



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)

ปริญญา

วิศวกรรมเคมี

วิศวกรรมเคมี

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง สมรรถนะการแตกตัวของพอลิพรอพิลีนในปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบด

Performance of Polypropylene Cracking in a Fluidized Bed Reactor

นามผู้วิจัย นางสาวภัทรวรรณ กล่อมคุ้ม

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์สุรินทร์ ลิ้มตระกูล, D.Sc.)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์เทอดไทย วัฒนธรรม, Ph.D.)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สัญญา สิริวิทยาปกรณ์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ผ่องแผ้ว พรรณวดี, D.Sc.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

สมรรถนะการแตกตัวของพอลิพรอพิลีนในปฏิกรณ์ฟลูอิดไชเบด

Performance of Polypropylene Cracking in a Fluidized Bed Reactor

โดย

นางสาวภัทรวรรณ กล่อมคุ้ม

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)

พ.ศ. 2552

ภัทรวรรณ กล่อมคุ้ม 2552: สมรรถนะการแตกตัวของพอลิพรอพิลีนในปฏิกรณ์ฟลูอิดไซ์เบด ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี) สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี ประสานกรรมการที่ปรึกษา: รองศาสตราจารย์สุนันท์ ลิ้มตระกูล, D.Sc.
119 หน้า

ในการแตกตัวพอลิพรอพิลีนด้วยความร้อนในบรรยากาศของไนโตรเจนเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำมันปิโตรเลียมในเครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไซ์เบด สภาพการเดินเครื่องที่เหมาะสมมีผลต่อสมรรถนะการทำงาน ผลการทดลองพบว่าสถานะที่มีผลต่อการแตกตัวของพอลิพรอพิลีน คือ อัตราการป้อนพลาสติก อุณหภูมิในปฏิกรณ์ และอัตราการไหลของไนโตรเจน การศึกษานี้มีการป้อนเม็ดพลาสติกพอลิพรอพิลีนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มม. โดยทำการป้อนและหยุดเป็นจังหวะอย่างต่อเนื่อง โดยในแต่ละรอบการป้อนมีปริมาณ 50 กรัม สภาพอุณหภูมิที่บริเวณทำปฏิกิริยาแตกตัวพอลิพรอพิลีนที่เหมาะสม เป็น 450°C ที่บริเวณเหนือบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาอุณหภูมิจะลดลงเป็น 267, 275 และ 282°C เมื่ออัตราการป้อนของไนโตรเจนเป็น 1, 1.3 และ 1.5 เท่าของอัตราเร็วฟลูอิดไซ์ต่ำสุดของเม็ดพลาสติกตามลำดับเพื่อมิให้เกิดการแตกตัวของไอไฮโดรคาร์บอน ส่วนบริเวณใกล้ทางออกปฏิกรณ์อุณหภูมิเพิ่มขึ้นเป็น 300, 450 และ 450°C ตามลำดับ เพื่อมิให้ไอไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลสูงเกิดการอุดตัน ผลปรากฏว่าเมื่อต้องการรักษาอุณหภูมิในปฏิกรณ์ให้เหมาะสมอัตราการป้อนพลาสติกเฉลี่ยควรเป็น 10.0, 16.7 และ 25.0 กรัมต่อนาที และได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวร้อยละ 40.37, 44.39 และ 47.99 เมื่ออัตราการป้อนของไนโตรเจนเป็น 1, 1.3 และ 1.5 เท่าของอัตราเร็วฟลูอิดไซ์ต่ำสุดของเม็ดพลาสติกตามลำดับ การเพิ่มความเร็วก๊าซทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวมากขึ้นเนื่องจากการขยายตัวเบดเพิ่มขึ้น และเวลาในการแตกโมเลกุลน้อยลง ดังนั้นจึงลดการแตกตัวที่มากเกินไป ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวมากขึ้น

Pattarawan Klomkom 2009: Performance of Polypropylene Cracking in a Fluidized Bed Reactor. Master of Engineering (Chemical Engineering), Major Field: Chemical Engineering, Department of Chemical Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Sunun Limtrakul, D.Sc. 119 pages.

Operating conditions are essential for thermal cracking of polypropylene in a fluidized bed reactor under nitrogen atmosphere to obtain liquid fuels. The results show that the polypropylene feed rate, temperature, and nitrogen flow rate in the reactor have the effects on thermal cracking. The polypropylene pellets of 5 mm in diameter, with 50 grams of pellets were fed in a pause cycle. Appropriate reactor temperature was 450°C in the main cracking zone of polypropylene pellet at the bottom of the reactor. The temperatures were decreased to 267, 275, 282°C above the main reaction zone and were increased to 300, 450, 450°C in the exit zone of the reactor for the systems operated with the nitrogen feed rates of 1, 1.3 and 1.5 times of the minimum fluidization velocity of plastic pellet, respectively. In order to maintain proper temperature, plastic can be fed with the flow rates of 10, 16.7, 25 g/min and the obtained liquid fuel yields were 40.37, 44.39, 47.99% for the systems operated with the nitrogen feed rates of 1, 1.3 and 1.5 times of the minimum fluidization velocity of plastic pellet, respectively. Increasing of gas velocity creates more fluidized bed expansion and reduces the cracking time. Thus the over cracking is reduced and gives more liquid yield..

Student's signature

Thesis Advisor's signature

____ / ____ / ____

กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิศวกรรมเคมีเรื่อง สมรรถนะการแตกตัวของพอลิพรอพิลีนในปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดไพโรไลซิสเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ การดำเนินงานของโครงการนี้สามารถดำเนินไปได้ด้วยดี ทางคณะผู้จัดทำใคร่ขอขอบคุณทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ในด้านต่าง ๆ ดังนี้

รศ.ดร.สุนันท์ ลิ้มตระกูล อาจารย์ผู้ให้คำปรึกษาและคำแนะนำต่าง ๆ เกี่ยวกับการดำเนินโครงการทั้งทางด้านทฤษฎี และทางด้านปฏิบัติ

รศ.ดร.เทอดไทย วัฒนธรรม และคณะกรรมการคุมสอบที่ได้สละเวลาอันมีค่ามานั่งฟังการรายงาน พร้อมด้วยคำติชมต่าง ๆ ล้วนแต่มีประโยชน์ทั้งสิ้น

นายปริญญา คงพรม นิสิตปริญญาเอก นายชัยนุรักษ์ พุ่มอิน นิสิตปริญญาโท ที่ให้คำแนะนำต่าง ๆ เกี่ยวกับการทำการทดลอง

ทางผู้จัดทำใคร่ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง ณ โอกาสนี้ด้วย

ภัทรวรรณ กล่อมคุ้ม

พฤษภาคม 2552

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(6)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(10)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	31
อุปกรณ์	31
วิธีการทดลอง	31
ผลการทดลอง	41
สรุปผลการทดลอง	70
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	72
ภาคผนวก	75
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	119

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	กลไกการแตกตัวของพอลิเมอร์และปริมาณมอนอเมอร์ที่ได้	12
2	ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวพลาสติกชนิดต่าง ๆ ด้วยความร้อน	13
3	องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการแตกตัวด้วยความร้อน Polypropylene (PP) ใน Fixed bed reactor ที่อุณหภูมิ 425 °ซ	16
4	ข้อมูลจุดเดือด จุดหลอมเหลว และสถานะที่อุณหภูมิ 25 °ซ	18
5	ร้อยละของผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการแตกตัว LDPE ด้วย ความร้อนใน ปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดที่อุณหภูมิ 500-700 °ซ (wt.%)	26
6	สภาวะการทดลอง	40
7	อุณหภูมิตามความสูงของปฏิกรณ์ในสภาวะเบดนิ่ง เมื่อทำการป้อนพอลิพรอพิลีน สลับการหยุดเป็นจังหวะ	52
8	การตั้งอุณหภูมิตามความสูงของปฏิกรณ์ในสภาวะฟลูอิดไชน์เบด (ความเร็วก๊าซ 1.3 เท่าของอัตราเร็วต่ำสุดของเม็ดพลาสติก) เมื่อทำการป้อนพอลิพรอพิลีนสลับการหยุดเป็นจังหวะ	59
ตารางผนวกที่		
1	อุณหภูมิ และอัตราการไหลเมื่อทำการป้อนพลาสติกแบบป้อนและหยุดเป็นจังหวะ ต่อเนื่อง 50 กรัมในสภาวะเบดนิ่ง ตั้งอุณหภูมิที่ 450 °ซ ตลอดความสูง	76
2	อุณหภูมิ และอัตราการไหลเมื่อทำการป้อนพลาสติกแบบป้อนและหยุดเป็นจังหวะ ต่อเนื่อง 50 กรัมในสภาวะเบดนิ่ง 2 ตั้งอุณหภูมิที่จุดเหนือแผ่นกระจายก๊าซ 10 ซม. เป็น 450 °ซ เหนือขึ้นไป เป็น 430 °ซ	81
3	อุณหภูมิ และอัตราการไหลเมื่อทำการป้อนพลาสติกแบบป้อนและหยุดเป็นจังหวะ ต่อเนื่อง 50 กรัมในสภาวะเบดนิ่งตั้งอุณหภูมิที่จุดเหนือแผ่นกระจายก๊าซ 10 ซม. เป็น 450 °ซ จุดที่เหนือ 50 ซม. ตั้งที่ 430 °ซ จุดเหนือ 100 ซม. และ 150 ซม. ตั้งไว้ที่ 400 °ซ	86

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
4 อุณหภูมิ และอัตราการไหลเมื่อทำการป้อนพลาสติกแบบป้อนและหยุดเป็น จังหวะต่อเนื่อง 50 กรัมในสภาวะเบดนิ่ง ตั้งอุณหภูมิที่จุดเหนือแผ่นกระจายก๊าซ 10 ซม. เป็น 450 °ซ จุดที่เหนือ 50 ซม. ตั้งที่ 430 °ซ จุดเหนือ 100 ซม. ซม. ตั้งที่ 150 °ซ จุดเหนือ 150 ซม. ตั้งไว้ที่ 300 °ซ	91
5 อุณหภูมิ และอัตราการไหลเมื่อทำการป้อนพลาสติกแบบป้อนและหยุดเป็น จังหวะต่อเนื่อง 50 กรัมในสภาวะฟลูอิดไคส์เบค เมื่อป้อนในโตรเจน 9.40 กิโลกรัม/ชั่วโมง (1.3 เท่าของอัตราเร็วฟลูอิดไคส์ต่ำสุดของเม็ดพลาสติก) ตั้ง อุณหภูมิที่ 450 °ซ ตลอดความสูง	96
6 อุณหภูมิ และอัตราการไหลเมื่อทำการป้อนพลาสติกแบบป้อนและหยุดเป็นจังหวะ ต่อเนื่อง 50 กรัมในสภาวะฟลูอิดไคส์เบค เมื่อป้อนในโตรเจน 9.40 กิโลกรัม/ชั่วโมง (1.3 เท่าของอัตราเร็วฟลูอิดไคส์ต่ำสุดของเม็ดพลาสติก)อุณหภูมิเหนือแผ่นกระจาย ก๊าซ 10 50 100 150 ซม. เป็น 450, 450 150 และ 450°ซ	99
7 อุณหภูมิ และอัตราการไหลเมื่อทำการป้อนพลาสติกแบบหยุดเป็นจังหวะต่อเนื่อง 50 กรัมในสภาวะฟลูอิดไคส์เบค เมื่อป้อนในโตรเจน 10.85 กิโลกรัม/ชั่วโมง (1.5 เท่าของอัตราเร็วต่ำสุดเพื่อเกิดฟลูอิดไคส์ของเม็ดพลาสติก) ตั้งอุณหภูมิที่ 450 °ซ ตลอดความสูง	102
8 อุณหภูมิ และอัตราการไหลเมื่อทำการป้อนพลาสติกแบบหยุดเป็นจังหวะต่อเนื่อง 50 กรัมในสภาวะฟลูอิดไคส์เบค เมื่อป้อนในโตรเจน 10.85 กิโลกรัม/ชั่วโมง (1.5 เท่าของอัตราเร็วต่ำสุดเพื่อเกิดฟลูอิดไคส์ของเม็ดพลาสติก)อุณหภูมิเหนือแผ่น กระจายก๊าซ 10 50 100 150 ซม. เป็น 450, 450 150 และ 450°ซ	104
9 Orifice flow meter calibration data before gas flow in condenser 1	106
10 Orifice flow meter calibration data before and after gas flow in condenser 2 and 3	106
11 Screw feeder calibration data	107
12 ผลิตภัณฑ์ที่ได้ในสภาวะเบดนิ่ง	109
13 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักผลิตภัณฑ์ที่ได้ในสภาวะเบดนิ่ง	109

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
14 ผลิตรัทพ์ที่ได้ในช่วงฟลูอิดไคซ์เบค ป้อนก๊าซไนโตรเจน 9.40 กิโลกรัม/ชั่วโมง (1.3 อัตราเร็วฟลูอิดไคซ์ต่ำสุดของเม็ดพลาสติก)	110
15 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักผลิตรัทพ์ที่ได้ในช่วงฟลูอิดไคซ์เบค ป้อนก๊าซไนโตรเจน 9.40 กิโลกรัม/ชั่วโมง (1.3 อัตราเร็วฟลูอิดไคซ์ต่ำสุดของเม็ดพลาสติก)	110
16 ผลิตรัทพ์ที่ได้ในช่วงฟลูอิดไคซ์เบค ป้อนก๊าซไนโตรเจน 10.85 กิโลกรัม/ชั่วโมง (1.5 อัตราเร็วฟลูอิดไคซ์ต่ำสุดของเม็ดพลาสติก)	111
17 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักผลิตรัทพ์ที่ได้ในช่วงฟลูอิดไคซ์เบค ป้อนก๊าซไนโตรเจน 10.85 กิโลกรัม/ชั่วโมง (1.5 อัตราเร็วต่ำฟลูอิดไคซ์สุดของเม็ดพลาสติก)	111
18 องค์ประกอบผลิตรัทพ์ที่ได้ในสภาวะเบคนึ่ง เมื่อตั้งอุณหภูมิที่ 450 °ซ ตลอดความสูง	112
19 องค์ประกอบผลิตรัทพ์ที่ได้ในสภาวะเบคนึ่ง ตั้งอุณหภูมิจุดเหนือแผ่นกระจายก๊าซ 10 ซม. เป็น 450 °ซ จุดที่เหนือขึ้นไปตั้งที่ 430 °ซ	112
20 องค์ประกอบผลิตรัทพ์ที่ได้ในสภาวะเบคนึ่ง ตั้งอุณหภูมิจุดเหนือแผ่นกระจายก๊าซ 10 ซม. เป็น 450 °ซ จุดที่เหนือ 50 ซม. ตั้งที่ 430 °ซ จุดเหนือ 100 ซม. และ 150 ซม. ตั้งไว้ที่ 400 °ซ	113
21 องค์ประกอบผลิตรัทพ์ที่ได้ในสภาวะเบคนึ่ง ตั้งอุณหภูมิจุดเหนือแผ่นกระจายก๊าซ 10 ซม. เป็น 450 °ซ จุดเหนือ 50 ซม. ตั้งไว้ที่ 430 °ซ จุดเหนือ 100 ซม. ตั้งที่ 150 °ซ จุดเหนือ 150 ซม. ตั้งไว้ที่ 300 °ซ	113
22 องค์ประกอบผลิตรัทพ์ที่ได้ในช่วงฟลูอิดไคซ์เบค (9.40 กิโลกรัม/ชั่วโมง) ตั้งอุณหภูมิที่ 450 °ซ ตลอดปฏิกรณ์	114
23 องค์ประกอบผลิตรัทพ์ที่ได้ในช่วงฟลูอิดไคซ์เบค (9.40 กิโลกรัม/ชั่วโมง) อุณหภูมิเหนือแผ่นกระจายก๊าซ 10 50 100 150 ซม. เป็น 450, 450 150 และ 450°ซ	114
24 องค์ประกอบผลิตรัทพ์ที่ได้ในช่วงฟลูอิดไคซ์เบค (10.85 กิโลกรัม/ชั่วโมง) ตั้งอุณหภูมิที่ 450 °ซ ตลอดปฏิกรณ์	115

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่

หน้า

- 25 องค์ประกอบผลิตภัณฑ์ที่ได้ในช่วงฟลูอิดไชเบค (10.85 กิโลกรัม/ชั่วโมง)
อุณหภูมิเหนือแผ่นกระจายก๊าซ 10 50 100 150 ซม. เป็น 450, 450 150
และ 450°ซ

115

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1	พรีพอลิเมอร์ โพลิเมอร์และพรีพอลิเมอร์
2	ไอโซแทกติก (isotactic), ซินดีโอแทกติก (syndiotactic) และ อะแทกติก (atactic)
3	ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวขยะพลาสติกด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ
4	ข้อมูลจากเครื่อง Gas chromatograms ที่ใช้วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการทำไพโรไลซิส พอลิพรีพอลิเมอร์
5	เปอร์เซ็นต์โดยมวลขององค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ซึ่งแบ่งตามจำนวนคาร์บอนอะตอม ที่เกิดจากการทำไพโรไลซิสพอลิพรีพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ
6	ช่วงของอุณหภูมิที่ใช้ในการกลั่นแยกลำดับส่วน เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ในแต่ละช่วงของจำนวนคาร์บอนอะตอม
7	เครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งเฉพาะงวดที่ใช้ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการแตกโมเลกุลของพลาสติกพอลิพรีพอลิเมอร์โดยใช้ความร้อนในที่อับอากาศ
8	สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการแตกโมเลกุลของพลาสติกพอลิพรีพอลิเมอร์ โดยใช้ความร้อนในที่อับอากาศ ในปฏิกรณ์แบบกึ่งเฉพาะงวด
9	ปฏิกรณ์ฟลูอิดไคส์เบดที่ใช้ในการแตกตัวพลาสติกด้วยความร้อน
10	การหายไปของน้ำหนักพลาสติกที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที
11	น้ำหนักที่หายไป การไหลของความร้อน และอัตราการหายไปของน้ำหนักของการแตก โมเลกุลพอลิพรีพอลิเมอร์ (อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสต่อนาที)
12	การแตกโมเลกุลด้วยความร้อนที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นของพอลิพรีพอลิเมอร์ที่ใช้แล้วที่อัตราการให้ความร้อนต่าง ๆ
13	ระบบไพโรไลซิส
14	องค์ประกอบออริฟิค
15	เครื่องกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม (Distillation Unit)
16	การหายไปของน้ำหนักพอลิพรีพอลิเมอร์ที่เกิดการแตกโมเลกุลโดยเครื่อง simultaneous DSC-TGA เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
17	ความสัมพันธ์อุณหภูมิกับความสูงเมื่อควบคุมอุณหภูมิ (ก) ณ จุดเริ่มต้น (ข) เพิ่มจุดควบคุม อุณหภูมิและเตาให้ความร้อน	43
18	อุณหภูมิที่ใช้ในการแตกตัวของพอลิพรอพิลีนในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ	44
19	อุณหภูมิที่เปลี่ยนไปเมื่อใส่พอลิพรอพิลีน (ก) 50, (ข) 100, (ค) 200 และ (ง) 500 กรัมตามลำดับ	45
20	อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกับเวลาเมื่อใช้อัตราการไหลไนโตรเจน (ก) 0.26 กิโลกรัม/ชั่วโมง (ข) 0.34 กิโลกรัม/ชั่วโมง (ค) 3.64 กิโลกรัม/ชั่วโมง ป้อนพลาสติก 100 กรัม	47
21	อุณหภูมิที่เปลี่ยนไปกับเวลาเมื่อใช้อัตราการไหลของไนโตรเจน (ก) 7.26 กิโลกรัม/ชั่วโมง (ข) 11.66 กิโลกรัม/ชั่วโมง ป้อนพลาสติก 500 กรัม	49
22	อุณหภูมิกับเวลาต่อการแตกตัวของพลาสติกเมื่อทำการป้อนพลาสติกเป็นจังหวะแบบต่อเนื่อง (ก) 200 กรัม (ข) 100 กรัม (ค) 50 กรัม ความเร็วก๊าซเป็น 7.23 กิโลกรัม/ชั่วโมง (1 Umf) อุณหภูมิตลอดปฏิกิริยาเป็น 500°ซ	51
23	อุณหภูมิกับเวลาต่อการแตกตัวของพลาสติกเมื่อทำการควบคุมอุณหภูมิที่จุดแตกต่างกันซึ่งได้ทำการควบคุมอุณหภูมิไว้ดังนี้ (ก) อุณหภูมิเป็น 450°ซ ตลอดความสูง (ข) อุณหภูมิเหนือแผ่นกระจายก๊าซ 10 50 100 150 เป็น 450 430 430 430°ซ (ค) อุณหภูมิเหนือกระจายก๊าซ 10 50 100 150 เป็น 450 430 400 400°ซ (ง) อุณหภูมิเหนือกระจายก๊าซ 10 50 100 150 เป็น 450 430 150 300°ซ ป้อนพลาสติก 50 กรัม/รอบ ความเร็วก๊าซ 7.24 กิโลกรัม/ชั่วโมง (1 Umf)	54
24	ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ ตามความสูงของปฏิกรณ์พร้อมอุณหภูมิที่ตั้งไว้ในสภาวะเบดนิ่ง เมื่อทำการควบคุมอุณหภูมิไว้ 4 เจือไนซ์ป้อนพลาสติก 50 กรัม/รอบ ความเร็วก๊าซ 7.24 กิโลกรัม/ชั่วโมง (1 Umf)	55
25	ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวของพลาสติกเมื่อทำการควบคุมอุณหภูมิแตกต่างกันในสภาวะเบดนิ่ง (1 Umf) เมื่อป้อนพลาสติก 10 กรัม/นาที	56

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
26	ร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากพลาสติกป้อนเมื่อทำการควบคุมอุณหภูมิแตกต่างกัน ในสภาวะเบคนิ่งในสภาวะเบคนิ่ง (1 Umf) เมื่อป้อนพลาสติก 10 กรัม/นาที่	57
27	องค์ประกอบผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากหน่วยควบคุม ในสภาวะเบคนิ่ง (1 Umf) เมื่อป้อนพลาสติก 10 กรัม/นาที่	58
28	ร้อยละองค์ประกอบผลิตภัณฑ์ที่ได้จากหน่วยควบคุม ในสภาวะเบคนิ่ง (1 Umf) เมื่อป้อนพลาสติก 10 กรัม/นาที่	58
29	การแตกตัวของพลาสติก ณ เวลาต่างๆ เมื่อควบคุมอุณหภูมิต่างกันโดยป้อนไนโตรเจน 9.40 กิโลกรัม/ชั่วโมง ซึ่งได้ทำการควบคุมอุณหภูมิไว้ดังนี้ (ก) อุณหภูมิตลอดความสูงเป็น 450°ซ (ข) อุณหภูมิที่ 10, 50, 100 และ 150 ซม. เป็น 450, 450, 150 และ 450°ซ ตามลำดับ ป้อนพลาสติก 50 กรัม/รอบ ในอัตรา 9.40 กิโลกรัม/นาที่ (1.3 Umf)	60
30	ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ ตามความสูงของปฏิกรณ์ฟลูอิดไซ์พร้อมอุณหภูมิที่ตั้งไว้เมื่อป้อนไนโตรเจน 9.40 กิโลกรัม/ชั่วโมง (1.3 Umf) และป้อนพลาสติก 50 กรัมต่อรอบสลับการหยุดเป็นจังหวะต่อเนื่องกัน จำนวน 40 รอบ เมื่อทำการควบคุมอุณหภูมิไว้ 2 เงื่อนไข ตามตารางที่ 8	61
31	ผลิตภัณฑ์ก๊าซและของเหลวที่ได้จากหน่วยควบคุม จากปฏิกรณ์ฟลูอิดไซ์เบค (ความเร็วก๊าซเป็น 1.3 เท่าของอัตราเร็วต่ำสุดเพื่อเกิดฟลูอิดไซ์ของเม็ดพลาสติก) อัตราการป้อนพลาสติก 16.7 กรัม/นาที่	62
32	ร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากพลาสติกป้อนเมื่อทำการควบคุมอุณหภูมิแตกต่างกัน ในช่วงฟลูอิดไซ์เบค (ความเร็วก๊าซเป็น 1.3 เท่าของอัตราเร็วต่ำสุดเพื่อเกิดฟลูอิดไซ์ของเม็ดพลาสติก)	63
33	องค์ประกอบผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากหน่วยควบคุม ในสภาวะฟลูอิดไซ์เบค (ความเร็วก๊าซเป็น 1.3 เท่าของอัตราเร็วต่ำสุดเพื่อเกิดฟลูอิดไซ์ของเม็ดพลาสติก) ซึ่งปริมาณรวมของของเหลวในการทดลองที่ 1 น้อยกว่าในการทดลองที่ 2	64

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
34 ร้อยละองค์ประกอบผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากหน่วยควบแน่น ในสภาวะฟลูอิดไคซ์เบด (ความเร็วก๊าซเป็น 1.3 เท่าของอัตราเร็วต่ำสุดเพื่อเกิดฟลูอิดไคซ์ของเม็ดพลาสติก)	65
35 อุณหภูมิที่เวลาการแตกตัวต่างๆของพลาสติก โดยป้อนไนโตรเจน 10.85 กิโลกรัม/ชั่วโมง (ก) อุณหภูมิตามความสูง เป็น 450°ซ (ข) อุณหภูมิเหนือแผ่นกระจายก๊าซ 10 50 100 150 ซม. เป็น 450, 450 150 และ 450°ซ	66
36 ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ ตามความสูงของปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์พร้อมอุณหภูมิที่ตั้งไว้เมื่อป้อนไนโตรเจน 10.85 กิโลกรัม/ชั่วโมง และป้อนพลาสติกสลับการหยุดเป็นจังหวะต่อเนื่องกัน 40 รอบโดยทำการควบคุมอุณหภูมิไว้ 2 เจือไนตามตารางที่ 8	67
37 ผลิตภัณฑ์ก๊าซและของเหลวที่ได้จากหน่วยควบแน่น ในสภาวะฟลูอิดไคซ์เบด (ความเร็วก๊าซเป็น 1.5 เท่าของอัตราเร็วต่ำสุดเพื่อเกิดฟลูอิดไคซ์ของเม็ดพลาสติก) อัตราการป้อนพลาสติก 25กรัม/นาที่	68
38 ร้อยละผลิตภัณฑ์ก๊าซและของเหลวที่ได้จากหน่วยควบแน่น ในสภาวะฟลูอิดไคซ์เบด (ความเร็วก๊าซเป็น 1.5 เท่าของอัตราเร็วต่ำสุดเพื่อเกิดฟลูอิดไคซ์ของเม็ดพลาสติก)	68
39 องค์ประกอบผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากหน่วยควบแน่น ในสภาวะฟลูอิดไคซ์เบด (1.5 เท่าอัตราเร็วต่ำสุดเพื่อเกิดฟลูอิดไคซ์ของพลาสติก)	69
40 ร้อยละองค์ประกอบผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากหน่วยควบแน่น ในสภาวะฟลูอิดไคซ์เบด (1.5 เท่าอัตราเร็วต่ำสุดเพื่อเกิดฟลูอิดไคซ์ของพลาสติก)	69
ภาพผนวกที่	
1 แผนภาพเครื่องมือที่ใช้แตกโมเลกุลพอลิพรอพิลีน	116
2 รูปเครื่องมือที่ใช้แตกโมเลกุลพอลิพรอพิลีน	117
3 เม็ดทรายขนาด 150 — 300 ไมครอน	118
4 เม็ดพลาสติกที่ใช้ในการแตกโมเลกุลให้กลายเป็นน้ำมันปิโตรเลียม	118
5 ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแตกโมเลกุลของพอลิพรอพิลีน	118

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

C_d = discharge coefficient

c_p = ความจุความร้อนจำเพาะของสาร (kJ/kgK)

D_i = พื้นที่หน้าตัดของท่อก่อนเข้าอริฟิค (m^2)

D_o = พื้นที่หน้าตัดของรูเล็ก (m^2)

D_p = เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของอนุภาคของแข็ง (Particle size)

Φ_s = ภาวะทรงกลม (Sphericity)

ρ_p = ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง (Density of particle)

ρ = ความหนาแน่นของของไหล (Density of fluid)

ε_M = เศษส่วนช่องว่างที่ต่ำที่สุดสำหรับการเกิดฟลูอิดไลเซชัน (Minimum porosity for Fluidization) โดยทั่วไปสำหรับอนุภาคทรงกลมจะมีค่าประมาณ 0.40 - 0.45

q = อัตราการไหลที่เหมาะสมของก๊าซ (m^3/s)

P_1 = ความดันขาเข้า (N/m^2)

P_2 = ความดันขาออก (N/m^2)

Q = ปริมาณความร้อน (J)

$\dot{m}$ = อัตราการไหลของไนโตรเจนในปฏิกรณ์ (kg/s)

ΔT = อุณหภูมิที่แตกต่างของไนโตรเจนที่เข้าและออกจากปฏิกรณ์ ($^{\circ}C$)

สมรรถนะการแตกตัวของพอลิพรอพิลีนในปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบด

Performance of Polypropylene Cracking in a Fluidized Bed Reactor

คำนำ

ในปัจจุบันนี้ทั่วโลกมีผลิตภัณฑ์ที่ผลิตมาจากพลาสติกเป็นจำนวนมากทั้งในครัวเรือนและในอุตสาหกรรม จึงเกิดปัญหาขยะจากพลาสติก และพลาสติกที่เหลือใช้ออกสู่สิ่งแวดล้อมเป็นจำนวนมาก และเนื่องจากพลาสติกเหล่านี้ย่อยสลายได้ยากจึงมีปัญหาในการกำจัด โดยการกำจัดพลาสติกที่เหลือใช้เหล่านี้มีหลายวิธี เช่น การนำกลับไปใช้ใหม่ให้เป็นพลาสติกคุณภาพต่ำนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงพลังงาน ส่วนที่เหลืออาจนำไปเผาหรือฝังกลบ ซึ่งการนำไปเผาหรือฝังกลบจะเกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ ดังนั้นในปัจจุบันเพื่อเป็นการลดปัญหาสิ่งแวดล้อมจึงเน้นการนำเศษพลาสติกเหล่านี้มาใช้ประโยชน์โดยมีการนำกลับมาใช้ใหม่

การนำพลาสติกกลับมาใช้ใหม่ในปัจจุบันนิยม จะใช้วิธีการเปลี่ยนพลาสติกให้เป็นน้ำมันปิโตรเลียม ซึ่งวิธีที่ได้รับความนิยมและได้มีการค้นคว้าทดลองอย่างแพร่หลาย เพราะเป็นการลดขยะจากพลาสติกและยังช่วยเพิ่มคุณค่าของผลิตภัณฑ์ และยังก่อให้เกิดคุณค่าทางเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อมอีกด้วย กระบวนการใช้เศษพลาสติกให้เปลี่ยนเป็นน้ำมันปิโตรเลียม ใช้วิธีการทำให้พลาสติกแตกตัวจากไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลใหญ่ กลายเป็นไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลเล็กลง การทำให้พลาสติกแตกตัวนี้จะใช้กระบวนการ การแตกตัวด้วยความร้อนในที่อับอากาศ (pyrolysis)

กระบวนการแตกตัวพลาสติกโดยการแตกตัวด้วยความร้อน (pyrolysis) เป็นกระบวนการหนึ่งที่ใช้ความร้อนเปลี่ยนเศษพลาสติกให้กลายเป็นองค์ประกอบของน้ำมันปิโตรเลียม โดยการใช้ความร้อนที่อุณหภูมิสูง ($> 700^{\circ}\text{C}$) ในที่อับอากาศทำให้พลาสติกแตกตัวจากไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลใหญ่กลายเป็นองค์ประกอบย่อยชนิดต่างๆ ซึ่งองค์ประกอบย่อยต่างๆเหล่านี้สามารถนำมาทำเป็นเชื้อเพลิงแทนน้ำมัน หรือใช้เป็นสารป้อนในการผลิตพลาสติกคุณภาพสูงได้ องค์ประกอบที่ได้จากการแตกตัวด้วยความร้อนสามารถเปลี่ยนแปลงเป็น ก๊าซ ($C_1 - C_4$) ของเหลว ($C_5 - C_{17}$) และกากของแข็ง (C_{18} ขึ้นไป) ปฏิกิริยาการแตกตัวพลาสติกเป็นปฏิกิริยาที่ใช้อุณหภูมิสูงและเกิดขึ้นเร็ว (Mohammad and Abul, 2003) และถ้าใช้เวลาในการแตกตัวของพลาสติกนานหรือสั้น

เกินไป จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการ ดังนั้นในการเลือกช่วงของผลิตภัณฑ์ให้ได้ตามที่เราต้องการอุณหภูมิและเวลาจึงเป็นตัวแปรที่สำคัญในการออกแบบปฏิกิริยา

ในงานวิจัยส่วนใหญ่ ระบบที่ใช้ในการแตกตัวของพลาสติกมักเป็นระบบขนาดเล็กที่เป็นชนิดถังกวน หรือแบบแพคเบด (packed bed) (Williams and Slaney, 2007) อย่างไรก็ตามภาพปฏิกิริยาขนาดใหญ่เช่นฟลูอิดไคซ์เบด เพื่อเพิ่มปริมาณการผลิตและสามารถควบคุมอุณหภูมิและเวลาในการเกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้น เงื่อนไขการเดินเครื่องต่างจากเครื่องเล็กในเงื่อนไขของอุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยา

ปฏิกิริยาชนิดฟลูอิดไคซ์เบดเป็นปฏิกิริยาที่เหมาะสมสำหรับการทำให้พลาสติกแตกตัวด้วยความร้อน และมีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนได้ดี สามารถควบคุมเวลาในการทำปฏิกิริยาได้ (Kaminsky *et al*, 2003) แต่ในทางปฏิบัติแล้วปฏิกิริยาชนิดนี้มีการสัมผัสกันอย่างซับซ้อนระหว่างแก๊สและอนุภาคในเชิงการถ่ายเทความร้อนและมวล ดังนั้นสถานะการเดินเครื่องจะมีอิทธิพลต่อสมรรถนะของปฏิกิริยาโดยตรง

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการหาสภาวะการให้ความร้อนเพื่อให้ได้อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการแตกตัวของพลาสติก และหาสภาวะที่เหมาะสมในการทำงานของเครื่องปฏิกิริยาชนิดฟลูอิดไคซ์เบด เพราะปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อสมรรถนะการทำงานของระบบ และผลิตภัณฑ์ที่ออกมา

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาการแตกตัวของโมเลกุลโดยใช้ความร้อนของพอลิพรอพิลีน เพื่อให้ได้น้ำมันเชื้อเพลิง
2. ศึกษาสมรรถนะการเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวของพอลิพรอพิลีน ในปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไชน์เบด
3. ศึกษาการให้ความร้อนและอุณหภูมิภายในปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไชน์เบดที่มีผลต่อสมรรถนะของปฏิกรณ์

ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาการแตกตัวของพอลิพรอพิลีนด้วยความร้อน
2. ศึกษาการแตกตัวของพลาสติกในปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไชน์เบดพร้อมทั้งเปรียบเทียบกับกรณีเดินเครื่องแบบเบดนิ่ง
3. ศึกษาการแตกตัวของพลาสติกโดยมีการให้ความร้อนควบคู่ไปกับสถานะของปฏิกิริยา
4. การแตกตัวของพลาสติกเน้นให้ได้ผลิตภัณฑ์หลักคือน้ำมันเชื้อเพลิง
5. การให้ความร้อนโดยใช้เตาไฟฟ้า

ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ผลที่ได้นำไปใช้ในการปรับปรุงการเดินเครื่องให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการเพิ่มขึ้น
2. เป็นแนวทางในการศึกษาพลาสติกชนิดอื่นต่อไป
3. ได้ข้อมูลในการออกแบบระบบเผาไหม้เชื้อเพลิงเพื่อให้ได้ความร้อนป้อนเข้ากับระบบ
4. ข้อมูลสามารถนำไปออกแบบและเดินเครื่องเพื่อการขยายขนาดในอนาคต

การตรวจเอกสาร

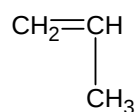
จากการศึกษาที่ผ่านมาปฏิกรณ์ฟลูอิดไคส์เบคที่ใช้กันแพร่หลายในอุตสาหกรรมชนิดต่างๆ เช่นใช้เป็นปฏิกรณ์เคมี ปฏิกรณ์แยก ปฏิกรณ์ผสม หรือปฏิกรณ์อบแห้ง เป็นต้น ปฏิกรณ์ฟลูอิดไคส์เบค เป็นปฏิกรณ์ที่มีความเหมาะสมและมีข้อได้เปรียบสำหรับการแตกตัวพลาสติก เนื่องจากมีข้อดีที่ใช้งานได้ดีกับระบบที่ต้องการให้มีการถ่ายเทความร้อนและถ่ายเทมวลดี เกิดการสัมผัสดีระหว่างก๊าซกับของแข็ง ระยะเวลาในการสัมผัสสั้น ปฏิกรณ์ฟลูอิดไคส์เบคจึงมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย

กระบวนการแตกตัวของขยะพลาสติกไปเป็นน้ำมันปิโตรเลียม เป็นกระบวนการที่ได้รับความสนใจ โดยมีการศึกษาและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง (Huang, 1998) พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวมี แก๊ส ของเหลวและของแข็ง โดยคุณภาพของผลิตภัณฑ์ขึ้นอยู่กับชนิดของพลาสติก อุณหภูมิ ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา ชนิดของเครื่องปฏิกรณ์และเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

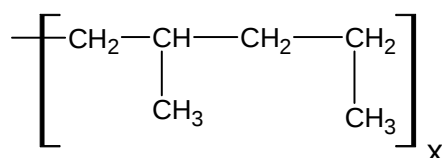
1. พอลิพรอพิลีน (Polypropylene,PP)

พอลิพรอพิลีน จัดเป็นพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติก (Thermo plastic) โดยพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติก คือ พลาสติกที่สามารถนำกลับมาขึ้นรูปใหม่ได้ด้วยความร้อน (The Dow Chemical Company, 1995)

Propylene Monomer



Polypropylene Polymer

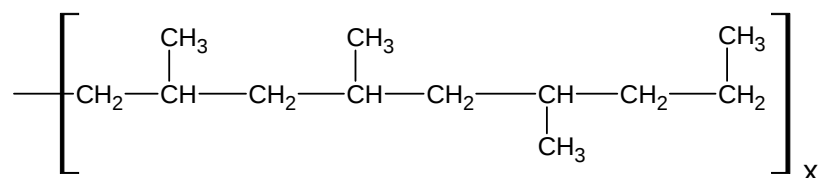


ภาพที่ 1 พรอพิลีนโมโนเมอร์และพอลิพรอพิลีนพอลิเมอร์

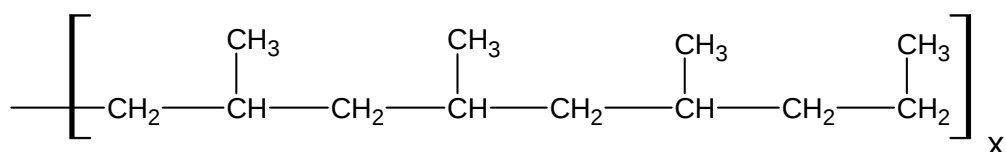
ที่มา: The Dow Chemical Company (1995)

โดยในปี ค.ศ.1954 มีการผลิตพอลิพรอพิลีนขึ้นเป็นครั้งแรกโดยบริษัทนาททา (Natta) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาซีเกลอร์-นาททา ที่ประกอบด้วยไทเทเนียมไตรคลอไรด์ (TiCl_3) กับอลูมิเนียมไดเอทิลคลอไรด์ ($\text{Al}(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{Cl}$) จากนั้นทำการพอลิเมอไรซ์พอรอพิลีนที่อุณหภูมิ 70-80 °C และความดัน 100 บรรยากาศได้พอลิพรอพิลีนดังแสดงในภาพที่ 1 ซึ่งประกอบด้วยโครงสร้าง (Richardson and Lokensgard, 1997) ที่เป็นไอโซแทกติก (Isotactic), ซินดิโอแทกติก (Syndiotactic) และอะแทกติก (Atactic) ดังแสดงในภาพที่ 2

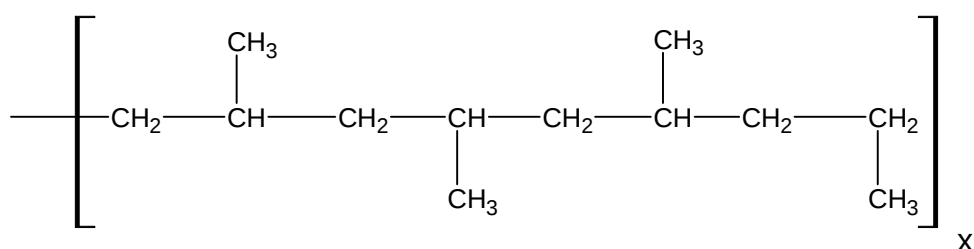
Atactic Polypropylene



Isotactic Polypropylene



Syndiotactic Polypropylene



ภาพที่ 2 ไอโซแทกติก (isotactic), ซินดิโอแทกติก (syndiotactic) และ อะแทกติก (atactic)

ที่มา: The Dow Chemical Company (1995)

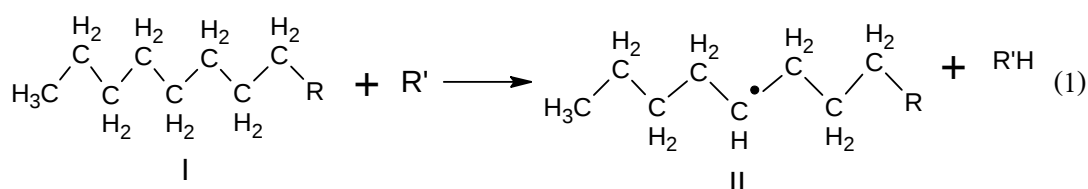
ข้อดีของพอลิพรอพิลีนคือ เป็นพลาสติกประเภทที่เบา จุดหลอมเหลวสูง มีความเหนียว สามารถทนต่อแรงกระแทกได้ดี ซึ่งพอลิพรอพิลีนส่วนใหญ่ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ โทรทัศน์ ภาชนะเครื่องครัว ถุงพลาสติก เป็นต้น ส่วนข้อเสียคือ สามารถติดไฟได้ง่าย เกิดพันธะยาก และสลายตัวด้วยรังสียูวีได้

2. ปฏิกิริยาการแตกโมเลกุล

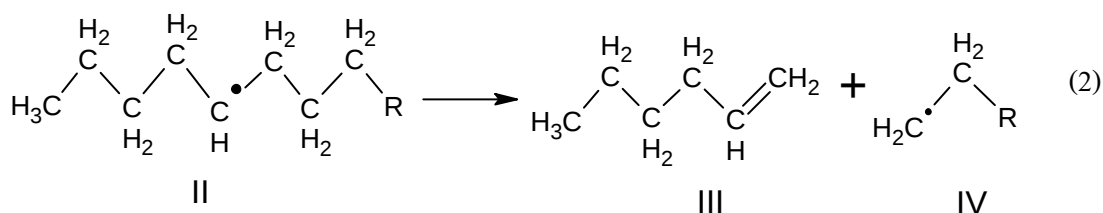
การแตกโมเลกุล (Degradation หรือ Cracking) คือกระบวนการที่สารประกอบไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลใหญ่แตกตัวเป็นโมเลกุลเล็ก ๆ หลายโมเลกุลโดยใช้ความร้อนหรือตัวเร่งปฏิกิริยา กลไกการเกิดการแตกสลายของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน แบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบใหญ่ ๆ คือ (Venuto, 1979)

2.1 กลไกการแตกโมเลกุลที่เกิดอนุมูลโดยใช้ความร้อน

การเกิดการแตกสลายแบบนี้ เกิดผ่านกลไกแบบลูกโซ่ของอนุมูลอิสระ (Free radical chain mechanism) หรือกลไกของ Rice-Kossiakoff ซึ่งกลไกแบบนี้อาจเกิดร่วมกับ การแตกโมเลกุลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ในกรณีที่ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูงสำหรับกลไกในการแตกโมเลกุลใช้ความร้อนของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลใหญ่นั้น จะเริ่มด้วยขั้นเริ่มต้น (Initiation) หรือการกระตุ้น (Activation) ของสารตั้งต้น ดังแสดงในสมการที่ (1) พาราฟิน (I) จะถูกกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาโดยเกิดการดึงไฮโดรเจนออก ทำให้เกิดเป็นอนุมูลอิสระ (II) โดย $R\cdot$ ในสมการ อาจเป็นอะตอมไฮโดรเจน อนุมูลเมทิล และอื่นๆที่ถูกกระตุ้นให้เกิดการแตกพันธะแบบสมมาตรโดยใช้ความร้อน



หลังจากนั้น อนุมูล (II) สามารถเกิดเป็น β -scission แล้วกลายเป็น โอลีฟิน (III) และอนุมูลที่มีมวลโมเลกุลลดลง (IV) ดังสมการที่ (2) และถ้ามีการแข่งขันของผลิตภัณฑ์ที่จะเกิดขึ้น ผลิตภัณฑ์ที่มีความเสถียรกว่าจะถูกสร้างขึ้น นอกจากนี้ อนุมูล (II) และ อนุมูล (IV) อาจเกิดการแข่งขันกันดึงไฮโดรเจน ซึ่งจะเป็นการสิ้นสุดของอนุมูลในปฏิกิริยา



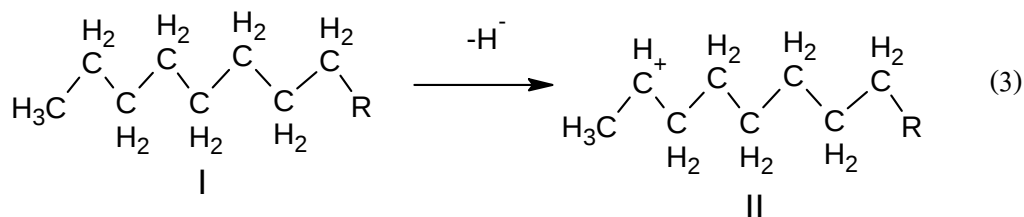
หลังจากปฏิกิริยาการแตกสลายโดยใช้ความร้อนสิ้นสุดลง อนุโมลทั้งหมดจะกลายเป็นผลิตภัณฑ์ ซึ่งผลิตภัณฑ์หลักจะเป็น C_1 , C_2 และแอลฟาโอเลฟิน นอกจากนี้ยังพบว่า ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกสลายโดยใช้ความร้อน ส่วนใหญ่จะไม่เกิดผ่านการจัดเรียงตัวใหม่ของสารตั้งต้น หรือ อนุโมลชั้นกลาง

2.2 การแตกโมเลกุลชนิดที่เกิดอนุโมลบนผิวของแข็ง

จากการศึกษาพบว่า อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มขึ้น เมื่อทำปฏิกิริยาบนซิลิกาเจล ซึ่งจัดเป็นของแข็งที่ไม่ว่องไว หรือบนถ่านกัมมันต์ ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ไม่มีความเป็นกรด รวมทั้งปฏิกิริยาที่เกิดเมื่อมีซีโอไลต์ที่ถูกแลกเปลี่ยนไอออนกับโลหะอัลคาไล ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจะมีความแตกต่างจากการแตกย่อยโดยใช้ความร้อนเพียงเล็กน้อย แต่อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากผิวของวัสดุมีส่วนช่วยในการสร้างอนุโมลอิสระ เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาต่อไป อย่างไรก็ตามกลไกการเกิดปฏิกิริยาแบบนี้ จะเกิดผ่านอนุโมลเช่นเดียวกับการแตกย่อยโดยใช้ความร้อน

2.3 กลไกชนิดที่เกิดคาร์โบเนียมไอออนโดยการเร่งปฏิกิริยาด้วยกรด

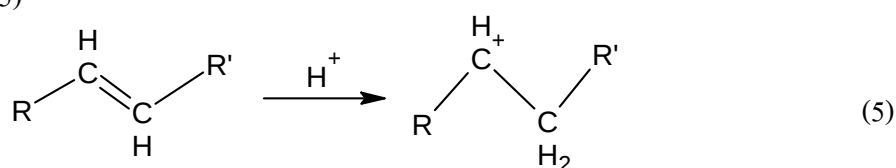
การทำปฏิกิริยาการแตกสลายบนวัสดุที่มีความเป็นกรดชนิดต่าง ๆ เช่น ซิลิกา-อะลูมินา และซีโอไลต์ อัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเพิ่มสูงมากอย่างเห็นได้ชัด และผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความแตกต่างจากการแตกสลายโดยใช้ความร้อนอย่างชัดเจน การแตกสลายโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา จะเกิดผ่านสารชั้นกลางที่เป็นคาร์โบเนียมไอออน และจะมีการแตกพันธะอย่างมีความจำเพาะมากกว่าที่จะเกิดแบบสุ่มเหมือนการแตกสลายโดยใช้ความร้อนสำหรับกลไกในการเกิดการแตกสลายโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา นอกจากจะเกิด β -scission เช่นเดียวกับการแตกสลายโดยใช้ความร้อนแล้วยังมีปฏิกิริยาแบบอื่นเกิดขึ้นด้วย เช่น ไอโซเมอไรเซชันของพาราฟินและโอเลฟิน แทรนส์แอลคิลชัน (Transalkylation) การส่งผ่านไฮโดรเจน (Hydrogen transfer) รวมทั้งปฏิกิริยาที่ก่อให้เกิดการรวมตัวของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ โพลิเมอไรเซชันการควบแน่นและการเกิดโค้กขึ้นตอนแรกในการเกิด การแตกสลายโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา คือ การทำให้เกิดคาร์โบเนียมไอออน (II) จากสารตั้งต้น (I) โดยปฏิกิริยาที่แรงกว่าการดึงไฮโดรเจนออก ดังสมการ (3)



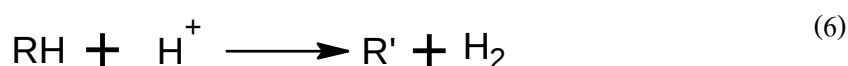
สำหรับในปฏิกิริยาที่มีซีโอไลต์ในภาพกรด หรือวัสดุอะมิโนซิลิกเกต เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสมการที่ (3) อาจเขียนได้ดังสมการ (4) โดยที่ A^+ ในสมการแทนตำแหน่งที่เป็นกรดลิวอิส (Lewis acid) บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยากลุ่มนี้



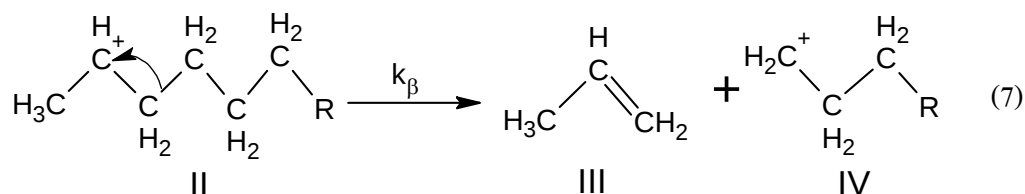
นอกจากการเกิดคาร์โบเนียมไอออนจะเกิดได้จากตำแหน่งที่เป็นกรดลิวอิสแล้ว ยังสามารถเกิดได้จากตำแหน่งที่เป็นกรดเบรินสเตท (Bronsted) บนพื้นผิวของซีโอไลต์ และวัสดุอะมิโนซิลิกเกตในรูปกรดอีกด้วย โดยโปรตอนจากตำแหน่งที่เป็นกรดเบรินสเตท จะโปรตอนเดไปที่พันธะคู่ของสารตั้งต้นถึงแม้ในกรณีที่สารตั้งต้น ไม่มีพันธะคู่อยู่ในโมเลกุล การเกิดคาร์โบเนียมไอออนแบบนี้ก็ยังสามารถเกิดขึ้นได้ ดังที่รายงานไว้โดย Ishihara และคณะ ซึ่งศึกษาปฏิกิริยาการแตกสลายของพอลิพรอพิลีน ว่าสารที่มีพันธะคู่ที่เป็นต้นกำเนิดของคาร์โบเนียมไอออนในปฏิกิริยาที่ศึกษา คือโอเลฟินขนาดเล็กที่เป็นสารปนเปื้อนอยู่ในสารตั้งต้น ซึ่งเกิดจากการออกซิเดชันของพอลิเมอร์เมื่อสัมผัสกับอากาศและความร้อน การเกิดคาร์โบเนียมโดยตำแหน่งที่เป็นกรดเบรินสเตทแสดงดังสมการที่ (5)



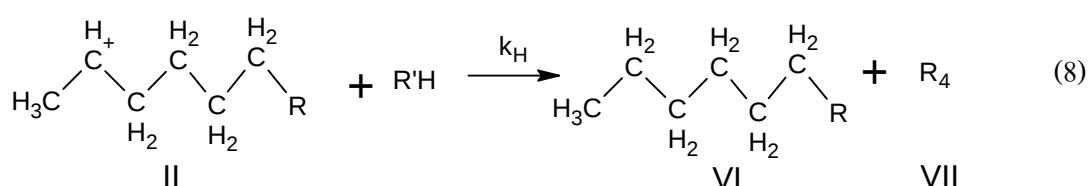
นอกจากนี้ มีการตั้งสมมติฐานว่าคาร์โบเนียมไอออนอาจเกิดได้จากการดึงไฮโดรด์ไอออนออกจากสารตั้งต้นโดยการทำปฏิกิริยากับโปรตอนจากตำแหน่งที่เป็นกรดเบรินสเตท พื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา ดังแสดงในสมการที่ (6)



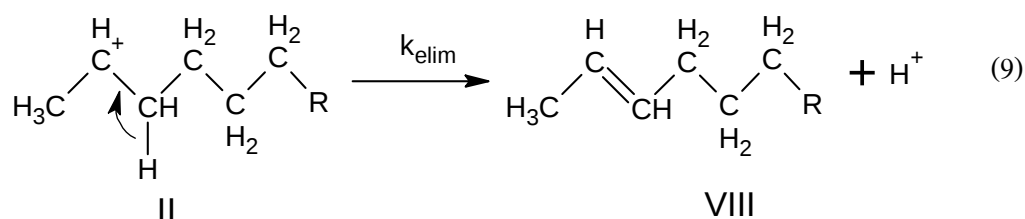
จากสมการที่ (3) คาร์โบเนียมไอออน (II) ที่เกิดขึ้น สามารถเกิดปฏิกิริยาต่อไปได้หลายเส้นทาง ได้แก่ เกิด β -scission ดังแสดงในสมการที่ (7) ซึ่งทำให้ได้โอเลฟิน (III) และไอออนบวกที่มีขนาดเล็กลง (IV)



ปฏิกิริยาที่อาจเกิดได้อีกปฏิกิริยาหนึ่ง คือ การส่งผ่านไฮโดรเจนซึ่งทำให้ไฮโดรด์ไอออนถูกดึงออกจากโมเลกุลที่เป็นกลางทางประจุ ทำให้เกิดคาร์โบเนียมไอออน (IV) และโมเลกุลที่เป็นกลางทางประจุ (VII) ดังสมการที่ (8)



สมการนี้ที่ (8) อาจเรียกได้ว่า เป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ (Propagation) โดยการส่งผ่านระหว่างสายของสารตั้งต้น ในขณะที่สมการที่ (9) จัดว่าเป็นปฏิกิริยาสิ้นสุด (Termination reaction)



ปฏิกิริยาขั้นนี้ คือการที่คาร์โบเนียมไอออนที่อยู่บริเวณพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาถูกปล่อยออกมา และได้ตำแหน่งที่เป็นกรดเบรินสเตทกลับมาอีกครั้ง ซึ่งก็คือ ปฏิกิริยาย้อนกลับของขั้นที่ทำให้เกิดคาร์โบเนียมไอออนตามสมการที่ (5) นั่นเองหลังจากสิ้นสุดปฏิกิริยาขั้นนี้ ปฏิกิริยาการแตกสลายจะเกิดอย่างสมบูรณ์และสิ้นสุดปฏิกิริยา

3. การแตกตัวพลาสติกเป็นน้ำมันปิโตรเลียมด้วยกระบวนการแตกตัวด้วยความร้อน

กระบวนการแตกตัวด้วยความร้อน (Pyrolysis) เป็นการทำให้เศษพลาสติกซึ่งเป็นไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลใหญ่แตกตัวเล็กลงด้วยความร้อนสูงในที่อับอากาศจนกลายเป็นน้ำมันปิโตรเลียม โดยพอลิเมอร์แต่ละชนิดมีกลไกการแตกตัวที่แตกต่างกัน ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท (Buckens and Huang, 1998) คือ

3.1 การตัดโซ่ส่วนปลาย (End-Chian Scission) หรือกระบวนการ Depolymerization โพลิเมอร์เกิดการแตกตัวที่ปลาย คือ โมโนเมอร์จะหลุดออกจากโซ่โพลิเมอร์ โดยเริ่มหลุดจากตอนปลายของโซ่ออกมาทีละตัว ดังนั้นผลิตภัณฑ์ที่ได้ส่วนใหญ่จะเป็นโมโนเมอร์

3.2 การตัดโซ่แบบสุ่ม (Random-Chian Scission) โซ่โพลิเมอร์ขาดออกอย่างไม่เป็นระเบียบ ซึ่งมักจะเกิดที่โซ่ที่เป็นจุดอ่อน ทำให้แตกตัวได้โซ่ที่มีความยาวแตกต่างกัน

3.3 การต่อสายโซ่ (Chain-Linking) การกำจัดกลุ่มด้านข้างของโซ่โพลิเมอร์

3.4 การต่อแบบเชื่อมโยง (Cross-Linking) เกิดการเชื่อมโยงของโซ่โพลิเมอร์ซึ่งเกิดกับโพลิเมอร์ประเภท Thermosetting เมื่อได้รับความร้อน

สำหรับ Polyethylene และ Polypropylene ซึ่งเป็นพลาสติกหลักที่พบในขยะพลาสติกมีกลไกการแตกตัวแบบ Random-Chain และได้ปริมาณมอนอเมอร์น้อยมาก ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 กลไกการแตกตัวของพอลิเมอร์และปริมาณมอนอเมอร์ที่ได้

พอลิเมอร์	กลไกการแตกตัว	มอนอเมอร์ที่ได้ (%โดยน้ำหนัก)
Poly(methyl metacrylate)	End-chain scission	91-98
Polytetrafluorethylene	End-chain scission	95
Polymetracrylonitrile	End-chain scission	90
Polyethylstyrene	End-chain scission	82-94
Polystyrene	End-chain and random-chain scission	42-45
Polyisobutene	End-chain and random-chain scission	18-25
Polyethylene	Random-chain scission	0.03
Polypropylene	Random-chain scission	0-17
Polybutadiene	Random-chain scission	1
Poly(vinyl chloride)	Chain-stripping	0-0.07
Poly(vinyl fluoride)	Chain-stripping	0

ที่มา: Buekens and Huang (1998)

4. ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวพลาสติกด้วยความร้อน

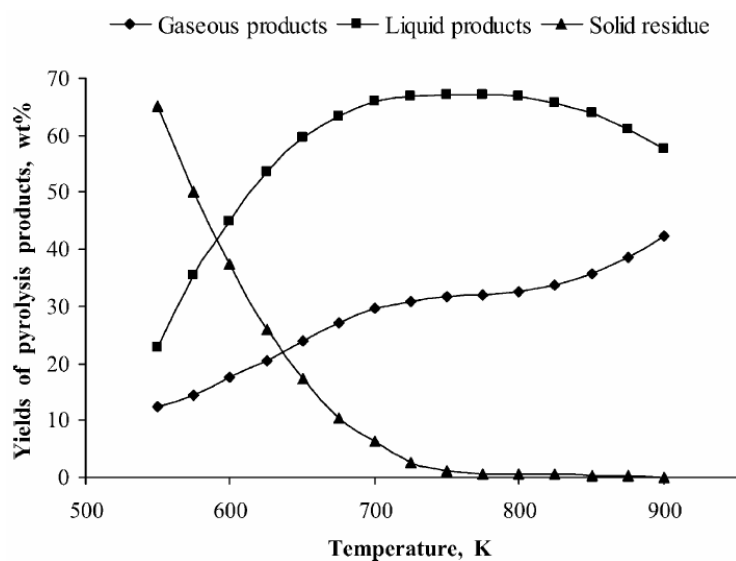
ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวพลาสติกด้วยความร้อนแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ แก๊ส น้ำมัน และของแข็ง ซึ่งพลาสติกแต่ละชนิดก็จะมี การแตกตัวเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีสัดส่วนต่างๆ แตกต่างกันไป ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลิตรภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวพลาสติกชนิดต่าง ๆ ด้วยความร้อน

ชนิดของพลาสติก	อุณหภูมิ (°C)	ผลิตรภัณฑ์ (%โดยน้ำหนัก)			
		แก๊ส	น้ำมัน	ของแข็ง	อื่น ๆ
Polyethylene (PE)	760	55.8	42.4	1.8	-
Polypropylene (PP)	740	49.6	48.8	1.6	-
Polystyrene (PS)	580	9.9	24.6	0.6	64.9 Styrene
Poly(methyl metacrylate) (PMMA)	450 740	1.25 6.8	1.4 28.1	0.15 8.8	97.2 MMA 56.3 HCl
Poly(vinyl chloride) (PVC)					

ที่มา: Kaminsky (2004)

นอกจากนั้นยังพบว่าปริมาณของผลิตรภัณฑ์แก๊ส น้ำมัน และของแข็งที่ได้จากการแตกตัวขยะพลาสติกด้วยความร้อนขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ในการแตกตัวด้วย ดังแสดงในภาพที่ 3 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจาก 500-900 K ผลิตรภัณฑ์ที่เป็นแก๊สจะมีปริมาณเพิ่มขึ้น ส่วนผลิตรภัณฑ์ที่เป็นน้ำมันจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นในช่วงที่อุณหภูมิสูงขึ้นจาก 500-750 K หลังจากนั้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจาก 750-900 K ผลิตรภัณฑ์ที่เป็นน้ำมันจะมีปริมาณลดลง และสำหรับผลิตรภัณฑ์ที่เป็นของแข็งจะมีปริมาณลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและหมดไปในที่สุด



ภาพที่ 3 ผลผลิตที่เกิดขึ้นจากการแตกตัวของพลาสติกด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่าง ๆ

ที่มา: Demirbas (2004)

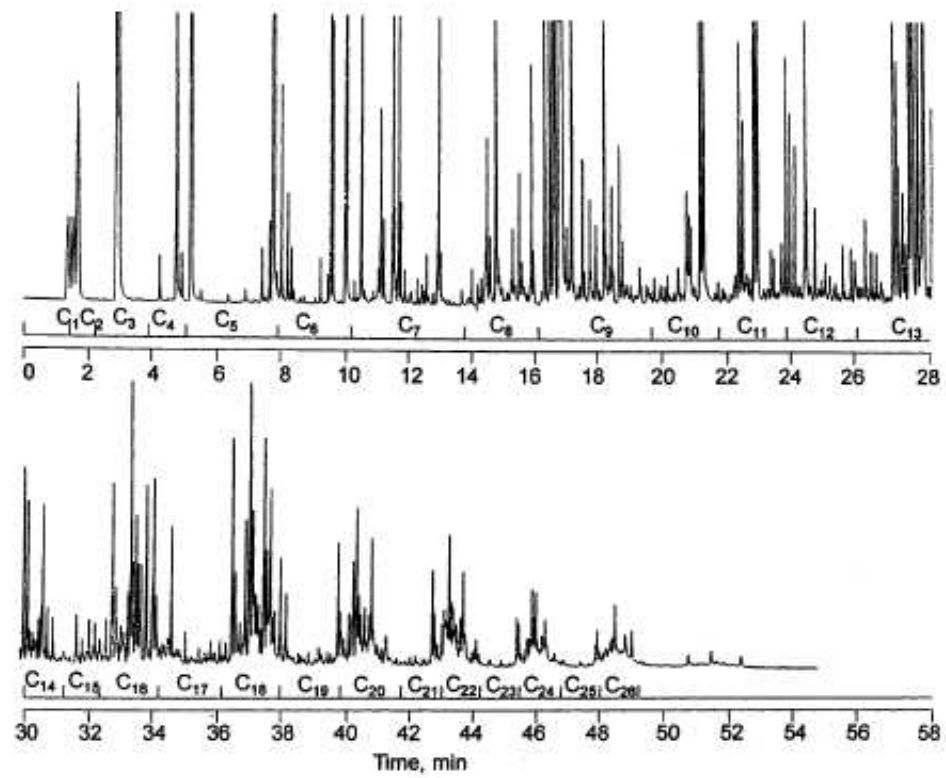
จากการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ต่างๆที่ได้จากการแตกตัวของพลาสติกด้วยความร้อน โดย Paul and Elizabeth, 1999 พบว่า

ผลิตภัณฑ์แก๊ส มักประกอบไปด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ที่มีจำนวนคาร์บอน 1-4 อะตอม ได้แก่ มีเทน อีเทน เอทิลีน พรופן พรอพิลีน บิวเทน และบิวทีน

ผลิตภัณฑ์น้ำมันเหลว มักประกอบไปด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ที่มีจำนวนคาร์บอน 5-12 อะตอม ได้แก่ เบนซีน โทลูอีน ไซลีน ฟลูออรีน ไตรเมทิลเบนซีน และฟีนแอนทรีน

กากของแข็ง ประกอบด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ที่มีจำนวนคาร์บอน 18 อะตอมขึ้นไป ได้แก่ ถ่านคาร์บอนเป็นส่วนใหญ่

นอกจากนี้ยังมีงานศึกษาที่ทำการจำแนกองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการแตกตัวด้วยความร้อน Polypropylene (PP) ใน Fixed bed reactor ที่อุณหภูมิ 425 °C ซึ่งมีอัตราการเกิดเป็นผลิตภัณฑ์สูงสุด (Maximum volatile product evolution temperature) ได้ข้อมูลแสดงในภาพที่ 4 ซึ่งสรุปผลในตารางที่ 3 (Levent และ Rainer, 2001)



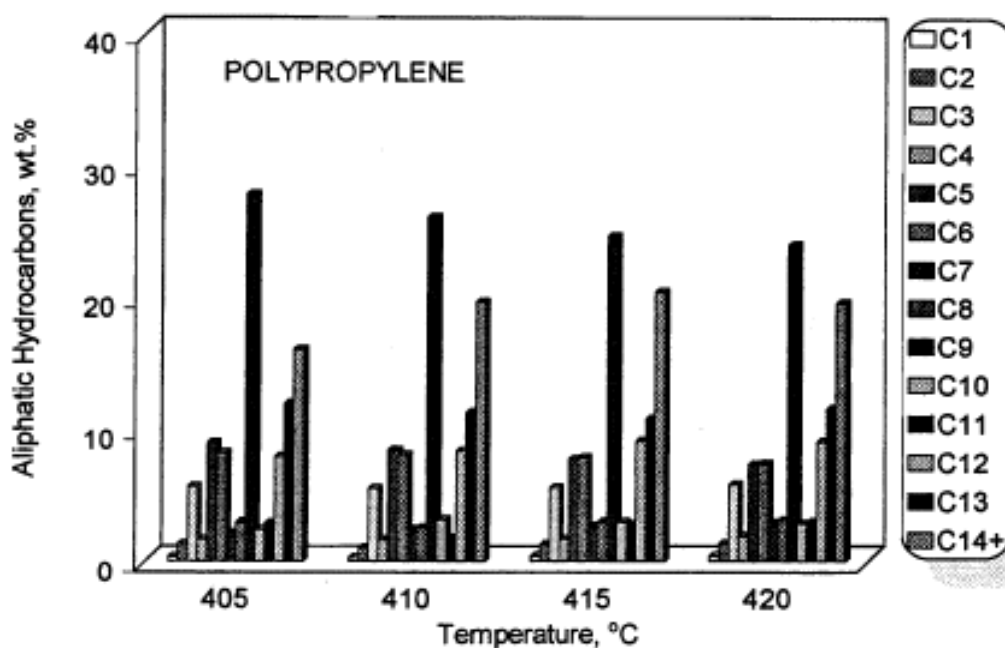
ภาพที่ 4 ข้อมูลจากเครื่อง Gas chromatograms ที่ใช้วิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการทำไพโรไลซิส
พอลิพรอพิลีน

ที่มา: Levent and Rainer (2001)

ตารางที่ 3 องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการแตกตัวด้วยความร้อน Polypropylene (PP) ใน Fixed bed reactor ที่อุณหภูมิ 425 °ซ

C-Number	Organic compounds
1	Methne
2	Ethane, Ethane
3	1-Propene, Propane
4	Isobutane, 1-Butene, 1,3-Butadiene, Butane Cis-2-Butene
5	Neopentane, 1,4-Pentadiene, 2-Methyl butane, 1-Pentene, 2-Methyl-1,3-butadiene, Pentane, 2-Methyl-2-butane
6	3,3-Dimethyl-1-butene, 1,3-Pentadiene, 4-Methyl-1-Pentene, 2-Methyl pentene, 2-Methyl-1-pentene, 1-Hexene, Hexane
7	2,3-Dimethyl-2-butene, 2,4-Hexadiene, 2,4-Dimethyl-1-pentene, 2,4-Dimethyl-2-pentene, 3,4-Dimethyl-2-pentene, 3-Methyl hexene, 3,4-Dimethyl-2-pentene, 2,4-Dimethyl-1,3-pentadiene, 1-Heptene
8	4-Methyl heptane, 3-Methyl heptane, 2,3-Dimethyl-2-hexene
9	4,4,5-Trimethyl-2-hexene, 2-Methyl-4-octene, 2,6-Dimethyl-2,4-heptadiene, 2,4-Dimethyl-1-heptene, 2-Methyl-1-octene, 3,3,5-Trimethyl-1,4-hexadiene
10	2,7-Dimethyl-1-octene, 2,2-Dimethyl-3-octene
11	2,6-Dimethyl nonane
12	2,4,6-Trimethyl-1-nonene

ที่มา: Levent and Rainer (2001)



ภาพที่ 5 เปอร์เซ็นต์โดยมวลขององค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ซึ่งแบ่งตามจำนวนคาร์บอนอะตอม ที่เกิดจากการทำไพโรไลซิสพอลิพรอพิลีนที่อุณหภูมิต่าง ๆ

ที่มา: Levent and Rainer (2001)

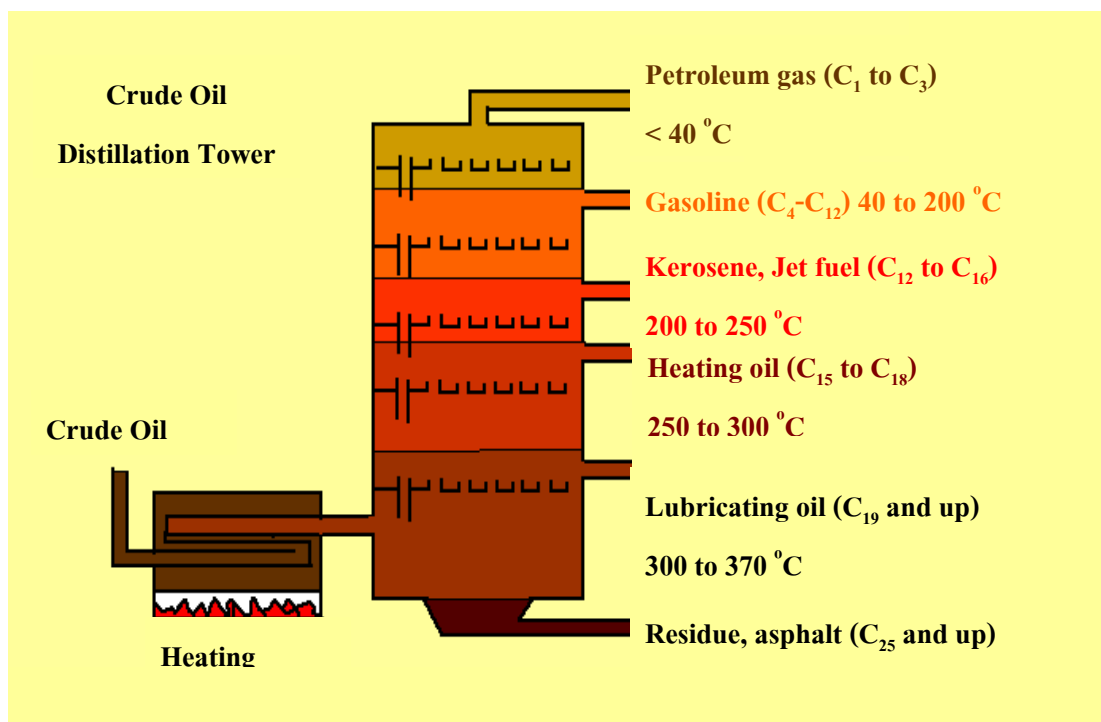
จากภาพที่ 5 แสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมี C_9 เป็นองค์ประกอบในปริมาณมากที่สุด (Major compounds) ซึ่งได้แก่ 2-methyl-4-octene, 2-methyl-2-octene, 2,6-dimethyl-2,4-heptadiene, 2,4-dimethyl-1-heptene, 2-methyl-1-octene

จากการศึกษาเพิ่มเติมพบว่าในการ นำผลิตภัณฑ์ของเหลวและแก๊สที่ได้ไปใช้ประโยชน์อาจใช้การกลั่นลำดับส่วนโดยอาศัยความแตกต่างของจุดเดือดมาช่วยในการแยกสารแต่ละชนิดออกจากกัน ตามมาตรฐาน ASTM D 86 Distillation methods (ชัยนุรักษ์, 2548) ซึ่งข้อมูลของจุดเดือดของสารต่าง ๆ และช่วงของอุณหภูมิที่ใช้ในการกลั่นแยกลำดับส่วนเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ในแต่ละช่วงแสดงดังตารางที่ 4 และภาพที่ 6 ตามลำดับ

ตารางที่ 4 ข้อมูลจุดเดือด จุดหลอมเหลว และสถานะที่อุณหภูมิ 25 °ซ

Name	Molecular	Melting Point (°C)	Boiling Point (°C)	State at 25°ซ
methane	CH ₄	-183	-164	gas
ethane	C ₂ H ₆	-183	-89	gas
propane	C ₃ H ₈	-190	-42	gas
butane	C ₄ H ₁₀	-138	-0.5	gas
pentane	C ₅ H ₁₂	-130	36	liquid
hexane	C ₆ H ₁₄	-95	69	liquid
heptane	C ₇ H ₁₆	-91	98	liquid
octane	C ₈ H ₁₈	-57	125	liquid
nonane	C ₉ H ₂₀	-51	151	liquid
decane	C ₁₀ H ₂₂	-30	174	liquid
undecane	C ₁₁ H ₂₄	-25	196	liquid
dodecane	C ₁₂ H ₂₆	-10	216	liquid
hexadecane	C ₁₆ H ₃₄	18.5	287.5	liquid
heptadecane	C ₁₇ H ₃₆	24	300	liquid

ที่มา: <http://www.elmhurst.edu/~chm/vchembook/501hcboilingpts.html>



ภาพที่ 6 ช่วงของอุณหภูมิที่ใช้ในการกลั่นแยกลำดับส่วน เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ในแต่ละช่วงของจำนวนคาร์บอนอะตอม

ที่มา: <http://www.elmhurst.edu/~chm/vchembook/501hcboilingpts.html>

5. เชื้อเพลิงเหลว

เชื้อเพลิงเหลว เป็นเชื้อเพลิงที่นิยมใช้มากในโรงงานอุตสาหกรรม และยานพาหนะ เพราะสะดวกในการใช้ ให้ค่าความร้อนทางเชื้อเพลิงสูง เชื้อเพลิงเหลวที่ใช้ส่วนใหญ่จะได้จากผลิตภัณฑ์การกลั่นน้ำมันปิโตรเลียมเช่น น้ำมันเบนซินหรือน้ำมันก๊าดโซลีน น้ำมันเชื้อเพลิง เครื่องบินไอพ่น น้ำมันก๊าด น้ำมันดีเซล และ น้ำมันเตา เป็นต้น (ปราโมทย์, 2537 และ ประเสริฐ, 2544)

5.1 น้ำมันเบนซิน (Gasoline fuels)

น้ำมันเบนซินหรือน้ำมันก๊าดโซลีน เป็นน้ำมันที่ได้จากการปรุงแต่งคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกลั่นน้ำมันโดยตรง ซึ่งมีช่วงจุดเดือดอยู่ระหว่าง $38-214$ °C และมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง $0.70 - 0.75$ กิโลกรัมต่อลิตร หลังจากนั้นจะผสมสารเพิ่มคุณภาพเพื่อให้เหมาะสม

กับการใช้งานและได้คุณภาพตามข้อกำหนด เช่น สารเพิ่มค่าออกเทน สารเคมีสำหรับป้องกันสนิม รวมทั้งสารเคมีที่ช่วยทำความสะอาดคาร์บูเรเตอร์

5.1.1 ค่าออกเทนในน้ำมันเบนซิน

ค่าออกเทนเป็นการวัดคุณภาพการติดไฟของน้ำมันเบนซิน หรือวัดปริมาณความต้านทานการน็อกของเครื่องยนต์ โดยกำหนดให้ Isooctane มีค่าออกเทน เท่ากับ 100 และให้ Normal heptane มีค่าเท่ากับ 0 ในการกำหนดอัตราออกเทนของน้ำมันเบนซินชนิดใด ๆ ทำได้โดยการเปรียบเทียบการเผาไหม้ของน้ำมันเบนซินนั้น ๆ กับของผสมที่มี Normal heptane กับ Isooctane เช่นน้ำมันเบนซินชนิดหนึ่งมีค่าอัตราออกเทน 85 หมายความว่าเมื่อมีการเผาไหม้น้ำมันเบนซินนั้น จะมีผลในการเผาไหม้เหมือนส่วนผสมของนอร์มัลเฮปเทน 15 เปอร์เซ็นต์ กับไอโซออกเทน 85 เปอร์เซ็นต์ น้ำมันเบนซินที่มีค่าอัตราออกเทนสูงเหมาะที่จะใช้กับเครื่องยนต์ที่มีอัตราการอัดสูง

5.2 น้ำมันก๊าด (Kerosene fuels)

น้ำมันก๊าดเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดหนึ่งที่ได้จากการกลั่นปิโตรเลียม การทำอุตสาหกรรมปิโตรเลียมในสมัยก่อนนั้น ผลิตภัณฑ์หลักของการกลั่นน้ำมันก็คือ น้ำมันก๊าด เพราะคนส่วนใหญ่นิยมใช้น้ำมันก๊าดไปจุดตะเกียงให้แสงสว่างมากกว่าในปัจจุบัน ในปัจจุบันน้ำมันก๊าดได้นำไปใช้ประโยชน์อย่างอื่นอีกมากมาย เช่น ตู้เย็นน้ำมันก๊าด นำไปเป็นส่วนผสมในยาฆ่าแมลง สีนํ้ามันน้ำมันชักเงา ส่วนผสมสำหรับนํ้ายาทำความสะอาด และอุตสาหกรรมเซรามิก ทางด้านเกษตรได้นำไปใช้กับรถไถ รถแทรกเตอร์ นอกจากนั้นใช้เป็นเชื้อเพลิงในการบ่มใบยาสูบ และอบพืชผลอีกด้วย ที่สำคัญน้ำมันก๊าดถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบินใบพัด เครื่องบินไอพ่น

จะเห็นได้ว่าคุณสมบัติของน้ำมันก๊าดนั้นขึ้นอยู่กับว่าจะนำไปใช้ประโยชน์ในด้านใด ซึ่งน้ำมันก๊าดที่ดีจะต้องให้ค่าความร้อนสูง ให้แสงสว่างมาก และมีจุดควั่นสูง โดยทั่วไปแล้วจะมีช่วงจุดเดือดประมาณ 151-216 °ซ ซึ่งมืทั้ง พาราฟิน แนฟทีน และอะโรมาติกผสมอยู่ในอัตราส่วนต่าง ๆ กัน แล้วแต่ที่มาของน้ำมันดิบ

5.3 น้ำมันเชื้อเพลิงเครื่องบิน (Aviation fuels)

น้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้กับเครื่องบินแบ่งออกตามลักษณะของเครื่องยนต์เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

5.3.1 น้ำมันเบนซินเครื่องบินใบพัด (Aviation gasoline)

เครื่องยนต์ที่ใช้กับเครื่องบินใบพัดมีระบบการทำงานคล้ายกับเครื่องยนต์เบนซิน แต่มีแรงม้าสูงและได้รับการออกแบบให้ทำงานได้ในสภาวะที่อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงในช่วงกว้าง ซึ่งรวมถึงในระดับสูงที่มีอากาศเจือจางด้วย ดังนั้นน้ำมันเชื้อเพลิงที่นำมาใช้กับเครื่องบินใบพัดแม้จะมีองค์ประกอบเหมือนกับน้ำมันเบนซินที่ใช้กับรถยนต์ แต่ต้องมีความสะอาดบริสุทธิ์เป็นพิเศษ มีค่าออกเทนสูงกว่า มีจุดไหลเทต่ำ เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้ในสภาวะที่ความดันและอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงในช่วงกว้างมาก มีช่วงจุดเดือดต่ำกว่าน้ำมันเบนซินทั่วไป โดยอยู่ในช่วง 30-170 °ซ แต่ในปัจจุบันมีการใช้น้ำมันชนิดนี้น้อย

5.3.2 น้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบินไอพ่น (Aviation turbine fuel)

เครื่องยนต์ไอพ่นได้รับความนิยมอย่างสูง เพราะมีแรงขับเคลื่อนมาก บินได้เร็ว มีประสิทธิภาพดี ประหยัดเพราะใช้เชื้อเพลิงราคาถูกและหาง่าย ในสมัยแรก ๆ ได้ใช้น้ำมันก๊าดที่มีจำหน่ายทั่วไปเป็นน้ำมันเชื้อเพลิง เนื่องจากน้ำมันก๊าดมีคุณสมบัติในการระเหยตัวต่ำ อันเป็นคุณสมบัติสำคัญของเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบินไอพ่น หรือที่เรียกว่าเครื่องบินเจ็ต ในปัจจุบันเครื่องบินไอพ่นของสายการบินพาณิชย์ส่วนใหญ่ยังนิยมใช้เชื้อเพลิงที่มีช่วงจุดเดือดเช่นเดียวกับน้ำมันก๊าด แต่จะต้องมีความสะอาด บริสุทธิ์ และมีคุณสมบัติบางอย่างดีกว่าน้ำมันก๊าดทั่วไป ส่วนเครื่องบินไอพ่นที่ใช้ในทางทหารนั้น ต้องใช้เชื้อเพลิงที่มีคุณสมบัติต่างกันออกไปเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งาน เพราะเครื่องบินต้องการความเร็วสูง จึงต้องการกำลังขับเคลื่อนมาก น้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบินไอพ่นที่ใช้ในทางทหารนั้นเป็นเชื้อเพลิงผสมระหว่างน้ำมันก๊าด กับ แนพธา

5.4 น้ำมันดีเซล (Diesel fuels)

น้ำมันดีเซล เป็นผลิตภัณฑ์ชนิดหนึ่งที่ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบ จัดว่าเป็นน้ำมันที่มีองค์ประกอบมากที่สุด และมีช่วงจุดเดือดกว้างและสูงกว่าน้ำมันเบนซิน เนื่องจากเครื่องยนต์ดีเซลเป็นเครื่องยนต์ที่มีมูลฐานการทำงานแตกต่างจากเครื่องยนต์เบนซิน การจุดระเบิดของเครื่องยนต์ดีเซลใช้ความร้อนที่เกิดจากการอัดอย่างมากภายในกระบอกสูบ แล้วฉีดเชื้อเพลิงเข้าไปเพื่อทำการเผาไหม้ ไม่ใช่เป็นการจุดระเบิดจากหัวเทียนเหมือนในเครื่องยนต์เบนซิน เครื่องยนต์ดีเซลในสมัยแรก ๆ นั้นมีขนาดใหญ่โตมาก เพราะต้องการให้ทนกับความร้อนและแรงอัดสูง ๆ ได้ เครื่องยนต์ดีเซลสมัยก่อนก็นำมาใช้เป็นเครื่องต้นกำลังเช่นใช้เป็นต้นกำลังในการผลิตกระแสไฟฟ้า โรงงานอุตสาหกรรม และใช้ในเรือ ต่อมาได้มีการพัฒนาสร้างเครื่องยนต์ให้มีขนาดเล็กลงแต่มีประสิทธิภาพสูง ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันดีเซลให้เหมาะสมกับเครื่องยนต์ที่ใช้กับงานนั้น ๆ

5.5 น้ำมันเตา (Residual fuels)

น้ำมันเตาจัดว่าเป็นเชื้อเพลิงที่สำคัญที่สุดในอุตสาหกรรม เพราะราคาถูก ใช้งานง่าย ให้ความร้อนสูงและไม่มีจีเอ็ม น้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเตาหม้อน้ำและเตาเผา หรือเตาหลอมในโรงงานอุตสาหกรรม เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่ เครื่องยนต์เรือเดินทะเลขนาดใหญ่และอื่นๆ ทั้งนี้เนื่องจากน้ำมันเตามีราคาถูกกว่าน้ำมันเชื้อเพลิงอย่างอื่น และให้ความร้อนทางเชื้อเพลิงได้ดีด้วย น้ำมันเตาจะได้จากส่วนที่หนักที่สุดของการกลั่นน้ำมันดิบเพื่อแยกเป็นเชื้อเพลิง ส่วนนี้จะไม่ระเหยเป็นไอและเหลืออยู่ก้นหอกลั่น

น้ำมันเตาที่ใช้มีอยู่หลายชนิด ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความข้นใสของน้ำมันเตา โดยทั่วไปน้ำมันเตาที่มีคุณภาพสูงจะมีความข้นใสต่ำกว่า การแบ่งประเภทของน้ำมันเตาแบ่งได้ 3 ประเภท คือน้ำมันเตาชนิดใส ส่วนมากใช้ในการเผาไหม้ให้ความร้อนกับหม้อน้ำขนาดเล็กทั่วไป เพื่อใช้ในการผลิตไอน้ำแล้วนำไปใช้งานต่าง ๆ น้ำมันเตาชนิดปานกลาง ส่วนมากจะใช้เผาให้ความร้อนแก่หม้อน้ำเตาเผาขนาดกลาง หรือขนาดเล็กที่มีอุปกรณ์อุ่นน้ำมัน และ น้ำมันเตาชั้น จะนำไปใช้กับเตาเผาขนาดใหญ่โรงงานอุตสาหกรรม แต่น้ำมันเตาที่ใช้ในเรือเดินสมุทร จะข้นมากกว่านี้ ซึ่งผสมกันระหว่างน้ำมันดีเซลกับน้ำมันเตา

6. ตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการแตกโมเลกุลด้วยความร้อน

กระบวนการแตกโมเลกุลตัวพลาสติกด้วยความร้อนจะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ในปริมาณมากหรือน้อย สัดส่วนขององค์ประกอบเป็นอย่างไรจะขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิส วิธีการให้ความร้อน อัตราการให้ความร้อน เวลาที่สัมผัสปฏิกิริยา ชนิดของเครื่องอุปกรณ์ต่างๆ การเตรียมวัสดุป้อน การใช้สารเร่งปฏิกิริยา ความดัน หรือสารเคมีที่เติมเข้าไปเพื่อประโยชน์อย่างอื่น อาทิ เป็นตัวทำให้เกิดรีดักชัน ได้แก่ ไฮโดรเจน และคาร์บอนมอนอกไซด์ (ไพศาล , 2543)

7. เครื่องปฏิกรณ์ (Reactor)

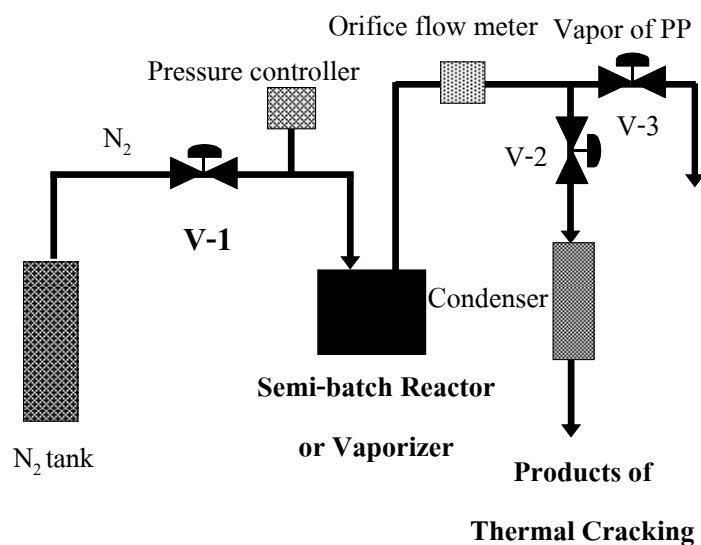
7.1 เครื่องปฏิกรณ์แบบเฉพาะงวด (Batch reactor)

สารตั้งต้นถูกป้อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์พร้อมกัน และทำปฏิกิริยากัน โดยองค์ประกอบทั้งหมดในถังที่เวลาใด ๆ จะเหมือนกัน เหมาะกับงานที่มีขนาดเล็ก ใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีราคาแพง เช่น ในอุตสาหกรรมยา ข้อดีของเครื่องปฏิกรณ์แบบเฉพาะงวดคือ ให้ Conversion ของปฏิกิริยาสูง แต่มีข้อเสียคือ ค่าใช้จ่ายในการผลิตสูง และไม่เหมาะกับการผลิตในปริมาณมาก ๆ (Levenspiel, 1999)

7.2 เครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งเฉพาะงวด (Semibatch reactor)

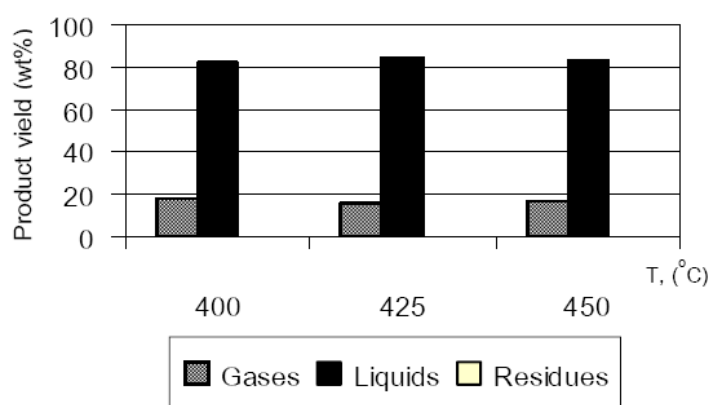
เริ่มแรกสารตั้งต้นถูกป้อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์พร้อมกันและทำปฏิกิริยากันเช่นเดียวกับเครื่องปฏิกรณ์แบบเฉพาะงวด แต่เครื่องปฏิกรณ์ประเภทนี้จะมีการป้อนสารตั้งต้นเพิ่มเข้าไปหรือมีการดึงสารผลิตภัณฑ์บางส่วนออกในระหว่างการทำงาน ข้อดีของเครื่องปฏิกรณ์แบบนี้คือ สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ดีกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบเฉพาะงวด (Levenspiel, 1999)

จากภาพที่ 7 จากการศึกษาการแตกโมเลกุลของพลาสติกพอลิพรอพิลีน โดยใช้ความร้อนในที่อับอากาศ



ภาพที่ 7 เครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งเฉพาะงวดที่ใช้ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการแตกโมเลกุลของพลาสติกพอลิพรอพิลีน โดยใช้ความร้อนในที่อับอากาศ
ที่มา: ชัยนุรักษ์ (2548)

โดยการนำพอลิพรอพิลีนมาทำการสลายตัวในปฏิกรณ์แบบกึ่งเฉพาะงวดที่มีขนาด 1.0 dm³ ที่ความดันบรรยากาศ ในช่วงอุณหภูมิ 400 – 450 °ซ โดยการทดลองในแต่ละครั้งใช้พอลิพรอพิลีนจำนวน 50 g จากผลการทดลองพบว่า จะได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวมากถึง 81-85 wt% ดังภาพที่ 8



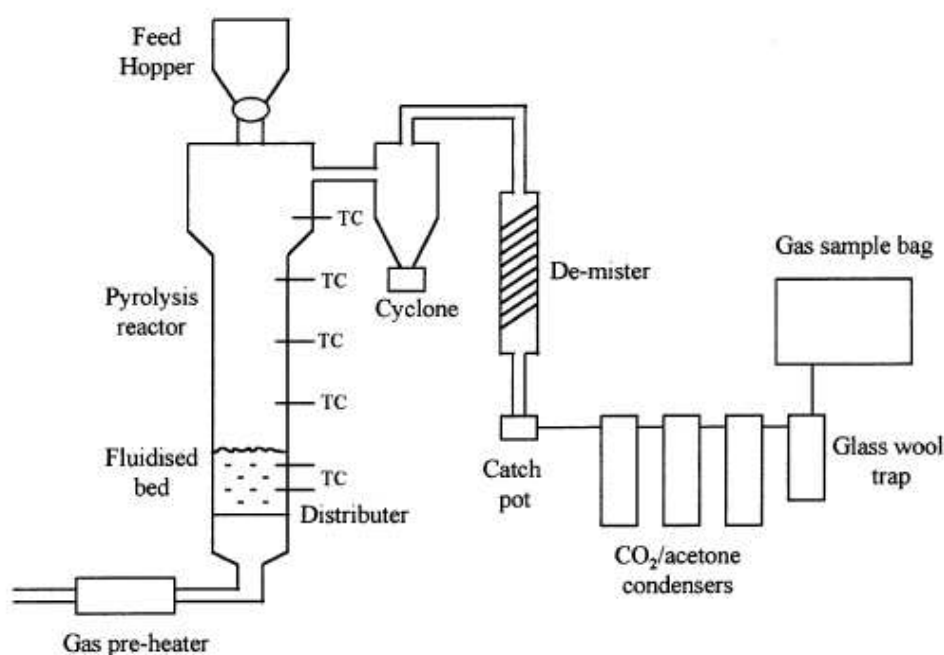
ภาพที่ 8 สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากการแตกโมเลกุลของพลาสติกพอลิพรอพิลีน โดยใช้ความร้อนในที่อับอากาศ ในปฏิกรณ์แบบกึ่งเฉพาะงวด (หมายเหตุ: Residues Product มีปริมาณน้อยมาก)

ที่มา: ชัยนุรักษ์ (2548)

7.3 ปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไคซ์เบด (Fluidized bed reactor)

จากการศึกษาที่ผ่านมา (Grace et al, 1997) พบว่าปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดเป็นปฏิกรณ์ที่ช่วยให้เกิดการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทมวลได้ดี เกิดการสัมผัสกันได้ดีระหว่างแก๊สกับอนุภาค มีระยะเวลาการสัมผัส (Residence time) สั้น ใช้งานได้ดีกับระบบที่ต้องใช้ความร้อนสูง

ภาพที่ 9 และตารางที่ 5 เป็นศึกษาการแตกตัวพลาสติกประเภท Polyethylene ชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene, LDPE) ด้วยความร้อนในปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบด ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 cm สูง 70 cm เพื่อผลิตเป็นสารป้อนในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีซึ่งสามารถนำกลับไปผลิตพลาสติกหรือกลั่นเป็นน้ำมันเชื้อเพลิง โดยภายในปฏิกรณ์บรรจุทรายขนาด 250 ไมครอน เม็ดพลาสติกที่ใช้มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2-3 mm ใช้แก๊สไนโตรเจนเป็นตัวแลกเปลี่ยนความร้อน ส่วนอุณหภูมิที่ใช้ในการแตกตัวอยู่ระหว่าง 500-700 °C และจากผลการทดลองพบว่าผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จะมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น



ภาพที่ 9 ปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดที่ใช้ในการแตกตัวพลาสติกด้วยความร้อน
ที่มา: Paul (1999)

ตารางที่ 5 ร้อยละของผลได้ของผลิตภัณฑ์จากกระบวนการแตกตัว LDPE ด้วยความร้อนใน
ปฏิกิริยาฟลูอิดไคส์เบดที่อุณหภูมิ 500-700 °ซ (wt.%)

Product	Temperature (°ซ)				
	500	550	600	650	700
Gas	10.8	21.4	24.2	40.1	71.4
Oil	43.9	43.2	51.0	47.8	24.6
Wax	45.3	35.4	24.8	12.1	4.0
Oil+Wax	89.2	78.6	75.8	59.9	28.6

ที่มา: Paul T. Williams (1999)

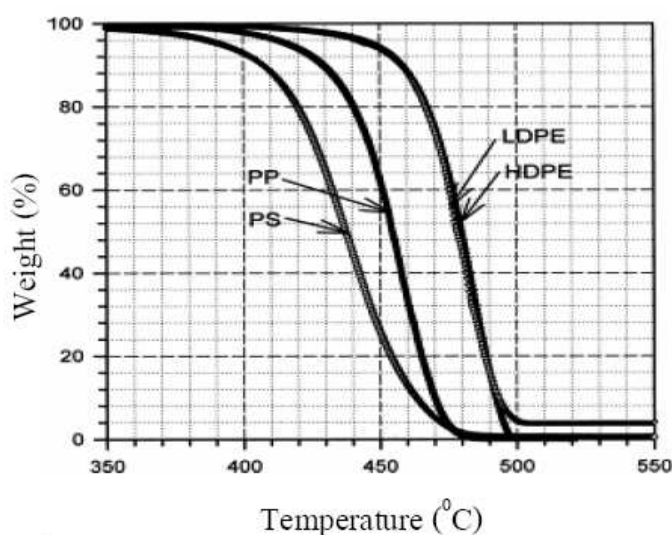
8. การวิเคราะห์แบบเทอร์โมกราวิเมตริก

การวิเคราะห์แบบเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric analysis, TGA) (Campbell and Wite, 1989) มวลของสารตัวอย่างจะถูกวิเคราะห์อย่างต่อเนื่องขณะที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นด้วยอัตราคงที่ น้ำหนักของสารตัวอย่างที่หายไปเกิดจากสารที่ระเหยได้ที่อยู่ในพอลิเมอร์ถูกไล่ออกไป และที่อุณหภูมิสูงเมื่อการแตกตัวของพอลิเมอร์ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่ระเหยได้ การออกแบบเครื่องมือนี้ต้องการความละเอียดสูง ไม่เพียงเพราะว่าน้ำหนักของสารที่หายไปมีปริมาณที่น้อยมาก ยังต้องการความแม่นยำในการชั่ง เนื่องจากต้องการหลีกเลี่ยงการพาความร้อน (convective force) ที่เกิดขึ้นภายในภาชนะที่ร้อน และเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของแก๊สที่ล้อมรอบอีกด้วย ซึ่งมีความสำคัญที่จะมั่นใจว่าสารที่ระเหยไปนั้นจะไม่ควบแน่นกลับไปบนเครื่องชั่งอีก

เครื่องมือนี้สามารถทำการวัดได้ทั้งการวิเคราะห์แบบเทอร์โมกราวิเมตริก และเทอร์มอดิฟเฟอเรนเชียล (Differential thermal analysis, DTA) ในเวลาเดียวกัน โดยให้ข้อมูลที่ครอบคลุมในการทดสอบเพียงครั้งเดียว นอกจากนี้ยังสามารถใช้ร่วมกับเครื่องมืออื่นๆ เช่น การใช้การวิเคราะห์แบบเทอร์โมกราวิเมตริก ร่วมกับแมสสเปกโตรสโกปี

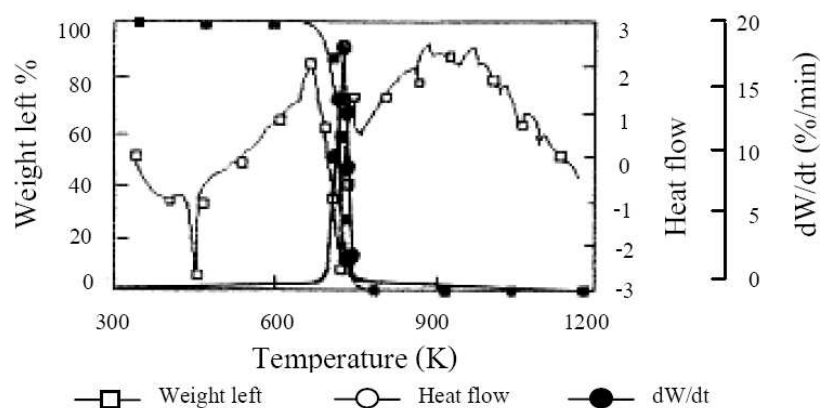
8.1 การวิเคราะห์การแตกโมเลกุลพลาสติกโดยใช้เทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก

การวิเคราะห์แบบเทอร์โมกราวิเมตริก ถูกใช้อย่างกว้างขวางในการศึกษาการแตกโมเลกุลโดยใช้ความร้อนของพลาสติก และจากการแตกโมเลกุลโดยใช้ความร้อนซึ่งใช้การวิเคราะห์ปริมาณความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 350 ถึง 500 °ซ (Lee *et al.*, 2002) ดังแสดงในภาพที่ 10 พบว่าน้ำหนักที่หายไป (50 %) ของพลาสติกชนิดต่าง ๆ ซึ่งพอลิสไตรีนเกิดที่ประมาณ 440 °ซ พอลิพรอพิลีนเกิดที่ประมาณ 455 °ซ ส่วนพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง และพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเกิดที่ประมาณ 480 °ซ แสดงว่าอุณหภูมิการแตกโมเลกุลของพลาสติกชนิดต่าง ๆ เรียงตามลำดับได้ดังนี้ PS<PP<LDPE และ HDPE



ภาพที่ 10 การหายไปของน้ำหนักพลาสติกที่อัตราการให้ความร้อน 10 °ซ ต่อนาที
ที่มา: Lee *et al.* (2002)

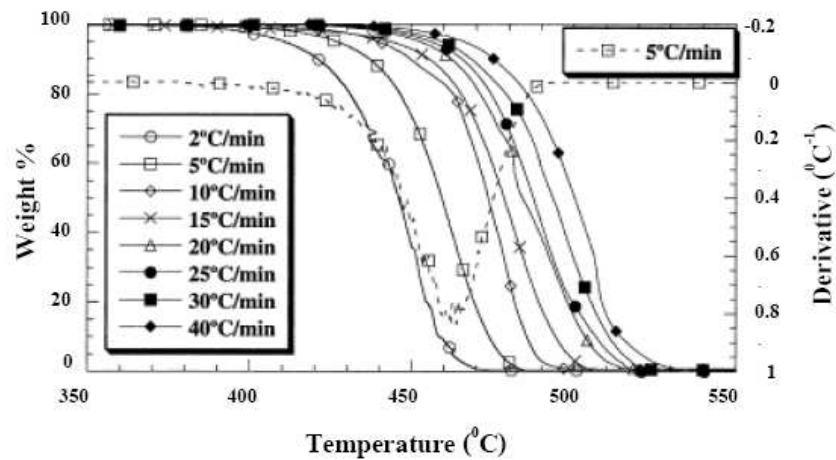
การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการแตกโมเลกุลด้วยความร้อนของพอลิพรอพิลีนโดยใช้การวิเคราะห์แบบเทอร์โมกราวิเมตริก พบว่าการแตกโมเลกุลของพอลิพรอพิลีนจะเกิดขึ้นในขั้นตอนเดียวสังเกตจากน้ำหนักที่หายไปของสาร ส่วน 2 พิกที่ที่เกิดขึ้นในเส้นกราฟของการไหลของความร้อน (Heat flow) ซึ่งเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาคูดความร้อน พิกแรกจะแสดงถึงจุดหลอมเหลวของพอลิพรอพิลีน ส่วนพิกที่สองจะแสดงถึงปฏิกิริยาการแตกโมเลกุลขณะที่เส้นกราฟแสดงอัตราการหายไปของน้ำหนักจะแสดงอุณหภูมิที่เริ่มเกิดปฏิกิริยาและสิ้นสุดปฏิกิริยารวมถึงอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงสุดอีกด้วย ดังแสดงในภาพที่ 11 (Gersten *et al.*, 2000)



ภาพที่ 11 น้ำหนักที่หายไป การไหลของความร้อน และอัตราการหายไปของน้ำหนักของการแตกโมเลกุลพอลิพรอพิลีน (อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5 เคลวินต่อนาที)

ที่มา: Gersten *at el* (2000)

น้ำหนักของพอลิพรอพิลีนที่เหลือเกือบจะคงที่ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 613-644 เคลวิน (อุณหภูมิจริงขึ้นอยู่กับอัตราการให้ความร้อน) และที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมินี้ น้ำหนักจะเริ่มลดลง และลดลงอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงกว่า 673 เคลวิน จนถึงอุณหภูมิ 753-768 เคลวิน (ช่วงอุณหภูมินี้ยังเป็นฟังก์ชันของอัตราการให้ความร้อนอีกด้วย) น้ำหนักที่เหลืออยู่ที่ 773 เคลวินประมาณ 0.2 เปอร์เซ็นต์ ถ้าอัตราการให้ความร้อนเพิ่มขึ้น เส้นกราฟจะขยับไปทางด้านขวา ด้วยอุณหภูมิการแตกโมเลกุลสูงสุด (T_m) และอัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักสูงสุดเพิ่มขึ้น ต่อมาได้มีการทดสอบพฤติกรรมการหายไปของน้ำหนักของพอลิพรอพิลีนที่ใช้แล้วที่อัตราการให้ความร้อนต่างๆ (Navarro *at el.*, 2003) ซึ่งผลการทดลองได้ถูกนำเสนอในภาพของเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป เช่นเดียวกันกับอัตราการเปลี่ยนแปลงที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ เป็นที่คาดว่าเส้นกราฟการแตกโมเลกุลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นไปที่อุณหภูมิสูงกว่า และที่อัตราการให้ความร้อนที่สูงกว่า แม้ว่ารูปร่างของกราฟค่อนข้างจะคล้ายกัน และการที่ไม่มีมีกากของแข็งที่เหลือตอนสิ้นสุดกระบวนการทดลอง แสดงว่าการแตกโมเลกุลโดยใช้ความร้อนของพอลิพรอพิลีนที่ใช้แล้วจะเกิดปฏิกิริยาขั้นตอนเดียว ซึ่งเห็นได้จากพีคที่มีอยู่พีคเดียว ดังแสดงในภาพที่ 12



ภาพที่ 12 การแตกโมเลกุลด้วยความร้อนที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นของพอลิพรอพิลีนที่ใช้แล้วที่อัตราการให้ความร้อนต่าง ๆ

ที่มา: Navarro *et al.* (2003)

9. ฟลูอิดไลเซชัน (Fluidization)

เป็นกระบวนการที่มีของไหลไหลเข้าทางด้านล่างของคอลัมน์หรือท่อที่มีชั้นของอนุภาค หรือเม็ดของแข็งบรรจุอยู่ เพื่อทำให้อนุภาคของของแข็งเคลื่อนที่แบบอิสระ (Warren, 2001)

9.1 ความเร็วต่ำสุดของการทำให้เกิดฟลูอิดไลเซชัน (Minimum Fluidization Velocity $\bar{V}_{0M}$)

การหาความเร็วต่ำสุดที่ทำให้อนุภาคเริ่มเกิดฟลูอิดไลเซชัน หาโดยใช้หลักการที่ว่าความดันลด (Pressure drop) ที่เกิดขึ้นระหว่างชั้นของแข็ง (Bed) มีค่าเท่ากับ น้ำหนักของ Bed ต่อพื้นที่หน้าตัดขวางของคอลัมน์ จะได้สมการทั่วไปเพื่อคำนวณหา $\bar{V}_{0M}$ ดังนี้

$$\frac{150\mu\bar{V}_{0M}}{\Phi_s D_p^2} \frac{(1-\varepsilon_M)}{\varepsilon_M^3} + \frac{1.75\rho\bar{V}_{0M}^2}{\Phi_s D_p} \frac{1}{\varepsilon_M^3} = g(\rho_p - \rho) \quad (10)$$

สมการนี้อาจลดรูปเป็นสมการสำหรับใช้ในกรณีพิเศษต่าง ๆ ดังนี้

1. กรณีที่อนุภาคมีขนาดเล็ก ซึ่ง $Re_p < 1.0$ การไหลจะเป็นแบบราบเรียบ (Laminar flow)

$$\bar{V}_{0M} \approx \frac{g(\rho_p - \rho)}{150\mu} \frac{\varepsilon_M^3}{1 - \varepsilon_M} \Phi_s^2 D_p^2 \quad (11)$$

2. กรณีที่อนุภาคมีขนาดใหญ่ ซึ่ง $Re_p > 10^3$

$$\bar{V}_{0M} \approx \left[\frac{\Phi_s D_p g(\rho_p - \rho) \varepsilon_M^3}{1.75\rho} \right]^{1/2} \quad (12)$$

Φ_s = ภาวะทรงกลม (Sphericity) มีค่าเท่ากับ 1 สำหรับทรงกลม

D_p = เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคของแข็ง (Particle size)

ρ_p = ความหนาแน่นของอนุภาคของแข็ง (Density of particle)

ρ = ความหนาแน่นของของไหล (Density of fluid)

ε_M = เศษส่วนช่องว่างที่ต่ำที่สุดสำหรับการเกิดฟลูอิดิเซชัน (Minimum porosity for Fluidization)

โดยทั่วไปสำหรับอนุภาคทรงกลมจะมีค่าประมาณ 0.40 - 0.45

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. ปฏิกรณ์ฟลูอิดไชเบค
2. อุปกรณ์วัดอัตราการไหลของก๊าซ
3. อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ
4. ชุดทำความร้อน
5. ชุดควบคุมแรงดันผลิตภัณฑ์
6. ชุดเก็บผลิตภัณฑ์
7. ปฏิกรณ์แบบกึ่งเฉพาะจง
8. เครื่อง simultaneous DSC-TGA analyzer
9. เครื่องกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม

สารเคมี

1. เม็ดพลาสติกชนิดพอลิพรอพิลีน บริษัท ทีพีโอโพลีน จำกัด (มหาชน)
2. แก๊สไนโตรเจน (N_2) IND. บริษัท ไทยอินดัสเทรียลแก๊ส จำกัด (มหาชน)

วิธีการทดลอง

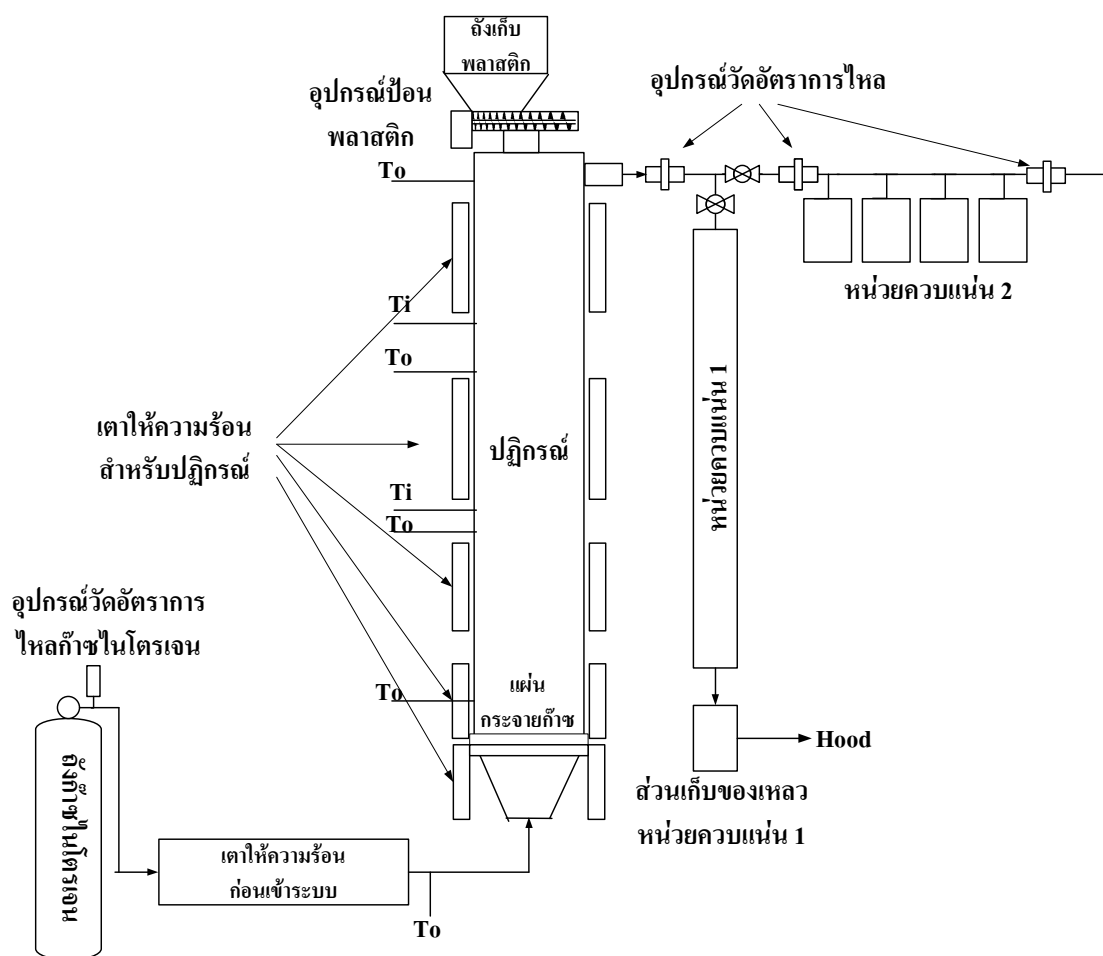
1. ระบบที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิส

ระบบการแตกสลายพลาสติกที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังภาพที่ 13 ซึ่งประกอบไปด้วย ปฏิกรณ์ฟลูอิดไชเบค โดยมีการป้อนไนโตรเจนจากถังก๊าซเข้าสู่หน่วยให้ความร้อนก่อนเข้าระบบ (Preheater) ซึ่งจากการออกแบบควรจะทำให้ก๊าซป้อนที่มีอุณหภูมิห้องร้อนขึ้นได้ถึง 600°C ก๊าซที่ป้อนเข้าจะผ่านไปยังแผ่นกระจายก๊าซเพื่อเข้าสู่ฟลูอิดไชเบค รอบๆฟลูอิดไชเบคจะมีเตาให้ความร้อนจำนวน 5 ตัวประกอบอยู่ เพื่อให้ก๊าซภายในปฏิกรณ์ร้อน บริเวณเหนือปฏิกรณ์จะมีสกรูป้อนพลาสติก บริเวณระหว่างสกรูป้อนพลาสติกและปฏิกรณ์จะมีน้ำหล่อเย็นเพื่อป้องกันไม่ให้ความร้อนจากด้านบนของปฏิกรณ์ไปทำให้พลาสติกในสกรูป้อนหลอมเหลวติดกับตัวสกรู ก๊าซร้อนที่

ออกจากปฏิกรณ์ มีการวัดอัตราการไหลซึ่งติดตั้งอุปกรณ์วัดอัตราการไหลไว้ 3 ตำแหน่งด้วยกันคือ ตำแหน่งที่ก๊าซร้อนออกจากปฏิกรณ์ก่อนเข้าหน่วยควบแน่นที่ 1 และตำแหน่งที่ก๊าซร้อนเข้าหน่วยควบแน่นที่ 2 และตำแหน่งที่ก๊าซออกจากหน่วยควบแน่นเล็ก

1.1 เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิส

เครื่องปฏิกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสเพื่อใช้ในการแตกสลายด้วยความร้อน ทำหน้าที่ให้ความร้อนกับพอลิพรอฟิลีน ภายใต้สภาวะปราศจากอากาศเพื่อให้โครงสร้างของพอลิพรอฟิลีนแตกสลายกลายเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลสั้นลงและมักอยู่ในรูปของไอไฮโดรคาร์บอน อุปกรณ์นี้มีลักษณะเป็นทรงกระบอกทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม 306 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6.72 เซนติเมตร และมีความสูง 150 เซนติเมตร ด้านล่างของปฏิกรณ์มีแผ่นกระจายก๊าซเพื่อป้องกันก๊าซเข้าสู่ปฏิกรณ์ในปฏิกรณ์จะบรรจุด้วยทราย 2 ขนาดแล้วแต่สภาวะการทดลองคือขนาด 120-150 ไมครอน และ 300-350 ไมครอน จำนวน 0.5 กิโลกรัม สูงจากแผ่นกระจายก๊าซ 7.5 เซนติเมตร เพื่อใช้เป็นตัวช่วยแลกเปลี่ยนความร้อน การให้ความร้อนจะทำจากภายนอกด้วยเตาให้ความร้อนที่หุ้มทรงกระบอกโดยรอบ การวัดอุณหภูมิในเครื่องปฏิกรณ์ใช้เทอร์โมคัปเปิ้ลชนิด K ตลอดแนวความสูงของปฏิกรณ์ และสัญญาณจะถูกส่งไปยังเครื่องควบคุมอุณหภูมิแบบ PID ที่ติดตั้งไว้แต่ละจุดของปฏิกรณ์เพื่อควบคุมให้ได้อุณหภูมิตามต้องการ



ภาพที่ 13 ระบบไพโรไลซิส

1.2 การออกแบบระบบให้ความร้อน

ระบบการให้ความร้อนในงานวิจัยนี้ ได้ทำการออกแบบเตาให้ความร้อนโดยใช้คอนกรีตทนไฟเป็นผนังเตาที่สามารถทนไฟได้ถึง $1,700^{\circ}\text{C}$ เกลงในแบบหล่อปูน จากนั้นใส่ลวดให้ความร้อนไว้ภายในช่องที่ได้หล่อไว้ ปฏิกิริยาที่ใช้ในการทดลองนี้มีการใช้เตาให้ความร้อนจำนวน 5 ชุด แต่ละชุดลวดความร้อนในเตาต่อแบบขนานและมีการควบคุมอุณหภูมิของเตาทุกตัวเพื่อให้อุณหภูมิภายในปฏิกิริยาตามที่ต้องการตลอดความสูงของปฏิกิริยา

ในการออกแบบระบบให้ความร้อนโดยใช้ลวดนิโครม จำนวนวัตต์ของลวดที่ใช้ต้องสัมพันธ์กับ ปริมาณความร้อนที่ใช้ในการแตกตัวของพอลิพรอพิลีน ที่หามาจากการวิเคราะห์โดยใช้

เครื่อง simultaneous DSC-TGA analyzer จะพบว่าอุณหภูมิที่ใช้ไม่ควรต่ำกว่า 500 °ซ (จะแสดงในบทผลการทดลอง) ดังนั้นการออกแบบเตาในที่นี้ควรสามารถเพิ่มให้ก๊าซมีอุณหภูมิมากถึง 500 °ซ ได้ สมการที่ใช้คำนวณหาจำนวนวัตต์ของลวดนิโครมแสดงในสมการที่ 1

$$Q = (\dot{m} C_p \Delta T)_{N_2} + (\dot{m} c_p \Delta T)_{pp} + \Delta H_{pp} \quad (1)$$

โดยที่ $\dot{Q}$ คือ ปริมาณความร้อนที่ให้เตาเพื่อเพิ่มอุณหภูมิของก๊าซร้อนให้ร้อนขึ้น (J/s)

$\dot{m}$ คือ อัตราการไหล (kg/s)

c_p คือ ความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kgK)

ΔT คือ อุณหภูมิที่แตกต่างของสารที่เข้าและออกจากปฏิกรณ์ (°ซ)

ΔH_{pp} คือ Heat of pyrolysis ของพอลิพรอพิลีนที่ 473.43 °C มีค่าเท่ากับ 601.7 J/g (180.51 MJ/mol)

สำหรับแก๊สไนโตรเจนจากข้อมูลการคำนวณหาอัตราการป้อนแก๊สไนโตรเจนที่ใช้พองเม็ดทรายและเม็ดพลาสติกซึ่งมีค่าเท่ากับ 13.41 g/s, $c_p = 1.088 \text{ J/g} \cdot ^\circ\text{C}$ และ $\Delta T = 473.43 - 30 = 443.43^\circ\text{C}$ จะได้ $\dot{Q} = 6.47 \text{ kJ/s}$

ส่วนอัตราการป้อนเม็ดพลาสติกพอลิพรอพิลีน มีค่าเท่ากับ 2 kg/min, $c_p = 1.6 \text{ J/g} \cdot ^\circ\text{C}$ และ $\Delta T = 473.43 - 30 = 443.43^\circ\text{C}$ ดังนั้นจะได้ $\dot{Q} = 1.18 \text{ kJ/s}$

Heat of pyrolysis ของพอลิพรอพิลีนที่ 473.43 °ซ มีค่าเท่ากับ 601.7 J/g (180.51 MJ/mol) จะได้ $\dot{Q} = 1.00 \text{ kJ/s}$

ในงานวิจัยนี้ปริมาณความร้อนที่ทำให้ไนโตรเจนร้อนขึ้นคำนวณได้จากสมการที่ 1 ซึ่งเป็นก๊าซป้อนเข้าไปเพื่อทำให้ก๊าซไนโตรเจนร้อนขึ้น โดยมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาพบว่าต้องใช้ลวดที่มีกำลัง 8.65 กิโลวัตต์ แต่เมื่อพิจารณาระบบจริงซึ่งต้องมีพลังงานความร้อนที่สูญเสียไปและเพื่อให้พลาสติกร้อนขึ้นพร้อมทั้งความร้อนเพื่อทำปฏิกิริยาจึงได้เพิ่มกำลังความร้อนเป็น 10 กิโลวัตต์ โดยมีการใช้เตาทั้งหมด 5 ชุด ชุดละ 2 กิโลวัตต์ และทำการทดสอบอุณหภูมิเพื่อให้ได้อุณหภูมิที่ต้องการ

1.3 การออกแบบระบบควบแน่น

ระบบควบแน่นที่ใช้ในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกันคือ หน่วยควบแน่นใหญ่ และหน่วยควบแน่นเล็ก การเก็บผลิตภัณฑ์ของเหลวเพื่อนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบจะเก็บจากหน่วยควบแน่นเล็ก ส่วนหน่วยควบแน่นใหญ่จะใช้เป็นหน่วยหลักในการเก็บน้ำมันปิโตรเลียมที่ได้จากการแตกตัวของพอลิพรอฟิลีนเพื่อนำไปใช้งาน โดยในหน่วยควบแน่นใหญ่นี้ต้องทำการคำนวณปริมาณน้ำหล่อเย็นเพื่อให้เกิดการควบแน่นสมบูรณ์ ซึ่งข้อมูลการหาปริมาณน้ำหล่อเย็นแสดงในสมการที่ 2 ในที่นี้จะไม่คำนึงถึงปริมาณก๊าซผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น

พลังงานความร้อนที่ก๊าซคายความร้อน = พลังงานความร้อนที่น้ำหล่อเย็นได้รับ

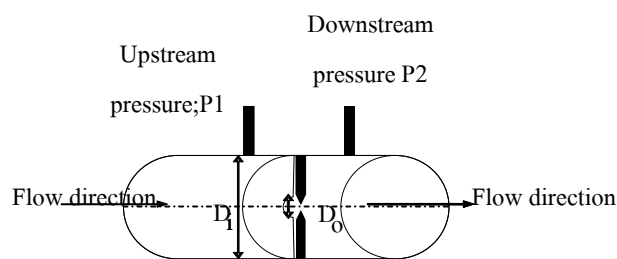
$$\dot{m}_1 c_{p1} \Delta T_1 = \dot{m}_2 c_{p2} \Delta T_2 \quad (2)$$

โดยที่ $\dot{m}_1$ คือ อัตราการไหลของไนโตรเจนในปฏิกิริยา (kg/s)
 c_{p1} คือ ความจุความร้อนจำเพาะของไนโตรเจน (kJ/kgK)
 ΔT_1 คือ อุณหภูมิที่แตกต่างของไนโตรเจนที่เข้าและออกจากเครื่องควบแน่น
 $\dot{m}_2$ คือ อัตราการไหลของน้ำหล่อเย็น (kg/s)
 c_{p2} คือ ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (kJ/kgK)
 ΔT_2 คือ อุณหภูมิที่ของน้ำที่เข้าและออกของน้ำจากหน่วยควบแน่น

ถ้าป้อนก๊าซไนโตรเจนด้วยอัตรา 13.41 กรัม/วินาทีโดยก๊าซไนโตรเจนเข้าที่เข้าหน่วยควบแน่นใหญ่ 200 °ซ และออกจากหน่วยควบแน่นใหญ่ให้ได้อุณหภูมิประมาณ 30 °ซ พบว่าต้องใช้ปริมาณน้ำหล่อเย็นที่ใช้ในหน่วยควบแน่น คือ 23 กรัม/วินาที ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงต้องทำการควบคุมปริมาณน้ำหล่อเย็นในหน่วยควบแน่นใหญ่ซึ่งต้องปรับวาล์วของน้ำหล่อเย็นที่เข้าหน่วยควบแน่นใหญ่เพื่อให้มีอัตราการไหลของน้ำหล่อเย็นอย่างน้อย 23 กรัม/วินาที เพื่อให้ปริมาณน้ำหล่อเย็นในหน่วยควบแน่นมีค่าใกล้เคียงกับที่คำนวณได้

1.4 การวัดอัตราการไหลของก๊าซ

ผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซที่ออกมาจากปฏิกรณ์จะทำการวัดอัตราการไหล โดยใช้ออร์ฟิกลเป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดอัตราการไหล ดังภาพที่ 14 ซึ่งได้มีการติดตั้งอุปกรณ์วัดอัตราการไหลไว้ 3 จุดควบแน่นชุดเล็ก จุดที่ 3 ติดตั้งที่ทางออกของแก๊ส หลังออกจากเครื่องควบแน่นชุดเล็ก ดังภาพที่ 14 จากภาพที่ 14 มีการวัด อุณหภูมิและความดัน เพื่อใช้คำนวณหาอัตราการไหลของสาร



ภาพที่ 14 องค์ประกอบออร์ฟิกล

ในภาพที่ 14 สามารถหาอัตราการไหลที่เหมาะสมคำนวณจากสมการที่ 3

$$q = C_d A_2 \left[\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho \left(1 - \left(\frac{D_i}{D_o} \right)^4 \right)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

โดยที่ q คือ อัตราการไหลที่เหมาะสมของก๊าซ (m^3/s)

C_d คือ discharge coefficient

D_i คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อก่อนเข้าออร์ฟิกล (m^2)

D_o คือ พื้นที่หน้าตัดของรูเล็ก (m^2)

P_1 คือ ความดันขาเข้า (N/m^2)

P_2 คือ ความดันขาออก (N/m^2)

ρ คือ ความหนาแน่นของก๊าซ (kg/m^3)

การออกแบบ แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือออร์ฟีกที่ออกจากปฏิกรณ์ และก่อนเข้าหน่วยควบแน่นเล็ก โดยอัตราการไหลที่ออกจากปฏิกรณ์อยู่ในช่วง 0.7-4.92 กรัม/วินาที ดังนั้นต้องใช้เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 2.54 เซนติเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเล็ก 0.7 เซนติเมตร ส่วนอัตราการไหลของหน่วยควบแน่นเล็กอยู่ในช่วง 0.14-0.7 กรัม/วินาที ดังนั้นต้องใช้เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 2.54 เซนติเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเล็ก 0.3 เซนติเมตร

1.5 วิธีการไพโรไลซิส

นำพลาสติกชนิดโพลิพรอพิลีน จากบริษัทบริษัท ทีพีโอโพลีน จำกัด (มหาชน) ตามปริมาณที่ต้องการใช้ป้อนในถังเก็บพลาสติกด้านบนของปฏิกรณ์ จากนั้นทำการไล่ออกซิเจนก่อนทำปฏิกิริยาด้วยก๊าซไนโตรเจน ปรับอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนตามต้องการ ทำการให้ความร้อนกับปฏิกรณ์โดยให้ความร้อนตามอุณหภูมิที่ต้องการใช้ แล้วเริ่มทำการปล่อยโพลิพรอพิลีน เมื่อโพลิพรอพิลีนที่แตกสลายจะกลายเป็นไอผ่านไปยังหน่วยควบแน่นซึ่งจะเป็นตัวแยกผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวและก๊าซ

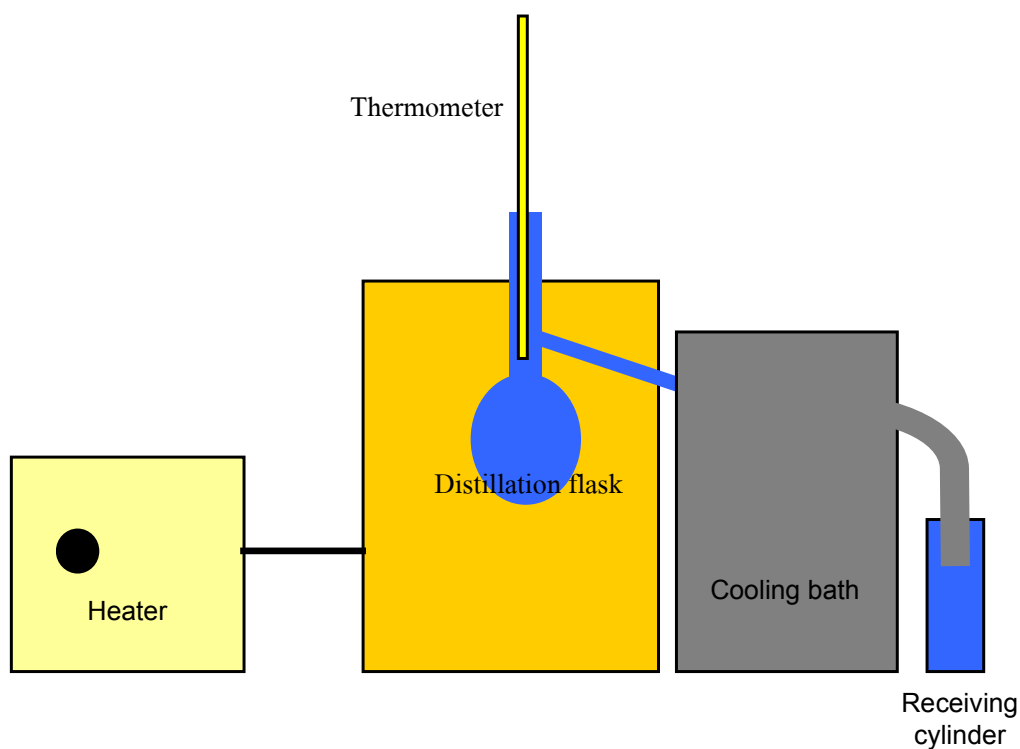
1.6 การเก็บตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว

การเก็บตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว ใช้กระบอกตวงเป็นตัวเก็บ และทำการเก็บตัวอย่างที่ด้านบนของปฏิกรณ์ ที่มีหน่วยควบแน่นอยู่จำนวนหลายชุด ชุดแรกมีการหล่อเย็นโดยใช้ น้ำที่อุณหภูมิห้อง ส่วนชุดถัดไปจะทำการหล่อเย็นโดยใช้น้ำแข็ง การพิจารณาจำนวนกระบอกตวงพิจารณาจาก กระบอกตวงสุดท้ายที่ใช้เก็บต้องไม่มีตัวอย่างของเหลวในกระบอกตวงชุดสุดท้ายเลยเพื่อให้มั่นใจว่าการควบแน่นสมบูรณ์ จากนั้นของเหลวที่เก็บได้จากกระบอกตวงทั้งหมดนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบโดยใช้เครื่องกลั่นลำดับส่วน

2. การวิเคราะห์ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว

ผลิตภัณฑ์ส่วนที่เป็นของเหลว จะนำไปกลั่นแยกเพื่อหาองค์ประกอบของน้ำมัน ซึ่งอาศัยหลักการกลั่นตามมาตรฐาน ASTM (D1078) ซึ่งแยกสารโดยใช้หลักการจุดเดือดของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ต่างกัน ดังภาพที่ 15 ซึ่งประกอบด้วยเครื่องให้ความร้อน ขวดกลั่นใช้ใส่สารตั้งต้น

และผลิตภัณฑ์ไอจะถูกควบแน่นโดยหาปริมาณของผลิตภัณฑ์ในแต่ละช่วงอุณหภูมิ ได้แก่ Gasoline (IBP-216°C), Kerosene (216-300°C), Residue (>300°C)



ภาพที่ 15 เครื่องกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม (Distillation Unit)

3. สถานะการทดลอง

งานวิจัยนี้ทำการหาสถานะที่เหมาะสมในการเปลี่ยนพลาสติกชนิดพอลิพรอพิลีน เพื่อให้ได้ปริมาณน้ำมันเบนซินสูงสุด สถานะการทดลองแบ่งได้ ดังแสดงในตารางที่ 6 โดยแบ่งช่วงการทดลองได้ดังนี้

3.1 การหาสถานะอุณหภูมิที่เหมาะสมในการแตกตัวของพอลิพรอพิลีน ด้วยเครื่องวิเคราะห์แบบเทอร์โมกราวิเมตริก เป็นการนำเม็ดพอลิพรอพิลีนมาทำให้ร้อนในที่อับอากาศภายในเครื่อง simultaneous DSC-TGA เมื่อพิจารณาน้ำหนักที่ลดลงกับอุณหภูมิ ก็สามารถทราบอุณหภูมิที่เหมาะสมในการแตกตัวของพอลิพรอพิลีนได้

3.2 ปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดที่ประกอบด้วยเตาหลายตัวที่สร้างขึ้น จะต้องมีการทดสอบการกระจายอุณหภูมิเพื่อให้อุณหภูมิในเตาสม่ำเสมอมากที่สุด ซึ่งต้องมีการวัดการกระจายอุณหภูมิตลอดแนวความสูง ถ้าอุณหภูมิไม่สม่ำเสมอจะส่งผลกับผลิตภัณฑ์ที่ได้ในการแตกตัวของพอลิพรอพิลีนได้

3.3 การทดสอบหาสภาวะการแตกตัวของพอลิพรอพิลีนในปฏิกรณ์โดยเดินเครื่องแบบกะ เป็นการทดสอบการแตกตัวของพอลิพรอพิลีนในปริมาณน้อย เพื่อทดสอบว่า ณ อุณหภูมิ 500 °ซ สามารถทำให้พอลิพรอพิลีนแตกตัวเป็นน้ำมัน โดยใส่เม็ดพอลิพรอพิลีนลงในปฏิกรณ์เพียงครั้งเดียว จากนั้นให้ความร้อน แล้วพิจารณาอุณหภูมิในช่วงที่เกิดน้ำมันปิโตรเลียม

3.4 การทดสอบหาสภาวะปริมาณของพลาสติกเมื่อทำการป้อนพลาสติกเพียงครั้งเดียว และอัตราการไหลของไนโตรเจนที่เหมาะสมต่อการแตกตัวของพอลิพรอพิลีน โดยทำการใส่พอลิพรอพิลีนในน้ำหนักที่แตกต่างกันลงในปฏิกรณ์ที่ทำการให้ความร้อนแล้ว แล้วพิจารณาผลของน้ำหนักของพลาสติกที่มีผลต่ออุณหภูมิในเตาที่ใช้แตกตัวของพอลิพรอพิลีน

3.5 การทดสอบสภาวะที่เหมาะสมในปฏิกรณ์จริง ต่อการแตกตัวของพอลิพรอพิลีน โดยการทดสอบอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนอยู่ในช่วง ปฏิกรณ์เบดนิ่ง และ ปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบด จากนั้นโดยพิจารณาอุณหภูมิในเตาว่าเหมาะสมต่อการเปลี่ยนพอลิพรอพิลีนเป็นน้ำมันปิโตรเลียม

3.6 การทดสอบในสภาวะที่ป้อนพลาสติกเป็นอย่างต่อเนื่อง โดยที่ช่วงของอุณหภูมิยังอยู่ในช่วงที่พอลิพรอพิลีนแตกตัวเป็นน้ำมันปิโตรเลียมได้ โดยทำการแบ่งพอลิพรอพิลีน และป้อนลงไปนปฏิกรณ์ในปริมาณน้อยแล้วหยุดป้อนเป็นจังหวะ ตามเวลาที่กำหนดไว้

3.7 การทดสอบหาอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการแตกตัวของพอลิพรอพิลีนในสภาวะเบดนิ่ง และฟลูอิด์เบด โดยทำการกำหนดอุณหภูมิไว้ในแต่ละตำแหน่งแตกต่างกัน ซึ่งสภาวะการทดลองแสดงในตารางที่ 6

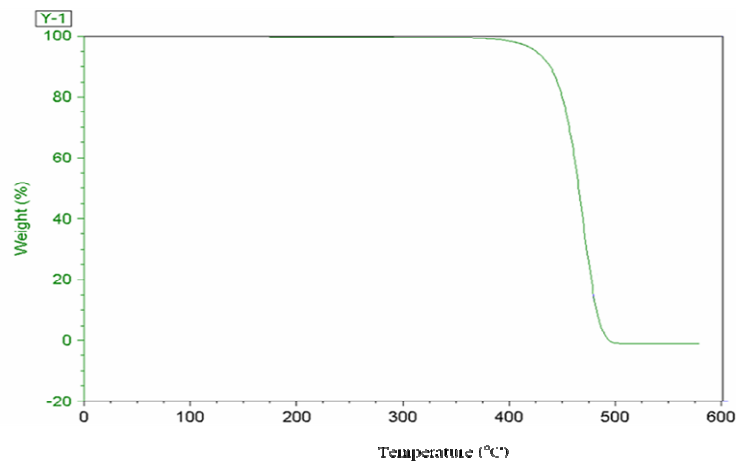
ตารางที่ 6 สภาวะการทดลอง

ที่	สภาวะการทดลอง	อุณหภูมิที่กำหนด (°C)	อัตราการไหล ไนโตรเจน (กิโลกรัม/ชั่วโมง)	ปริมาณพอลิ พรอพิลีน (กรัม)	หมายเหตุ			
1	การแตกตัวด้วยเครื่องเทอร์มอลกราฟิเมตริก	20°ซ/นาที่	0.12	10-20				
2	การทดสอบอุณหภูมิภายในปฏิกิริณั้	500	7.24	-	ไม่มีการป้อน พอลิพรอพิลีน			
3	การแตกตัวของพอลิพรอพิลีน ในปฏิกิริณั้แบบกะ	500	0.13	50				
4	การหาปริมาณพลาสติกป้อนที่เหมาะสม	500	3.64	50, 100, 200, 500				
5	การแตกตัวในปฏิกิริณั้แบบฟลูอิดไค้ซ์เบด ที่เดินในสภาวะแบบเบดนั้ง	500	0.26	100				
			0.34	100				
			3.64	100				
	การแตกตัวในปฏิกิริณั้แบบฟลูอิดไค้ซ์เบด ที่เดินในสภาวะแบบฟลูอิดไค้ซ์เบด	500	7.24 9.40	500 500				
6	การหาปริมาณพลาสติกป้อนที่เหมาะสมในการ ป้อนพลาสติกแบบป้อนและหยุดเป็นจ้งหะ ต่อเนื่องในสภาวะเบดนั้ง	500	7.24	200* 100 50	*ปริมาณ พลาสติกต่อ 1 รอบ			
7	การแตกตัวในปฏิกิริณั้แบบฟลูอิดไค้ซ์เบดที่เดิน ในสภาวะแบบเบดนั้ง เมื่อทำการป้อนและหยุด ป้อนเป็นจ้งหะต่อเนื่อง เมื่อมีการควบคุม อุณหภูมิต่างกััน	ที่ความสูง (cm)				7.24	50*	*ปริมาณ พลาสติกต่อ 1 รอบ
		0	40	90	140			
		450						
		450	430	430	430			
		450	430	400	400			
		450	430	150	300			
8	การแตกตัวในปฏิกิริณั้แบบฟลูอิดไค้ซ์เบดใน สภาวะแบบฟลูอิดไค้ซ์เบด มีการป้อนและหยุด เป็นจ้งหะต่อเนื่อง เมื่อควบคุมอุณหภูมิต่างกััน	ที่ความสูง (cm)				9.40 (1.3 Umf plastic) 10.85 (1.5 Umf plastic)	50*	*ปริมาณ พลาสติกต่อ 1 รอบ
		0	40	90	140			
		450						
		450	450	150	450			

ผลการทดลอง

1. การทดลองการแตกโมเลกุลของพอลิพรอพิลีนโดยใช้เทคนิควิเคราะห์เทอร์โมกราวิเมตริก

ภาพที่ 16 แสดงน้ำหนักของพอลิพรอพิลีนที่หายไปจากการแตกโมเลกุลโดยใช้เครื่อง simultaneous DSC-TGA โดยมีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 20°C ต่อนาที พบว่ามีการหายของน้ำหนักพอลิพรอพิลีนจากการแตกโมเลกุลอยู่ในช่วง $350\text{--}500^{\circ}\text{C}$ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นในช่วงแรกที่ $0\text{--}363^{\circ}\text{C}$ น้ำหนักของพอลิพรอพิลีนยังไม่เปลี่ยนแปลง แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้น พบว่าน้ำหนักของพอลิพรอพิลีนเริ่มลดลงอย่างช้า ๆ ตามลำดับ และลดลงอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิ $405\text{--}480^{\circ}\text{C}$ จนเมื่ออุณหภูมิ 491°C จะไม่พบน้ำหนักของพอลิพรอพิลีนอยู่เลย ดังนั้นในการทดลองการแตกตัวควรจะทำปฏิกิริยาอย่างน้อยที่ 363°C



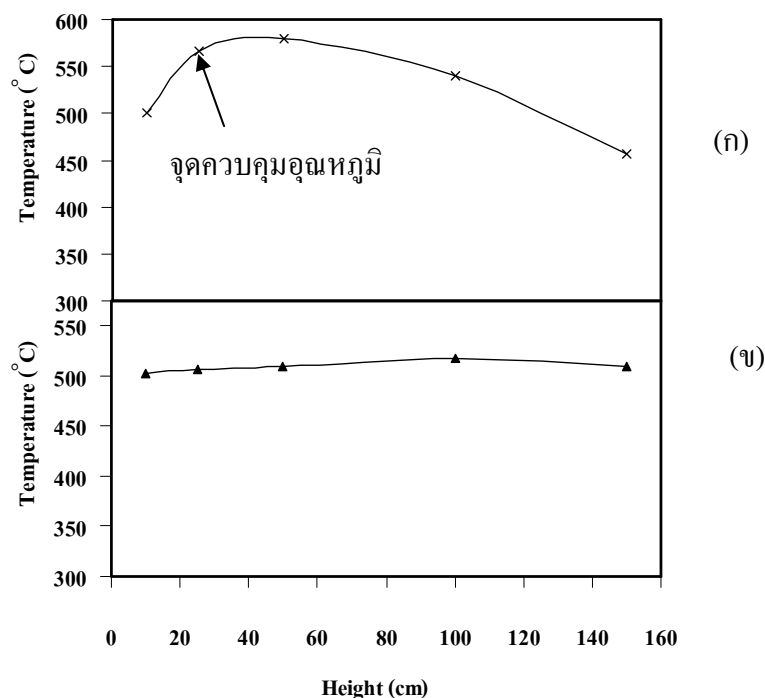
ภาพที่ 16 การหายไปของน้ำหนักพอลิพรอพิลีนที่เกิดการแตกโมเลกุลโดยเครื่อง simultaneous DSC-TGA เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน

2. การทดสอบอุณหภูมิภายในปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดไพโรไลซิส

การศึกษาหลักการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไชน์เบด พบว่าอุณหภูมิที่ใช้ภายในเครื่องปฏิกรณ์มีผลต่อการแตกตัวของพอลิพรอฟิลีนเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำมัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงต้องทำการปรับปรุงส่วนให้ความร้อน ให้ได้อุณหภูมิที่เหมาะสมภายในปฏิกรณ์ เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการแตกโมเลกุลของพอลิพรอฟิลีน เกิดเป็นน้ำมันปิโตรเลียมสูงสุด

การทดสอบผลของอุณหภูมิ โดยได้ทำการควบคุมอุณหภูมิ ที่จุดเหนือจากแผ่นกระจายก๊าซ 10 ซม. เพียงจุดเดียวเมื่อวัดอุณหภูมิตามความสูงของปฏิกรณ์ พบว่าค่าของอุณหภูมิมิค่าไม่คงที่ แตกต่างกันทั้งความสูงของปฏิกรณ์ พบว่า ณ จุดที่ทำการควบคุมคือ ที่ความสูง 25 เซนติเมตรนับจากเหนือแผ่นกระจายก๊าซ เมื่อวัดอุณหภูมิพบว่ามีความใกล้เคียงกับที่ตั้งไว้คือ 550°C แต่บริเวณต่ำและเหนือจุดควบคุมมีอุณหภูมิตดลง และยังมีอุณหภูมิไม่สูงเพียงพอต่อการแตกตัวของพอลิพรอฟิลีนดังภาพที่ 17 (ก) จึงได้มีการปรับปรุงส่วนให้ความร้อนของปฏิกรณ์โดยมีการเพิ่มเตาให้ความร้อนในส่วนที่เกิดปฏิกิริยา และเพิ่มจุดควบคุมอุณหภูมิที่ห่างจากแผ่นกระจายก๊าซไป 50, 100 และ 150 เซนติเมตร ตามลำดับ ภาพที่ 17 (ข) แสดงให้เห็นว่า อุณหภูมิมีค่าคงที่ตลอดความสูงของปฏิกรณ์ อีกทั้งยังสูงเพียงพอต่อการแตกตัวของพอลิพรอฟิลีน

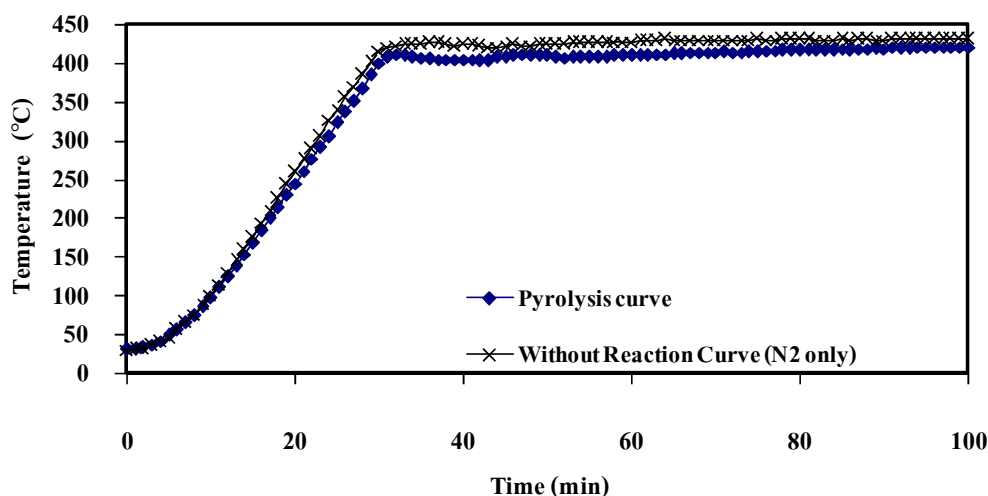
ในการทดสอบเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไชน์เบดไพโรไลซิส เมื่อทำการเร่งอัตราการไหลของไนโตรเจน มีผลทำให้อุณหภูมิภายในปฏิกรณ์ลดลงจากก่อนที่เพิ่มอัตราการไหล ดังนั้นก่อนการทดลองจึงต้องรอจนกระทั่งอุณหภูมิคงที่ แล้วจึงจะทำการปล่อยพอลิพรอฟิลีน เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของไนโตรเจน อุณหภูมิ ณ ส่วนล่างของปฏิกรณ์จะลดลง จากนั้นเมื่อเวลาผ่านไป จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนอุณหภูมิขึ้นถึงที่ตั้งไว้ที่ 500°C และคงที่ตลอดความสูง โดยเวลาที่ใช้จนอุณหภูมิคงที่ตลอดความสูง ประมาณ 20 นาที



ภาพที่ 17 ความสัมพันธ์อุณหภูมิกับความสูงเมื่อควบคุมอุณหภูมิ (ก) ณ จุดเริ่มต้น (ข) เพิ่มจุดควบคุม อุณหภูมิและเตาให้ความร้อน

3. การทดลองการแตกตัวของพอลิพรอพิลีนโดยเดินเครื่องแบบกึ่งเฉพาะงวด

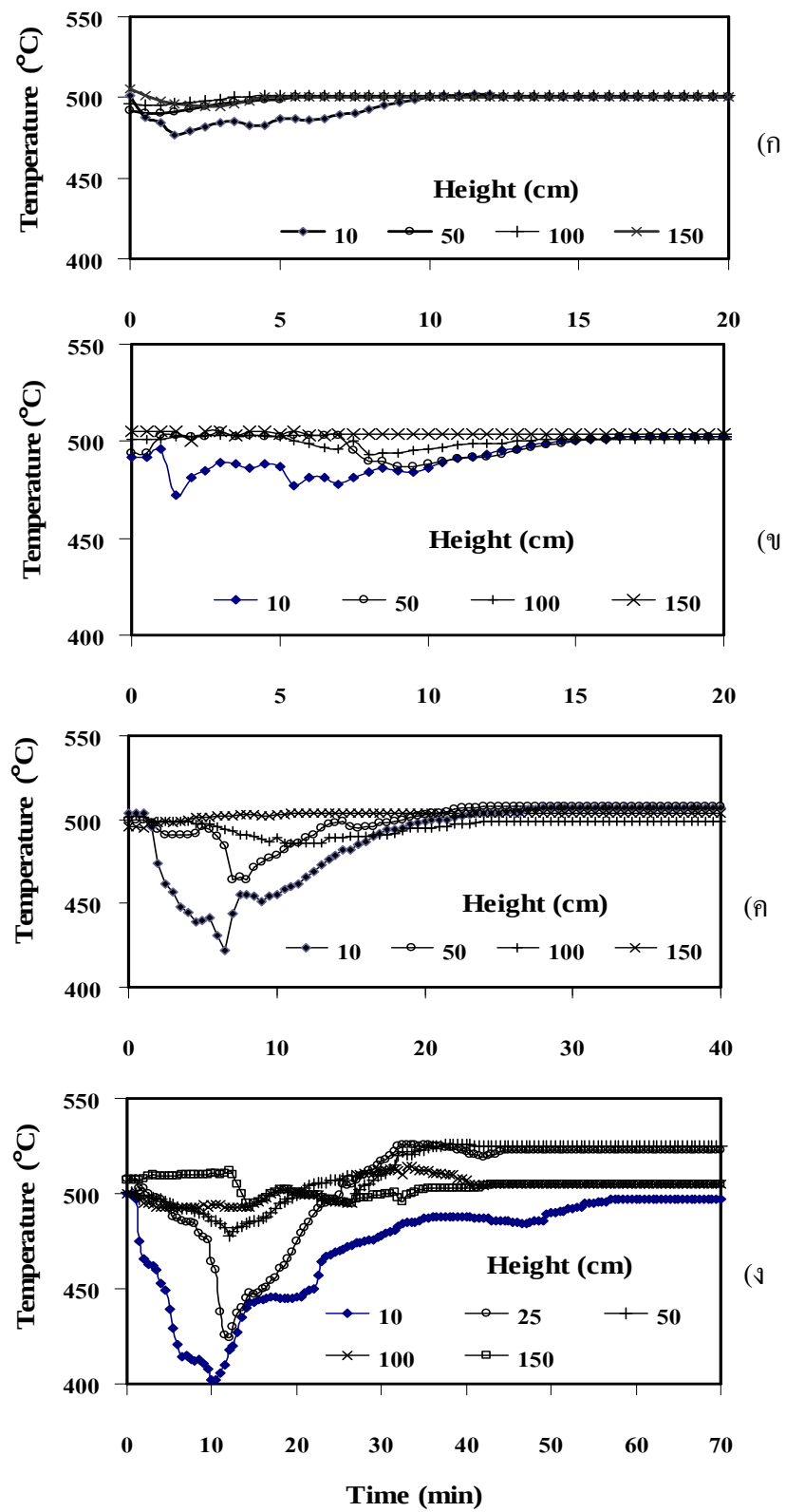
การทดสอบการแตกตัวของพอลิพรอพิลีนได้ทำการทดสอบในปฏิกรณ์ขนาดเล็กแบบกึ่งเฉพาะงวด โดยปฏิกรณ์ที่ใช้ทำในปฏิกรณ์แบบกะ มีอัตราการไหลของไนโตรเจน 0.13 กิโลกรัม/ชั่วโมง ใช้จำนวนพอลิพรอพิลีน 50 กรัม และทำการควบคุมอุณหภูมิโดยใช้หม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าความต่างศักย์ แทนการควบคุมด้วยตัวควบคุมอุณหภูมิ เพื่อพิจารณาการลดลงของอุณหภูมิเป็นผลมาจากการแตกตัวของพอลิพรอพิลีน ไม่เกี่ยวกับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ควบคุมโดยตัวควบคุมอุณหภูมิ ในภาพที่ 18 พบว่าอุณหภูมิในระบบที่มีการแตกตัวของพอลิพรอพิลีนต่ำกว่ากราฟอุณหภูมิเมื่อไม่มีการเติมพลาสติก แสดงว่าการแตกตัวของพอลิพรอพิลีนเป็นปฏิกิริยาในการดูดความร้อน ต้องอาศัยความร้อนในการแตกตัว ในเมื่อเดินเครื่องโดยไม่มีพลาสติกอุณหภูมิเตาอยู่ในช่วง 440 °ซ ในการทดลองในปฏิกรณ์แบบกะพบว่าเมื่อไม่มีการปรับความร้อนของเตาอุณหภูมิในระบบที่มีการแตกตัวของพอลิพรอพิลีนเพื่อกลายเป็นน้ำมันปิโตรเลียมตกลงไปเป็นช่วง 405-410 °ซ ในช่วงระยะเวลา 36-59 นาที



ภาพที่ 18 อุณหภูมิที่ใช้ในการแตกตัวของพอลิพรอพิลีนในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งเฉพาจะวด

4. ผลของปริมาณการป้อนพอลิพรอพิลีนกับอุณหภูมิภายในปฏิกรณ์

การทดลองนี้จะทำการป้อนพอลิพรอพิลีนในปริมาณที่แตกต่างกัน โดยใส่ลงไปทีละน้ำหนัก 50, 100, 200 และ 500 กรัม ณ อัตราการไหลในโตรเจน 3.64 กิโลกรัม/ชั่วโมง (0.5 เท่าของอัตราเร็วต่ำสุดเพื่อเกิดฟลูอิดไชน์ของเม็ดพลาสติก) จากนั้นบันทึกอุณหภูมิที่ลดลงกับเวลาเมื่อทำการป้อนพอลิพรอพิลีนที่ใส่ในปฏิกรณ์แล้ว จากภาพที่ 19 พบว่าเมื่อเติมพลาสติก 50 กรัม อุณหภูมิเหนือแผ่นกระจายก๊าซ 10 ซม. จะลดลงเล็กน้อยเนื่องจากการสูญเสียความร้อนจำนวนหนึ่งให้กับพลาสติกป้อนที่มีอุณหภูมิห้อง นอกจากนี้ความร้อนจะสูญเสียไปเพื่อทำปฏิกิริยาเมื่อปฏิกิริยาเกิดหมดพบว่าอุณหภูมิจะเริ่มสูงขึ้นและเริ่มเท่ากับที่อุณหภูมิเมื่อระบบยังไม่ได้เติมพลาสติก ส่วนบริเวณเหนือแผ่นกระจายก๊าซ (ตำแหน่งสูงจากแผ่นกระจายก๊าซ 50, 100 และ 150 เซนติเมตร) จะพบว่าอุณหภูมิแทบจะไม่เปลี่ยนแปลงเลยตลอดเวลา เนื่องจากพลาสติกจำนวนน้อยที่ป้อนเข้ามาจะตกลงมาอยู่ที่บริเวณใกล้แผ่นกระจายก๊าซเท่านั้น จึงทำให้บริเวณเหนือขึ้น ไปมีอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อพลาสติกป้อนมากขึ้นเป็น 100, 200 และ 500 กรัม จะพบว่าอุณหภูมิในบริเวณเหนือแผ่นกระจายก๊าซลดลงจาก 500 °ซ ไปเป็น 426, 416 และ 402 °ซ ตามลำดับ การป้อนพลาสติกยิ่งมากขึ้นไปก็ต้องใช้ความร้อนในการเพิ่มอุณหภูมิของพลาสติกมากขึ้น และความร้อนในการทำปฏิกิริยามากขึ้น จึงทำให้อุณหภูมิของระบบลดลงมาก ในระบบที่มีปริมาณของพลาสติกมากขึ้นจะทำให้ชั้นของพลาสติกในระบบสูง และทำให้เกิดปฏิกิริยาในบริเวณสูงขึ้นไป จึงทำให้บริเวณเหนือขึ้นมีอุณหภูมิลดลง ในภาพที่ 19 (ก) บริเวณ 50, 100 และ 150 เซนติเมตร ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ แต่ภาพที่ 19 (ง) จะพบว่าทุกบริเวณมีอุณหภูมิลดลงในช่วงเวลาการเกิดปฏิกิริยา

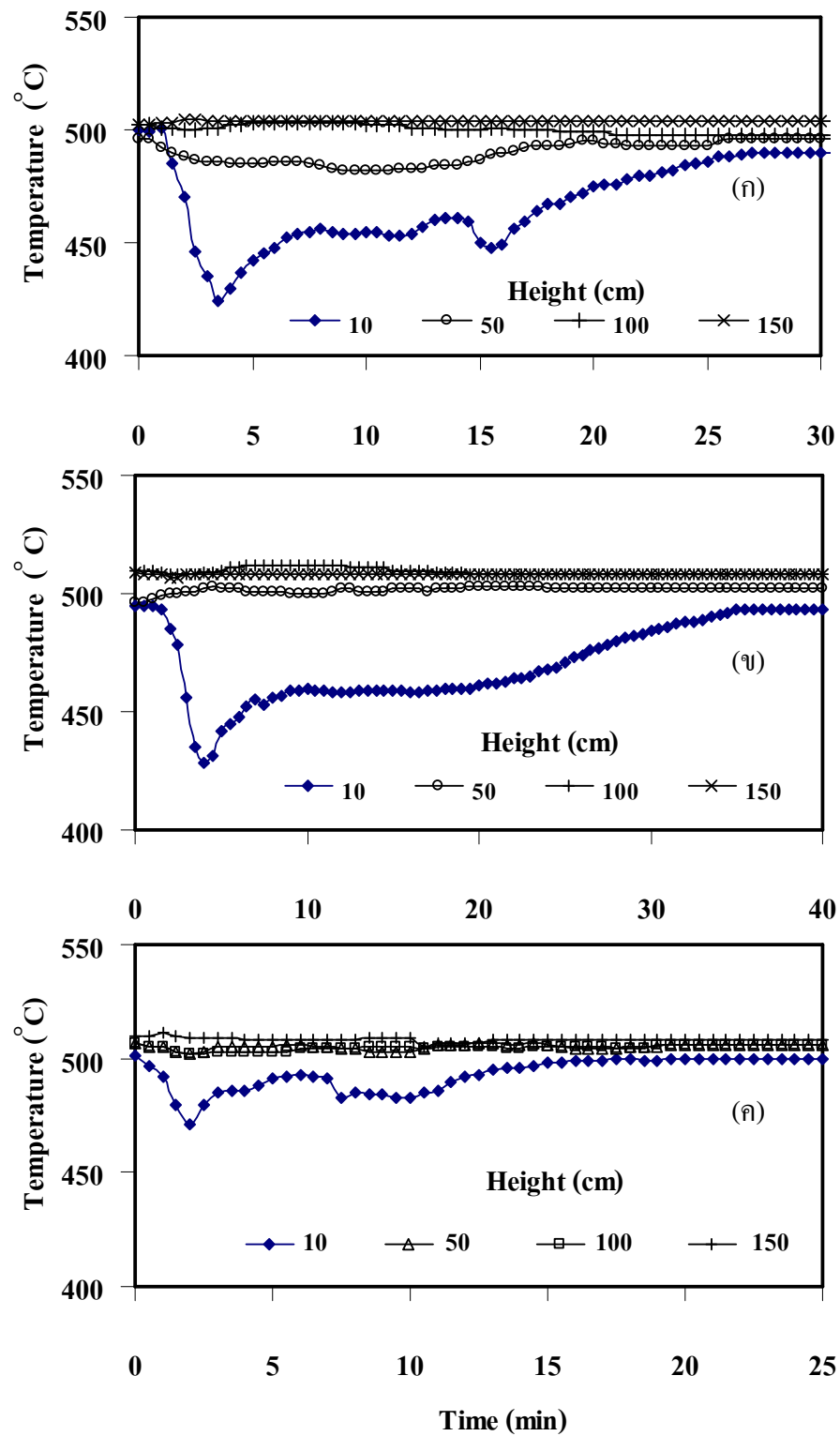


ภาพที่ 19 อุณหภูมิที่เปลี่ยนไปเมื่อใส่ฟอลิพรอฟิลีน (ก) 50, (ข) 100, (ค) 200 และ (ง) 500 กรัม ตามลำดับ

5. ผลของอัตราการไหลของไนโตรเจนในสถานะเบดนิ่งที่มีต่อการแตกตัวของพอลิพรอพิลีน

เมื่อเดินเครื่องด้วยอัตราเร็วต่ำกว่าความเร็วต่ำสุดของฟลูอิไดซ์เบด (Minimum Velocity for Fluidized) ของแข็งจะไม่เกิดการลอยตัว ปฏิกรณ์จะมีสภาพเป็นแบบเบดนิ่ง ในหัวข้อนี้ ทำการทดสอบที่สภาวะก๊าซความเร็วต่ำ ซึ่งเป็นสภาวะที่ต้องการความร้อนให้กับก๊าซป้อนในปริมาณน้อย ภาพที่ 20 (ก) และ (ข) อัตราการไหลของไนโตรเจน 0.26 กิโลกรัม/ชั่วโมง และ 0.34 กิโลกรัม/ชั่วโมงตามลำดับ และใช้ปริมาณพอลิพรอพิลีน 100 กรัม พบว่าอุณหภูมิที่จุดเหนือจากแผ่นกระจายก๊าซ 10 ซม. จะลดลงต่ำสุดเป็น 424 และ 428 °ซ ตามลำดับ เนื่องมาจากความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มก๊าซไนโตรเจนมีค่าไม่มาก อุณหภูมิจึงลดลงน้อยตาม จากนั้นอุณหภูมิก็อยๆเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆจนคงที่กับที่ตั้งไว้ตอนแรกพร้อมกันที่เวลา 30 นาที ส่วนที่ความสูง 50, 100 และ 150 เซนติเมตร อุณหภูมิไม่ลดลงมากเพราะปฏิกิริยาในบริเวณนั้นมีน้อย อุณหภูมิจึงไม่ลดลงมาก ส่วนปริมาณน้ำมันที่ได้ คือ 0.81 และ 0.01 กรัมตามลำดับ ปริมาณน้ำมันที่วัดได้มีปริมาณน้อยมากเนื่องจากการทดลองนี้ทำในระบบขนาดใหญ่ น้ำมันที่ได้จึงค้างอยู่ในระบบ แต่ก็ยังสามารถแสดงค่าแนวโน้มให้เห็นได้

เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของไนโตรเจนเป็น 3.64 กิโลกรัม/ชั่วโมงดังภาพที่ 20 (ค) ใช้พลาสติกจำนวน 100 กรัมพบว่าอุณหภูมิจะลดลงต่ำสุดเป็น 471 °ซ เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของไนโตรเจน จะมีการถ่ายเทความร้อนระหว่างเตาก่อนเข้าปฏิกรณ์ และแผ่นฟินที่อยู่ในปฏิกรณ์ดีขึ้น



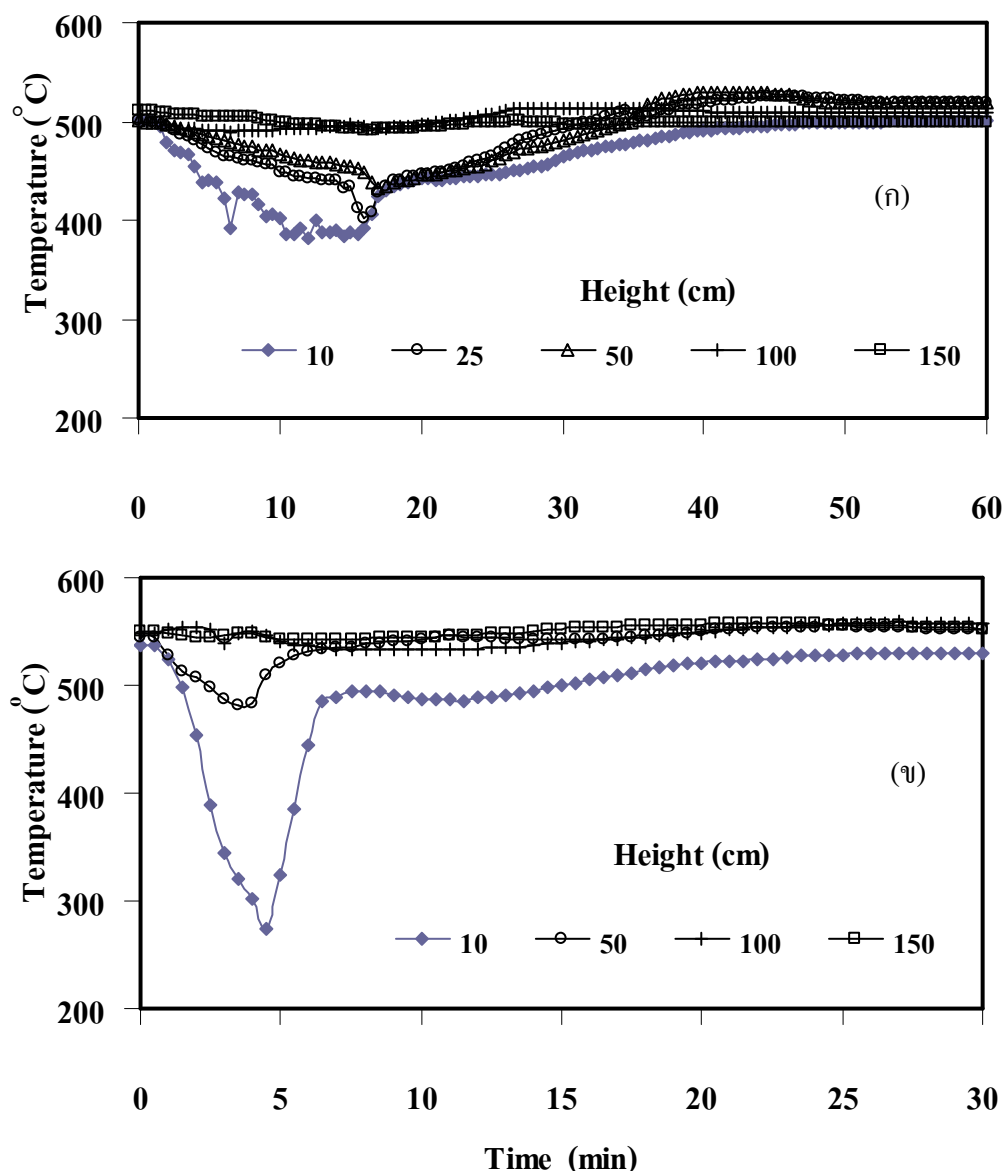
ภาพที่ 20 อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงกับเวลาเมื่อใช้อัตราการไหลไนโตรเจน (ก) 0.26 กิโลกรัม/ชั่วโมง
(ข) 0.34 กิโลกรัม/ชั่วโมง (ค) 3.64 กิโลกรัม/ชั่วโมง เม็ดพลาสติก 100 กรัม

6. การทดสอบเบื้องต้นของอิทธิพลอัตราการไหลของไนโตรเจนในช่วงที่เป็นฟลูอิดซ์เบด

การทดลองจะมีอัตราการไหลของไนโตรเจนที่ 7.24 และ 9.40 กิโลกรัม/ชั่วโมง และในอัตราการไหลนี้เป็น 1 และ 1.3 เท่าของอัตราเร็วต่ำสุดเพื่อเกิดฟลูอิดซ์เบดของเม็ดพลาสติก โดยเติมปริมาณพอลิพรอพิลีน 500 กรัม จากภาพที่ 21 (ก) และ 21 (ข) จะเห็นว่า อุณหภูมิของปฏิกรณ์ ลดลงเป็น 402 และ 382 °ซ ตามลำดับ ผลลัพธ์ที่ได้มีลักษณะเป็นผงสีขาวออกมา แสดงว่าได้ผลลัพธ์เป็นไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลสูง

การได้ไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลสูง เนื่องจากปริมาณพอลิพรอพิลีนที่ใช้มากเกินไปและเติมก๊าซในปริมาณมากเพื่อเกิดฟลูอิดซ์เบด อุณหภูมิที่ใช้ในการแตกตัวไม่สูงเพียงพอที่จะทำให้พอลิพรอพิลีนแตกตัวเป็นน้ำมันได้ ดังนั้นถ้าต้องการน้ำมันปิโตรเลียม จะต้องทำการลดอัตราการป้อนพอลิพรอพิลีนลง

ผลการทดลองในที่นี่สรุปว่าเมื่อต้องการเติมพอลิพรอพิลีนแบบต่อเนื่อง จะทำให้อุณหภูมิไม่สูงเพียงพอต่อการแตกตัวของพอลิพรอพิลีน ผลลัพธ์ที่ได้จึงเป็นไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลสูง ดังนั้นจึงต้องมีการแบ่งปริมาณการป้อนพลาสติก โดยจะทำการปล่อยพอลิพรอพิลีนในปริมาณน้อยแล้วหยุดป้อนในช่วงเวลาหนึ่งแล้วทำการป้อนใหม่อีกเช่นนี้อีกอย่างต่อเนื่อง เพื่อไม่ให้อุณหภูมิในเตาลดลงมากเกินไป ดังนั้นในหัวข้อต่อไปจะทดลองป้อนพลาสติกในปริมาณน้อยแล้วหยุดป้อนเป็นจังหวะ นั่นคือเป็นการลดอัตราการป้อนของพลาสติกนั่นเอง



ภาพที่ 21 อุณหภูมิที่เปลี่ยนไปกับเวลาเมื่อใช้อัตราการไหลของไนโตรเจน (ก) 7.26 กิโลกรัม/ชั่วโมง (1 Umf) (ข) 9.40 กิโลกรัม/ชั่วโมง (1.3 Umf) ป้อนพลาสติก 500 กรัม

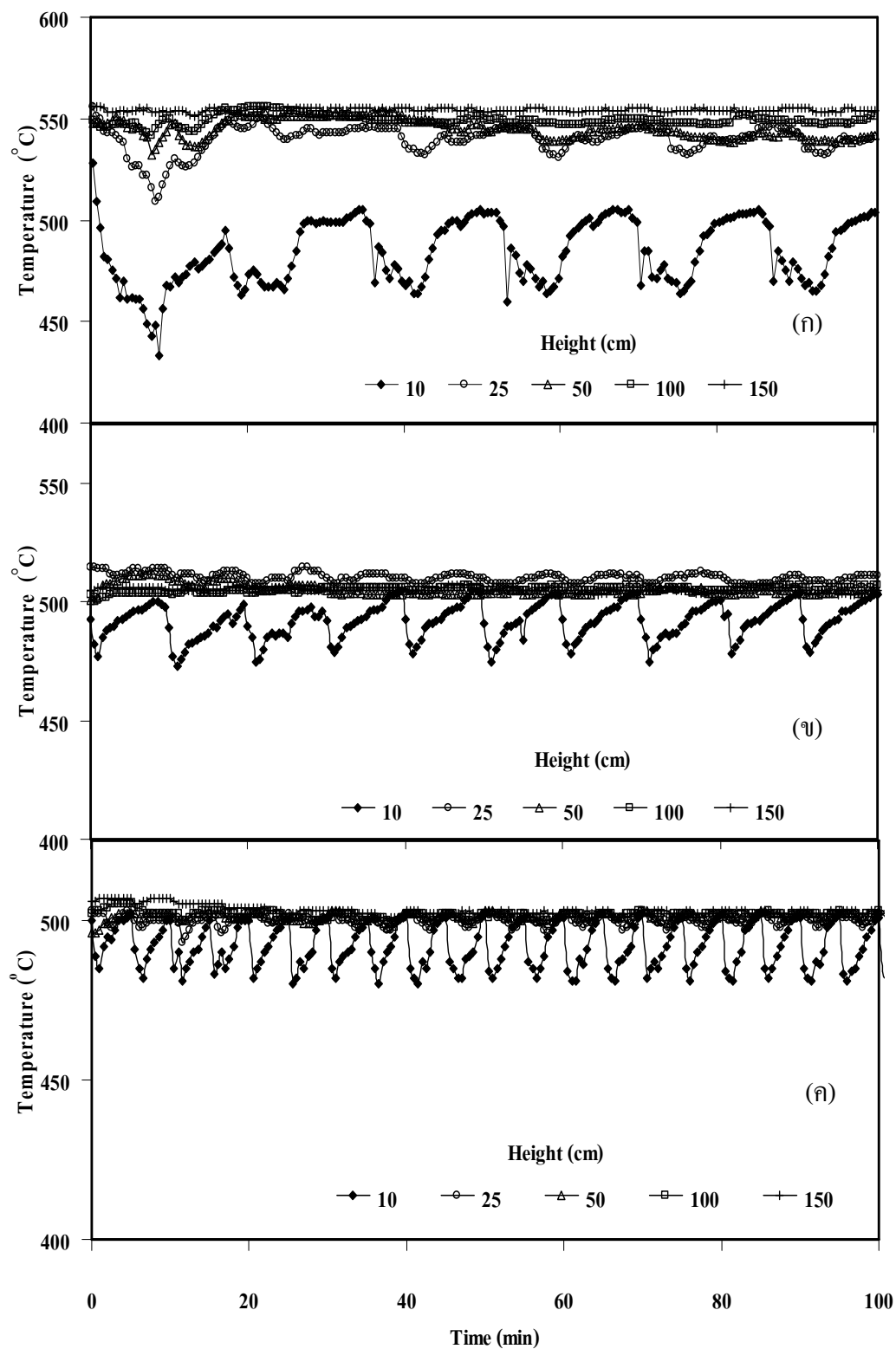
7. ผลของปริมาณการป้อนพลาสติกแบบป้อนและหยุดเป็นจังหวะต่อเนื่องในสภาวะเบดนิ่ง

การทดลองนี้ทำการปรับอัตราการไหลของไนโตรเจนที่ 7.23 กิโลกรัม/ชั่วโมง (1 เท่าของความเร็วต่ำสุดเพื่อเกิดฟลูอิดไรซ์ของเม็ดพลาสติก) ควบคุมอุณหภูมิของเตาที่ 500 °ซ เมื่อทำการป้อนพลาสติกสลับการหยุดเป็นจังหวะ จำนวน 3 เงื่อนไขการทดลอง โดยในแต่ละรอบของการป้อนจะใช้พลาสติก 200, 100 และ 50 กรัม และใช้เวลาการป้อน 2, 1 และ 0.5 นาที ตามลำดับ ผลของอุณหภูมิแสดงในภาพที่ 22 (ก)-(ค) พบว่าอุณหภูมิ ที่เนื้อแผ่นกระจายก๊าซ 10 ซม.จะลดลง

อย่างรวดเร็วจาก 500 °ซ ไปเป็น 450, 475 และ 480 °ซ เนื่องจากต้องทำให้พลาสติกร้อนขึ้นและเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวของพลาสติก เวลาที่อุณหภูมิลดลงนาน 10, 2, และ 2 นาที ตามลำดับ เมื่อพลาสติกถูกใช้หมดอุณหภูมิเพิ่มจนเป็น 500 °ซ โดยใช้เวลาในการเพิ่มอุณหภูมิ 15, 9, และ 4.5 นาที ตามลำดับ จากนั้นทำการป้อนพลาสติกและหยุดอีกครั้ง จนป้อนพลาสติกครบ 10, 10 และ 40 รอบตามลำดับ และเมื่อวัดจุดที่เนื้อแผ่นกระจายก๊าซ 50 เซนติเมตรขึ้นไป พบว่าอุณหภูมิลดลงไม่มากนักเพราะพลาสติกส่วนใหญ่จะแตกตัวที่ด้านล่างของปฏิกรณ์ บริเวณที่เนื้อขึ้นมามีพลาสติกปริมาณน้อยจึงทำให้บริเวณนั้นมีอุณหภูมิไม่เปลี่ยนแปลงเพราะมีปฏิกิริยาจากการแตกตัวของพลาสติกน้อย

เมื่อพิจารณาอุณหภูมิที่ลดของการป้อนในแต่ละรอบพบว่า เมื่อป้อน 200, 100 และ 50 กรัม อุณหภูมิลดลงเป็น 50, 25 และ 20 °ซ ตามลำดับ จากอุณหภูมิก่อนเริ่มป้อนพลาสติก (500°ซ) เห็นว่าเมื่อป้อนพลาสติกมากอุณหภูมิลดลงมาก เนื่องจากความร้อนที่สูญเสียไปในการทำให้พลาสติกร้อน เมื่อต้องการให้อุณหภูมิในเตาเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุดตลอดช่วงเวลาในการเดินเครื่องอย่างต่อเนื่อง ควรเลือกสภาวะการป้อนที่ 50กรัม ต่อรอบ เพราะเป็นช่วงที่อุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า

อย่างไรก็ตามอุณหภูมิที่ใช้ยังอยู่ในช่วงที่สูง คืออยู่ในช่วง 500-480 °ซ ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวจะอยู่จะอยู่ในรูปก๊าซ โดยเมื่อป้อนพลาสติก 50 กรัมต่อรอบ มีปริมาณของเหลวทั้งหมดเพียง 1.55 กรัม/นาที เท่านั้น ดังนั้นในหัวข้อต่อไปจะทำการศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการแตกตัว



ภาพที่ 22 อุณหภูมิกับเวลาต่อการแตกตัวของพลาสติกเมื่อทำการป้อนพลาสติกเป็นจังหวะ
 แบบต่อเนื่อง (ก) 200 กรัม (ข) 100 กรัม (ค) 50 กรัม ความเร็วก๊าซเป็น 7.23 กิโลกรัม/
 ชั่วโมง (1 Umf) อุณหภูมิตลอดปฏิกิริยาเป็น 500°ซ

8. การแตกตัวของพอลิพรอพิลีนในปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไชน์เบดในสภาวะเบดนิ่ง เมื่อทำการป้อนพอลิพรอพิลีนแบบป้อนและหยุดเป็นจังหวะต่อเนื่อง

การทดลองนี้ปรับอัตราการไหลของไนโตรเจนไว้ที่ 7.24 กิโลกรัม/ชั่วโมง (1 เท่าของอัตราเร็วต่ำสุดเพื่อเกิดฟลูอิดไชน์ของเม็ดพลาสติก) การป้อนพลาสติกเข้าปฏิกรณ์จะทำการป้อนสลับหยุดเป็นจังหวะต่อเนื่อง โดยในแต่ละรอบการป้อนทำการป้อนพลาสติก 50 กรัม ใช้เวลาการป้อน 30 วินาที การทดลองทำที่ 4 เงื่อนไข ดังแสดงในตารางที่ 7 โดยเงื่อนไขที่ 1 ทำการควบคุมอุณหภูมิ 450 °ซ ตลอดปฏิกรณ์ เงื่อนไขที่ 2 ทำการปรับอุณหภูมิที่ตำแหน่งเหนือแผ่นกระจายก๊าซ 10 ซม. เป็น 450 °ซ เท่านั้น โดยบริเวณอื่นมีอุณหภูมิเย็นลงเป็น 430 °ซ เพื่อไม่ให้ก๊าซพลาสติกแตกตัวมากเกินไปกลายเป็นสารที่เบา เช่น ก๊าซ เงื่อนไขที่ 3 ทำการลดอุณหภูมิเหนือแผ่นกระจายก๊าซ 10 ซม. ลงไปอีก เป็น 400 °ซ เงื่อนไขที่ 4 ลดอุณหภูมิเหนือแผ่นกระจายก๊าซ 100 ซม. ให้เย็นลงเป็น 150 °ซ เพื่อมิให้อุณหภูมิที่ไม่สามารถแตกตัวต่อไปอีกได้ และบริเวณใกล้ทางออกเป็น 300 °ซ ซึ่งทำให้อุณหภูมิที่ไม่แน่นอนและจุดตันที่ทางออก

ตารางที่ 7 อุณหภูมิตามความสูงของปฏิกรณ์ในสภาวะเบดนิ่ง เมื่อทำการป้อนพอลิพรอพิลีนแบบป้อนสลับการหยุดเป็นจังหวะ

การทดลองที่	ความสูง (ซม.)	การตั้งอุณหภูมิตามความสูงจากแผ่นกระจายก๊าซ (°ซ)			
		10	50	100	150
1		450	450	450	450
2		450	430	430	430
3		450	430	400	400
4		450	430	150	300

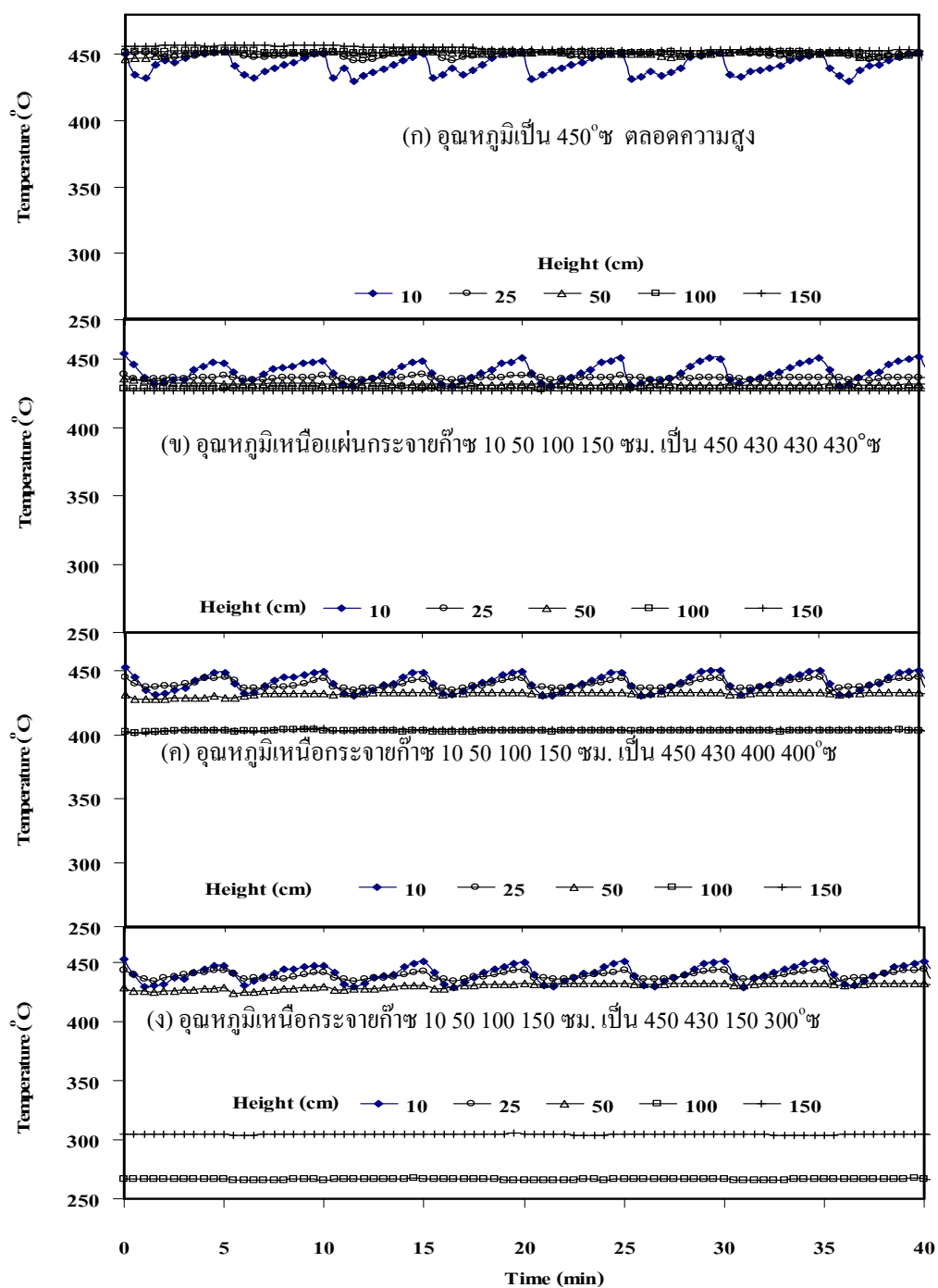
8.1 ผลของอุณหภูมิต่อการแตกตัวของพลาสติก

จากภาพ 23 (ก)-(ง) เมื่อเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิ พบว่าเมื่อเริ่มป้อนพลาสติกไป 1-2 นาทีแรกอุณหภูมิที่บริเวณป้อนก๊าซจะลดลงอย่างรวดเร็ว คือลดลงจาก 450 ไปเป็น 430 °ซ เนื่องมาจากความร้อนที่สูญเสียไปจำนวนหนึ่งให้กับพลาสติกเย็นที่มีอุณหภูมิห้อง และสูญเสียไปกับการทำปฏิกิริยา เมื่อปฏิกิริยาหมดที่เวลา 4.5 นาที (โดยดูจากกราฟอุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิเริ่ม

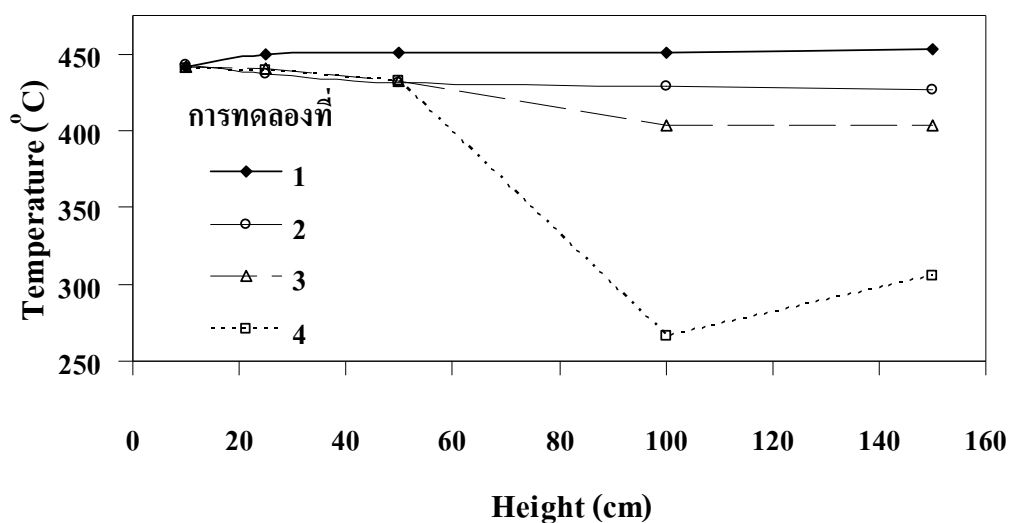
เพิ่มขึ้นกลับไปยังค่าที่ไม่มีการเติมพลาสติก) ทำการป้อนใหม่อีกครั้ง ทำเช่นนี้จนครบ 40 รอบ ส่วนบริเวณเหนือแผ่นกระจายก๊าซที่ 25 เซนติเมตร อุณหภูมิลดลงเล็กน้อยในช่วง 1-2 นาทีแรก และจะกลับไปยังอุณหภูมิเดิมอย่างรวดเร็ว เนื่องจากบริเวณนี้มีพลาสติกกระจายอยู่น้อยกว่าบริเวณแผ่นกระจายก๊าซ ส่วนบริเวณเหนือแผ่นกระจายก๊าซไป 50, 100 และ 150 เซนติเมตร อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจากจุดเริ่มป้อนพลาสติกไม่มากนัก เนื่องจากมีพลาสติกกระจายอยู่น้อยมาก ยกเว้นกรณีภาพ 23(ง) ที่ตำแหน่ง 100 เซนติเมตรเหนือแผ่นกระจายก๊าซ เมื่อควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 150°C พบว่าอุณหภูมิขึ้นถึง 267°C ถึงแม้การตั้งอุณหภูมิที่ต่ำกว่าถึง 150°C อิทธิพลความร้อนจากเตาบริเวณใกล้เคียงสูงกว่า ส่งผลให้อุณหภูมิบริเวณนี้สูงกว่าที่ตั้งไว้ แต่อย่างไรก็ตามอุณหภูมิบริเวณนี้มีค่าไม่เปลี่ยนแปลงต่อการป้อนของพลาสติก

เมื่อทำการเฉลี่ยอุณหภูมิตลอดเวลาในทั้ง 4 เงื่อนไข สำหรับการป้อนครบ 40 รอบ ที่ความสูงเหนือแผ่นกระจายก๊าซ 10, 25, 50, 100 และ 150 เซนติเมตร อุณหภูมิเฉลี่ยที่ความสูงต่าง ๆ แสดงได้ดังภาพที่ 24

ภาพที่ 24 แสดงให้เห็นว่าเมื่อตั้งอุณหภูมิ 450°C เท่ากันตลอดความสูง อุณหภูมิที่เกิดขึ้นจะเทียบเท่ากันทั่วปฏิกิริยา ยกเว้นบริเวณใกล้กับแผ่นกระจายก๊าซ ซึ่งเป็นบริเวณที่พลาสติกตกไปยังอยู่และทำปฏิกิริยา ซึ่งมีอุณหภูมิลดลงเป็น 441°C ในกรณีที่ 2 และ 3 เมื่อตั้งอุณหภูมิที่จุดเหนือแผ่นกระจายก๊าซ 10 ซม. 450°C และบริเวณเหนือขึ้นไปลดลงเป็น 430 และ 400°C ตามลำดับ พบว่าอุณหภูมิที่อุณหภูมิที่จุดเหนือแผ่นกระจายก๊าซ 10 ซม.ลดลงเป็น 442°C ทั้ง 2 เงื่อนไขด้วยเหตุผลเดียวกับกรณีแรก ส่วนอุณหภูมิเหนือขึ้นไปก็ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ในกรณีสุดท้าย เมื่อพยายามตั้งอุณหภูมิเหนือปฏิกิริยาให้มีค่าลดลง จะเห็นว่าอุณหภูมิในปฏิกิริยากรณีสุดท้ายจะมีค่าสูงที่บริเวณใกล้กับแผ่นกระจายก๊าซ และลดลงในบริเวณเหนือปฏิกิริยา แต่ที่ทางออกอุณหภูมิสูงเป็น 300°C เพื่อป้องกันมิให้เกิดการอุดตัน



ภาพที่ 23 อุณหภูมิกับเวลาต่อการแตกตัวของพลาสติกเมื่อทำการควบคุมอุณหภูมิที่จุดแตกต่างกัน ซึ่งได้ทำการควบคุมอุณหภูมิไว้ดังนี้ (ก) อุณหภูมิเป็น 450°ซ ตลอดความสูง (ข) อุณหภูมิเหนือแผ่นกระจายก๊าซ 10 50 100 150 ซม. เป็น 450 430 430 430°ซ (ค) อุณหภูมิเหนือกระจายก๊าซ 10 50 100 150 ซม. เป็น 450 430 400 400°ซ (ง) อุณหภูมิเหนือกระจายก๊าซ 10 50 100 150 ซม. เป็น 450 430 150 300°ซ ป้อนพลาสติก 50 กรัม/รอบ ความเร็วก๊าซ 7.24 กิโลกรัม/ชั่วโมง (1 Umf)



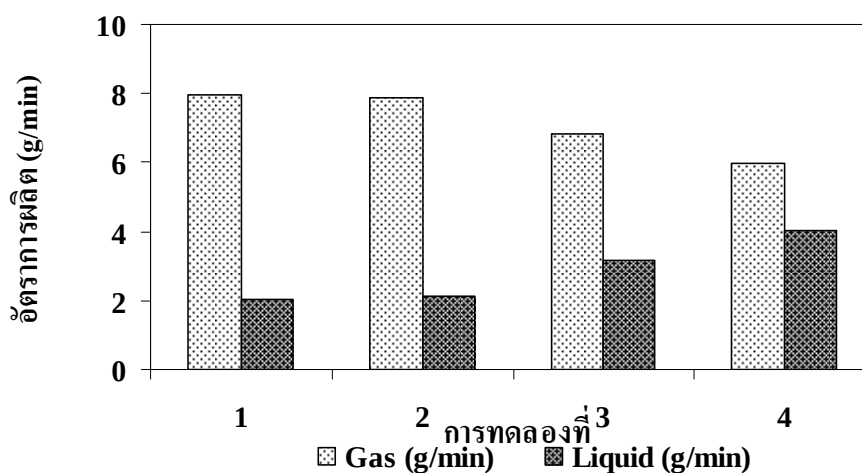
ภาพที่ 24 ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ ตามความสูงของปฏิกรณ์พร้อมอุณหภูมิที่ตั้งไว้ในสภาวะ เบดนิ่ง เมื่อทำการควบคุมอุณหภูมิไว้ 4 เงื่อนไข โปเนพลาสติก 50 กรัม/รอบ ความเร็วก๊าซ 7.24 กิโลกรัม/ชั่วโมง (1 Umf)

8.2 ผลกระทบที่ได้เมื่อโปเนและหุคพลาสติกแบบเป็นจังหวะต่อเนื่องในช่วงเบดนิ่ง

ปริมาณของของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการควบคุมอุณหภูมิที่แตกต่างกันตามเงื่อนไขทั้ง 4 ข้อ (หัวข้อ 8.1)

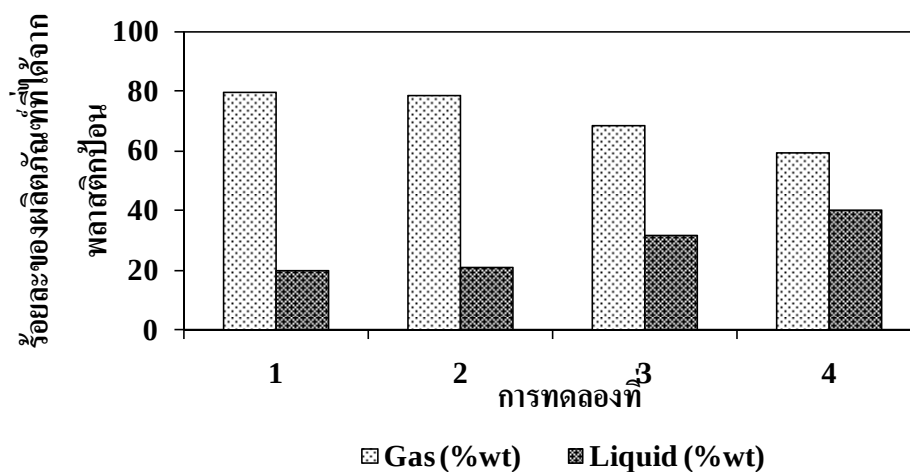
ภาพที่ 25 แสดงอัตราการผลิตก๊าซและของเหลวสำหรับการทดลองทั้ง 4 กรณี เมื่อทำการควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 450 °ซ ตลอดทั้งปฏิกรณ์ ผลกระทบที่ได้ส่วนมากเป็นก๊าซ เพราะพลาสติกส่วนใหญ่แตกตัวที่ด้านล่างของปฏิกรณ์ เมื่อไอผลิตภัณฑ์ลอยสูงไปที่ด้านบนของปฏิกรณ์ซึ่งมีอุณหภูมิสูงถึง 450 °ซ จึงมีการแตกตัวต่อเป็นสารโมเลกุลเล็กลง ทำให้ในการทดลองที่ 1 ผลกระทบที่ได้ส่วนใหญ่จึงเป็นก๊าซ ดังนั้นการทดลองที่ 2 และ 3 จึงได้มีการลดอุณหภูมิที่ด้านบนของปฏิกรณ์ลงมาเพื่อให้มีการแตกตัวของพลาสติกน้อยลง ในการทดลองที่ 2 ลดอุณหภูมิที่ในเตาเป็น 430 °ซ ยกเว้นที่จุดเหนือบริเวณโปเนก๊าซ 10 ซม. ที่ยังคง 450 °ซ ส่วนในการทดลองที่ 3 อุณหภูมิเหมือนดังการทดลองที่ 2 ในบริเวณสูงสุดก่อนออกจากเตาจะตั้งอุณหภูมิต่ำลงอีกเป็น 400 °ซ พบว่าปริมาณผลิตภัณฑ์ก็ยังใกล้เคียงกับการทดลองแรก ดังนั้นการทดลองที่ 4 จึงได้ทำการลดอุณหภูมิต่ำลงมา ที่บริเวณความสูง 100 ซม. ตั้งอุณหภูมิ 150 ซม. และจุดสูงสุดของปฏิกรณ์ตั้งไว้ที่ 300 °ซ ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่คาดว่าไอผลิตภัณฑ์แตกตัวต่อเป็น โมเลกุลเล็กลงได้น้อย และไอผลิตภัณฑ์ไม่ควบแน่น

(จุดควบแน่นของ C > 18 ประมาณ 300 °ซ) เห็นได้ว่าผลิตภัณฑ์ของเหลวเพิ่มจากเดิมอย่างเห็นได้ชัด จากการทดลองทั้ง 4 เงื่อนไขมีปริมาณของเหลว 2.02, 2.11, 3.16 และ 4.04 กรัม/นาที่ ตามลำดับ



ภาพที่ 25 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแตกตัวของพลาสติกเมื่อทำการควบคุมอุณหภูมิแตกต่างกันในสถานะเบดนิ่ง (1 Umf) เมื่อป้อนพลาสติก 10 กรัม/นาที่

ภาพที่ 26 ผลิตภัณฑ์ก๊าซ และของเหลวที่ได้เป็นร้อยละเทียบกับน้ำหนักพลาสติก เริ่มต้นผลที่ได้เป็นร้อยละ 79.81 78.87 68.38 59.64 และ ร้อยละ 20.19 21.13 31.62 และ 40.37 ตามลำดับ จะเห็นว่าของเหลวในการทดลองที่ 4 มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เพราะได้มีการลดอุณหภูมิส่วนบนของปฏิกรณ์ลงเพื่อไม่ให้พลาสติกแตกตัวต่อไปเป็นก๊าซได้อีก ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จึงมีปริมาณเพิ่มขึ้น

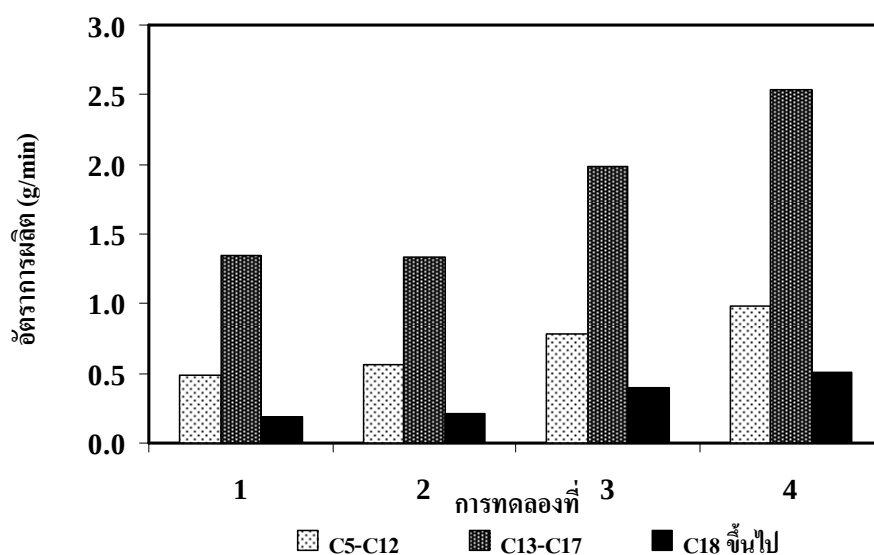


ภาพที่ 26 ร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากพลาสติกป้อนเมื่อทำการควบคุมอุณหภูมิแตกต่างกัน ในสถานะเบดนิ่งในสถานะเบดนิ่ง (1 Umf) เมื่อป้อนพลาสติก 10 กรัม/นาทิต

8.3 องค์ประกอบผลิตภัณฑ์ที่ได้เมื่อป้อนพลาสติกแบบป้อนและหยุดเป็นจังหวะต่อเนื่องในช่วงเบดนิ่ง

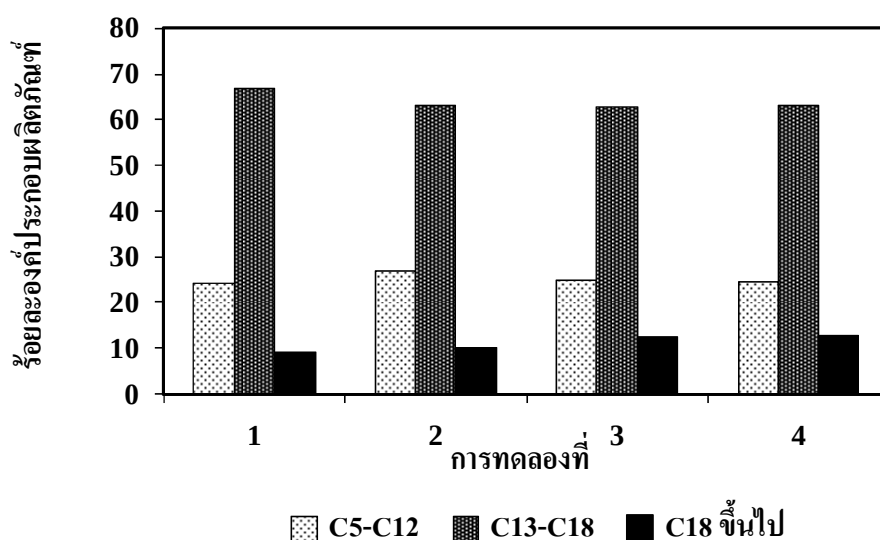
องค์ประกอบผลิตภัณฑ์ของเหลว จาก 4 เงื่อนไขการทดลองซึ่งหาโดยวิธีกลั่นลำดับส่วน แบ่งเป็น 3 ส่วนคือ ส่วนที่เป็น C_5-C_{12} , $C_{13}-C_{17}$ และ C_{18} ขึ้นไป ผลแสดงดังภาพที่ 27

ในบริเวณที่ปล่อยก๊าซออก เมื่อมีอุณหภูมิสูง 450°C ทำให้ก๊าซผลิตภัณฑ์เกิดการแตกตัวต่อเป็นสารที่มีจำนวนคาร์บอนต่ำลง กลายเป็นผลิตภัณฑ์ก๊าซมากขึ้น เกิดของเหลวที่มี C_5-C_{12} น้อย ในการทดลองที่ 2 และ 3 เมื่อทำการลดอุณหภูมิในบริเวณที่ปล่อยก๊าซออกเพื่อไม่ให้เกิดการแตกตัวกลายเป็นก๊าซมากเกินไป ดังกล่าวมาแล้วในหัวข้อ 8.2 ได้ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่มี C_5-C_{12} มากขึ้นเล็กน้อย ในการทดลองที่ 4 ที่มีการลดอุณหภูมิเหนือปฏิกรณ์ให้ต่ำลง (ดูหัวข้อ 8.2) ผลิตภัณฑ์ของเหลวเกิดมากอย่างเห็นได้ชัดและเกิด C_5-C_{12} มากขึ้น เนื่องจากการลดอุณหภูมิที่ตำแหน่งเหนือแผ่นกระจายก๊าซ 100 ซม. เป็นเพียง 150°C ซึ่งทำให้ผลิตภัณฑ์ไม่ร้อนเกินไป แต่ในบริเวณสูงสุดใกล้ทางออกของปฏิกรณ์ ต้องควบคุมให้อุณหภูมิไม่น้อยกว่า 300°C เพราะจะทำให้กลุ่ม $C \geq 18$ ควบแน่นและเกิดการอุดตัน



ภาพที่ 27 องค์ประกอบผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากหน่วยควบแน่น ในสถานะเบดนิ่ง (1 Umf) เมื่อป้อนพลาสติก 10 กรัม/นาที

ในภาพที่ 28 พบว่าร้อยละองค์ประกอบผลิตภัณฑ์ C_5-C_{12} $C_{13}-C_{17}$ และ C_{18} ขึ้นไป ในผลิตภัณฑ์ของเหลว มีค่าใกล้เคียงกันใน 4 การทดลอง คือ ร้อยละ 24.29 26.74 24.71 24.45 ,ร้อยละ 66.67 63.11 62.75 62.93 และร้อยละ 9.04 10.15 12.54 12.62 ตามลำดับ ถึงแม้อัตราการผลิตของสารแต่ละช่วงในแต่ละเงื่อนไขจะไม่เท่ากัน (ดูภาพที่ 27)



ภาพที่ 28 ร้อยละองค์ประกอบผลิตภัณฑ์ที่ได้จากหน่วยควบแน่น ในสถานะเบดนิ่ง (1 Umf) เมื่อป้อนพลาสติก 10 กรัม/นาที

9. การแตกตัวของพอลิพรอพิลีนในปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไซ์เบด เมื่อทำการป้อนพอลิพรอพิลีนแบบป้อนและหยุดเป็นจังหวะต่อเนื่อง

9.1 การแตกตัวของพอลิพรอพิลีนในปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไซ์เบดเมื่อป้อนไนโตรเจน 9.40 กิโลกรัม/นาทีก (1.3 เท่าของอัตราเร็วต่ำสุดเพื่อเกิดฟลูอิดไซ์ของเม็ดพลาสติก, 1.3 U_{mf})

การทดลองนี้ตั้งอัตราการใช้ของไนโตรเจนไว้ที่ 9.40 กิโลกรัม/ชั่วโมง (1.3 เท่าของอัตราเร็วต่ำสุดเพื่อเกิดฟลูอิดไซ์ของเม็ดพลาสติก) การป้อนพลาสติกเข้าปฏิกรณ์จะทำการป้อนสลับการหยุดเป็นจังหวะต่อเนื่อง โดยในแต่ละรอบการป้อนใช้พลาสติก 50 กรัม ใช้เวลาการป้อน 30 วินาที การทดลองตั้งอุณหภูมิโดยเลือก 2 เงื่อนไข ดังแสดงในตารางที่ 8 โดยเงื่อนไขที่ 1 ทำการตั้งอุณหภูมิ 450 °ซ ตลอดปฏิกรณ์ เงื่อนไขที่ 2 ทำการปรับอุณหภูมิที่จุดเหนือแผ่นกระจายก๊าซ 10 ซม. และ จุดที่เหนือขึ้นไป 50 และ 100 ซม. เป็น 450 °ซ ส่วนตำแหน่งที่ 100 ซม. เป็น 150 °ซ เพื่อไม่ให้ก๊าซพลาสติกแตกตัวมากเกินไป

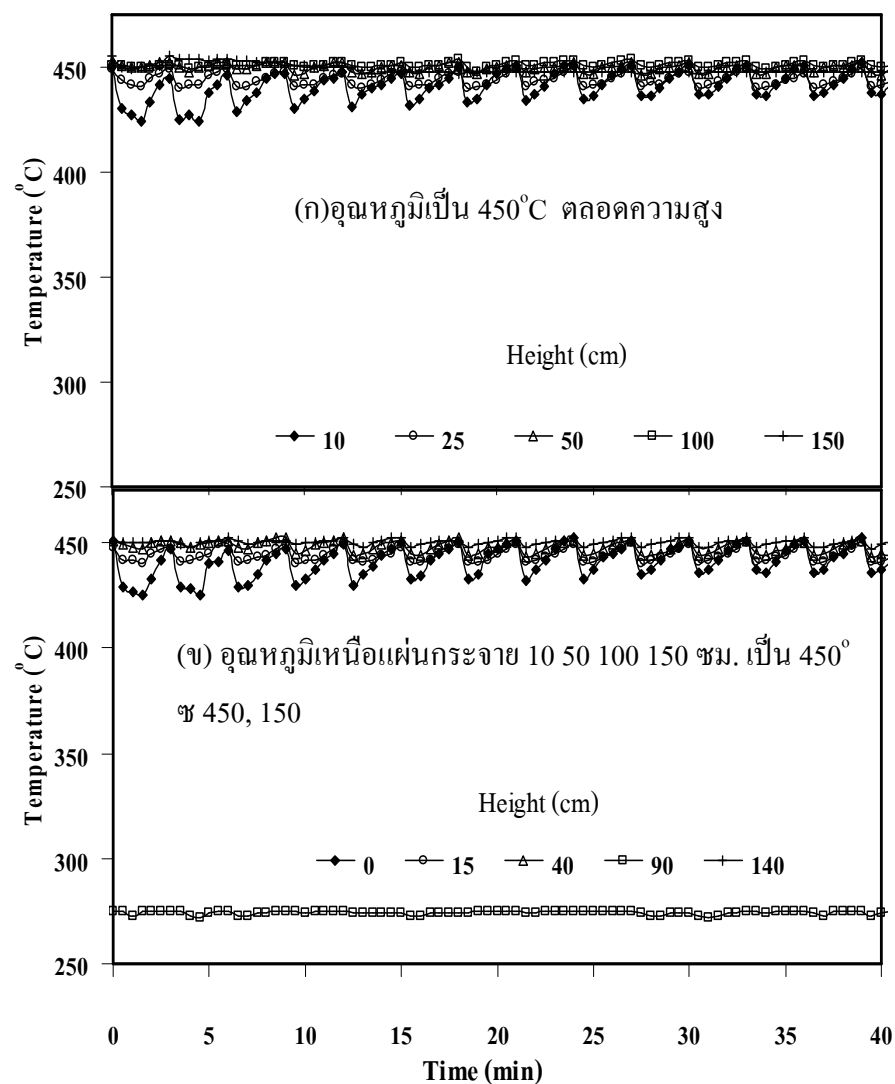
ตารางที่ 8 การตั้งอุณหภูมิตามความสูงของปฏิกรณ์ในสภาวะฟลูอิดไซ์เบด (ความเร็วก๊าซ 1.3 เท่าของอัตราเร็วต่ำสุดของเม็ดพลาสติก) เมื่อทำการป้อนพอลิพรอพิลีนสลับการหยุดเป็นจังหวะ

การทดลองที่	ความสูง (ซม.)	การตั้งอุณหภูมิตามความสูงจากแผ่นกระจายก๊าซ (°ซ)			
		10	50	100	150
1		450	450	450	450
2		450	450	150	450

9.1.1 ผลของอุณหภูมิต่อการแตกตัวของพลาสติก

ผลของอุณหภูมิแสดงในภาพที่ 29 และพบว่าเมื่อเริ่มป้อนพลาสติกไป 1-2 นาทีแรกอุณหภูมิที่จุดเหนือแผ่นกระจายก๊าซ 10 ซม. จะลดลงอย่างรวดเร็ว คือลดลงจาก 450 ไปเป็น 435 และ 434 °ซ สำหรับทั้ง 2 การทดลองตามลำดับ เนื่องจากการสูญเสียความร้อนให้กับพลาสติกป้อนที่เย็นและการทำปฏิกิริยา หลังทำปฏิกิริยาหมดแล้ว ณ นาทีที่ 5 ได้ป้อนพลาสติกใหม่อีกครั้งทำต่อเนื่องเช่นนี้ 40 รอบ ส่วนบริเวณเหนือแผ่นกระจายก๊าซที่ 25 เซนติเมตร อุณหภูมิลดลงจาก 450

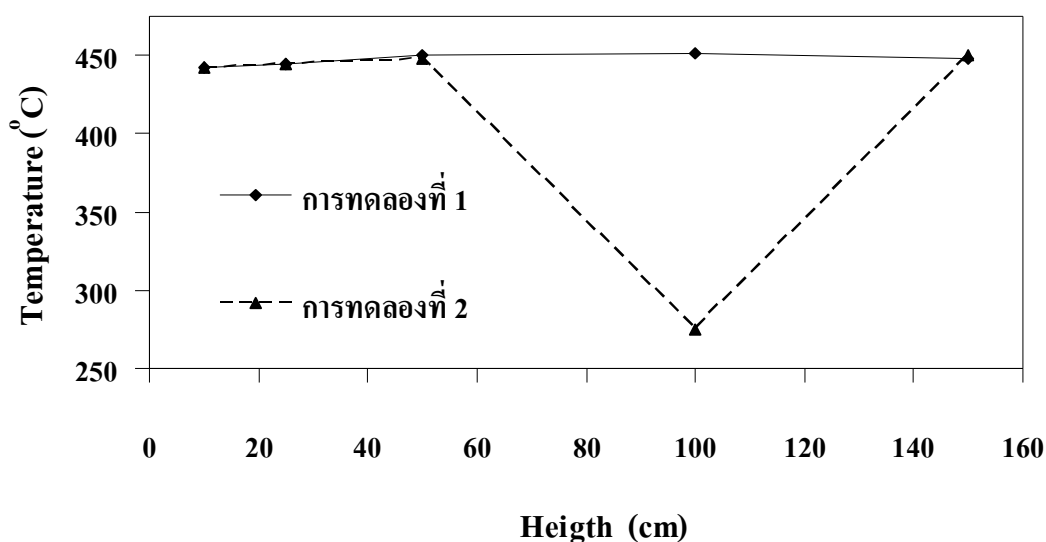
ไปเป็น 441 และ 440 °ซ สำหรับทั้ง 2 การทดลองตามลำดับ เพราะสูญเสียความร้อนให้กับพลาสติก ด้วยเช่นกัน แต่น้อยกว่าบริเวณด้านล่างเนื่องจากมีปริมาณพลาสติกกระจายน้อยกว่า ส่วนตำแหน่ง เนื้อแผ่นกระจายก๊าซไป 50 เซนติเมตร อุณหภูมิลดลงจาก 450 ไปเป็น 447 และ 444 °ซ และ ที่ 150 เซนติเมตร อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงจากจุดเริ่มป้อนพลาสติกไม่มากนัก ยกเว้นที่ตำแหน่ง 100 เซนติเมตรเนื้อแผ่นกระจายก๊าซ เมื่อตั้งค่าอุณหภูมิไว้ที่ 150 °ซ พบว่าอุณหภูมิจึงเป็น 275 °ซ เป็น เพราะอิทธิพลความร้อนจากเตาบริเวณใกล้เคียงที่ตั้งไว้ที่อุณหภูมิสูงกว่า



ภาพที่ 29 การแตกตัวของพลาสติก ณ เวลาต่าง ๆ เมื่อควบคุมอุณหภูมิต่างกันโดยป้อนไนโตรเจน 9.40 กิโลกรัม/ชั่วโมง ซึ่งได้ทำการควบคุมอุณหภูมิไว้ดังนี้ (ก) อุณหภูมิ ตลอดความสูง เป็น 450°ซ (ข) อุณหภูมิที่ 10, 50, 100 และ 150 ซม. เป็น 450, 450, 150 และ 450°ซ ตามลำดับ ป้อนพลาสติก 50 กรัม/รอบ ในอัตรา 9.40 กิโลกรัม/นาทื (1.3 Umf)

เมื่อทำการเฉลี่ยอุณหภูมิตลอดเวลาในทั้ง 2 เงื่อนไข สำหรับการป้อนครบ 40 รอบ ที่ความสูงเหนือแผ่นกระจายก๊าซ 10, 25, 50, 100 และ 150 เซนติเมตร ของแต่ละความสูง แสดงได้ดังภาพที่ 30

จากภาพที่ 30 เมื่อตั้งอุณหภูมิตลอดปฏิบัติการเป็น 450°C พบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก คือมีค่า 442, 444, 449, 451, 448°C ที่ตำแหน่ง 10, 25, 50, 100, 150 ซม. ตามลำดับ ในการทดลองที่ 2 เมื่อตั้งอุณหภูมิที่บริเวณใกล้ทางออกด้านล่าง จะพบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยมีค่า 442, 445, 448, 275, 450°C ที่บริเวณ 10, 25, 50, 100, 150 ซม. ตามลำดับ



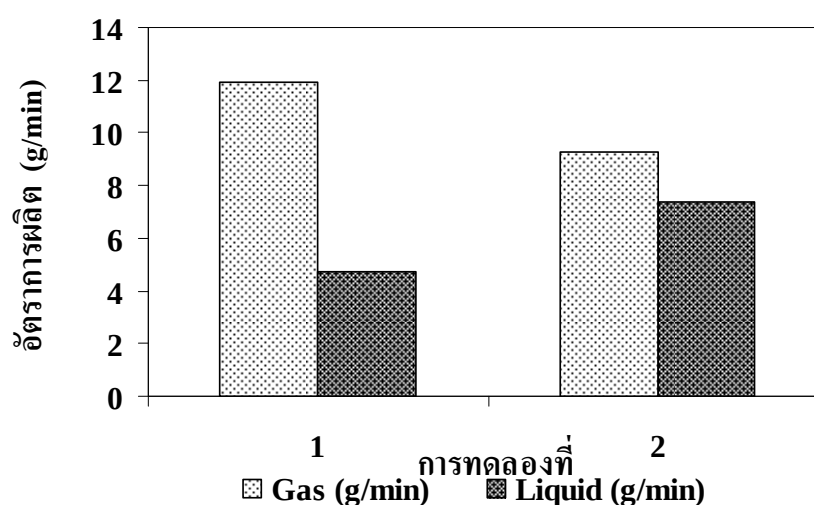
ภาพที่ 30 ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ ตามความสูงของปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์พร้อมอุณหภูมิที่ตั้งไว้เมื่อป้อนไนโตรเจน 9.40 กิโลกรัม/ชั่วโมง และป้อนพลาสติก 50 กรัมต่อรอบสลับการหยุดเป็นจังหวะต่อเนื่องกัน จำนวน 40 รอบ เมื่อทำการควบคุมอุณหภูมิไว้ 2 เงื่อนไข ตามตารางที่ 8

9.1.2 ผลิตรกษณ์ที่ได้เมื่อป้อนพลาสติกแบบป้อนสลับหยุดเป็นจังหวะต่อเนื่องในสถานะฟลูอิดไชน์เบค (ความเร็วก๊าซเป็น 1.3 เท่าของอัตราเร็วต่ำสุดเพื่อเกิดฟลูอิดไชน์ของเม็ดพลาสติก)

ปริมาณของผลิตรกษณ์ที่ได้จากการควบคุมอุณหภูมิที่แตกต่างกันตามเงื่อนไขทั้ง 2 ในตารางที่ 8 (หัวข้อ 9.1.1)

ภาพที่ 31 แสดงอัตราการผลิตก๊าซและของเหลวสำหรับการทดลองทั้ง 2 กรณี เมื่อตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 450°C ตลอดทั้งปฏิบัติการ ผลิตรกษณ์ที่ได้ส่วนมากเป็นก๊าซ เพราะพลาสติกส่วน

ใหญ่แตกตัวที่ด้านล่างของปฏิกรณ์ เมื่อไอผลิตภัณฑ์ลอยสูงไปที่ด้านบนของปฏิกรณ์ซึ่งมีอุณหภูมิสูงถึง 450°C จึงมีการแตกตัวต่ออีกเป็นสารโมเลกุลเล็กลง ทำให้ในการทดลองที่ 1 ผลิตภัณฑ์ที่ได้ส่วนใหญ่เป็นก๊าซ ดังนั้นการทดลองที่ 2 จึงได้มีการลดอุณหภูมิที่ความสูง 100 ซม. จากจุดป้อนก๊าซลงมาเป็น 150°C เพื่อให้มีการแตกตัวของพลาสติกน้อยลง และจุดสูงสุดของปฏิกรณ์ยังคงเป็น 450°C ผลพบว่า ผลิตภัณฑ์ของเหลวเพิ่มจากเดิมอย่างเห็นได้ชัดในการทดลองที่ 2 จากการทดลองป้อนพลาสติก 50 กรัมต่อรอบ จะพบว่าอัตราการผลิตของเหลวเป็น 4.74 และ 7.40 กรัม/นาที ตามลำดับ

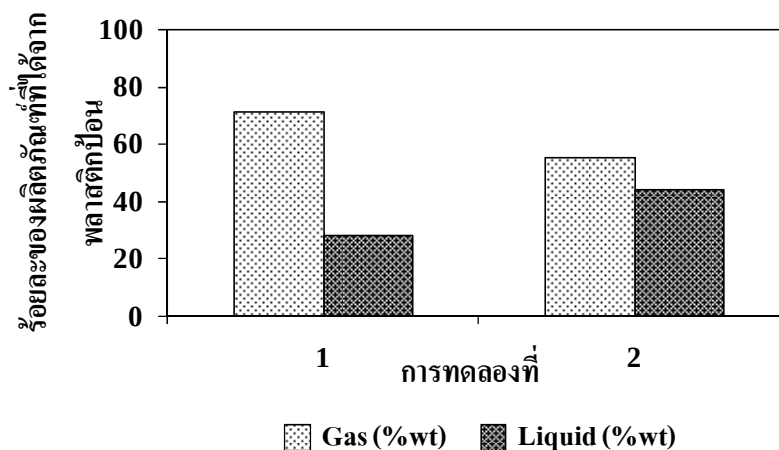


ภาพที่ 31 ผลิตภัณฑ์ก๊าซและของเหลวที่ได้จากหน่วยควบแน่น จากปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบด (ความเร็วก๊าซเป็น 1.3 เท่าของอัตราเร็วต่ำสุดเพื่อเกิดฟลูอิดไชน์ของเม็ดพลาสติก) อัตราการป้อนพลาสติก 16.7 กรัม/นาที

จะพบว่าจากการทดลองด้วยสภาวะฟลูอิดไชน์ เมื่อป้อนพลาสติก 50 กรัม/รอบ และการให้ความร้อนที่เหมือนกัน (การทดลองที่ 1) จะพบว่าอัตราการป้อนพลาสติกในการทดลองนี้เป็น 16.7 กรัม/นาที จะสามารถทำได้เร็วกว่าในการทดลองแบบเบดนิ่ง (หัวข้อ 8) (อัตราป้อนของพลาสติก 10 กรัม/นาที) แสดงว่าการไหลของก๊าซที่เร็วขึ้น ทำให้เม็ดพลาสติกกระจายได้สูงกว่า อุณหภูมิใกล้บริเวณป้อนก๊าซจะเย็นลงน้อยกว่าเมื่อเกิดปฏิกิริยา จึงใช้เวลาน้อยกว่าที่อุณหภูมิกลับไปอุณหภูมิเดิม จึงป้อนพลาสติกในรอบต่อไปได้เร็วขึ้น ดังนั้นจึงสามารถป้อนพลาสติกด้วยอัตราการป้อนที่เร็วขึ้น เมื่อเทียบกับสภาวะการป้อนก๊าซแบบเบดนิ่ง

ภาพที่ 32 แสดงผลิตภัณฑ์ก๊าซที่ได้เป็นร้อยละเทียบกับน้ำหนักพลาสติกเริ่มต้น ผลที่ได้เป็นร้อยละ 71.57 และ 55.62 ตามลำดับ ส่วนผลิตภัณฑ์ของเหลวได้เป็นร้อยละ 28.44 และ 44.39 ตามลำดับ จะเห็นว่าของเหลวในการทดลองที่ 2 มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เพราะได้มีการ

ลดอุณหภูมิส่วนบนของปฏิกรณ์ลงเพื่อไม่ให้พลาสติกแตกตัวต่อไปเป็นก๊าซได้อีก ผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จึงมีปริมาณเพิ่มขึ้น



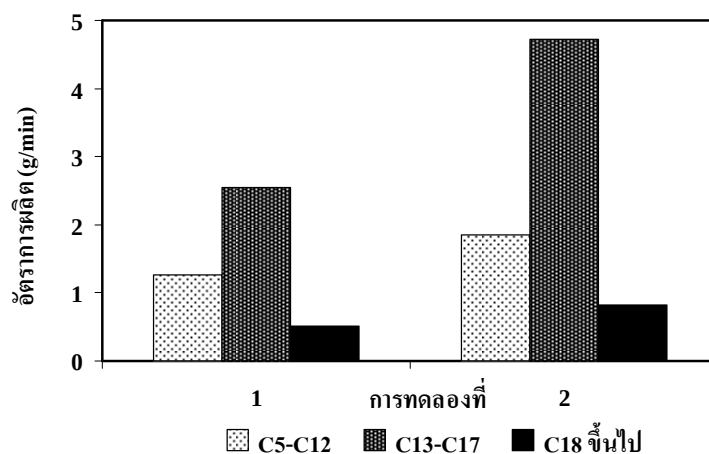
ภาพที่ 32 ร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากพลาสติกป้อนเมื่อทำการควบคุมอุณหภูมิแตกต่างกัน ในช่วงฟลูอิดไชเบด (ความเร็วก๊าซเป็น 1.3 เท่าของอัตราเร็วต่ำสุดเพื่อเกิดฟลูอิดไชเบดของเม็ดพลาสติก)

9.1.3 องค์ประกอบผลิตภัณฑ์ที่ได้เมื่อป้อนพลาสติกแบบป้อนสลับหยุดเป็นจังหวะ ต่อเนื่องในสภาวะฟลูอิดไชเบด (ความเร็วก๊าซเป็น 1.3 เท่าของอัตราเร็วต่ำสุดเพื่อเกิดฟลูอิดไชเบดของเม็ดพลาสติก)

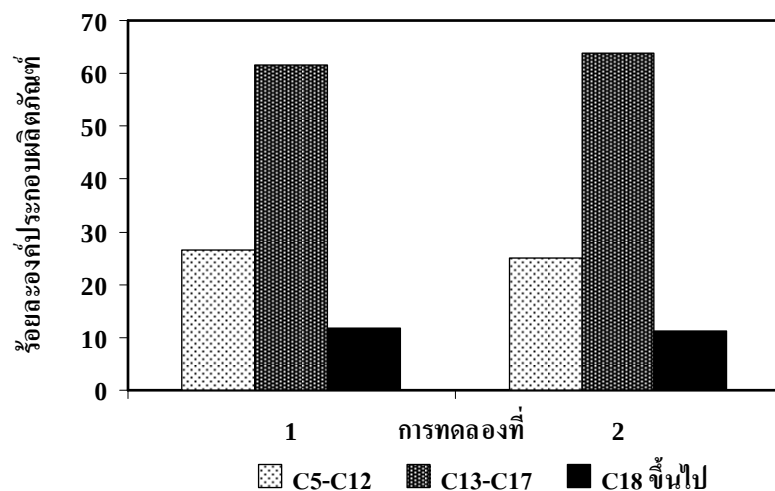
ผลิตภัณฑ์ของเหลว จาก 2 เงื่อนไขการทดลอง (ดูตารางที่ 8) นำไปหาร้อยละ องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์โดยใช้วิธีการกลั่นลำดับส่วน และแบ่งเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนที่เป็น C_5-C_{12} , $C_{13}-C_{17}$ และ C_{18} ขึ้นไป แสดงได้ดังภาพที่ 33 และ 34

ในบริเวณที่ปล่อยก๊าซออก ถ้ามีอุณหภูมิสูง 450°C (การทดลองที่ 1) ทำให้ก๊าซ ผลิตภัณฑ์เกิดการแตกตัวต่อเกิดเป็นสารที่มีจำนวนคาร์บอนต่ำลง ได้ผลิตภัณฑ์ก๊าซมากขึ้น จึงมี ของเหลวทุกส่วนน้อยและมีผลรวมของเหลวน้อย เมื่อปรับตั้งอุณหภูมิบริเวณเหนือแผ่นกระจาย ก๊าซ 100 ซม. เป็น 150°C อุณหภูมิเกิดจริงเป็น 275°C (การทดลองที่ 2) ซึ่งทำให้ปฏิกิริยาส่วนบนไม่ ร้อนเกินไป ผลิตภัณฑ์ของเหลวแต่ละส่วนและค่ารวมจะมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เมื่อคิดเป็นร้อยละ ของแต่ละส่วนจะไม่แตกต่างกันใน 2 การทดลอง แสดงว่าการแตกตัวต่ออีกเกิดขึ้นสม่ำเสมอในทุก ส่วนขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์ของเหลว การปรับอุณหภูมิไม่มีผลต่อองค์ประกอบของเหลวที่ได้ แต่ในบริเวณสูงสุดใกล้ทางออก ไม่สามารถควบคุมให้ต่ำกว่า 450°C ได้ เพราะจะทำให้ $C \geq 18$

ความแน่นและเกิดการอุดตัน อุณหภูมิในกรณีเบดนิ่ง (หัวข้อ 8) ที่ตั้งไว้ต่ำที่ 300°C ก็เพียงพอไม่ให้เกิดการอุดตัน อุณหภูมิที่ทางออกนี้ต้องตั้งสูงกว่า กรณีนี้ต้องตั้ง 450°C เนื่องจากมีปริมาณของคาร์บอนสูง ๆ ที่มากขึ้น เนื่องจากอัตราการผลิตของเหลวมากขึ้น



ภาพที่ 33 องค์ประกอบผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากหน่วยควบแน่น ในสถานะฟลูอิด์เบด (ความเร็วก๊าซเป็น 1.3 เท่าของอัตราเร็วต่ำสุดเพื่อเกิดฟลูอิด์เบดของเม็ดพลาสติก) ซึ่งปริมาณรวมของของเหลวในการทดลองที่ 1 น้อยกว่าในการทดลองที่ 2



ภาพที่ 34 ร้อยละองค์ประกอบผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากหน่วยควบแน่น ในสถานะฟลูอิด์เบด (ความเร็วก๊าซเป็น 1.3 เท่าของอัตราเร็วต่ำสุดเพื่อเกิดฟลูอิด์เบดของเม็ดพลาสติก)

9.2 ผลของอุณหภูมิต่อการแตกตัวของพลาสติกเมื่อทำการปรับอัตราการไหลของก๊าซเป็น 10.85 กิโลกรัม/ชั่วโมง (1.5 เท่าของอัตราเร็วต่ำสุดเพื่อเกิดฟลูอิฟิเคชันของเม็ดพลาสติก, 1.5 Umf)

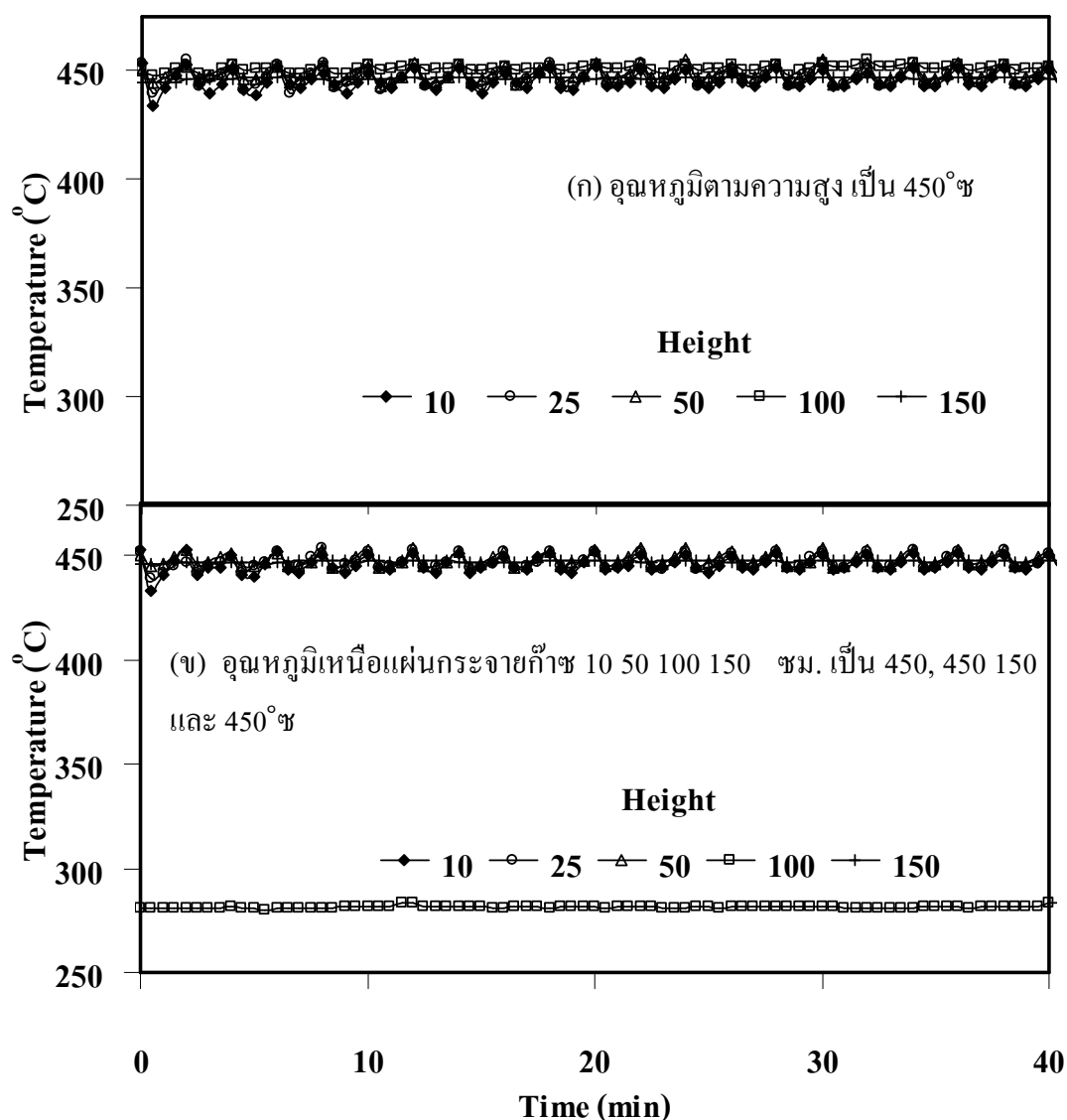
การทดลองนี้ปรับตั้งอัตราการไหลของไนโตรเจนไว้ที่ 10.85 กิโลกรัม/ชั่วโมง (1.5 เท่าของอัตราเร็วต่ำสุดเพื่อเกิดฟลูอิเคชันของพลาสติก, 1.5Umf) การป้อนพลาสติกเข้าปฏิกิริยาเป็นแบบป้อนสลับหยุดเป็นจังหวะต่อเนื่อง โดยในแต่ละรอบการป้อนใช้พลาสติก 50 กรัม เวลาการป้อน 30 วินาที การทดลองทำที่ 2 เงื่อนไข โดยเงื่อนไขที่ 1 ทำการควบคุมอุณหภูมิ 450 °ซ ตลอดปฏิกิริยา เงื่อนไขที่ 2 อุณหภูมิที่จุดเหนือแผ่นกระจายก๊าซขึ้นไปที่ 10 50 และ 150 ซม. เป็น 450 °ซ ส่วนที่ตำแหน่งเหนือแผ่นกระจายก๊าซ 100 ซม. เป็น 150 °ซ ตามตารางที่ 8 การปรับความเร็วของก๊าซเป็น 1.5 Umf ได้ผลดังนี้

9.2.1 ผลของอุณหภูมิต่อการแตกตัวของพลาสติก

ผลกระทบจากการป้อนเม็ดพลาสติกต่ออุณหภูมิ พบว่าการป้อนพลาสติกทำให้อุณหภูมิลดลงแล้วจะเพิ่มขึ้นอีกกลับไปที่ได้ตั้งไว้ (set point) ดังแสดงในภาพที่ 35 เช่นเดียวกับกรณีของความเร็วก๊าซเป็น 1.3 Umf โดยเวลาที่พลาสติกแตกตัวทั้งหมดในแต่ละรอบเป็น 2 นาทีซึ่งอุณหภูมิจะลดลงและปรับเพิ่มขึ้นเป็นเท่าเดิมก่อนป้อนพลาสติกเมื่อเทียบกับ 5 นาที และ 3 นาที สำหรับการป้อนก๊าซที่ความเร็ว 1 Umf (เบดนิ่ง) และ 1.3 Umf ตามลำดับ

นอกจากเวลาการทำปฏิกิริยาทั้งหมดในแต่ละรอบจะสั้นลงแล้ว การเพิ่มความเร็วก๊าซยังทำให้ช่วงกว้างของการแกว่งของอุณหภูมิ (amplitude) ในแต่ละรอบลดลงด้วย ทั้งนี้เนื่องจากความเร็วของก๊าซที่สูงขึ้นทำให้เม็ดพลาสติกลอยสูงขึ้นตามการขยายตัวของเบดทำให้ตำแหน่งการเกิดปฏิกิริยาแตกตัวสูงขึ้น ช่วงกว้างในการแกว่งของอุณหภูมิจึงลดลง

การทดลองที่ความเร็วสูงขึ้นซึ่งทำให้เวลาการเกิดปฏิกิริยาแต่ละรอบสั้นลง เมื่อทำการป้อนพลาสติก 50 กรัมในแต่ละรอบ จึงทำให้อัตราการป้อนพลาสติกในการทดลองนี้มีค่าสูงกว่าการทดลองที่ความเร็วต่ำ ซึ่งอัตราการป้อนพลาสติกเป็น 25 กรัม/นาที (เทียบกับที่ความเร็ว 1.3 Umf มีอัตราการป้อนเป็น 16.7 กรัม/นาที)

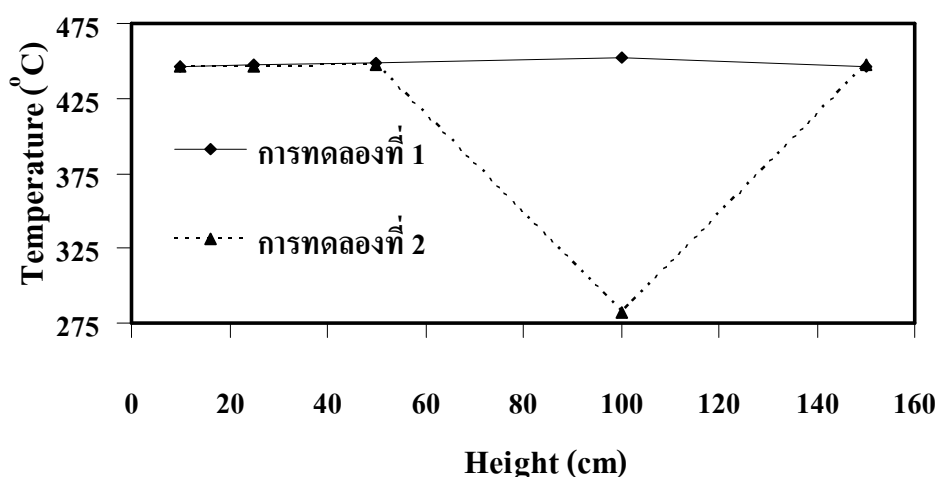


ภาพที่ 35 อุณหภูมิที่เวลาการแตกตัวต่าง ๆ ของพลาสติก โดยป้อนไนโตรเจน 10.85 กิโลกรัม/ชั่วโมง (ก) อุณหภูมิตามความสูง เป็น 450°ซ (ข) อุณหภูมิเหนือแผ่นกระจายก๊าซ 10 50 100 150 ซม. เป็น 450, 450 150 และ 450°ซ

เมื่อทำการเฉลี่ยอุณหภูมิตลอดเวลาในทั้ง 2 เจ็อนไขตามตารางที่ 8 สำหรับการป้อน 40 รอบ ที่ความสูงเหนือแผ่นกระจายก๊าซ 10, 25, 50, 100 และ 150 เซนติเมตร แสดงได้ดังภาพที่ 36

จากภาพที่ 36 พบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยในกรณีการทดลองที่ 1 เป็น 446, 447, 448, 451, 446°ซ ที่ตำแหน่ง 10, 25, 50, 100, 150 ซม. ตามลำดับ และในการทดลองที่ 2 เป็น 445, 446,

448, 282, 443°ซ สำหรับความสูง 10, 25, 50, 100, 150 ซม. ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งความสูงต่างๆมีลักษณะเดียวกันกับการป้อนก๊าซความเร็ว 1.3 Umf ความแตกต่างของความเร็วก๊าซที่ทดสอบมีช่วงแคบไปที่จะแสดงให้เห็นผลชัดเจนเนื่องจากข้อจำกัดของเครื่องมือทดลองซึ่งควรจะได้มีการทดสอบต่อไปอีก

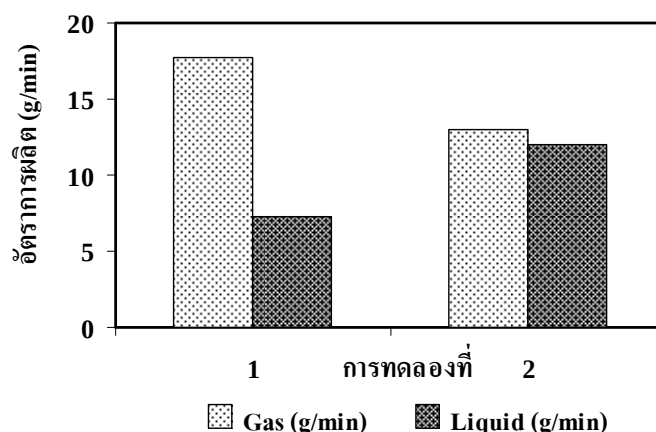


ภาพที่ 36 ค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิ ตามความสูงของปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์พร้อมอุณหภูมิที่ตั้งไว้เมื่อป้อนไนโตรเจน 10.85 กิโลกรัม/ชั่วโมง และป้อนพลาสติกสลับการหยุดเป็นจังหวะต่อเนื่องกัน 40 รอบโดยทำการควบคุมอุณหภูมิไว้ 2 เงื่อนไขตามตารางที่ 8

9.2.2 ผลิตรกัณฑ์ที่ได้เมื่อป้อนพลาสติกแบบป้อนสลับหยุดเป็นจังหวะต่อเนื่องในสถานะฟลูอิดไชน์เบค (ความเร็วก๊าซเป็น 1.5 เท่าของอัตราเร็วต่ำสุดการเกิดฟลูอิดไชน์ของเม็ดพลาสติก, 1.5 Umf)

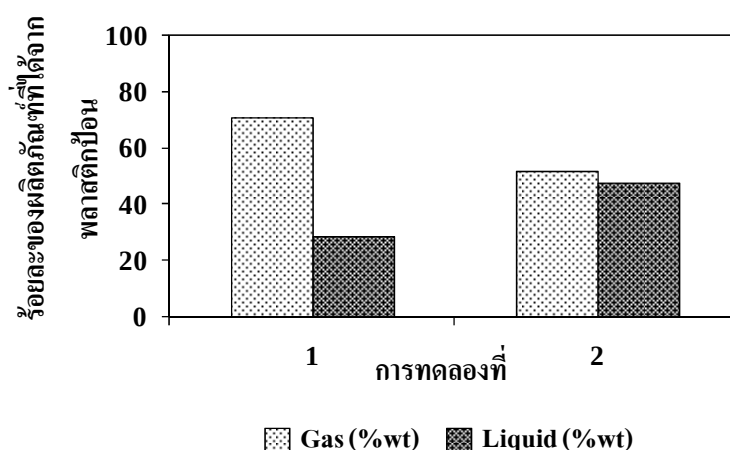
วัดปริมาณผลิตรกัณฑ์ที่ได้จากการควบคุมอุณหภูมิที่แตกต่างกันตามเงื่อนไข 2 ข้อ (หัวข้อ 9.1.1) ได้ผลดังนี้

ภาพที่ 37 แสดงอัตราการผลิตก๊าซและของเหลวสำหรับการทดลองทั้ง 2 กรณี ตามตารางที่ 8 ผลปรากฏว่าผลิตรกัณฑ์เป็นลักษณะเดียวกับกรณีความเร็วก๊าซเป็น 1.3 Umf แต่มีอัตราการไหลของทุกส่วนสูงกว่ากรณี 1.3 Umf ชัดเจนในทั้งสองการทดลอง ในการทดลองที่ 2 ได้ของเหลว 12 กรัม/นาทีก ในขณะที่เมื่อความเร็วก๊าซป้อนต่ำกว่าจะได้ของเหลว 7.4 กรัม/นาทีก เนื่องจากอัตราการป้อนพลาสติกสูงกว่านั่นเอง



ภาพที่ 37 ผลิตรกัณฑ์ก๊าซและของเหลวที่ได้จากหน่วยความดัน ในสภาวะฟลูอิดเบด (ความเร็วก๊าซเป็น 1.5 เท่าของอัตราเร็วต่ำสุดเพื่อเกิดฟลูอิดของเม็ดพลาสติก) อัตราการป้อนพลาสติก 25กรัม/นาที

เมื่อคิดผลได้เป็นร้อยละเทียบกับน้ำหนักพลาสติกเริ่มต้นได้ผลดังแสดงในภาพที่ 38 จะเห็นว่าผลิตรกัณฑ์เป็นก๊าซและของเหลวเมื่อคิดเป็นร้อยละของพลาสติกป้อน แตกต่างกับกรณีความเร็วก๊าซป้อนเป็น 1.3 Umf ไม่มากนัก นั่นคือในการทดลองที่ 2 ได้ก๊าซและของเหลวร้อยละ 52.02 และ 47.99 ตามลำดับ (เมื่อเทียบกับที่ความเร็วต่ำได้ก๊าซและของเหลวร้อยละ 59.63 และ 40.37) แสดงว่าเมื่อเพิ่มความเร็วก๊าซสูงขึ้น ทำให้ป้อนพลาสติกได้มากขึ้นและเกิดของเหลวได้มากกว่า นอกจากนี้การเพิ่มความเร็วก๊าซป้อน ทำให้เวลาการแตกโมเลกุลน้อยลง จึงลดการแตกตัวที่มากเกินไป ส่งผลให้ผลิตรกัณฑ์ของเหลวมากขึ้น

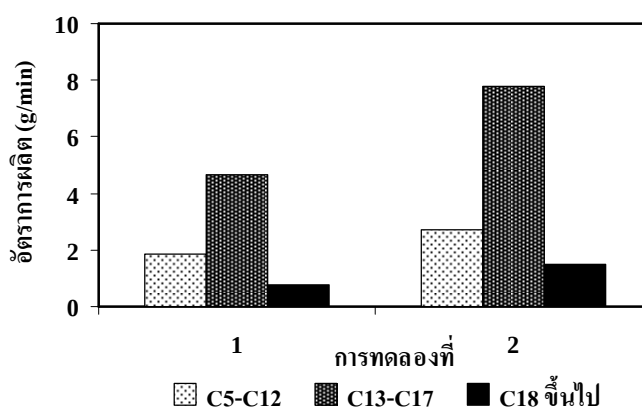


ภาพที่ 38 ร้อยละผลิตรกัณฑ์ก๊าซและของเหลวที่ได้จากหน่วยความดัน ในสภาวะฟลูอิดเบด (ความเร็วก๊าซเป็น 1.5 เท่าของอัตราเร็วต่ำสุดเพื่อเกิดฟลูอิดของเม็ดพลาสติก)

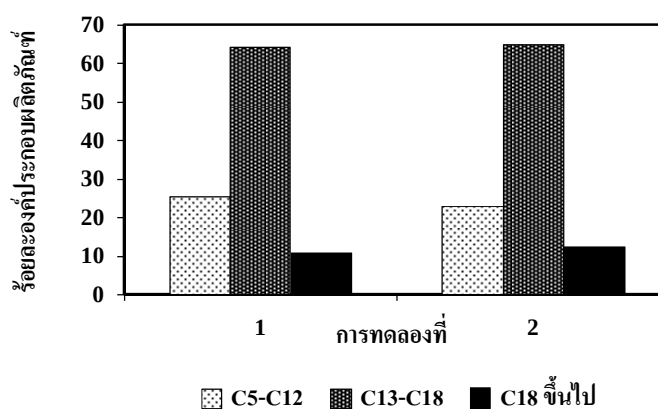
9.2.3 องค์ประกอบผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้เมื่อป้อนพลาสติกแบบป้อนหยดเป็นจังหวะต่อเนื่องในสภาวะฟลูอิด์เบด (ความเร็วก๊าซเป็น 1.5 เท่าของอัตราเร็วต่ำสุดเพื่อเกิดฟลูอิด์ของเม็ดพลาสติก)

องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของเหลวจากการกลั่นลำดับส่วน โดยแบ่งเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนที่เป็น C_5 - C_{12} , C_{13} - C_{17} และ C_{18} ขึ้นไป แสดงได้ดังภาพที่ 39 และ 40

ผลปรากฏว่าการกระจายขององค์ประกอบส่วนต่าง ๆ ทั้ง 3 องค์ประกอบเป็นลักษณะเดียวกันกับกรณีที่ก๊าซมีความเร็ว 1.3 U_{mf} แสดงว่า เมื่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาจะเร็วขึ้น และการกระจายขององค์ประกอบของของเหลวมากกว่า แม้จะเพิ่มความเร็วของก๊าซสูงขึ้น และฟลูอิด์เบดขยายตัวมากขึ้น



ภาพที่ 39 องค์ประกอบผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากหน่วยควบแน่น ในสภาวะฟลูอิด์เบด (1.5 เท่าอัตราเร็วต่ำสุดเพื่อเกิดฟลูอิด์ของพลาสติก)



ภาพที่ 40 ร้อยละองค์ประกอบผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้จากหน่วยควบแน่น ในสภาวะฟลูอิด์เบด (1.5 เท่าอัตราเร็วต่ำสุดเพื่อเกิดฟลูอิด์ของพลาสติก)

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมรรถนะการแตกตัวของพอลิพรอพิลีนในปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดไพโรไลซิส เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำมันปิโตรเลียม ที่ในสภาวะการทดลองที่มีผลต่อการแตกตัวของพอลิพรอพิลีนต่าง ๆ ซึ่งสรุปผลได้ดังต่อไปนี้

ผลของปริมาณพลาสติกป้อนที่มีต่อการแตกตัวของพอลิพรอพิลีน

ในการทดลองได้ทำการกำหนดพลาสติกป้อนจำนวน 200, 100 และ 50 กรัม อุณหภูมิในปฏิกรณ์จะลดลง โดยอุณหภูมิลดลง 50, 25 และ 20 °C ตามลำดับ จากอุณหภูมิเมื่อเริ่มป้อนพลาสติก (500°C) สรุปว่าเมื่อป้อนพลาสติกมากอุณหภูมิก็ตกลงมาก เนื่องจากความร้อนที่สูญเสียไปในการทำให้พลาสติกร้อนขึ้น และการดูดความร้อนในปฏิกิริยาการแตกตัว ดังนั้นหากต้องการให้อุณหภูมิในเตาเปลี่ยนแปลงน้อยที่สุดตลอดช่วงเวลาในการเดินเครื่องอย่างต่อเนื่อง ควรเลือกสภาวะการป้อนที่เหมาะสมกับปริมาณความร้อนที่มี หรือเพิ่มปริมาณความร้อนที่ให้อุณหภูมิที่เหมาะสมกับปริมาณพลาสติกที่ป้อน

ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการแตกตัวของพอลิพรอพิลีน

ในการทดลองทำการควบคุมอุณหภูมิไว้แตกต่างกัน โดยด้านล่างของปฏิกรณ์ทำการควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 450 °C จะเป็นส่วนหลักที่เกิดปฏิกิริยาการแตกตัว ส่วนที่อยู่เหนือขึ้นไป เมื่อลดอุณหภูมิที่ด้านบนของปฏิกรณ์ลงเพื่อให้เกิดการแตกตัวของพลาสติกน้อยลง จะเห็นได้ว่าผลิตภัณฑ์ของเหลวเพิ่มจากเดิมอย่างเห็นได้ชัด ในทุกอัตราการไหลของไนโตรเจน ดังนั้นการควบคุมโปรไฟล์ของอุณหภูมิจึงมีความสำคัญในการลดการแตกตัวมากเกินไป (over cracking)

ผลของอัตราการไหลของก๊าซที่มีต่อการแตกตัวของพอลิพรอพิลีน

ในการทดลองได้ทำการปรับตั้งอัตราการไหลของไนโตรเจนไว้ที่ 7.24, 9.40 และ 10.85 กิโลกรัม/ชั่วโมง (เป็น 1, 1.3 และ 1.5 เท่าของอัตราเร็วต่ำสุดเพื่อฟลูอิดไคซ์ของเม็ดพลาสติก) และทำให้สามารถป้อนพลาสติกได้เป็น 10, 16.7, 25 กรัม/นาที ได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวเป็นร้อยละ 40.37, 44.39, 47.99 ตามลำดับ พบว่าเมื่อใช้อัตราการไหลของไนโตรเจนมาก ปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวก็มีปริมาณเพิ่มขึ้นด้วย เพราะเมื่ออัตราการไหลมาก เวลาที่ทำปฏิกิริยาน้อย ดังนั้นพลาสติกไม่แตกตัวเป็นก๊าซมากเกินไป จึงมีผลิตภัณฑ์ของเหลวมากขึ้น

ของเหลวที่ได้แม้จะมีปริมาณเพิ่มขึ้น แต่จะมีการกระจายขององค์ประกอบเหมือนเดิมเมื่อแยกออกเป็นส่วน C_5 - C_{12} , C_{13} - C_{17} และ C_{18} ขึ้นไป

นอกจากนี้เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของก๊าซจะทำให้อัตราการแตกตัวเพิ่มขึ้นด้วย

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

ชัยนุรักษ์ พุ่มอิน. Kinetics Rate of Polypropylene Catalytic Cracking, การประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 15, โรงแรมจอมเทียนปาล์มบีช รีสอร์ท พัทยา ชลบุรี 27-28 ตุลาคม 2448.

ประเสริฐ เทียนนิมิตร, ขวัญชัยสิน ทิพย์สมบูรณ์ และ ปานเพชร ชินินทร. 2544. เชื้อเพลิงเหลวและสารหล่อลื่น. บริษัทซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด (มหาชน), กรุงเทพฯ.

ปราโมทย์ ไชยเวช และ นุรักษ์ กฤษดาณรงค์. 2543. ปีโตรเลียมเทคโนโลยี. ครั้งที่ 1. ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ไพศาล นาคพิพัฒน์, ผลกระทบของพอลิโพรไพลีนและพอลิสไตรีนที่มีต่อการสลายตัวด้วยความร้อนของไฮโดรคาร์บอน-พอลิเอทิลีน, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, วิศวกรรมสาร ม.ข. ปีที่ 27 ฉบับที่ 3 (21-29) กค.- กย. 2543.

Buekens, A.G. and H. Huang. 1998. Catalytic plastics cracking for recovery of gasoline-range hydrocarbons from municipal plastic wastes. **Resources, Conservation and Recycling**. 23: 163-181.

Campbell, D. and J.R. White. 1989. **Polymer characterization physical techniques**. Chapman and Hall, New York.

Demirbas, A. 2004. Pyrolysis of municipal plastic wastes for recovery of gasoline-range hydrocarbons. **Journal of Analytic and Analytical and Applied. Pyrolysis**. 72: 97-102.

Gersten, J., V. Fainberg, G. Hetsroni and Y. Shindler. 2000. Kinetic study of the thermal

- decomposition of polypropylene, oil shale, and their mixture. **Fuel** 79: 1679-1686.
- Grace, J.R., A.A. Avidan and T.M. Knowlton. 1997. **Circulating Fluidized Beds**. Blackie Academic & Professional. London. 542-552.
- Lee, K.-H., N.-S. Noh, D.-H. Shin and Y. Seo. 2002. Comparison of plastic types for catalytic degradation of waste plastics into liquid product with spent FCC catalyst. **Polymer Degradation and Stability**. 78: 539-544.
- Levenspiel, O. 1999. **Chemical reaction engineering**. 3 rd., John Willey and Sons, Inc., Singapore. 83-85.
- Levent Ballice and Rainer Reimert, Classification of volatile products from the temperature-programmed pyrolysis of polypropylene (PP), atactic-polypropylene (APP) and thermogravimetrically derived kinetics of pyrolysis, **Chemical Engineering and Processing** 41 (2002) 289–296.
- Mohammad A and Abul-Hamayel, Kinetic modeling of high-severity fluidized catalytic cracking, **Fuel** 82 (2003) 1113–1118.
- Navarro, R., L. Torre, J.M. Kenny and A. Jimenez. 2003. Thermal degradation of recycled polypropylene toughened with elastomers. **Polymer Degradation and Stability** 82: 279-290.
- Venuto, P.B., E.T. Habib. 1979. **Fluid Catalytic Cracking with Zeolite Catalysts**. Marcel Dekker, Inc., New York
- W. Kaminsky, M. Predel, A. Sadiki. 2004. Feedstock recycling of polymers by pyrolysis in a fluidized bed. **Polymer Degradation and Stability**. 85:1045-1050
- Warren L. McCabe, Julian C. Smith and Peter Harriott, **Unit Operation of Chemical Engineering**. 6th edition, McGraw-Hill Book company, New York, USA, 2001.

Williams P.T. and E.A. Williams. 1999. Fluidised bed pyolysis of low density polyethylene to produce petrochemical feedstock. **J. Anal. Appl. Pyrolysis** . 51: 107-126.

Williams P.T. and Slaney E. 2007. Analysis of products from the pyrolysis and liquefaction of single plastic mixtures. **Resources conservation & recycling**. 51: 754-769.

<http://www.elmhurst.edu/~chm/vchembook.html>, Discussion Board, Lab and Exam Reports, Grades Meets the Elmhurst College General Education Category Requirement (IST).

ภาคผนวก

1. อุณหภูมิ และอัตราการไหลเมื่อทำการป้อนพลาสติกแบบหุคเป็นจังหวะต่อเนื่อง 50 กรัมในสถานะเบดนิ่ง

ตารางผนวกที่ 1 อุณหภูมิ และอัตราการไหลเมื่อทำการป้อนพลาสติกแบบหุคเป็นจังหวะต่อเนื่อง 50 กรัมในสถานะเบดนิ่งตั้งอุณหภูมิที่ 450 °ซ ตลอดความสูง

เวลา (min)	ความสูง (cm)					อัตราการไหล (l/min)		
	10	25	50	100	150	1	2	3
0	450	452	446	451	456	277.45	44.18	34.94
2	445	448	449	452	457	284.20	46.49	32.63
4	450	450	452	453	456	284.20	53.42	41.87
6	435	449	451	453	457	290.95	55.73	46.49
8	442	449	451	451	456	290.95	60.35	44.18
10	450	450	452	452	457	284.20	53.42	41.87
12	434	445	450	451	455	284.20	60.35	44.18
14	445	450	452	452	455	290.95	53.42	41.87
16	435	447	452	453	455	290.95	55.73	44.18
18	442	450	450	452	454	290.95	55.73	44.18
20	451	452	451	451	454	284.20	53.42	39.56
22	440	451	451	452	454	290.95	62.66	41.87
24	449	449	450	452	453	290.95	55.73	44.18
26	433	450	450	451	452	284.20	55.73	41.87
28	440	449	449	450	453	290.95	58.04	44.18
30	451	450	451	451	454	284.20	53.42	39.56
32	438	450	452	452	454	290.95	62.66	39.56
34	447	448	451	452	453	290.95	55.73	41.87
36	434	451	451	451	453	284.20	55.73	44.18
38	442	447	449	450	453	297.70	60.35	41.87
40	452	451	452	450	453	284.20	53.42	39.56
42	437	449	451	451	454	290.95	60.35	44.18

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

เวลา (min)	ความสูง (cm)					อัตราการไหล (l/min)		
	10	25	50	100	150	1	2	3
44	448	449	450	452	453	284.20	55.73	41.87
46	435	451	452	452	454	284.20	58.04	41.87
48	439	447	451	451	454	297.70	55.73	41.87
50	451	451	451	451	453	284.20	53.42	39.56
52	437	452	452	451	452	290.95	60.35	41.87
54	449	448	450	452	453	284.20	53.42	41.87
56	435	450	451	451	452	284.20	53.42	41.87
58	445	446	449	450	452	297.70	60.35	41.87
60	451	451	451	451	452	284.20	53.42	41.87
62	437	448	451	450	453	290.95	62.66	41.87
64	448	450	451	451	452	290.95	55.73	41.87
66	432	451	451	450	452	284.20	58.04	41.87
68	441	447	449	451	452	297.70	55.73	41.87
70	451	451	452	452	452	284.20	53.42	41.87
72	435	449	450	452	453	297.70	62.66	44.18
74	448	450	450	452	452	290.95	53.42	41.87
76	432	450	451	452	452	290.95	55.73	41.87
78	446	447	449	452	453	290.95	58.04	41.87
80	452	450	451	452	452	284.20	53.42	41.87
82	438	449	450	452	453	290.95	62.66	44.18
84	450	449	450	451	452	290.95	55.73	41.87
86	432	451	452	452	453	290.95	55.73	44.18
88	445	448	450	452	452	297.70	55.73	41.87
90	451	451	451	451	453	284.20	53.42	39.56

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

เวลา (min)	ความสูง (cm)					อัตราการไหล (l/min)		
	10	25	50	100	150	1	2	3
92	435	447	450	452	453	290.95	62.66	44.18
94	449	450	450	451	452	290.95	55.73	41.87
96	432	451	451	452	452	284.20	55.73	41.87
98	442	448	450	451	454	297.70	58.04	41.87
100	451	451	449	452	454	284.20	53.42	39.56
102	438	448	452	452	452	290.95	64.97	44.18
104	449	450	451	451	453	290.95	55.73	41.87
106	435	451	452	452	453	290.95	55.73	41.87
108	441	448	449	452	452	297.70	55.73	44.18
110	451	451	452	453	453	284.20	53.42	39.56
112	435	449	451	452	452	290.95	62.66	44.18
114	450	449	450	451	453	290.95	55.73	41.87
116	434	451	451	452	453	290.95	55.73	41.87
118	444	448	447	452	453	297.70	55.73	44.18
120	450	451	451	452	452	284.20	53.42	41.87
122	440	450	451	449	453	290.95	62.66	44.18
124	450	449	451	452	452	290.95	55.73	41.87
126	430	451	451	452	453	290.95	55.73	41.87
128	440	448	450	450	451	297.70	55.73	44.18
130	451	451	452	452	452	284.20	51.11	39.56
132	436	448	450	452	453	290.95	62.66	44.18
134	448	448	450	448	452	290.95	58.04	41.87
136	432	451	452	452	453	290.95	55.73	41.87
138	443	448	449	452	452	297.70	58.04	41.87

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

เวลา (min)	ความสูง (cm)					อัตราการไหล (l/min)		
	10	25	50	100	150	1	2	3
140	451	451	452	452	453	284.20	53.42	39.56
142	435	449	451	451	452	297.70	62.66	44.18
144	449	449	450	450	452	290.95	55.73	41.87
146	431	451	452	452	452	290.95	55.73	41.87
148	445	448	448	452	453	297.70	55.73	44.18
150	451	450	452	453	452	284.20	51.11	39.56
152	437	449	450	451	452	290.95	64.97	44.18
154	448	450	448	452	453	290.95	55.73	41.87
156	432	451	451	451	453	290.95	55.73	44.18
158	448	450	449	451	452	290.95	55.73	41.87
160	451	450	451	452	452	284.20	55.73	41.87
162	436	450	450	451	453	290.95	64.97	44.18
164	450	449	451	449	453	290.95	55.73	41.87
166	431	451	452	451	452	290.95	55.73	41.87
168	446	449	449	452	452	297.70	58.04	41.87
170	451	450	452	451	453	284.20	53.42	39.56
172	438	451	449	451	452	297.70	64.97	44.18
174	449	449	450	449	453	290.95	55.73	41.87
176	434	450	451	452	453	290.95	55.73	44.18
178	449	447	449	451	453	297.70	58.04	41.87
180	451	450	452	452	453	284.20	53.42	39.56
182	438	449	451	451	452	297.70	62.66	44.18
184	450	449	447	451	453	290.95	55.73	41.87

ตารางผนวกที่ 1 (ต่อ)

เวลา (min)	ความสูง (cm)					อัตราการไหล (l/min)		
	10	25	50	100	150	1	2	3
186	432	451	450	452	452	290.95	55.73	44.18
188	442	447	450	449	452	297.70	55.73	44.18
190	450	452	450	450	453	284.20	53.42	39.56
192	438	449	450	450	452	290.95	64.97	44.18
194	450	450	450	451	452	290.95	55.73	41.87
196	432	451	450	451	452	290.95	55.73	41.87
198	444	448	451	450	453	297.70	55.73	41.87
200	451	451	452	451	452	290.95	53.42	41.87

ตารางผนวกที่ 2 อุณหภูมิ และอัตราการไหลเมื่อทำการป้อนพลาสติกแบบหุุดเป็นจังหวะต่อเนื่อง
50 กรัมในสภาวะเบดนิ่ง 2 ตั้งอุณหภูมิที่จุดเหนือแผ่นกระจายก๊าซ 10 ซม. เป็น 450
°ซ เหนือขึ้นไป เป็น 430 °ซ

เวลา (min)	ความสูง (cm)					อัตราการไหล (l/min)		
	10	25	50	100	150	1	2	3
0	454	439	436	429	427	277.45	44.18	34.94
2	433	436	434	429	427	284.20	46.49	32.63
4	445	437	433	429	427	284.20	58.04	46.49
6	434	436	432	429	427	290.95	58.04	46.49
8	444	437	433	429	427	290.95	62.66	44.18
10	449	438	432	429	427	284.20	53.42	41.87
12	434	435	432	429	427	284.20	58.04	44.18
14	445	437	431	430	427	284.20	60.35	44.18
16	432	436	432	429	427	290.95	55.73	44.18
18	440	437	431	429	427	290.95	64.97	44.18
20	451	438	432	429	427	284.20	53.42	39.56
22	435	436	432	430	427	290.95	62.66	44.18
24	448	437	431	429	427	290.95	64.97	44.18
26	433	437	431	429	427	284.20	55.73	41.87
28	440	437	431	429	427	297.70	62.66	44.18
30	450	437	431	429	427	284.20	53.42	39.56
32	437	435	431	429	427	290.95	60.35	39.56
34	447	437	431	429	427	290.95	67.28	44.18
36	430	437	431	429	427	290.95	58.04	44.18
38	441	436	431	429	427	290.95	67.28	41.87
40	452	437	432	429	427	284.20	55.73	39.56
42	435	434	431	429	427	290.95	62.66	44.18
44	448	437	431	429	427	284.20	62.66	39.56
46	432	436	431	429	427	284.20	58.04	41.87

ตารางผนวกที่ 2 (ต่อ)

เวลา (min)	ความสูง (cm)					อัตราการไหล (l/min)		
	10	25	50	100	150	1	2	3
48	440	437	431	429	427	297.70	71.90	41.87
50	451	438	431	429	427	284.20	55.73	39.56
52	435	435	431	429	427	290.95	62.66	39.56
54	447	437	432	429	427	290.95	60.35	41.87
56	431	437	432	429	427	284.20	60.35	41.87
58	441	437	431	429	427	297.70	67.28	44.18
60	452	437	432	429	427	284.20	53.42	41.87
62	433	435	432	429	427	290.95	69.59	44.18
64	448	437	431	429	427	290.95	67.28	41.87
66	431	437	431	429	427	290.95	58.04	41.87
68	441	437	431	429	427	297.70	71.90	41.87
70	451	437	431	429	427	284.20	55.73	41.87
72	436	435	432	429	427	297.70	71.90	44.18
74	448	437	431	429	427	284.20	58.04	41.87
76	433	437	431	429	427	290.95	62.66	41.87
78	445	437	431	429	427	290.95	67.28	44.18
80	452	437	431	429	427	284.20	55.73	41.87
82	438	435	432	429	427	290.95	67.28	44.18
84	449	437	430	429	427	290.95	62.66	41.87
86	431	437	430	429	427	290.95	62.66	44.18
88	445	436	431	429	427	297.70	71.90	44.18
90	451	437	431	429	427	284.20	60.35	39.56
92	437	435	432	429	427	290.95	67.28	44.18

ตารางผนวกที่ 2 (ต่อ)

เวลา (min)	ความสูง (cm)					อัตราการไหล (l/min)		
	10	25	50	100	150	1	2	3
94	449	437	431	429	427	290.95	62.66	41.87
96	431	436	431	429	427	284.20	60.35	41.87
98	445	436	431	429	427	297.70	71.90	44.18
100	451	437	431	429	427	284.20	58.04	39.56
102	438	435	431	429	427	297.70	69.59	44.18
104	448	437	431	429	427	290.95	62.66	41.87
106	432	437	431	429	427	290.95	60.35	41.87
108	445	437	430	429	427	297.70	69.59	44.18
110	451	438	431	429	427	284.20	55.73	39.56
112	437	435	431	428	427	290.95	69.59	44.18
114	449	437	431	429	427	290.95	67.28	41.87
116	432	437	432	429	427	290.95	62.66	41.87
118	445	436	431	429	427	297.70	67.28	44.18
120	451	439	431	429	427	284.20	55.73	41.87
122	439	436	431	429	427	297.70	69.59	44.18
124	449	437	432	429	428	290.95	62.66	41.87
126	432	436	432	429	427	290.95	62.66	41.87
128	445	437	431	429	427	297.70	69.59	44.18
130	451	437	431	429	427	284.20	55.73	39.56
132	439	435	431	429	427	290.95	67.28	44.18
134	449	437	431	429	427	290.95	67.28	41.87
136	433	437	431	429	427	290.95	64.97	41.87
138	445	436	431	429	428	290.95	69.59	44.18

ตารางผนวกที่ 2 (ต่อ)

เวลา (min)	ความสูง (cm)					อัตราการไหล (l/min)		
	10	25	50	100	150	1	2	3
140	452	437	430	429	427	284.20	55.73	39.56
142	439	434	430	429	427	297.70	69.59	44.18
144	448	437	431	429	427	290.95	62.66	41.87
146	431	437	431	429	427	290.95	62.66	41.87
148	442	436	431	429	427	297.70	69.59	44.18
150	451	437	431	429	427	284.20	55.73	39.56
152	438	434	431	429	427	290.95	67.28	44.18
154	449	437	431	430	427	290.95	67.28	41.87
156	432	437	430	429	427	290.95	62.66	44.18
158	442	437	431	429	427	290.95	67.28	41.87
160	451	437	432	429	427	284.20	58.04	41.87
162	438	435	430	429	427	297.70	69.59	44.18
164	449	437	431	429	427	290.95	67.28	41.87
166	431	437	432	429	427	290.95	67.28	41.87
168	444	436	431	429	427	297.70	71.90	41.87
170	451	437	431	429	427	284.20	55.73	41.87
172	438	436	431	429	427	297.70	69.59	44.18
174	450	437	432	429	427	290.95	67.28	41.87
176	432	438	431	429	427	290.95	69.59	44.18
178	445	437	431	429	427	297.70	69.59	44.18
180	451	438	431	429	427	284.20	58.04	39.56
182	439	435	432	429	427	297.70	69.59	44.18
184	450	437	431	429	427	290.95	62.66	41.87

ตารางผนวกที่ 2 (ต่อ)

เวลา (min)	ความสูง (cm)					อัตราการไหล (l/min)		
	10	25	50	100	150	1	2	3
184	450	437	431	429	427	290.95	62.66	41.87
186	432	437	431	429	427	290.95	60.35	44.18
188	445	437	431	429	427	297.70	69.59	44.18
190	451	437	431	429	427	284.20	53.42	41.87
192	439	435	431	429	427	297.70	69.59	44.18
194	450	437	431	429	427	290.95	62.66	41.87
196	433	437	431	429	427	290.95	60.35	41.87
198	444	437	431	429	427	297.70	71.90	41.87
199	450	437	431	429	427	290.95	62.66	44.18
200	451	437	431	429	427	290.95	58.04	41.87

ตารางผนวกที่ 3 อุณหภูมิ และอัตราการไหลเมื่อทำการป้อนพลาสติกแบบหยดเป็นจังหวะต่อเนื่อง 50 กรัมในสภาวะเบดนิ่ง ตั้งอุณหภูมิที่จุดเหนือแผ่นกระจายก๊าซ 10 ซม. เป็น 450°C จุดที่เหนือ 50 ซม. ตั้งที่ 430°C จุดเหนือ 100 ซม. และ 150 ซม. ตั้งไว้ที่ 400°C

เวลา (min)	ความสูง (cm)					อัตราการไหล (l/min)		
	10	25	50	100	150	1	2	3
0	453	445	431	402	402	277.45	44.18	34.94
2	432	438	428	402	403	290.95	46.49	32.63
4	445	444	429	403	404	290.95	58.04	41.87
6	432	436	430	403	403	290.95	58.04	46.49
8	445	437	432	404	404	290.95	58.04	41.87
10	449	444	432	403	405	284.20	53.42	41.87
12	433	436	432	403	404	290.95	58.04	41.87
14	445	440	433	402	404	290.95	60.35	41.87
16	432	436	431	402	404	290.95	55.73	44.18
18	441	438	433	403	404	290.95	60.35	41.87
20	449	444	433	403	404	284.20	53.42	41.87
22	433	436	433	403	404	290.95	62.66	44.18
24	445	441	433	403	404	290.95	64.97	41.87
26	430	436	431	403	404	290.95	55.73	41.87
28	441	439	433	403	404	290.95	62.66	44.18
30	450	444	433	403	404	284.20	53.42	39.56
32	437	437	433	403	404	297.70	60.35	41.87
34	447	443	433	403	404	290.95	60.35	41.87
36	431	436	431	403	404	290.95	58.04	44.18
38	440	441	433	403	404	290.95	62.66	41.87
40	450	445	433	403	404	284.20	55.73	39.56
42	435	437	433	403	404	290.95	62.66	44.18
44	449	443	433	403	404	290.95	60.35	41.87
46	431	435	431	403	404	290.95	58.04	41.87

ตารางผนวกที่ 3 (ต่อ)

เวลา (min)	ความสูง (cm)					อัตราการไหล (l/min)		
	10	25	50	100	150	1.00	2.00	3.00
48	440	441	433	403	404	297.70	60.35	41.87
50	451	445	433	403	404	284.20	55.73	39.56
52	436	436	433	403	404	290.95	58.04	41.87
54	449	444	433	403	404	284.20	60.35	41.87
56	430	436	431	403	404	290.95	60.35	41.87
58	440	441	433	403	404	297.70	62.66	44.18
60	451	444	433	403	404	284.20	53.42	41.87
62	432	436	433	403	404	290.95	60.35	44.18
64	448	442	433	403	404	290.95	60.35	41.87
66	430	436	431	403	404	290.95	58.04	41.87
68	440	441	433	403	404	297.70	62.66	44.18
70	450	444	433	403	404	284.20	55.73	41.87
72	437	438	432	403	404	297.70	60.35	44.18
74	449	444	433	403	404	284.20	55.73	41.87
76	432	436	430	403	404	290.95	58.04	41.87
78	445	440	432	403	404	290.95	60.35	44.18
80	452	445	433	403	404	284.20	55.73	41.87
82	438	437	432	404	404	290.95	62.66	44.18
84	449	444	433	403	404	290.95	55.73	41.87
86	431	436	430	403	404	290.95	58.04	44.18
88	445	441	432	403	404	297.70	60.35	44.18
90	452	445	433	403	404	284.20	53.42	39.56
92	438	438	432	403	404	290.95	64.97	44.18

ตารางผนวกที่ 3 (ต่อ)

เวลา (min)	ความสูง (cm)					อัตราการไหล (l/min)		
	10	25	50	100	150	1.00	2.00	3.00
94	450	444	433	403	404	290.95	55.73	41.87
96	432	436	429	403	404	284.20	55.73	41.87
98	444	441	432	403	404	297.70	60.35	44.18
100	451	444	433	404	404	284.20	53.42	39.56
102	437	438	432	403	404	290.95	64.97	44.18
104	450	444	433	403	404	290.95	55.73	41.87
106	432	436	430	403	404	290.95	60.35	41.87
108	444	441	432	403	404	297.70	60.35	44.18
110	451	444	433	403	404	284.20	55.73	39.56
112	437	438	431	403	404	290.95	64.97	44.18
114	449	444	433	403	404	290.95	58.04	41.87
116	433	435	430	403	404	290.95	60.35	41.87
118	445	441	432	403	404	297.70	60.35	44.18
120	451	444	433	403	404	284.20	53.42	41.87
122	437	438	432	403	404	290.95	64.97	44.18
124	449	444	433	403	404	290.95	55.73	41.87
126	431	436	431	401	404	290.95	55.73	41.87
128	445	442	433	403	404	297.70	60.35	44.18
130	451	445	433	403	404	284.20	53.42	39.56
132	439	438	432	403	404	290.95	64.97	44.18
134	449	444	433	403	404	290.95	55.73	41.87
136	432	436	430	403	404	290.95	60.35	41.87
138	445	442	432	403	404	297.70	60.35	41.87

ตารางผนวกที่ 3 (ต่อ)

เวลา (min)	ความสูง (cm)					อัตราการไหล (l/min)		
	10	25	50	100	150	1.00	2.00	3.00
140	451	445	433	403	404	284.20	53.42	41.87
142	438	438	432	403	404	297.70	64.97	44.18
144	448	444	433	403	404	290.95	60.35	41.87
146	432	436	431	403	404	290.95	62.66	41.87
148	444	442	432	403	404	297.70	60.35	44.18
150	451	445	433	403	404	284.20	53.42	39.56
152	438	438	432	403	404	290.95	64.97	44.18
154	450	444	433	403	404	290.95	55.73	41.87
156	432	437	431	403	404	290.95	55.73	44.18
158	445	442	432	403	404	290.95	60.35	41.87
160	451	445	433	403	404	284.20	55.73	41.87
162	438	437	432	403	404	290.95	64.97	44.18
164	449	444	433	403	404	290.95	55.73	41.87
166	431	436	431	403	404	290.95	55.73	41.87
168	444	442	432	403	404	290.95	60.35	41.87
170	452	445	433	403	404	284.20	53.42	41.87
172	439	438	432	403	404	297.70	64.97	44.18
174	450	444	433	403	404	290.95	55.73	41.87
176	432	435	430	403	404	290.95	60.35	44.18
178	442	442	433	403	404	297.70	60.35	44.18
180	451	445	433	404	404	284.20	53.42	39.56
182	439	438	432	403	404	297.70	64.97	44.18
184	450	444	433	403	404	290.95	60.35	41.87

ตารางผนวกที่ 3 (ต่อ)

เวลา (min)	ความสูง (cm)					อัตราการไหล (l/min)		
	10	25	50	100	150	1.00	2.00	3.00
186	431	435	430	403	404	290.95	60.35	44.18
188	444	440	432	403	404	290.95	60.35	44.18
190	451	444	433	403	404	284.20	53.42	41.87
192	439	438	432	403	404	290.95	67.28	44.18
194	450	444	433	403	404	290.95	58.04	41.87
196	432	435	431	403	404	290.95	60.35	41.87
198	445	441	433	403	404	297.70	60.35	44.18
200	451	444	434	403	404	290.95	53.42	41.87

ตารางผนวกที่ 4 อุณหภูมิ และอัตราการไหลเมื่อทำการป้อนพลาสติกแบบหุคเป็นจังหวะต่อเนื่อง 50 กรัมในสภาวะเบดนิ่ง ตั้งอุณหภูมิที่จุดเหนือแผ่นกระจายก๊าซ 10 ซม. เป็น 450 °ซ จุดที่เหนือ 50 ซม. ตั้งที่ 430 °ซ จุดเหนือ 100 ซม. ตั้งที่ 150 °ซ จุดเหนือ 150 ซม. ตั้งไว้ที่ 300 °ซ

เวลา (min)	ความสูง (cm)					อัตราการไหล (l/min)		
	10	25	50	100	150	1	2	3
0	453	444	429	267	305	277.45	44.18	34.94
2	432	437	426	267	305	290.95	62.66	37.25
4	445	442	428	267	305	290.95	62.66	41.87
6	431	436	425	266	304	290.95	62.66	44.18
8	445	436	428	266	305	297.70	71.90	41.87
10	448	442	430	266	305	284.20	53.42	41.87
12	433	436	428	267	305	304.45	71.90	44.18
14	447	440	431	267	305	304.45	62.66	41.87
16	432	436	428	267	305	297.70	62.66	44.18
18	442	438	432	267	305	304.45	71.90	44.18
20	450	444	433	266	305	290.95	53.42	41.87
22	435	436	433	266	305	311.20	71.90	44.18
24	447	441	433	266	304	297.70	71.90	41.87
26	431	436	432	267	305	297.70	62.66	41.87
28	440	439	433	267	305	311.20	76.52	44.18
30	451	444	433	267	305	290.95	58.04	39.56
32	439	437	433	266	305	304.45	71.90	44.18
34	449	443	433	267	304	304.45	71.90	41.87
36	432	436	431	267	305	304.45	62.66	44.18
38	441	441	433	267	305	297.70	76.52	41.87
40	451	445	433	267	305	284.20	58.04	39.56
42	435	437	433	266	305	304.45	71.90	44.18
44	449	443	433	267	305	297.70	71.90	41.87
46	432	435	431	267	305	297.70	71.90	41.87

ตารางผนวกที่ 4 (ต่อ)

เวลา (min)	ความสูง (cm)					อัตราการไหล (l/min)		
	10	25	50	100	150	1	2	3
48	441	441	433	267	305	304.45	71.90	44.18
50	452	445	433	267	305	297.70	58.04	39.56
52	435	436	433	267	305	304.45	71.90	44.18
54	449	444	433	266	305	297.70	71.90	41.87
56	432	436	432	266	305	297.70	71.90	41.87
58	439	441	433	267	304	311.20	76.52	44.18
60	452	444	433	267	305	290.95	58.04	41.87
62	435	436	433	267	305	304.45	76.52	44.18
64	449	442	433	267	305	304.45	62.66	41.87
66	431	436	431	266	305	304.45	67.28	41.87
68	441	441	433	266	304	297.70	78.83	44.18
70	451	444	433	267	304	284.20	58.04	41.87
72	435	438	432	267	305	304.45	71.90	44.18
74	449	444	433	267	305	297.70	67.28	41.87
76	432	436	430	266	305	297.70	62.66	41.87
78	445	440	432	266	305	297.70	76.52	44.18
80	451	444	431	266	305	290.95	58.04	41.87
82	435	437	432	267	305	311.20	71.90	44.18
84	449	443	433	267	305	297.70	71.90	41.87
86	428	435	431	267	304	297.70	62.66	44.18
88	439	440	433	267	305	311.20	76.52	44.18
90	451	445	433	266	305	290.95	58.04	39.56
92	435	437	432	266	305	311.20	76.52	44.18

ตารางผนวกที่ 4 (ต่อ)

เวลา (min)	ความสูง (cm)					อัตราการไหล (l/min)		
	10	25	50	100	150	1	2	3
94	448	443	433	266	305	297.70	69.59	41.87
96	431	436	431	267	305	304.45	71.90	41.87
98	439	440	433	267	305	297.70	71.90	46.49
100	451	444	433	267	305	290.95	58.04	39.56
102	435	438	431	266	305	311.20	76.52	46.49
104	447	443	433	267	304	290.95	67.28	41.87
106	431	435	430	267	305	304.45	71.90	41.87
108	439	440	433	267	305	297.70	69.59	44.18
110	451	445	433	267	305	290.95	58.04	41.87
112	435	437	433	266	305	304.45	74.21	46.49
114	447	442	433	267	304	304.45	71.90	41.87
116	429	435	432	267	305	304.45	71.90	41.87
118	439	441	433	267	305	297.70	69.59	44.18
120	452	444	433	267	304	290.95	58.04	41.87
122	435	437	432	266	305	311.20	76.52	46.49
124	447	443	433	267	305	297.70	67.28	41.87
126	432	435	431	267	305	297.70	69.59	41.87
128	440	441	433	267	305	304.45	71.90	44.18
130	451	445	433	267	305	290.95	58.04	39.56
132	435	437	432	267	305	311.20	76.52	44.18
134	447	443	433	266	305	297.70	67.28	41.87
136	432	436	429	266	305	304.45	71.90	44.18
138	442	442	432	267	305	297.70	69.59	44.18

ตารางผนวกที่ 4 (ต่อ)

เวลา (min)	ความสูง (cm)					อัตราการไหล (l/min)		
	10	25	50	100	150	1	2	3
140	451	445	433	267	305	284.20	58.04	41.87
142	434	438	432	267	305	311.20	74.21	46.49
144	447	444	432	267	305	297.70	67.28	41.87
146	430	435	429	266	305	311.20	67.28	44.18
148	440	441	433	266	304	311.20	76.52	44.18
150	450	444	433	267	305	290.95	58.04	39.56
152	435	437	433	267	305	304.45	69.59	46.49
154	447	443	433	267	305	290.95	62.66	41.87
156	432	435	430	266	305	304.45	69.59	44.18
158	440	440	433	266	304	297.70	67.28	41.87
160	451	445	433	266	304	290.95	58.04	41.87
162	432	437	432	267	305	311.20	76.52	44.18
164	447	444	433	267	305	290.95	67.28	41.87
166	432	435	431	267	305	297.70	62.66	44.18
168	441	440	432	267	305	311.20	76.52	41.87
170	451	445	433	266	305	290.95	58.04	41.87
172	435	437	432	266	305	304.45	71.90	44.18
174	448	444	433	266	305	304.45	69.59	41.87
176	430	435	430	267	304	297.70	69.59	44.18
178	440	440	433	267	305	297.70	67.28	44.18
180	451	445	433	267	305	290.95	58.04	39.56
182	435	437	432	266	305	311.20	74.21	44.18
184	449	443	433	267	305	290.95	67.28	41.87

ตารางผนวกที่ 4 (ต่อ)

เวลา (min)	ความสูง (cm)					อัตราการไหล (l/min)		
	10	25	50	100	150	1	2	3
186	432	435	430	267	305	304.45	71.90	44.18
188	442	440	433	267	305	297.70	69.59	44.18
190	451	444	433	267	305	290.95	58.04	41.87
192	434	437	433	266	305	311.20	76.52	44.18
194	447	443	433	267	304	297.70	67.28	41.87
196	432	435	431	267	305	304.45	71.90	44.18
198	440	440	433	267	305	297.70	67.28	44.18
200	451	444	434	267	305	290.95	58.04	41.87

2. อุณหภูมิ และอัตราการไหลเมื่อทำการป้อนพลาสติกแบบป้อนและหยุดเป็นจังหวะต่อเนื่อง 50 กรัมในสถานะฟลูอิด์เบด เมื่อป้อนไนโตรเจน 9.40 กิโลกรัม/ชั่วโมง (1.3 เท่าของอัตราเร็วต่ำสุดพลาสติก)

ตารางผนวกที่ 5 อุณหภูมิ และอัตราการไหลเมื่อทำการป้อนพลาสติกแบบป้อนและหยุดเป็นจังหวะต่อเนื่อง 50 กรัมในสถานะฟลูอิด์เบด เมื่อป้อนไนโตรเจน 9.40 กิโลกรัม/ชั่วโมง (1.3 เท่าของอัตราเร็วต่ำสุดพลาสติก) ตั้งอุณหภูมิที่ 450 °ซ ตลอดความสูง

เวลา (min)	ความสูง (cm)					อัตราการไหล (l/min)		
	10	25	50	100	150	1	2	3
0	450	449	452	451	455	344.94	44.18	37.25
2	433	445	451	449	451	351.69	46.49	39.56
4	427	442	448	449	450	358.44	48.80	39.56
6	446	449	452	451	452	351.69	48.80	39.56
8	445	445	452	452	451	358.44	58.04	41.87
10	435	442	447	450	450	365.19	62.66	41.87
12	448	447	452	452	453	351.69	55.73	44.18
14	442	444	450	451	450	365.19	58.04	44.18
16	435	442	447	450	448	365.19	67.28	44.18
18	450	448	452	454	452	351.69	51.11	46.49
20	447	444	450	451	451	358.44	58.04	46.49
22	437	443	449	451	450	358.44	69.59	46.49
24	451	449	452	453	452	351.69	53.42	46.49
26	446	445	450	452	451	358.44	64.97	46.49
28	436	443	447	450	450	365.19	67.28	46.49
30	451	448	452	453	453	351.69	53.42	46.49
32	445	445	450	452	450	365.19	60.35	44.18
34	436	441	447	449	451	371.94	67.28	44.18
36	451	447	451	453	452	351.69	51.11	46.49

ตารางผนวกที่ 5 (ต่อ)

เวลา (min)	ความสูง (cm)					อัตราการไหล (l/min)		
	10	25	50	100	150	1	2	3
38	445	445	450	451	450	365.19	58.04	44.18
40	437	442	446	450	450	365.19	69.59	46.49
42	451	449	451	454	452	351.69	53.42	46.49
44	445	445	450	451	452	358.44	60.35	44.18
46	436	441	450	451	449	365.19	67.28	46.49
48	451	447	452	453	452	351.69	51.11	46.49
50	442	445	451	451	451	358.44	60.35	46.49
52	436	441	447	450	449	371.94	69.59	46.49
54	449	449	452	454	452	358.44	55.73	46.49
56	443	444	450	451	451	365.19	62.66	44.18
58	437	441	447	449	449	365.19	69.59	46.49
60	449	447	451	453	452	351.69	48.80	46.49
62	445	447	451	451	451	365.19	62.66	46.49
64	438	442	447	451	450	358.44	64.97	46.49
66	451	449	452	454	452	351.69	48.80	46.49
68	445	445	450	452	451	358.44	60.35	46.49
70	436	442	447	450	449	365.19	67.28	46.49
72	450	450	451	453	452	351.69	46.49	44.18
74	445	445	450	451	450	365.19	62.66	44.18
76	437	442	450	449	449	365.19	69.59	46.49
78	451	448	451	453	452	351.69	51.11	46.49
80	445	445	451	452	451	365.19	60.35	46.49
82	436	442	447	451	451	371.94	64.97	46.49
84	450	449	452	454	453	358.44	51.11	46.49

ตารางผนวกที่ 5 (ต่อ)

เวลา (min)	ความสูง (cm)					อัตราการไหล (l/min)		
	10	25	50	100	150	1	2	3
86	445	445	451	452	452	365.19	60.35	46.49
88	437	441	446	450	450	365.19	64.97	46.49
90	449	448	452	453	451	351.69	51.11	46.49
92	445	445	451	451	451	358.44	60.35	46.49
94	438	442	447	449	450	365.19	64.97	46.49
96	450	450	452	453	452	358.44	53.42	46.49
98	447	445	450	452	451	358.44	60.35	46.49
100	438	442	447	451	450	371.94	64.97	46.49
102	451	450	451	454	452	358.44	51.11	46.49
104	447	447	451	451	451	358.44	60.35	46.49
106	438	442	447	450	451	365.19	62.66	46.49
108	449	448	452	453	452	351.69	48.80	46.49
110	446	444	451	451	451	365.19	60.35	46.49
112	436	442	447	449	450	365.19	64.97	46.49
114	451	449	452	453	452	351.69	51.11	46.49
116	445	445	451	452	451	365.19	62.66	46.49
118	437	442	446	449	450	365.19	64.97	46.49
120	451	450	452	453	452	351.69	53.42	46.49

ตารางผนวกที่ 6 อุณหภูมิ และอัตราการไหลเมื่อทำการป้อนพลาสติกแบบป้อนและหยุดเป็นจังหวะ
ต่อเนื่อง 50 กรัมในสภาวะฟลูอิดไซ์เบด เมื่อป้อนไนโตรเจน 9.40 กิโลกรัม/ชั่วโมง
(1.3 เท่าของอัตราเร็วต่ำสุดพลาสติก) อุณหภูมิเหนือแผ่นกระจายก๊าซ 10 50 100
150 ซม. เป็น 450, 450 150 และ 450 °ซ

เวลา (min)	ความสูง (cm)					อัตราการไหล (l/min)		
	10	25	50	100	150	1	2	3
0	451	448	451	275	451	344.943	44.18	39.56
2	433	445	450	275	450	358.441	48.8	39.56
4	428	442	448	273	448	358.441	53.42	39.56
6	446	449	451	275	452	351.692	48.8	39.56
8	442	444	451	274	451	365.19	62.66	41.87
10	433	442	446	274	450	371.939	71.9	41.87
12	449	449	452	275	452	351.692	55.73	44.18
14	444	444	449	274	451	365.19	62.66	41.87
16	434	441	444	273	449	365.19	74.21	41.87
18	450	449	452	274	451	351.692	51.11	46.49
20	447	445	448	275	451	365.19	67.28	44.18
22	437	442	445	274	449	365.19	71.9	46.49
24	452	449	451	275	452	351.692	53.42	46.49
26	445	446	449	275	451	371.939	67.28	46.49
28	437	442	444	273	449	365.19	74.21	46.49
30	451	449	451	274	452	351.692	53.42	46.49
32	446	445	449	274	451	371.939	67.28	46.49
34	436	442	444	274	449	371.939	71.9	48.8
36	451	449	450	275	452	351.692	53.42	46.49
38	445	446	449	275	450	365.19	67.28	44.18
40	437	441	445	274	449	365.19	74.21	46.49
42	451	450	451	275	452	351.692	53.42	46.49
44	445	445	448	274	451	365.19	62.66	46.49

ตารางผนวกที่ 6 (ต่อ)

เวลา (min)	ความสูง (cm)					อัตราการไหล (l/min)		
	10	25	50	100	150	1	2	3
46	436	441	445	274	448	365.19	74.21	48.8
48	451	450	451	275	452	351.692	53.42	46.49
50	442	445	448	275	451	365.19	67.28	46.49
52	437	441	444	274	448	371.939	74.21	48.8
54	450	448	452	275	451	358.441	55.73	46.49
56	445	445	448	274	450	371.939	67.28	46.49
58	436	441	445	274	449	365.19	74.21	46.49
60	449	449	452	276	452	351.692	53.42	46.49
62	444	447	447	274	450	365.19	67.28	46.49
64	437	442	445	273	448	365.19	74.21	46.49
66	451	449	452	275	452	351.692	53.42	46.49
68	446	446	448	275	451	371.939	64.97	46.49
70	437	441	445	274	449	365.19	71.9	46.49
72	451	450	451	275	451	351.692	55.73	44.18
74	445	445	449	275	451	365.19	67.28	46.49
76	436	442	446	274	449	365.19	74.21	46.49
78	450	450	452	275	451	358.441	55.73	46.49
80	447	446	448	275	451	371.939	67.28	46.49
82	436	442	445	273	448	371.939	74.21	48.8
84	451	450	451	275	452	358.441	55.73	46.49
86	445	447	449	275	450	365.19	64.97	46.49
88	437	441	445	274	449	365.19	74.21	46.49
90	450	449	451	275	451	351.692	55.73	46.49

ตารางผนวกที่ 6 (ต่อ)

เวลา (min)	ความสูง (cm)					อัตราการไหล (l/min)		
	10	25	50	100	150	1	2	3
92	446	444	451	275	451	365.19	64.97	46.49
94	437	442	444	274	448	365.19	74.21	46.49
96	450	450	450	275	452	358.441	53.42	46.49
98	447	444	449	275	451	365.19	67.28	46.49
100	437	442	445	275	449	371.939	74.21	48.8
102	451	451	451	275	451	358.441	55.73	46.49
104	446	446	449	275	450	365.19	64.97	46.49
106	437	442	445	274	449	365.19	71.9	46.49
108	450	449	451	275	452	351.692	53.42	46.49
110	445	445	449	275	450	371.939	64.97	46.49
112	437	442	445	274	449	365.19	74.21	48.8
114	450	450	451	275	452	351.692	53.42	46.49
116	444	445	449	275	451	371.939	67.28	46.49
118	436	442	444	273	449	365.19	71.9	46.49
120	451	450	451	275	452	351.692	53.42	46.49

3. อุณหภูมิ และอัตราการไหลเมื่อทำการป้อนพลาสติกแบบหุคเป็นจังหวะต่อเนื่อง 50 กรัมในสถานะฟลูอิดซ์เบค เมื่อป้อนไนโตรเจน 10.85 กิโลกรัม/ชั่วโมง (1.5 เท่าของอัตราเร็วต่ำสุดพลาสติก)

ตารางผนวกที่ 7 อุณหภูมิ และอัตราการไหลเมื่อทำการป้อนพลาสติกแบบหุคเป็นจังหวะต่อเนื่อง 50 กรัมในสถานะฟลูอิดซ์เบค เมื่อป้อนไนโตรเจน 10.85 กิโลกรัม/ชั่วโมง (1.5 เท่าของอัตราเร็วต่ำสุดพลาสติก) ตั้งอุณหภูมิที่ 450 °ซ ตลอดความสูง

เวลา (min)	ความสูง (cm)					อัตราการไหล (l/min)		
	10	25	50	100	150	1	2	3
0	454	454	450	450	445	412.43	44.18	39.56
2	453	455	452	452	446	419.18	46.49	39.56
4	450	453	452	453	446	419.18	48.80	41.87
6	452	453	452	452	447	419.18	51.11	44.18
8	449	454	453	452	446	425.93	51.11	48.80
10	449	453	452	453	446	419.18	53.42	48.80
12	451	453	454	453	447	419.18	53.42	51.11
14	451	453	453	453	447	425.93	53.42	51.11
16	449	452	452	452	446	425.93	55.73	48.80
18	451	454	453	452	447	419.18	55.73	48.80
20	452	453	454	453	446	425.93	55.73	48.80
22	450	454	454	453	446	425.93	55.73	48.80
24	450	452	455	453	447	425.93	53.42	51.11
26	449	451	452	453	447	425.93	55.73	51.11
28	451	453	453	453	447	432.68	48.80	48.80
30	450	454	455	454	447	425.93	55.73	48.80
32	449	453	454	455	447	425.93	55.73	51.11
34	451	454	453	454	446	432.68	55.73	51.11
36	451	452	454	453	447	425.93	55.73	51.11

ตารางผนวกที่ 7 (ต่อ)

เวลา (min)	ความสูง (cm)					อัตราการไหล (l/min)		
	10	25	50	100	150	1	2	3
38	451	453	453	453	447	432.68	55.73	51.11
40	450	452	453	452	446	439.43	53.42	51.11
42	451	452	454	453	447	439.43	51.11	51.11
44	450	453	454	453	447	439.43	48.80	51.11
46	451	453	454	454	447	439.43	55.73	51.11
48	452	452	454	454	447	432.68	55.73	48.8
50	448	453	454	455	447	432.68	55.73	48.8
52	450	452	453	454	446	425.931	55.73	48.8
54	452	452	454	453	447	432.68	53.42	48.8
56	450	451	452	453	447	432.68	53.42	48.8
58	449	453	453	453	447	432.68	53.42	48.8
60	451	452	453	453	447	425.931	53.42	51.11
62	451	454	453	454	447	432.68	51.11	53.42
64	451	454	454	454	447	432.68	51.11	51.11
66	451	453	453	453	447	432.68	51.11	51.11
68	449	453	453	455	447	432.68	51.11	51.11
70	449	453	454	453	446	425.931	51.11	51.11
72	450	452	452	454	447	432.68	51.11	48.8
74	451	452	454	453	447	432.68	55.73	48.8
76	450	452	454	454	447	432.68	55.73	48.8
78	452	452	453	454	447	432.68	55.73	51.11
80	450	453	454	455	447	432.68	55.73	51.11

ตารางผนวกที่ 8 อุณหภูมิ และอัตราการไหลเมื่อทำการป้อนพลาสติกแบบหยดเป็นจังหวะต่อเนื่อง 50 กรัมในสภาวะฟลูอิด์เบด เมื่อป้อนไนโตรเจน 10.85 กิโลกรัม/ชั่วโมง (1.5 เท่าของอัตราเร็วต่ำสุดพลาสติก) อุณหภูมิเหนือแผ่นกระจายก๊าซ 10 50 100 150 ซม. เป็น 450, 450 150 และ 450°ซ

เวลา (min)	ความสูง (cm)					อัตราการไหล (l/min)		
	10	25	50	100	150	1	2	3
0	453	452	450	281	446	412.433	44.18	41.87
2	453	447	453	281	447	419.182	46.49	41.87
4	450	449	451	282	447	419.182	53.42	41.87
6	452	452	451	281	447	419.182	55.73	44.18
8	450	454	453	281	448	425.931	55.73	46.49
10	450	452	453	282	448	425.931	55.73	48.8
12	451	453	454	283	448	419.182	55.73	51.11
14	451	452	452	282	447	425.931	55.73	51.11
16	449	452	452	281	447	425.931	53.42	48.8
18	451	452	452	281	448	419.182	53.42	48.8
20	452	452	453	282	448	425.931	53.42	51.11
22	450	452	454	282	447	425.931	53.42	48.8
24	450	452	454	281	448	425.931	53.42	51.11
26	449	451	452	282	447	425.931	53.42	51.11
28	451	452	453	282	448	432.68	53.42	48.8
30	450	452	454	282	448	425.931	53.42	51.11
32	450	452	453	281	448	425.931	55.73	51.11
34	451	453	453	281	448	432.68	55.73	51.11
36	451	452	453	282	448	425.931	55.73	51.11
38	450	453	453	282	448	432.68	55.73	51.11
40	450	451	452	283	448	425.931	55.73	51.11
42	451	452	454	282	448	425.931	55.73	51.11
44	450	453	454	282	448	425.931	53.42	51.11

ตารางผนวกที่ 8 (ต่อ)

เวลา (min)	ความสูง (cm)					อัตราการไหล (l/min)		
	10	25	50	100	150	1	2	3
46	449	452	453	282	448	425.931	53.42	48.8
48	451	452	454	282	448	425.931	53.42	48.8
50	449	453	453	282	448	425.931	53.42	51.11
52	450	452	453	283	448	425.931	53.42	51.11
54	452	452	453	282	448	425.931	53.42	51.11
56	450	451	452	283	448	425.931	53.42	51.11
58	450	452	453	282	448	425.931	53.42	51.11
60	451	452	454	282	448	425.931	53.42	51.11
62	452	453	453	282	448	425.931	55.73	51.11
64	451	452	454	282	448	425.931	55.73	51.11
66	451	452	453	282	448	432.68	53.42	51.11
68	449	452	452	282	448	432.68	55.73	51.11
70	450	452	453	282	448	425.931	55.73	51.11
72	450	452	452	283	448	432.68	53.42	51.11
74	451	452	454	283	448	432.68	53.42	51.11
76	450	452	454	282	448	432.68	53.42	51.11
78	452	452	453	283	448	432.68	55.73	51.11
80	450	453	454	282	448	432.68	55.73	51.11

4. เครื่องวัดอัตราการไหลแบบออร์ฟิส

ตารางผนวกที่ 9 Orifice flow meter calibration data before gas flow in condenser 1

Scale reading	Flow rate (l/min)
10	74.98
20	142.47
30	209.96
40	277.45
50	344.94
60	412.43
70	479.92
80	547.41
90	614.90
100	682.39

ตารางผนวกที่ 10 Orifice flow meter calibration data before and after gas flow in condenser 2 and 3

Scale reading	Flow rate (l/min)	Scale reading	Flow rate (l/min)
10	20.7	10	21.1
20	25.3	20	25.7
30	30.1	30	30.3
40	33.8	40	34.9
50	40.2	50	39.6
60	43.7	60	44.2
70	48.5	70	48.8
80	54.1	80	53.4
90	58.0	90	58.0

5. สกรูป้อนพลาสติก

ตารางผนวกที่ 11 Screw feeder calibration data

Scale reading (Hz)	Flow rate (g/s)
2	1.30
4	2.44
6	3.58
8	4.72
10	5.86
12	7.00
14	8.14
16	9.28
18	10.42
20	11.56

6. วิธีคำนวณค่าผลิตภัณฑ์ ก๊าซ ของเหลวที่ออกมาจากจุดควบแน่นที่ 1 และ 2

กรณีใช้อัตราการไหลไนโตรเจน 7.24 กิโลกรัม/ชั่วโมง (1 เท่าอัตราเร็วต่ำสุดพลาสติก) ทำการป้อนพลาสติก 50 กรัม/รอบ โดยมีการป้อนพลาสติกจนครบ 40 รอบและทำการควบคุมอุณหภูมิ 450°C ตลอดความสูงปฏิกรณ์

6.1 การหาปริมาณพลาสติกป้อน

ในการป้อน 1 รอบทำการป้อนพลาสติก 50 กรัม ใช้เวลา 30 วินาที ดังนั้นอัตราการป้อนพลาสติกเป็น $\frac{50}{0.5} = 100 \text{ g/min}$

6.2 การหาปริมาณก๊าซพลาสติกออก

ทำการป้อนพลาสติก 50 กรัม/รอบ โดยมีการป้อนพลาสติกครบ 40 ครั้ง ดังนั้น มีพลาสติกทั้งหมดในการเกิดปฏิกิริยา $50 \times 40 = 2000 \text{ g}$

ในแต่ละรอบใช้เวลา 5 นาที ดังนั้นเวลาทั้งหมดที่พลาสติก 2000 g กรัมทำปฏิกิริยา คือ $5 \times 40 = 200 \text{ min}$

$$\text{มีก๊าซพลาสติกออกจากปฏิกรณ์} = \frac{2000}{200} = 10 \text{ g/min}$$

6.3 การหาปริมาณก๊าซและของเหลวเข้าเครื่องควบแน่นที่ 1 และ 2 โดยการปรับให้ก๊าซพลาสติกเข้าหน่วยควบแน่นที่ 1 และ 2 อัตราส่วน 5.5: 1

เมื่อทำการปรับแล้วให้ก๊าซพลาสติกเข้าหน่วยควบแน่นที่ 1 และ 2 ในอัตราส่วน 5.5: 1 จะมีก๊าซพลาสติกเข้าหน่วยควบแน่นที่ 1 และ 2 8.46 และ 1.54 g/min ตามลำดับ

ในหน่วยควบแน่นที่ 1 และ 2 มีปริมาณของเหลวทั้งหมด 298 และ 105.8 กรัม ตามลำดับ ดังนั้นปริมาณของเหลว $\frac{298}{200} = 1.49 \text{ g/min}$ และ $\frac{105.8}{200} = 0.53 \text{ g/min}$

ปริมาณก๊าซออกจากหน่วยควบแน่นที่ 1 และ 2 $8.46 - 1.49 = 6.97 \text{ g/min}$ และ $1.54 - 0.53 = 1.01 \text{ g/min}$

และเมื่อทำการเปลี่ยนจุดควบคุมอุณหภูมิจะได้ปริมาณพลาสติกดังนี้

ตารางผนวกที่ 12 ผลิตภัณฑ์ที่ได้ในสภาวะเบดนิ่ง

การทดลองที่	ผลิตภัณฑ์	จุดควบแน่น 1 (กรัม/นาที)		จุดควบแน่น 2 (กรัม/นาที)	
		ก๊าซ	ของเหลว	ก๊าซ	ของเหลว
1		6.97	1.49	1.01	0.53
2		6.91	1.55	0.98	0.56
3		5.90	2.56	0.93	0.60
4		5.18	3.29	0.79	0.75

เปลี่ยนเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักคำนวณจาก $\frac{\text{น้ำหนักผลิตภัณฑ์}}{\text{น้ำหนักผลิตภัณฑ์ทั้งหมด}} \times 100$
แสดงดังตาราง

ตารางผนวกที่ 13 เปอร์เซนต์โดยน้ำหนักผลิตภัณฑ์ที่ได้ในสภาวะเบดนิ่ง

การทดลองที่	ผลิตภัณฑ์	จุดควบแน่น 1 (% wt)		จุดควบแน่น 2 (% wt)	
		ก๊าซ	ของเหลว	ก๊าซ	ของเหลว
1		69.72	14.90	10.09	5.29
2		69.12	15.50	9.75	5.63
3		59.04	25.58	9.34	6.05
4		51.77	32.85	7.87	7.52

โดยที่ การทดลองที่ 1 ตั้งอุณหภูมิที่ 450°C ตลอดความสูง

การทดลองที่ 2 ตั้งอุณหภูมิจุดเหนือแผ่นกระจายก๊าซ 10 ซม. เป็น 450°C จุดที่เหนือขึ้น ไปตั้งที่ 430°C

การทดลองที่ 3 ตั้งอุณหภูมิจุดเหนือแผ่นกระจายก๊าซ 10 ซม. เป็น 450 °ซ จุดที่เหนือ 50 ซม. ตั้งไว้ที่ 430 °ซ จุดเหนือ 100 ซม. และ 150 ซม. ตั้งไว้ที่ 400 °ซ

การทดลองที่ 4 ตั้งอุณหภูมิจุดเหนือแผ่นกระจายก๊าซ 10 ซม. เป็น 450 °ซ จุดเหนือ 50 ซม. ตั้งไว้ที่ 430 °ซ จุดเหนือ 100 ซม. ตั้งไว้ที่ 150 °ซ จุดเหนือ 150 ซม. ตั้งไว้ที่ 300 °ซ

เมื่อเปลี่ยนอัตราการไหลในโตรเจน เป็น 9.40 กิโลกรัม/ชั่วโมง ป้อนพลาสติก 100 กรัม/นาทึ มีก๊าซพลาสติกออกจากปฏิกรณ์ 16.67 กรัม/นาทึ โดยมีปริมาณก๊าซและของเหลวเข้าเครื่องควบแน่นที่ 1 และ 2 โดยการปรับให้ก๊าซพลาสติกเข้าหน่วยควบแน่นที่ 1 และ 2 อัตราส่วน 6:1 มีปริมาณผลิตภัณฑ์ดังตาราง

ตารางผนวกที่ 14 ผลิตภัณฑ์ที่ได้ในช่วงฟลูอิดไชเบค ป้อนก๊าซในโตรเจน 9.40 กิโลกรัม/ชั่วโมง (1.3 อัตราเร็วต่ำสุดของพลาสติก)

การทดลองที่	ผลิตภัณฑ์	จุดควบแน่น 1 (g/min)		จุดควบแน่น 2 (g/min)	
		ก๊าซ	ของเหลว	ก๊าซ	ของเหลว
1		10.35	3.93	1.58	0.81
2		7.85	6.43	1.42	0.96

เปลี่ยนเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยมีปริมาณก๊าซออกจากปฏิกรณ์ 16.67 กรัม/นาทึ

ตารางผนวกที่ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักผลิตภัณฑ์ที่ได้ในช่วงฟลูอิดไชเบค ป้อนก๊าซในโตรเจน 9.40 กิโลกรัม/ชั่วโมง (1.3 อัตราเร็วต่ำสุดของพลาสติก)

การทดลองที่	ผลิตภัณฑ์	จุดควบแน่น 1 (% wt)		จุดควบแน่น 2 (% wt)	
		ก๊าซ	ของเหลว	ก๊าซ	ของเหลว
1		62.11	23.60	9.45	4.84
2		47.11	38.60	8.50	5.79

โดยที่ การทดลองที่ 1 ตั้งอุณหภูมิที่ 450 °ซ ตลอดความสูง

การทดลองที่ 2 อุณหภูมิเหนือแผ่นกระจายก๊าซ 10 50 100 150 ซม. เป็น 450, 450 150 และ 450 °ซ

เมื่อเปลี่ยนอัตราการไหลไนโตรเจน เป็น 10.85 กิโลกรัม/ชั่วโมง ใช้อัตราการป้อนเม็ดพลาสติก 100 กรัม/นาทึ มีก๊าซพลาสติกออกจากปฏิกรณ์ 25 กรัม/นาทึ โดยมีปริมาณก๊าซและของเหลวเข้าเครื่องควบแน่นที่ 1 และ 2 โดยการปรับให้ก๊าซพลาสติกเข้าหน่วยควบแน่นที่ 1 และ 2 อัตราส่วน 7:1 มีปริมาณผลิตภัณฑ์ดังตาราง

ตารางผนวกที่ 16 ผลิตภัณฑ์ที่ได้ในช่วงฟลูอิดไคซ์เบด ป้อนก๊าซไนโตรเจน 10.85 กิโลกรัม/ชั่วโมง (1.5 อัตราเร็วต่ำสุดของพลาสติก)

การทดลองที่	ผลิตภัณฑ์	จุดควบแน่น 1 (1 กรัม/นาทึ)		จุดควบแน่น 2 (1 กรัม/นาทึ)	
		ก๊าซ	ของเหลว	ก๊าซ	ของเหลว
1		15.71	6.16	2.03	1.10
2		11.18	10.70	1.83	1.30

เปลี่ยนเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยมีปริมาณก๊าซออกจากปฏิกรณ์ 25 กรัม/นาทึ

ตารางผนวกที่ 17 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักผลิตภัณฑ์ที่ได้ในช่วงฟลูอิดไคซ์เบด ป้อนก๊าซไนโตรเจน 10.85 กิโลกรัม/ชั่วโมง (1.5 อัตราเร็วต่ำสุดของพลาสติก)

การทดลองที่	ผลิตภัณฑ์	จุดควบแน่น 1 (% wt)		จุดควบแน่น 2 (% wt)	
		ก๊าซ	ของเหลว	ก๊าซ	ของเหลว
1		62.85	24.65	8.12	4.38
2		44.70	42.80	7.32	5.19

7. องค์ประกอบผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ออกมาจากหน่วยควบแน่นที่ 1 และ 2

ตารางผนวกที่ 18 องค์ประกอบผลิตภัณฑ์ที่ได้ในสภาวะเบดนิ่ง เมื่อตั้งอุณหภูมิที่ 450 °ซ ตลอด
ความสูง

ผลิตภัณฑ์	หน่วยควบแน่นที่ 1				หน่วยควบแน่นที่ 2							
			1		2		3		4			
	น้ำหนัก (g)	% wt	น้ำหนัก	% wt	น้ำหนัก	% wt	น้ำหนัก	% wt	น้ำหนัก	% wt	น้ำหนัก	% wt
			(g)		(g)		(g)		(g)		(g)	
C ₅ – C ₁₂	59.63	20.01	6.32	36.05	10.60	36.25	10.70	35.65	10.68	36.81		
C ₁₃ – C ₁₈	209.85	70.42	10.32	58.83	16.82	57.56	16.78	55.91	15.06	51.92		
C ₁₈ ขึ้นไป	28.52	9.57	0.90	5.12	1.81	6.19	1.75	5.81	3.49	12.03		

ตารางผนวกที่ 19 องค์ประกอบผลิตภัณฑ์ที่ได้ในสภาวะเบดนิ่ง ตั้งอุณหภูมิจุดเหนือแผ่นกระจาย
ก๊าซ 10 ซม. เป็น 450 °ซ จุดที่เหนือขึ้นไปตั้งที่ 430 °ซ

ผลิตภัณฑ์	หน่วยควบแน่นที่ 1				หน่วยควบแน่นที่ 2							
			1		2		3		4			
	น้ำหนัก (g)	% wt	น้ำหนัก	% wt	น้ำหนัก	% wt	น้ำหนัก	% wt	น้ำหนัก	% wt	น้ำหนัก	% wt
			(g)		(g)		(g)		(g)		(g)	
C ₅ – C ₁₂	69.25	22.34	6.45	38.56	12.71	38.95	12.61	38.83	11.99	38.96		
C ₁₃ – C ₁₈	204.10	65.84	9.33	55.78	18.13	55.56	18.08	55.68	17.06	55.43		
C ₁₈ ขึ้นไป	11.82	11.82	0.95	5.66	1.79	5.49	1.78	5.49	1.73	5.61		

ตารางผนวกที่ 20 องค์ประกอบผลิตภัณฑ์ที่ได้ในสภาวะเบดนิ่ง ตั้งอุณหภูมิจุดเหนือแผ่นกระจาย
ก๊าซ 10 ซม. เป็น 450 °ซ จุดที่เหนือ 50 ซม. ตั้งที่ 430 °ซ จุดเหนือ 100 ซม. และ
150 ซม. ตั้งไว้ที่ 400 °ซ

ผลิตภัณฑ์	หน่วยควบแน่นที่ 1		หน่วยควบแน่นที่ 2							
			1		2		3		4	
	น้ำหนัก (g)	% wt	น้ำหนัก	% wt	น้ำหนัก	% wt	น้ำหนัก	% wt	น้ำหนัก	% wt
			(g)		(g)		(g)		(g)	
C ₅ – C ₁₂	110.54	21.61	9.40	37.57	12.38	37.94	12.30	37.88	11.64	37.82
C ₁₃ – C ₁₈	329.00	64.32	14.03	56.08	18.32	56.14	18.25	56.21	17.24	56.01
C ₁₈ ขึ้นไป	71.97	14.07	1.59	6.35	1.93	5.91	1.92	5.91	1.90	6.17

ตารางผนวกที่ 21 องค์ประกอบผลิตภัณฑ์ที่ได้ในสภาวะเบดนิ่ง ตั้งอุณหภูมิจุดเหนือแผ่นกระจาย
ก๊าซ 10 ซม. เป็น 450 °ซ จุดเหนือ 50 ซม. ตั้งไว้ที่ 430 °ซ จุดเหนือ 100 ซม. ตั้งที่
150 °ซ จุดเหนือ 150 ซม. ตั้งไว้ที่ 300 °ซ

ผลิตภัณฑ์	หน่วยควบแน่นที่ 1		หน่วยควบแน่นที่ 2							
			1		2		3		4	
	น้ำหนัก (g)	% wt	น้ำหนัก	% wt	น้ำหนัก	% wt	น้ำหนัก	% wt	น้ำหนัก	% wt
			(g)		(g)		(g)		(g)	
C ₅ – C ₁₂	141.98	21.61	13.02	36.84	14.42	37.02	14.21	38.85	13.76	36.74
C ₁₃ – C ₁₈	422.58	64.32	19.94	56.42	22.18	56.94	21.97	56.98	21.35	57.01
C ₁₈ ขึ้นไป	92.44	14.07	2.38	6.73	2.35	6.03	2.38	6.17	2.34	6.25

ตารางผนวกที่ 22 องค์ประกอบผลิตภัณฑ์ที่ได้ในช่วงฟลูอิดไชเบค (9.40 กิโลกรัม/ชั่วโมง) ตั้งอุณหภูมิที่ 450 °ซ ตลอดปฏิบัติการ

ผลิตภัณฑ์	หน่วยควบแน่นที่ 1		หน่วยควบแน่นที่ 2							
			1		2		3		4	
	น้ำหนัก (g)	% wt	น้ำหนัก (g)	% wt	น้ำหนัก (g)	% wt	น้ำหนัก (g)	% wt	น้ำหนัก (g)	% wt
C ₅ – C ₁₂	112.67	23.87	9.60	40.08	9.87	40.15	9.70	39.88	9.95	40.20
C ₁₃ – C ₁₈	297.83	63.10	13.22	55.20	13.53	55.04	13.41	55.14	13.63	55.07
C ₁₈ ขึ้นไป	61.50	13.03	1.61	6.72	1.48	6.02	1.50	6.17	1.54	6.22

ตารางผนวกที่ 23 องค์ประกอบผลิตภัณฑ์ที่ได้ในช่วงฟลูอิดไชเบค (9.40 กิโลกรัม/ชั่วโมง) อุณหภูมิเหนือแผ่นกระจายก๊าซ 10 50 100 150 ซม. เป็น 450, 450 150 และ 450°ซ

ผลิตภัณฑ์	หน่วยควบแน่นที่ 1		หน่วยควบแน่นที่ 2							
			1		2		3		4	
	น้ำหนัก (g)	% wt	น้ำหนัก (g)	% wt	น้ำหนัก (g)	% wt	น้ำหนัก (g)	% wt	น้ำหนัก (g)	% wt
C ₅ – C ₁₂	177.71	23.02	10.61	38.72	11.32	38.63	11.32	38.50	11.38	38.45
C ₁₃ – C ₁₈	500.64	64.85	15.41	56.24	16.71	57.03	16.68	56.73	16.83	56.86
C ₁₈ ขึ้นไป	93.64	12.13	1.38	5.04	1.27	4.33	1.39	4.73	1.39	4.70

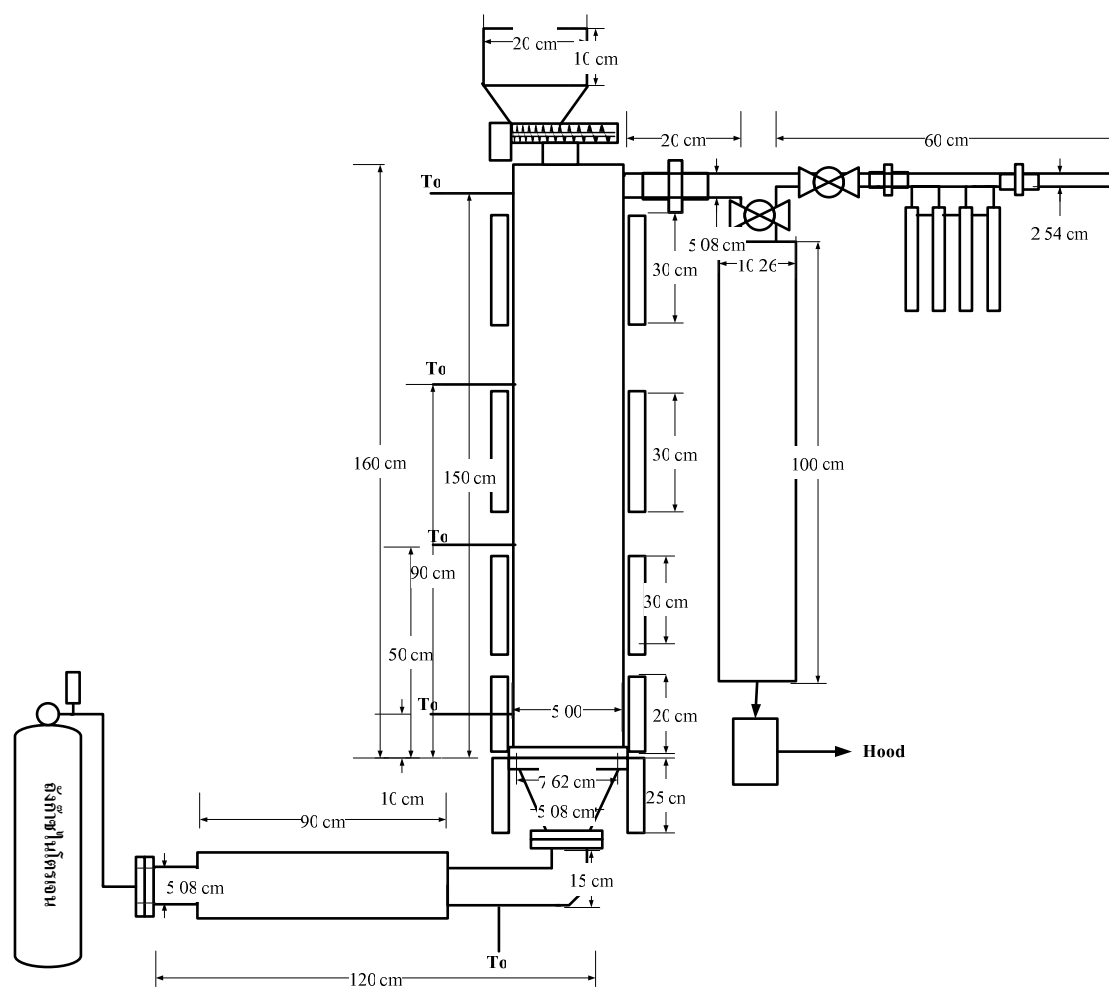
ตารางผนวกที่ 24 องค์ประกอบผลิตภัณฑ์ที่ได้ในช่วงฟลูอิดไคซ์เบด (10.85 กิโลกรัม/ชั่วโมง) ตั้งอุณหภูมิที่ 450 °ซ ตลอดปฏิบัติการ

ผลิตภัณฑ์	หน่วยควบแน่นที่ 1		หน่วยควบแน่นที่ 2							
			1		2		3		4	
	น้ำหนัก (g)	% wt	น้ำหนัก (g)	% wt	น้ำหนัก (g)	% wt	น้ำหนัก (g)	% wt	น้ำหนัก (g)	% wt
C ₅ – C ₁₂	110.14	22.34	8.27	41.54	9.37	41.92	9.54	41.88	9.42	41.76
C ₁₃ – C ₁₈	324.59	65.84	10.74	53.94	12.08	54.05	12.32	54.08	12.18	53.99
C ₁₈ ขึ้นไป	58.27	11.82	0.89	4.47	0.90	4.03	0.91	3.99	0.96	4.26

ตารางผนวกที่ 25 องค์ประกอบผลิตภัณฑ์ที่ได้ในช่วงฟลูอิดไคซ์เบด (10.85 กิโลกรัม/ชั่วโมง) อุณหภูมิเหนือแผ่นกระจายก๊าซ 10 50 100 150 ซม. เป็น 450, 450 150 และ 450°ซ

ผลิตภัณฑ์	หน่วยควบแน่นที่ 1		หน่วยควบแน่นที่ 2							
			1		2		3		4	
	น้ำหนัก (g)	% wt	น้ำหนัก (g)	% wt	น้ำหนัก (g)	% wt	น้ำหนัก (g)	% wt	น้ำหนัก (g)	% wt
C ₅ – C ₁₂	178.48	20.85	9.29	38.56	10.08	37.98	10.00	38.43	10.34	38.45
C ₁₃ – C ₁₈	562.73	65.74	13.70	56.87	15.14	57.05	14.83	56.99	15.26	56.75
C ₁₈ ขึ้นไป	114.79	1.41	1.10	4.57	1.32	4.97	1.20	4.61	1.29	4.80

8. เครื่องมือที่ใช้ในการแตกโมเลกุลของพอลิพรอพิลีน



ภาพผนวกที่ 1 แผนภาพเครื่องมือที่ใช้แตกโมเลกุลพอลิพรอพิลีน



ภาพผนวกที่ 2 รูปเครื่องมือที่ใช้แตกโมเลกุลพอลิพรอพิลีน



ภาพผนวกที่ 3 เม็ดทรายขนาด 150 – 300 ไมครอน



ภาพผนวกที่ 4 เม็ดพลาสติกที่ใช้ในการแตกโมเลกุลให้กลายเป็นน้ำมันปิโตรเลียม



ภาพผนวกที่ 5 ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้จากการแตกโมเลกุลของพอลิพรอพิลีน

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	ภัทรวรรณ กล่อมคุ้ม
วัน เดือน ปี ที่เกิด	10 มีนาคม 2525
สถานที่เกิด	จังหวัดสุโขทัย
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต) ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนอุดหนุน โครงการวิจัยของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์