

การผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากไพโรไลซิสของ *Ceratophyllum demersum* L. โดยใช้โดโลไมต์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

**LIQUID FUEL PRODUCTION FROM PYROLYSIS OF *Ceratophyllum demersum* L. USING DOLOMITE IN CONTINUOUS REACTOR**

ฐานันดร ประกอบ<sup>1</sup>, ธราพงษ์ วิทิตศานต์<sup>\*1,2</sup>

Thanandorn Prakob<sup>1</sup>, Tharapong Vitidsant<sup>\*1,2</sup>

<sup>1</sup>Department of Chemical Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

<sup>2</sup>Center of Excellence on Petrochemical and Material Technology, Chulalongkorn University, Bangkok 10330, Thailand

\*ติดต่อ E-mail: tharapong.v@chula.ac.th, เบอร์โทรศัพท์: 02-218-7517

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงเหลว (ไบโอดีเซลหรือน้ำมันชีวมวล) ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสของมหาหุราย *Ceratophyllum demersum* L. ซึ่งเป็นมหาหุรายชนิดหนึ่งที่พบได้ง่ายในประเทศไทย โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเกิดภายใต้เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องโดยใช้โดโลไมต์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งโดโลไมต์จะถูกเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยตัวแปรที่ศึกษาที่ส่งผลต่อการผลิตเชื้อเพลิงเหลว ได้แก่ อุณหภูมิไพโรไลซิส ขนาดของอนุภาค อัตราการป้อนของสารตั้งต้น และอัตราการไหลของไนโตรเจน จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิไพโรไลซิส 550 องศาเซลเซียส ขนาดของอนุภาค 250-500 ไมครอน อัตราการป้อนของสารตั้งต้น 1.13 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และอัตราการไหลของไนโตรเจน 160 มิลลิลิตรต่อนาที ทำให้ได้ปริมาณน้ำมันชีวมวลสูงถึง 41.87 เปอร์เซ็นต์ โดยในองค์ประกอบหลักของน้ำมันชีวมวล ได้แก่ แอลเคน แอลคีน และแอลคีน และในส่วนของผลิตภัณฑ์แก๊สมี แก๊สมีเทน เป็นองค์ประกอบหลัก นอกจากนี้การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์ยังลดปริมาณผลผลิตของน้ำมันชีวมวล เมื่อเทียบกับปฏิกิริยาที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในการภาวะเดียวกัน และค่าความร้อนของน้ำมันชีวมวลที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 19.53 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้แทนน้ำมันเชื้อเพลิงในหม้อต้มไอน้ำอุตสาหกรรม

**คำสำคัญ:** มหาหุราย, น้ำมันชีวมวล, ไพโรไลซิส, โดโลไมต์, เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

### Abstract

This research is focused on production of liquid fuel (bio-oil) from pyrolysis of *Ceratophyllum demersum* L. which is a type of macro algae. The reaction was carried out in continuous reactor by using dolomite as catalyst. Dolomite was calcined at temperature of 800 °C for 2 hours. The studied parameters that affect to the product yields are pyrolysis

temperature, particle size, feed rate and nitrogen flow rate. The bio-oil, solid and gas product yield were determined. The component of bio-oil and gas product were analyzed by GC-MS and GC-TCD respectively. The experimental result shows the maximum bio-oil yield of 41.87% at the pyrolysis temperature of 550 °C, particle size range of 250-500 micron. fixed feed rate at 1.13 kg/hr and nitrogen flow rate of 160 ml/min. Major components of bio-oil are Alkane, Alkene, Alkyne and in gas product are methane. Moreover the use of dolomite catalyst decreased bio-oil yield comparing non-catalyst operation at the same condition. The heating value of bio-oil is 19.53 MJ/kg and it can be partly substituted fuel oil using in industrial boiler.

**Keywords:** Macro algae, Bio oil, Pyrolysis, Dolomite, Continuous reactor

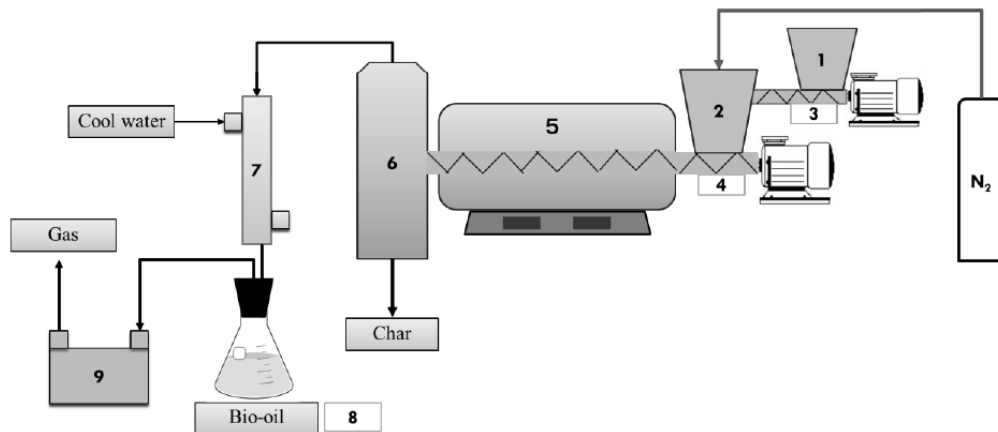
## บทนำ

ปัจจุบันการใช้พลังงานมีความต้องการที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้แหล่งพลังงานบางแหล่งมีค่าลดลง อาทิเช่น แหล่งพลังงานปิโตรเลียมและแหล่งพลังงานเหมืองแร่ จึงได้เล็งเห็นถึงความสำคัญในการใช้พลังงาน และพยายามค้นคว้าหาแหล่งทรัพยากรใหม่ๆ เพื่อตอบสนองความต้องการใช้ในด้านพลังงาน [1] โดยคำนึงถึงสิ่งแวดล้อมและผลกระทบที่จะตามมา จนทำให้เกิดแนวคิดในการค้นคว้าหา แหล่งทรัพยากรใหม่ๆที่สามารถทดแทนน้ำมันดิบหรือผลิตภัณฑ์ที่ได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ซึ่งพบว่า มหาสาหร่าย (macro algae) เป็นชีวมวลที่สามารถนำผลิตเป็นเชื้อเพลิงเหลวได้ โดยมหาสาหร่ายหาได้ง่ายทั้งน้ำจืดและน้ำเค็ม มีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วและใช้พื้นที่น้อยสำหรับการเพาะเลี้ยง รวมไปถึงองค์ประกอบของมหาสาหร่ายที่มีความน่าสนใจ โดยการเปลี่ยนชีวมวลให้กลายเป็นพลังงานนั้น สามารถแบ่งได้ 2 กระบวนการใหญ่ๆ ได้แก่ กระบวนการเชิงเคมีความร้อน (thermochemical conversion processes) และกระบวนการเชิงเคมีชีวภาพ (biochemical conversion processes) ซึ่งการเลือกกระบวนการเปลี่ยนชีวมวลให้เป็นพลังงานนั้น เราจะคำนึงถึงด้านเศรษฐศาสตร์และด้านสิ่งแวดล้อมเป็นหลัก [2] โดยพบว่ากระบวนการเชิงเคมีความร้อนมีต้นทุนต่ำและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่ากระบวนการเชิงเคมีชีวภาพ ดังนั้นจึงเลือกกระบวนการเชิงเคมีความร้อน โดยผ่านกระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) เนื่องจากการไพโรไลซิสเป็นการกระบวนการให้ความร้อนแก่ ชีวมวลที่อุณหภูมิปานกลางประมาณ 300-700 องศาเซลเซียส ในภาวะอับอากาศหรือไม่มีออกซิเจนในกระบวนการ โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสจะประกอบด้วยของแข็ง ของเหลว และแก๊ส ซึ่งผลิตภัณฑ์ของเหลวนั้นเรียกว่า ไบโอบอยล์ (bio-oil) หรือ น้ำมันชีวมวล โดยน้ำมันชีวมวลที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสจะมีปริมาณน้อย ความเสถียรต่ำ และยังมีปริมาณน้ำมันดิน (tar) เกิดขึ้นอีกด้วย จึงได้มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าไปในกระบวนการไพโรไลซิส เพื่อลดปริมาณน้ำมันดินและปรับปรุงสมบัติของน้ำมันชีวมวล ในการเลือกใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานั้น จะคำนึงถึงสมบัติของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ช่วยในการแตกตัวในระหว่างการไพโรไลซิส นอกจากนี้ยังคำนึงถึงต้นทุนของตัวเร่งปฏิกิริยาและผลกระทบในการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงได้เลือกใช้ โดโลไมต์ (dolomite) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการไพโรไลซิส

## อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

### อุปกรณ์

ในงานวิจัยมีการใช้มหาหุ่ยสายพันธุ์ *Ceratophyllum demersum* L. หรือ มหาหุ่ยพุงชะโด เป็นวัตถุดิบหลัก โดยมีการเก็บเกี่ยวจากแหล่งน้ำตามธรรมชาติ หลังจากการเก็บเกี่ยวจะถูกทำให้สะอาดและทำการอบแห้ง เพื่อนำไปบดและแยกขนาดตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย ในส่วนเครื่องปฏิกรณ์จะใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง โดยมีองค์ประกอบดังต่อไปนี้



หมายเลข 1 และ 2 ช่องเก็บสาร (Hopper)

หมายเลข 3 และ 4 ชุดสกรูขนาด 40 และ 120 เซนติเมตร โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 และ 10 เซนติเมตร ตามลำดับ (Screw feeder)

หมายเลข 5 เครื่องไฟโรไลซิสแบบต่อเนื่อง (Tube furnace)

หมายเลข 6 ชุดแยกถ่านชาร์ (Separator)

หมายเลข 7 ชุดควบแน่นสาร (Condenser)

หมายเลข 8 ชุดเก็บน้ำมันชีวมวล (Flask)

หมายเลข 9 และ 10 ปัมสุญญากาศและถังแก๊สไนโตรเจน (Vacuum Pump and Nitrogen tank)

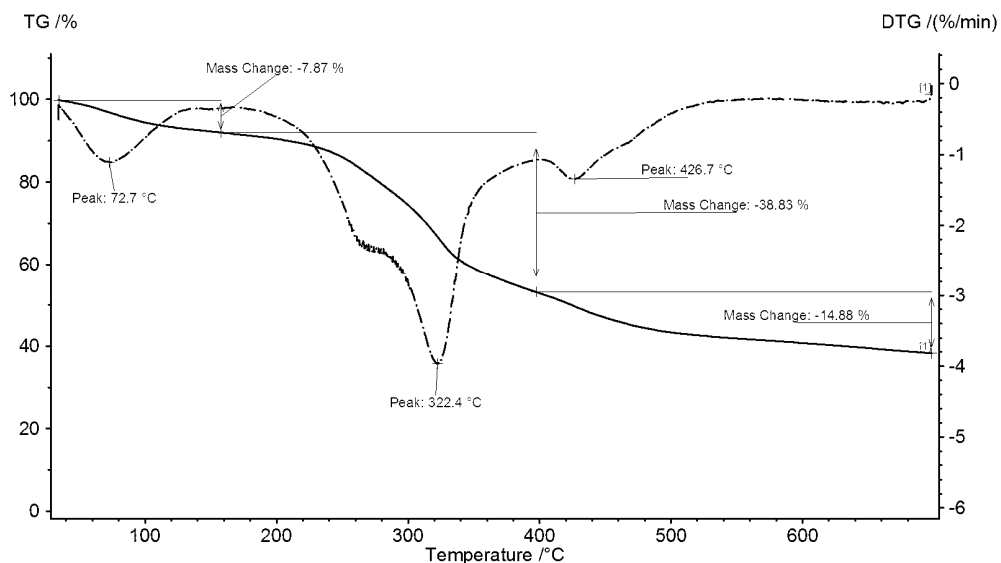
### วิธีการทดลอง

มหาหุ่ยที่ถูกต้องเตรียมไว้ จะถูกผ่านเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง โดยกำหนดตัวแปรที่ส่งผลต่อกระบวนการไฟโรไลซิส ได้แก่ อุณหภูมิไฟโรไลซิสที่ 400-600 องศาเซลเซียส ขนาดของอนุภาคที่ 250-850 ไมครอน อัตราการป้อนชีวมวล 0.41-3.30 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน 40-200 มิลลิลิตรต่อนาที เมื่อได้ภาวะที่เหมาะสม จะทำการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโคโลไมต์ปริมาณ 5-20 ร้อยละโดยน้ำหนัก เพื่อเปรียบเทียบปริมาณน้ำมันชีวมวลที่ได้จากการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาและไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา หลังจากนั้นทำการพิสูจน์เอกลักษณ์ของผลิตภัณฑ์ที่ได้ อาทิเช่น น้ำมันชีวมวล ถ่านชาร์ และแก๊ส ทั้งทางกายและทางเคมี

## ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

### ผลการทดลอง

ก่อนจะเริ่มการทดลอง การกำหนดช่วงอุณหภูมิในการสลายตัวของชีวมวลผ่านกระบวนการไพโรไลซิสนั้นถือเป็นสิ่งสำคัญเพื่อให้ได้ปริมาณน้ำมันชีวมวลที่สูง จึงจำเป็นต้องทำการพิสูจน์เอกลักษณ์โดยใช้เทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก (Thermogravimetric analysis หรือ TGA) เพื่อให้ทราบถึงช่วงในการสลายตัวของมหาหุ่ยที่นำมาใช้ และง่ายต่อการนำไปกำหนดตัวแปรให้ตรงตามวัตถุประสงค์ในส่วนของอุณหภูมิไพโรไลซิส



รูปที่ 1 แสดงการสลายตัวทางความร้อนของมหาหุ่ย *Ceratophyllum demersum* L. ในภาวะไนโตรเจนผ่านเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก

จากรูปที่ 1 แสดงการสลายตัวทางความร้อนของมหาหุ่ยผ่านเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก พบว่าช่วงการสลายตัวของมหาหุ่ยสามารถแบ่งออกเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงแรกเป็นการสลายตัวของความชื้นหรือน้ำที่อยู่ภายในมหาหุ่ยผ่านปฏิกิริยาดีไฮเดรชัน (Dehydration) ต่อมาช่วงที่สองเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิ 240 องศาเซลเซียส เป็นการสลายตัวสารระเหยของมหาหุ่ยผ่านปฏิกิริยาการกำจัดสารระเหย (Devolatilization) และช่วงที่สามเริ่มสลายตัวที่ 400 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นการสลายตัวของคาร์บอนหนักโดยมีการสลายตัวอย่างช้าๆ ผ่านปฏิกิริยาการสลายตัวของของแข็ง (Solid residue decomposition) [3] และการสลายตัวของมหาหุ่ยทั้งหมดจะมีอุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ 550 องศาเซลเซียส โดยจะมีคาร์บอนคงตัวและซีเถ้ามากถึง 40 เปอร์เซ็นต์โดยประมาณ ซึ่งเมื่อนำไปเทียบกับปริมาณขององค์ประกอบแบบประมาณจะมีค่าที่สอดคล้องกัน ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลวิเคราะห์แบบประมาณและแบบแยกธาตุของมหาหุราย

วิเคราะห์แบบประมาณ	ร้อยละโดยน้ำหนัก*
ความชื้น	5.46
สารระเหย	34.22
ซีเมนต์	29.50
คาร์บอนคงตัว	30.82
วิเคราะห์แบบแยกธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก*
คาร์บอน	32.94
ไฮโดรเจน	4.29
ไนโตรเจน	3.45
ออกซิเจน**	59.32

หมายเหตุ : \*พื้นฐานแห้ง \*\*จากผลต่าง

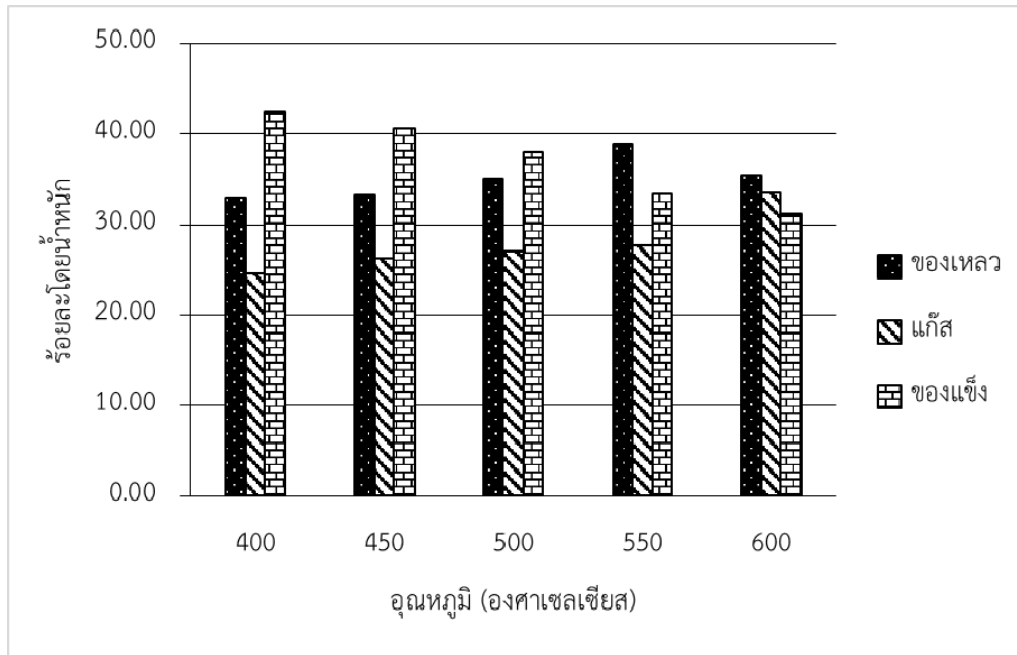
ต่อมาได้ทำการหาภาวะที่เหมาะสมในการไฟโรไลซิสมหาหุราย โดยตัวแปรที่เราสนใจศึกษาภายในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย 4 ตัวแปรใหญ่ๆ ได้แก่

1. อุณหภูมิไฟโรไลซิสที่ใช้เท่ากับ 400 450 500 550 และ 600 องศาเซลเซียส
2. ขนาดอนุภาคเท่ากับ น้อยกว่า 250 250-500 และ 500-850 ไมครอน
3. อัตราการป้อนชีวมวลเท่ากับ 0.41 0.61 1.13 2.91 และ 3.30 กิโลกรัมต่อชั่วโมง
4. อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเท่ากับ 40 80 120 160 และ 200 มิลลิลิตรต่อนาที

โดยจากรูปที่ 2 แสดงผลของอุณหภูมิไฟโรไลซิสที่ใช้ต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนัก พบว่าปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิไฟโรไลซิสสูงขึ้น โดยอุณหภูมิไฟโรไลซิสที่ 550 องศาเซลเซียส จะทำให้ได้ปริมาณผลิตภัณฑ์เหลวสูงสุด คิดเป็นร้อยละ 40.12 โดยน้ำหนัก เนื่องจากที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เกิดการสลายตัวทางความร้อนของโปรตีนและสารประกอบคาร์บอนเนตอย่างสมบูรณ์ โดยสารประกอบเหล่านี้จะเกิดแตกตัวเป็นสารระเหยที่อยู่ในสถานะแก๊ส [4] และสามารถควบแน่นกลายเป็นผลิตภัณฑ์เหลวเมื่อผ่านชุดควบแน่นในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง

ตารางที่ 2 ผลของอุณหภูมิไฟโรไลซิสที่ใช้ต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนัก

อุณหภูมิไฟโรไลซิสที่ใช้ (องศาเซลเซียส)	ผลิตภัณฑ์ของเหลว		ผลิตภัณฑ์แก๊ส		ผลิตภัณฑ์ของแข็ง		ร้อยละของผลิตภัณฑ์เฉลี่ย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ของเหลว	แก๊ส	ของแข็ง
400	33.25	32.83	24.82	24.32	41.93	42.85	33.04	24.57	42.39
450	33.96	32.50	27.46	25.00	38.58	42.50	33.23	26.23	40.54
500	34.98	35.04	26.39	27.56	38.63	37.40	35.01	26.98	38.02
550	40.12	37.60	28.81	26.65	31.07	35.75	38.86	27.73	33.41
600	33.65	37.13	34.68	32.32	31.67	30.55	35.39	33.50	31.11



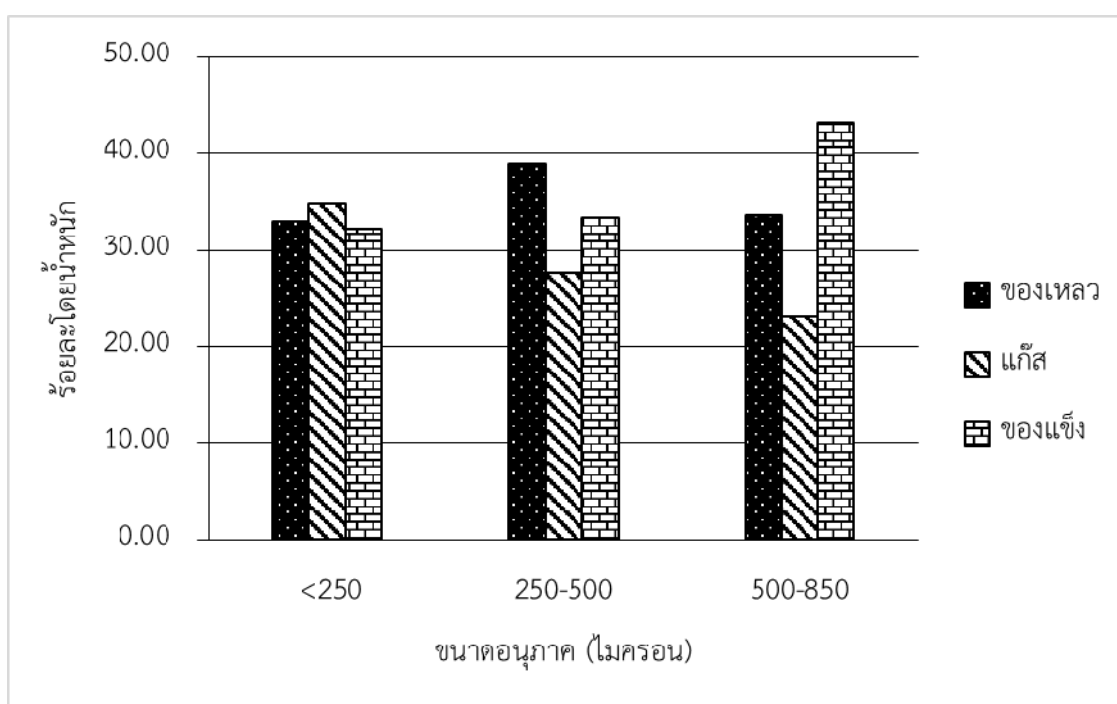
รูปที่ 2 ผลของอุณหภูมิไพโรไลซิสที่ใช้ต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนัก

จากนั้นได้ทำการศึกษาหาขนาดอนุภาคที่เหมาะสมในการไพโรไลซิสมหสาราย ดังรูปที่ 3 พบว่าขนาดอนุภาคของมหสารายที่เหมาะสมนั้น อยู่ในช่วง 250-500 ไมครอน ซึ่งทำให้ได้ปริมาณผลิตภัณฑ์เหลวมากที่สุด โดยขนาดอนุภาคที่มีขนาดเล็กจะสามารถเกิดการสลายตัวทางความร้อนได้ดีกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ เมื่อเกิดการสัมผัสหรือเกิดการกระจายตัวในเครื่องปฏิกรณ์จะส่งผลให้เกิดการถ่ายโอนความร้อนจากเครื่องปฏิกรณ์มายังอนุภาคได้ดีกว่าอีกด้วย จึงทำให้อนุภาคขนาดเล็กที่อยู่ในช่วง 250-500 ไมครอนมีปริมาณผลิตภัณฑ์เหลวมากที่สุด แต่พบจะว่าเมื่อขนาดอนุภาคเล็กกว่า 250 ไมครอน จะได้ปริมาณผลิตภัณฑ์เหลวต่ำกว่าอนุภาคขนาด 250-500 ไมครอน เป็นผลมาจากอนุภาคที่มีขนาดเล็กมากๆ เมื่อเกิดการแตกตัวจะมีการถ่ายโอนความร้อนได้สูง จึงไม่สามารถควบแน่นกลับมาในสถานะของเหลวได้

ในส่วนต่อมาได้ทำการศึกษาผลของอัตราการป้อนชีวมวล ดังรูปที่ 4 พบว่าเมื่อมีการเพิ่มอัตราการป้อนชีวมวลที่สูงขึ้น จะมีแนวโน้มปริมาณผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ลดลง เนื่องจากอัตราการป้อนชีวมวลที่สูงทำให้ชีวมวลมีเวลาในแตกตัวหรือถ่ายโอนความร้อนในเครื่องปฏิกรณ์นั้นเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้โอกาสในการแตกตัวของชีวมวลนั้นมีต่ำต่ำลง และเกิดการสัมผัสความร้อนในเครื่องปฏิกรณ์ไม่ทั่วถึง จึงทำให้ปริมาณผลิตภัณฑ์เหลวมีค่าลดลง

ตารางที่ 3 ผลของขนาดอนุภาคต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนักร้อยละ

ขนาดอนุภาค (ไมครอน)	ผลิตภัณฑ์ของเหลว		ผลิตภัณฑ์แก๊ส		ผลิตภัณฑ์ของแข็ง		ร้อยละของผลิตภัณฑ์เฉลี่ย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ของเหลว	แก๊ส	ของแข็ง
ต่ำกว่า 250	35.43	30.62	33.37	36.11	31.20	33.27	33.03	34.74	32.24
250-500	40.12	37.60	28.81	26.65	31.07	35.75	38.86	27.73	33.41
500-850	33.38	33.92	21.76	24.60	44.86	41.48	33.65	23.18	43.17

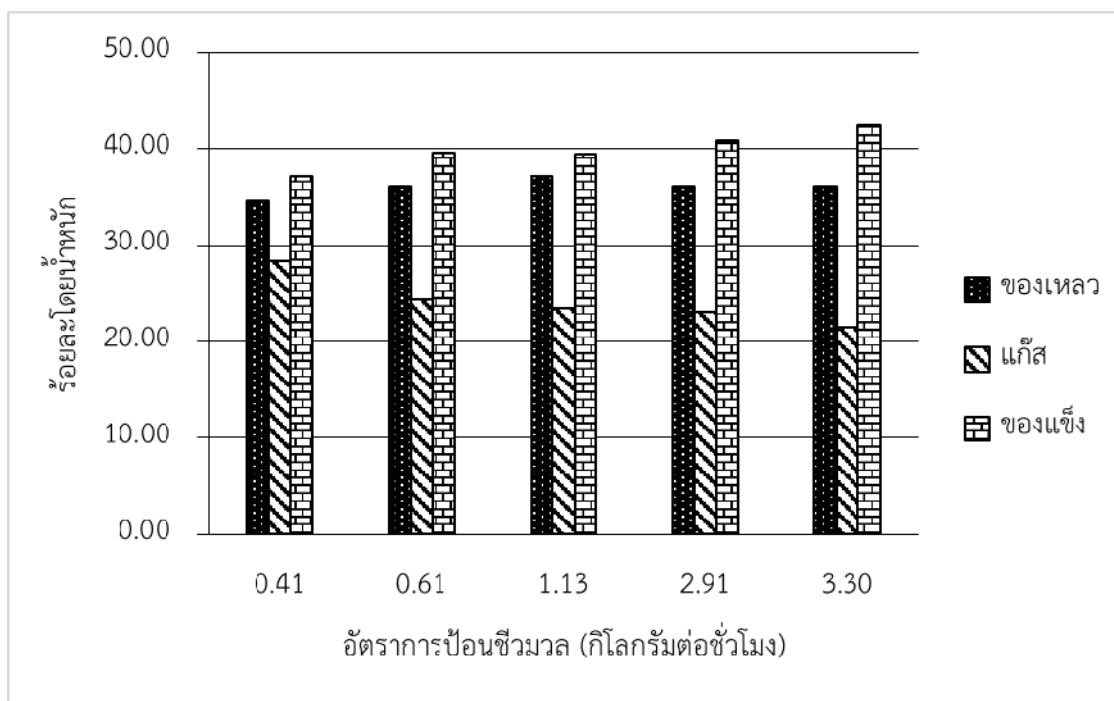


รูปที่ 3 ผลของขนาดอนุภาคต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนักร้อยละ

ตารางที่ 4 ผลของอัตราการป้อนชีวมวลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนักร้อยละ

อัตราการป้อนชีวมวล (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	ผลิตภัณฑ์ของเหลว		ผลิตภัณฑ์แก๊ส		ผลิตภัณฑ์ของแข็ง		ร้อยละของผลิตภัณฑ์เฉลี่ย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ของเหลว	แก๊ส	ของแข็ง
0.41	34.69	34.51	28.20	28.48	37.11	37.01	34.60	28.34	37.06
0.61	35.02	37.17	24.26	24.40	40.72	38.43	36.10	24.33	39.58

1.13	37.10	37.14	24.2	22.65	38.70	40.21	37.12	23.43	39.46
2.91	37.02	35.09	23.13	22.98	39.85	41.99	36.06	23.06	40.92
3.30	35.99	36.26	19.80	23.10	44.21	40.64	36.13	21.45	42.43

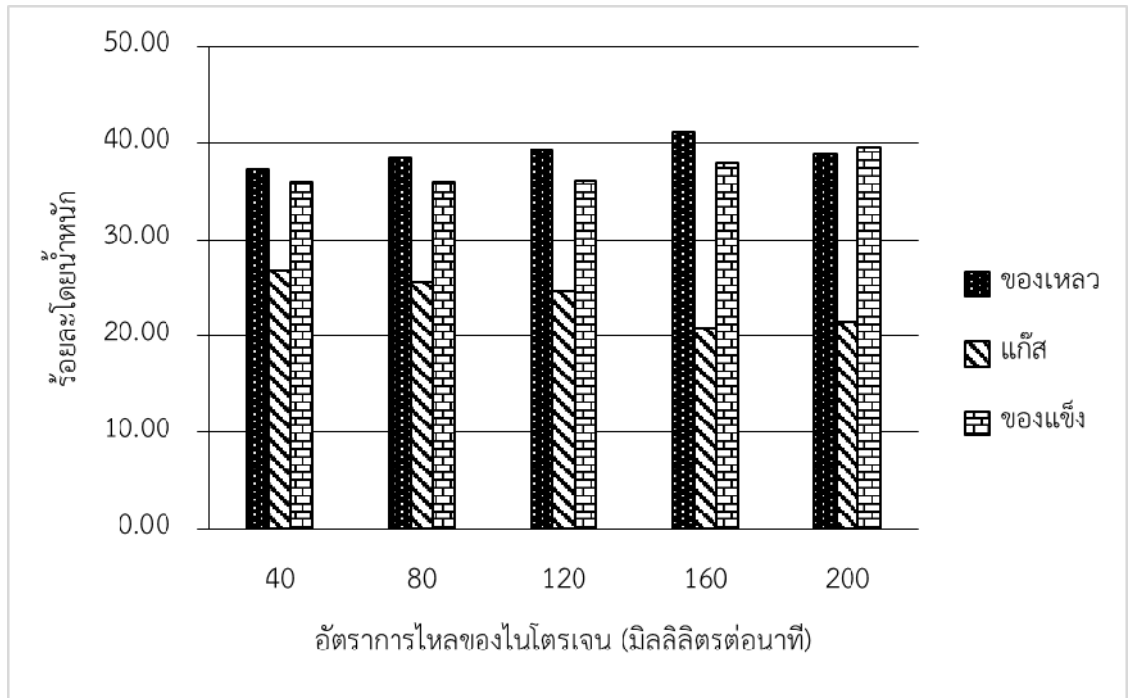


รูปที่ 4 ผลของอัตราการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 5 ผลของอัตราการใช้ปุ๋ยไนโตรเจนต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนัก

อัตราการใช้ ของแก๊ส ไนโตรเจน (มิลลิกรัมต่อ นาฬิกา)	ผลิตภัณฑ์ของเหลว		ผลิตภัณฑ์แก๊ส		ผลิตภัณฑ์ของแข็ง		ร้อยละของผลิตภัณฑ์เฉลี่ย (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ของเหลว	แก๊ส	ของแข็ง
40	36.87	37.73	26.98	26.45	36.15	35.82	37.30	26.72	35.99
80	38.72	38.17	22.55	28.68	38.73	33.15	38.45	25.62	35.94
120	41.63	37.02	26.06	23.13	32.31	39.85	39.33	24.60	36.08
160	41.87	40.44	20.78	21.01	37.35	38.55	41.16	20.90	37.95
200	38.76	38.90	22.66	20.42	38.58	40.68	38.83	21.54	39.63





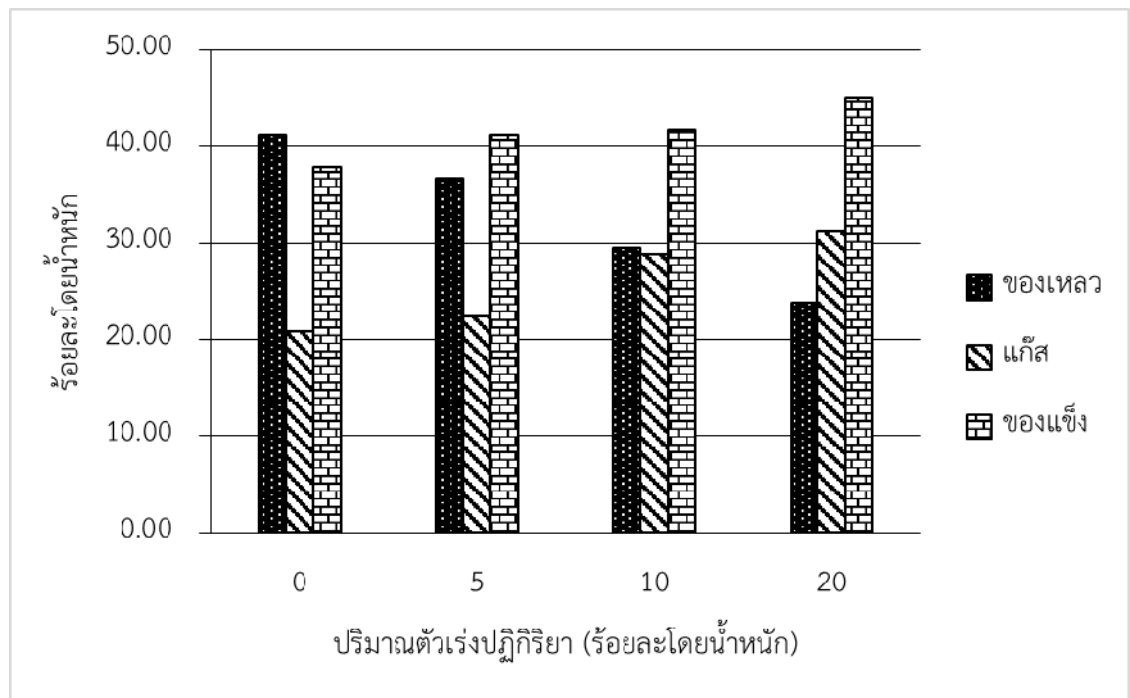
รูปที่ 5 ผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนัก

สุดท้ายได้ศึกษาผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน ดังรูปที่ 5 พบว่าเมื่ออัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเพิ่มมากขึ้น ปริมาณผลิตภัณฑ์เหลวจะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากแก๊สไนโตรเจนเป็นแก๊สตัวพา (Carrier Gas) จึงสามารถพาสารระเหยที่เกิดขึ้นเข้าสู่ชุดควบแน่นและกลั่นตัวกลับมาเป็นผลิตภัณฑ์เหลวได้อย่างรวดเร็ว ทำให้เมื่ออัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนสูงขึ้น ผลิตภัณฑ์เหลวที่ออกมาจะมีค่าเพิ่มสูงขึ้นตาม แต่ที่อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่ 200 มิลลิลิตรต่อนาทีจะมีค่าลดลง เป็นผลจากปริมาณแก๊สตัวพาที่มากเกินไป ทำให้เกิดการพาความร้อนในเครื่องปฏิกรณ์ไปบางส่วนส่งผลให้การสลายตัวของชีวมวลมีค่าต่ำลง

โดยภาวะที่เหมาะสมในการไพโรไลซิสสำหรับราย คือ อุณหภูมิไพโรไลซิส 550 องศาเซลเซียส ขนาดของอนุภาค 250-500 ไมครอน อัตราการไหลของไนโตรเจน 160 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราการป้อนของสารตั้งต้น 1.13 กิโลกรัมต่อชั่วโมง นอกจากนี้ได้ทำการหาอิทธิพลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ส่งผลต่อผลิตภัณฑ์ โดยมีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาไดโลไมต์ในอัตราส่วนร้อยละ 5 10 และ 20 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 อิทธิพลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ส่งผลต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสมหาหุ่ย

สารตัวอย่าง	ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสมหาหุ่ย		
	ของเหลว	ของแข็ง	แก๊ส
มหาหุ่ย	41.16	20.90	37.95
มหาหุ่ย+โดโลไมต์ ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก	36.58	22.33	41.10
มหาหุ่ย+โดโลไมต์ ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก	29.54	28.81	41.65
มหาหุ่ย+โดโลไมต์ ร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก	23.85	31.13	45.03



รูปที่ 6 ผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยน้ำหนัก

โดยตารางที่ 6 แสดงผลของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งพบว่าเมื่อปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ผลิตภัณฑ์เหลวมีค่าลดลง เนื่องจากเมื่อมีการเพิ่มตัวเร่งปฏิกิริยาโดโลไมต์จะไปส่งเสริมการแตกตัวของมหาหุ่ย รวมไปถึงน้ำมันดินหรือทาร์ ทำให้เกิดการแตกตัวขั้นทุติยภูมิ (Secondary decomposition) ของทาร์กลายเป็นโมเลกุลที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำลงและออกไปในสถานะแก๊สในบางส่วน นอกจากนั้นขนาดของรูพรุนและพื้นที่ผิวของโดโลไมต์ยังเหมาะสมในการกักเก็บทำให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์แข็งอีกด้วย [5]

ตารางที่ 7 องค์ประกอบแบบแยกธาตุและค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากมหาหุราย

องค์ประกอบ	ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิ			มห สาหุราย	น้ำมันชีวมวล จากไม้ <sup>6</sup>	น้ำมันดิบจากแหล่ง ปิโตรเลียม <sup>7</sup>
	สมมหาหุราย					
	น้ำมันเบา	น้ำมันหนัก	ถ่านชาร์			
คาร์บอน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	5.30	43.12	34.51	32.94	54-58	83-87
ไฮโดรเจน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	10.10	8.71	2.79	4.29	5.5-7.0	10-14.0
ไนโตรเจน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	2.71	4.91	2.45	3.45	0-0.2	0.01-0.7
ออกซิเจน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)*	81.89	43.27	**	59.32	35-40	0.05-1.5
H/C (โมลต่อโมล)	22.87	2.42	0.97	1.56	1.14-1.56	**
O/C (โมลต่อโมล)	11.59	0.75	**	1.35	0.28-0.45	**
ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อ กิโลกรัม)	-	19.53	12.18	12.27	19.2-26.73	42.48

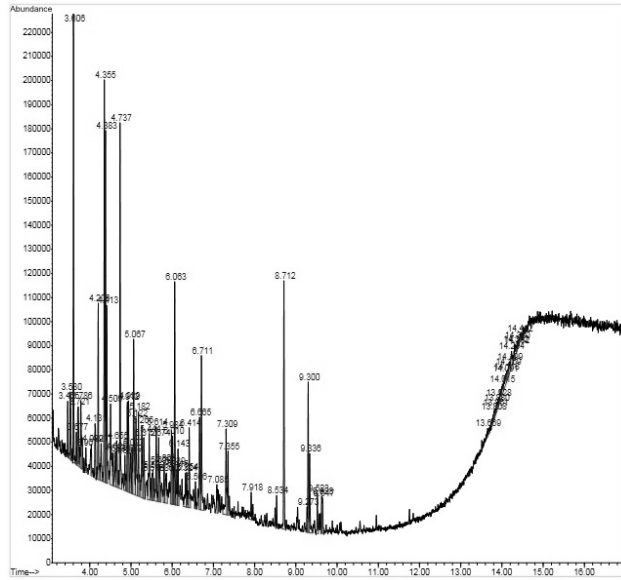
หมายเหตุ : \* Determined by difference.

\*\* Not specified.

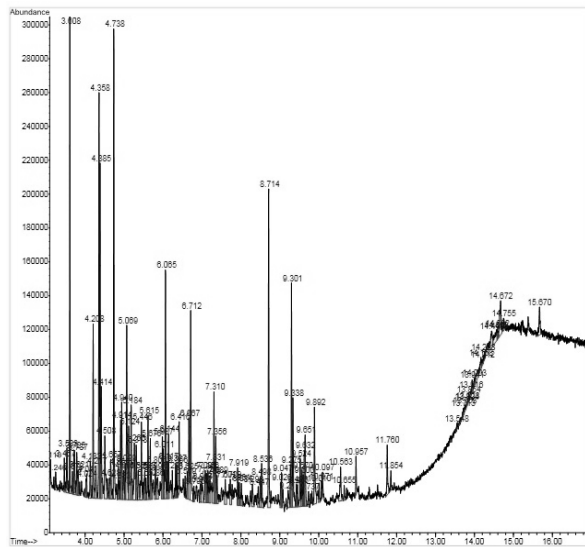
<sup>6</sup> Stamatov et al. and Zhang et al.

<sup>7</sup> Zhang et al. and Miao et al.

ตารางที่ 7 แสดงผลองค์ประกอบแบบแยกธาตุและค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น พบว่าปริมาณคาร์บอนและไฮโดรเจนของน้ำมันชีวมวลจากมหาหุรายจะมีค่าที่ต่ำกว่าน้ำมันชีวมวลที่ได้จากไม้และแหล่งปิโตรเลียม ทำให้ค่าความร้อนของน้ำมันชีวมวลจากมหาหุรายมีค่า 19.53 MJ/kg โดยมีค่าใกล้เคียงกับน้ำมันชีวมวลจากไม้ แต่จะมีค่าต่ำกว่าน้ำมันดิบจากแหล่งปิโตรเลียม นอกจากนี้ปริมาณของไนโตรเจนและออกซิเจนของน้ำมันชีวมวลจากมหาหุรายยังมีค่าสูงกว่าน้ำมันชีวมวลจากไม้และแหล่งปิโตรเลียม เนื่องจากองค์ประกอบหลักของมหาหุรายเริ่มต้นมีปริมาณไนโตรเจนและออกซิเจนค่อนข้างสูงจึงทำให้ค่าน้ำมันชีวมวลที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสมีสค่าสูงด้วย และพบว่าเมื่อเกิดการไพโรไลซิสมันจะทำให้เกิดการสลายตัวของสารจำพวกโปรตีนทำให้น้ำมันชีวมวลจากมหาหุรายมีค่าไนโตรเจนและออกซิเจนสูงนั่นเอง



รูปที่ 7 โครมาโทแกรมของน้ำมันชีวมวลที่ได้จากการไพโรไลซิสมหาห่วยที่ไม่มี การเติมตัวเร่งปฏิกิริยา โดโลไมต์



รูปที่ 8 โครมาโทแกรมของน้ำมันชีวมวลที่ได้จากการไพโรไลซิสมหาห่วยที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา โดโลไมต์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 8 แสดงองค์ประกอบหลักของน้ำมันชีวมวลที่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนักและไม่มี การเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยผ่านเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีร่วมกับแมสสเปคโตร

หมู่ฟังก์ชัน	ปริมาณ (โดยน้ำหนัก)	
	ไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา	มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยา ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก
แอลเคน แอลคีน และแอลโคई	67.11	61.21
ไฮดรอกซิล	7.89	5.17
อะมิโน, เอไมด์	2.63	8.62
อื่น (คาร์บอนิล, ออกซี, คาร์บอกซิล)	22.37	25.00

จากรูปที่ 7 และ 8 แสดงโครมาโทแกรมของน้ำมันชีวมวลโดยใช้เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี ร่วมกับแมสสเปคโตร พบว่าองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันชีวมวลจากการไพโรไลซิสสมหสาหร่ายมีโครงสร้างและ หมู่ฟังก์ชันที่ซับซ้อนแต่เราสามารถแยกเป็นกลุ่มๆ ได้ โดยตารางที่ 8 ชี้ให้เห็นว่าองค์ประกอบหลักทางเคมีของ น้ำมันชีวมวลเป็นสารประกอบจำพวก แอลเคน แอลคีน และแอลโคई โดยมีมากถึง 60 เปอร์เซ็นต์ และพบว่า องค์ประกอบหลักยังมีออกซิเจนในปริมาณสูง ซึ่งสอดคล้องกับองค์ประกอบแบบแยกธาตุ ดังตารางที่ 7 ที่กล่าวมา ข้างต้น นอกจากนี้ที่กล่าวมาข้างต้นเมื่อทำการเปรียบเทียบการเติมและไม่มีการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่า องค์ประกอบหลักทางเคมีมีค่าใกล้เคียงกัน แต่จะพบว่าองค์ประกอบหลักในน้ำมันชีวมวลที่ไม่มีการเติมตัวเร่ง ปฏิกิริยา คือ พารา-ครีซอล (p-Cresol) จึงทำให้หมู่ไฮดรอกซิลนั้นมีค่าสูง ในทางกลับกันน้ำมันชีวมวลที่มีการเติม ตัวเร่งปฏิกิริยาร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก คือ ไพเพอริดีโนน (4-Piperidinone) เป็นหมู่ของอะมิโน จึงทำให้หมู่ ฟังก์ชันในกลุ่มของเอมีนมีค่าเพิ่มขึ้นนั่นเอง

### สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้การใช้สมหสาหร่ายถือเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ ที่จะนำมาใช้เป็นพลังงานทางเลือก โดย ภาวะที่เหมาะสมในการนำไปใช้ คือ อุณหภูมิไพโรไลซิส 550 องศาเซลเซียส ขนาดของอนุภาค 250-500 ไมครอน อัตราการไหลของไนโตรเจน 160 มิลลิลิตรต่อนาที และอัตราการป้อนของสารตั้งต้น 1.13 กิโลกรัมต่อ ชั่วโมง ซึ่งได้ปริมาณน้ำมันชีวมวลสูงถึงร้อยละ 41.87 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้เมื่อทำการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาโดไล ไมด์ลงไปอัตราส่วนต่างๆจะทำให้ปริมาณน้ำมันชีวมวลลดต่ำลง แต่จะเพิ่มปริมาณแก๊สและของแข็ง ในส่วนของ การพิสูจน์เอกลักษณ์ทั้งทางกายภาพและทางเคมี พบว่าค่าความร้อนของน้ำมันชีวมวลมีค่าเหมาะสมต่อการ นำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในอุตสาหกรรม

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์และศูนย์เครือข่ายการเรียนรู้เพื่อภูมิภาค (สระบุรี) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในด้านความรู้และทักษะ รวมไปถึงเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย นอกจากนี้ขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุ ผู้มอบทุนการศึกษาและทุนงานวิจัย ในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ ด้วย หากมิได้การสนับสนุนจากหลายฝ่าย งานวิจัยนี้จึงไม่อาจสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

## เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Ghadiryanfar, K. A. Rosentrater, A. Keyhani, M. Omid. (2016). A review of macroalgae production with potential applications in biofuels and bioenergy, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 473-481.
- [2] T. Suganya, M. Varman, H. H. Masjuki, S. Renganathan. (2016). Macroalgae and microalgae as a potential source for commercial applications along with biofuels production: A biorefinery approach, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 909-941.
- [3] K. Chaiwong, T. Kiatsiriroat, N. Vorayos, C. Thararax. (2013). Study of bio-oil and bio-char production from algae by slow pyrolysis, *biomass and bio energy*, 56, 600-606.
- [4] S. D. Stefanidis, K. G. Kalogiannis, E. F. Iliopoulou, C. M. Michailof, P. A. Pilavachi, A. A. Lappas. (2014). A study of lignocellulosic biomass pyrolysis via the pyrolysis of cellulose, hemicellulose and lignin, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 105, 143-150.
- [5] Haydary, J., Jelemensky, L., Korenova, Z., Gasparovic, L. (2009, 25-29 May). Paper presented at the 36th International Conference of Slovak Society of Chemical Engineering, Tatranske Matliare, Slovakia.
- [6] Stamatov V, Honnery D, Soria J. (2006). Combustion properties of slow pyrolysis bio-oil produced from indigenous Australian species, *Renew Energy*, 31, 2108-21.
- [7] Zhang Q, Chang J, Wang T, Xu Y. (2007). Review of biomass pyrolysis oil properties and upgrading research. *Energy Convers Manage*, 48, 87-92.