

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- ธรรต มงคลศรี. หลักมูลทางวิศวกรรมปฏิกิริยาตัวเร่ง (Catalyst Reaction Engineering Fundamentals). ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. นคร ทิพย์วงศ์. เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล. สำนักพิมพ์ ส.ส.ท., 2552.
- บุศรินทร์ เมฆะปะบุตร. เคมีของกระบวนการเร่งปฏิกิริยา. เอกสารประกอบการสอน ภาควิชาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์, 2549.
- ไม้โตเร็วอีกทางเลือกของวิกฤติพลังงาน. LogisticsTime. (2552): 58
- สุกชิตา เกริกไกว้ล. แก๊สสังเคราะห์จากแก๊ซพีเคชั่นด้วยไอน้ำของทะเลสาบปาล์มน้ำมัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.
- อนันต์ เศรษฐพุทธิ. การรีฟอร์มมิงเอทานอลด้วยไอน้ำบนตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลแมกนีเซียมและนิกเกิล/อะลูมินา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.

ภาษาอังกฤษ

- Abu, Z., Rub, E., Bramer, E.A., and Brem, G. Review of Catalysts for Tar Elimination in Biomass Gasification Processes. Industrial & Engineering Chemistry Research 43 (2004): 6911-6919.
- Ates, F., and Isikdag, M. A. Influence of temperature and alumina catalyst on pyrolysis of corncob. Fuel 88 (2009): 1991-1997.
- Balat, M. Mechanisms of Thermochemical Biomass Conversion Processes. Part 1: Reactions of Pyrolysis. Energy Sources 30 (2008): 620-635.
- Demirbas, A. Calculation of higher heating value of biomass fuels. Fuel 76 (1997): 431-434.

- Demirbas, A. Mechanisms of liquefaction and pyrolysis reaction of biomass. Energy Conversion and Management 41 (2000): 633-646.
- Devi, L., Ptasinski, K. J., Janssen, Frans J.J.G., Paasen, Sander V.B. van, Bergman, Patrick C.A., and Kiel, Jacob H.A. Catalytic decomposition of biomass tars: use of dolomite and untreated olivine. Renewable Energy 30 (2005): 565-587.
- Dufour, A., Girods, P., Masson, E., Normand, S., Rogaume, Y., and Zoulalian, A. Comparison of two methods of measuring wood pyrolysis tar. Journal of Chromatography A 1164 (2007): 240-247.
- Hanaoka, T., Inoue, S., Uno, S., Ogi, T., and Minowa, T. Effect of woody biomass components on air-steam gasification. BIOMASS AND BIOENERGY 28 (2005): 69-76.
- Hosokai, S., Hayashi, J.-I., Shimada, T., Kobayashi, Y., Kuramoto, K., Li, C.Z., and Chiba, T. Spontaneous generation of tar decomposition promoter in a biomass steam reformer. Chemical Engineering Research and Design 83 (2005): 1093-1102.
- Hosoya, T., Kawamoto, H., and Saka, S. Influence of inorganic matter on wood pyrolysis at gasification temperature. The Japan Wood Research Society 53 (2007): 351-357.
- Kawamoto, H., Morisaki, H., and Saka, S. Secondary decomposition of levoglucosan in pyrolysis production from cellulosic biomass. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 85 (2009): 247-251.
- Li, C., and Suzuki, K. Tar property, analysis, reforming mechanism and model for biomass gasification. Renewable and Sustainable Energy Reviews (2008).
- Li, J., Yan, R., Xiao, B., Wang, X., and Yang, H. Influence of temperature on the formation of oil from pyrolyzing palm oil wastes in a fixed bed reactor. Energy & Fuels 21 (2007): 2398-2407.
- Mohan, D., Pittman, C. U., and Steele, P. H. Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil a critical review. Energy and fuel 20 (2006): 848-889.
- Mullen, Charles A., and Boateng, Akwasi A. Catalytic pyrolysis-GC/MS of lignin from several sources. Fuel Processing Technology 91 (2010): 1446-1458.

- Nishimura, M., Iwasaki, S., and Horio, M. The role of potassium carbonate on cellulose pyrolysis. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers 40 (2009): 630-637.
- Rajiv, Y., and Robert, G. Step-Response Kinetics of Methanation over a Ni/Al₂O₃ Catalysts. Ind. Eng. Chem. Res 31 (1992): 502-508.
- Shen, D.K., Gu, S., and Bridgwater, A.V. The thermal performance of the polysaccharides extracted from hardwood: Cellulose and hemicellulose. Carbohydrate Polymers 82 (2010): 39-45.
- Wang, L., Weller, Curtis L., Jones, David D., and Hanna, Milford A. Contemporary issues in thermal gasification of biomass and its application to electricity and fuel production. Biomass And Bioenergy 32 (2008): 573-581.
- Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D. H., and Zheng, C. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. Fuel 86 (2007): 1781-1788.
- Zhang, Y., Kajitan, S., Ashizawa, M., and Oki, Y. Tar destruction and coke formation during rapid pyrolysis and gasification of biomass in a drop-tube furnace. Fuel 89 (2010): 302-309.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
วิธีวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของชีวมวล

1. การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis): ASTM D3172

1.1 ความชื้น (Moisture): ASTM D3173

1.1.1 วิธีการทดลอง

- 1) อบถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาในเตาอบ (drying oven) 104-110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำเข้าเดสิเคเตอร์ (desiccator) ทิ้งไว้ประมาณ 15 นาที นำไปชั่งแล้วบันทึกน้ำหนัก
- 2) ชั่งตัวอย่างประมาณ 1 กรัม ลงในถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาที่ทราบน้ำหนักแล้ว บันทึกน้ำหนักตัวอย่าง
- 3) นำไปเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 104-110 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมงหรือจนน้ำหนักตัวอย่างคงที่
- 4) นำถาดอลูมิเนียมออกมาทิ้งไว้ให้เย็นลง แล้วนำเข้าเดสิเคเตอร์ ประมาณ 15 นาที แล้วชั่งถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาที่มีตัวอย่างอบแล้วอยู่ภายในบันทึกผล

1.1.2 สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$M = 100(W_1 - W_2) / W$$

เมื่อ M = ร้อยละของความชื้น

W_1 = น้ำหนักของถาดอลูมิเนียมพร้อมฝารวมกับน้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้นก่อนอบ (กรัม)

W_2 = น้ำหนักของถาดอลูมิเนียมพร้อมฝารวมกับน้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้นหลังอบ (กรัม)

W = น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)

1.2 ถ้ำ (Ash): ASTM D3174

1.2.1 วิธีการทดลอง

- 1) เผาครุชชีเบิลพร้อมฝานในเตาเผา (Muffle Furnace) ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำออกมาทำให้เย็นในเดสิเคเตอร์ (desicator) ซึ่งน้ำหนักครุชชีเบิล (crucible) พร้อมฝาน
- 2) ชั่งน้ำหนักตัวอย่างใส่ครุชชีเบิล ประมาณ 1 กรัม
- 3) นำไปเผาบนตะเกียงเบนเซนจนควันระเหยหมด
- 4) ใส่ครุชชีเบิลพร้อมฝานในเตาเผาที่อุณหภูมิประมาณ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 2 ชั่วโมงหรือจนน้ำหนักคงที่
- 5) นำครุชชีเบิลออกจากเตาเผาวางทิ้งไว้ให้เย็น แล้วนำไปใส่ในเดสิเคเตอร์ แล้วชั่งน้ำหนักพร้อมบันทึกผล

1.2.2 สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$A = 100(W_3 - W_4) / W$$

เมื่อ	A	=	ร้อยละของถ้ำ
	W_3	=	น้ำหนักของครุชชีเบิลพร้อมฝานที่มีถ้ำ (กรัม)
	W_4	=	น้ำหนักของครุชชีเบิลพร้อมฝาน (กรัม)
	W	=	น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)

1.3 ปริมาณสารระเหย (Volatile Matter): ASTM D3175

1.3.1 วิธีการทดลอง

- 1) เผาครุชชีเบิล (crucible) พร้อมฝานในเตาเผาอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ประมาณ 30 นาที นำออกจากเตาเผา ทำให้เย็นในเดสิเคเตอร์ (desicator) แล้วชั่งน้ำหนักครุชชีเบิลพร้อมฝาน บันทึกผล

- 2) ชั่งตัวอย่างใส่ในครุชชีเบลประมาณ 1 กรัม แล้วปิดฝาให้เรียบร้อย
- 3) นำไปให้ความร้อนโดยอยู่เหนือปากเตาเผา (Tubular Furnace) อุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที
- 4) หย่อนครุชชีเบลให้อยู่บริเวณปากเตา ที่อุณหภูมิประมาณ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที
- 5) หย่อนครุชชีเบลให้อยู่กึ่งกลางเตา อุณหภูมิประมาณ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 นาที
- 6) นำครุชชีเบลออกมาทิ้งไว้ให้เย็น แล้วนำไปใส่ในเดสิเคเตอร์ประมาณ 15 นาที นำไปชั่งและบันทึกผล

1.1.1 สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$V = [100(W_5 - W_6) / W] - M$$

เมื่อ	V	=	ร้อยละของสารระเหย
	W_5	=	น้ำหนักของครุชชีเบลพร้อมฝารวมกับน้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา (กรัม)
	W_6	=	น้ำหนักของครุชชีเบลพร้อมฝารวมกับน้ำหนักตัวอย่างหลังเผา (กรัม)
	W	=	น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)
	M	=	ร้อยละของความชื้น

1.2 ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon)

1.2.1 สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

$$\text{ร้อยละของคาร์บอนคงตัว} = 100 - M - A - V$$

ภาคผนวก ข

1.1 การวิเคราะห์โดยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ

งานวิจัยนี้ใช้เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น GC - 2014 Gas chromatograph (GC) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการแยกสารผสมที่ระเหยง่าย โดยสารผสมจะถูกฉีดเข้าไปในคอลัมน์ (Column) ที่บรรจุด้วยสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวยึดจับที่เรียกว่า Stationary phase และมีแก๊สพา (Carrier gas) เป็นเฟสเคลื่อนที่ (Mobile phase) เคลื่อนที่ไปตามคอลัมน์เข้าสู่เครื่องวัด (Detector) สัญญาณที่เครื่องตรวจวัดได้รับนั้นจะถูกส่งไปบันทึกเป็นโครมาโตแกรม (Chromatogram) โดยเครื่องบันทึก (Recorder)

1.1.1 แก๊สโครมาโตกราฟมีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้

- แก๊สพา (Carrier gas)
- ตัวควบคุมการไหล (Flow controller)
- ส่วนที่ฉีดสารตัวอย่าง (Injector port)
- คอลัมน์ (Column)
- ดีเทคเตอร์ (Detector)
- เครื่องบันทึก (Recorder)

1.1.2 รายละเอียดของส่วนประกอบที่สำคัญมีดังนี้

1.1.2.1 แก๊สพา

แก๊สพาเป็นแก๊สที่ใช้สำหรับพาสารตัวอย่าง ที่ถูกทำให้เป็นไอหรือแก๊สเฟสแล้วที่ส่วนที่ฉีดสารตัวอย่างให้เข้าสู่คอลัมน์ต่อไป แก๊สพานี้ต้องมีการควบคุมอัตราการไหล (Flow rate) ให้คงที่เสมอ โดยสามารถเลือกใช้อัตราการไหลให้เหมาะสมได้ตามต้องการ อัตราการไหลของแก๊สพามีส่วนสำคัญต่อการวิเคราะห์ทั้งเชิงคุณภาพและปริมาณ ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมให้คงที่

แก๊สพาโดยทั่วไปควรมีคุณสมบัติคือ มีสมบัติเฉื่อย ไม่เกิดปฏิกิริยากับสารตัวอย่าง มีมวลโมเลกุลต่ำและมีการแพร่กระจาย มีความบริสุทธิ์สูงและราคาไม่แพง แก๊สพาที่ใช้กันโดยทั่วไป ได้แก่ แก๊สไนโตรเจน ฮีเลียม และแก๊สไฮโดรเจน

1.1.2.2 คอลัมน์

คอลัมน์เป็นส่วนสำคัญของการแยกสาร เมื่อแก๊สหรือไอของสารผสมในสารตัวอย่างผ่านคอลัมน์ สารที่บรรจุในคอลัมน์เปล่านั้นจะทำหน้าที่เป็นตัวแยกแก๊สหรือไอของสารผสมเหล่านั้นออกจากกันเป็นส่วนๆ ดังนั้นโครมาโทแกรมที่ได้จะดีหรือไม่จึงขึ้นอยู่กับชนิดของคอลัมน์

1.1.2.3 ดีเทคเตอร์

ดีเทคเตอร์คือ ส่วนที่สามารถบ่งบอกในเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพของสารที่ต้องการวิเคราะห์หรือมีสารอื่นๆที่แตกต่างไปจากแก๊สพา ดังนั้นเครื่องตรวจวัดจึงเป็นเครื่องมือที่มีความสามารถสัมพันธ์กับสารต่างๆในลักษณะเฉพาะ และมีสภาพไวเพียงพอ มีการตอบสนองที่ดีในช่วงความเข้มข้นของสารที่กว้างพอ และมีหลากหลายชนิด ตามความเหมาะสมของงานก็ได้

ลักษณะเฉพาะที่ต้องการของดีเทคเตอร์นั้น ควรจะมีลักษณะเฉพาะในการตอบสนองต่อสารเคมีที่ต้องการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

- ให้สภาพความไวสูง (High sensitivity)
- มีความเฉพาะต่อการตรวจหาสาร (Selectivity)
- ให้ผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณในช่วงความเข้มข้นที่กว้างพอที่จะวัดได้อย่างถูกต้อง
- มีเสถียรภาพ (Stability) และความเที่ยง (Reproducibility)

ดีเทคเตอร์ที่นิยมใช้มี 2 ชนิดคือ ทอร์มอลคอนดักติวิตีดีเทคเตอร์ (TCD) และเฟลมไอออนไนเซชันดีเทคเตอร์ (FID) โดยในงานวิจัยนี้ใช้ดีเทคเตอร์แบบ TCD

ดีเทคเตอร์แบบ TCD

วิเคราะห์สารที่ออกมาจากแก๊สพา โดยใช้หลักการทำงานดังนี้ แก๊สพาบริสุทธิ์ (Reference gas) กับแก๊สพาที่มีสารตัวอย่างอยู่ด้วยจะมีคุณสมบัติในการนำความร้อน (Thermal conductivity) ที่ต่างกัน เมื่อสารตัวอย่างที่ถูกแยกจากคอลัมน์พร้อมด้วยแก๊สพาผ่านเข้าไปในเครื่องตรวจวัดและผ่านขดลวด (Filament) ซึ่งทำให้ร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าปริมาณหนึ่ง ขดลวดจะเสียความร้อนให้กับแก๊สพาที่มีสารตัวอย่างที่เข้ามาในดีเทคเตอร์ แล้วดีเทคเตอร์ก็จะทำการปรับกระแสไฟฟ้าเพื่อให้ขดลวดมีความร้อนเท่าเดิม กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการปรับความร้อนนี้จะเป็นสัญญาณส่งเข้าเครื่องบันทึกออกมาเป็นโครมาโทแกรม

1.2 การวิเคราะห์โดยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี-แมสสเปกโทรเมตรี (GC/MS)

ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี-แมสสเปกโทรเมตรี ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น GC-2010 Gas chromatograph-Mass spectrometry (GC/MS) เป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพสูง ใช้สำหรับวิเคราะห์สารเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ ซึ่งสามารถวิเคราะห์สารประกอบอินทรีย์ที่ผสมรวมกันหลายชนิดในปริมาณต่ำระดับนาโนกรัม โดยการแยกให้เป็นสารบริสุทธิ์ และสารประกอบอินทรีย์ที่นำมาวิเคราะห์นั้นจะต้องระเหยได้ที่อุณหภูมิไม่เกิน 450 องศาเซลเซียส เมื่อตรวจวัดเรียบร้อยแล้วจะแสดงผลออกมาในรูปของโครมาโตแกรม (Chromatogram)

1.2.1 แมสสเปกโทรเมตรี (Mass spectrometry)

เป็นเทคนิคการวิเคราะห์เพื่อหาสัดส่วนผสมในตัวอย่าง และเพื่อการพิสูจน์เอกลักษณ์สารทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ โดยอาศัยรูปแบบของการแตกไอออน (fragmentation pattern) อันเนื่องมาจากการเกิด ionization ด้วยวิธีการต่างๆ ซึ่งจะแสดงความแตกต่างของค่ามวลต่อประจุออกมา (m/z) กราฟของความสัมพันธ์ระหว่าง ion abundance และ m/z ของ fragment ion ต่างๆ ที่เกิดขึ้นถูกเรียกว่า mass spectrum ซึ่งให้ข้อมูลทางโครงสร้างเพื่อใช้ในการพิสูจน์เอกลักษณ์ของสาร โดยไม่ต้องอาศัยข้อมูลจากเทคนิคอื่นๆร่วมด้วย

1.2.2 หลักการของแมสสเปกโทรเมตรี (Mass spectrometry)

โมเลกุลถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออนภายในบริเวณ ionization chamber ซึ่งถูกเรียกว่าแหล่งไอออน (Ion Source) ไอออนจะถูกดึงและโฟกัสด้วยชุดของเลนส์และถูกแยกโดยหน่วยวิเคราะห์มวล (Mass Analyzer) จากนั้นไอออนจะถูกกำหนดให้ไปตกกระทบที่เครื่องตรวจวัดไอออน (Ion Detector) ทำให้เกิดสัญญาณไฟฟ้าที่สัมพันธ์โดยตรงกับความเข้มข้นของไอออนในตัวอย่าง กระแสไอออนจะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูป digital signal และถูกบันทึกใน data system ซึ่งจะเปลี่ยนสัญญาณนี้อยู่ในรูปที่เรียกว่าแมสสเปกตรัม (Mass spectrum) และสามารถนำไปใช้ในการพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารตัวอย่างต่อไป



1.2.3 องค์ประกอบของเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี-แมสสเปกโทรเมตรี (GC/MS) แสดงได้ดังรูปที่ ข 1

1.2.3.1 ส่วนการป้อนสารอัตโนมัติ (Auto sampler)

1.2.3.2 เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี (GC)

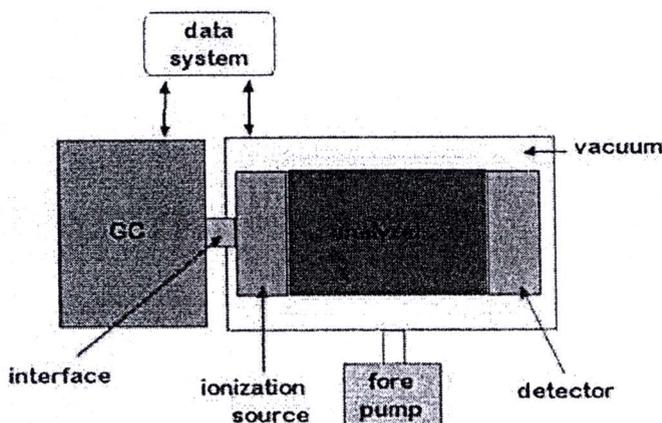
- Injector
- Oven column

1.2.3.3 ส่วนการเชื่อมต่อ (Interface)

1.2.3.4 แมสสเปกโทรเมตรี (MS)

- Ionization เป็นชนิด EI ใช้ศักย์ไฟฟ้า 70 eV
- Mass analysis เป็นแบบ Quadrupole Mass Filters โดยการให้ความถี่ชนิด DC และชนิด AC ไปที่ mass analyzer ซึ่งประกอบด้วยแท่งรูปทรง hyperbolic จำนวน 4 แท่ง การเพิ่มของความถี่ชนิด DC และชนิด AC ทำให้ไอออนที่มีค่า m/z ต่ำไปสู่สูง สามารถ oscillate ไปถึง detector ได้ตามลำดับ
- Ion detection

Mass spectrometer components



รูปที่ ข 1 แสดงองค์ประกอบของเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี-แมสสเปกโทรเมตรี (GC/MS) (kmitl : online)

ภาคผนวก ค

การคำนวณ

1. หาอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเข้าท่อชั้นในและชั้นนอก

เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อชั้นใน 8.8 มิลลิเมตร

เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อชั้นใน 10.0 มิลลิเมตร

เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อชั้นนอก 18.8 มิลลิเมตร

เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อชั้นนอก 20.0 มิลลิเมตร

ความเร็วพื้นที่หน้าตัด

$$\text{flow}_{\text{ท่อชั้นใน}} / A_{\text{ท่อชั้นใน}} = \text{flow}_{\text{ท่อชั้นนอก}} / A_{\text{ท่อชั้นนอก}}$$

เพราะฉะนั้น

$$\text{flow}_{\text{ท่อชั้นใน}} / \text{flow}_{\text{ท่อชั้นนอก}} = A_{\text{ท่อชั้นใน}} / A_{\text{ท่อชั้นนอก}}$$

$$\text{flow}_{\text{ท่อชั้นใน}} / \text{flow}_{\text{ท่อชั้นนอก}} = \pi r_{\text{ท่อชั้นใน}}^2 / \pi r_{\text{ท่อชั้นนอก}}^2$$

$$\text{flow}_{\text{ท่อชั้นใน}} / \text{flow}_{\text{ท่อชั้นนอก}} = \pi (4.4)^2 / \pi [(9.4)^2 - (5)^2]$$

จะได้

$$\text{flow}_{\text{ท่อชั้นใน}} = 0.305 \text{ flow}_{\text{ท่อชั้นนอก}}$$

2. หาอัตราการป้อนไอน้ำ

น้ำหนักชีวมวลทั้งสองชนิด 0.120 กรัม

ร้อยละของคาร์บอนในไม้กระถินยักษ์ 44.124

ร้อยละของคาร์บอนในขี้เลื่อย 49.200

จากปฏิกิริยาแกซีฟิเคชัน



รวม



ไม้กระถินยักษ์

$$C = 0.120 * (44.124/100) = 0.053 \text{ กรัม} = 0.053/12 = 0.0044 \text{ โมล}$$

$$H_2O = 0.0044 * 3/2 = 0.0066 \text{ โมล} = 0.0066 * 18 = 0.119 \text{ กรัม} = 0.119 \text{ มิลลิลิตร}$$

ขี้เลื่อย

$$C = 0.120 * (49.200/100) = 0.059 \text{ กรัม} = 0.059/12 = 0.0049 \text{ โมล}$$

$$H_2O = 0.0049 * 3/2 = 0.0074 \text{ โมล} = 0.0074 * 18 = 0.133 \text{ กรัม} = 0.133 \text{ มิลลิลิตร}$$

ดังนั้น จึงทำการป้อนไอน้ำด้วยอัตราการเร็ว 0.140 มิลลิลิตร/นาที

3. หาร้อยละโดยปริมาตรของไอน้ำ

เปิดตารางไอน้ำที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ได้ specific volume 4.952 ลูกบาศก์เมตร/กิโลกรัม
อัตราการไหลของไอน้ำ 0.140 มิลลิลิตร/นาที = 0.140 กรัม/นาที

$$\begin{aligned} \text{เพราะฉะนั้น Specific Volume} &= 4.952 \text{ ลูกบาศก์เมตร/กิโลกรัม} \times 0.140 \text{ กรัม/นาที} \times (1 \\ &\text{กิโลกรัม/1000 กรัม}) \times (1000 \text{ ลิตร/1 ลูกบาศก์เมตร}) \times (1000 \\ &\text{มิลลิลิตร/1 ลิตร}) \\ &= 693.280 \text{ มิลลิลิตร/นาที} \end{aligned}$$

อัตราการไหลของไนโตรเจน 110 มิลลิลิตร/นาที

$$\text{จาก } V_1/N_2 = T_1/T_2$$

$$110/N_2 = 298/1073$$

$$\text{จะได้ } V_2 = 396.074 \text{ มิลลิลิตร/นาที}$$

$$\begin{aligned} \text{เพราะฉะนั้น ร้อยละโดยปริมาตรของไอน้ำ(\%Vol)} &= 693.280 / (396.074 + 693.280) * 100 \\ &= 63.640 \end{aligned}$$

4. ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนในกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

- กรณีใช้ไม้กระถินยักษ์

ครั้งที่ 1

ชั่งน้ำหนักไม้กระถินยักษ์	0.121 กรัม
อุณหภูมิในโซนที่ 1	400 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิในโซนที่ 2	800 องศาเซลเซียส
อัตราการป้อนไอน้ำ	0.140 มิลลิลิตรต่ออนาที
คาร์บอนในไม้กระถินยักษ์	44.124 wt% (as receive)

เพราะฉะนั้น น้ำหนักคาร์บอนในไม้กระถินยักษ์ = $0.121 \times 44.124 / 100 = 0.053$ กรัม

น้ำหนักชาร์ที่ได้จากการทดลอง	0.0276 กรัม
คาร์บอนในชาร์ (C-char)	60.175 wt% (as receive)

เพราะฉะนั้น น้ำหนักคาร์บอนในชาร์ = $0.0276 \times 60.175 / 100 = 0.017$ กรัม

คาร์บอนในแก๊สที่ได้จากการทดลอง ($\text{CO} + \text{CH}_4 + \text{CO}_2$) = 0.031 กรัม

$$\begin{aligned} \text{เพราะฉะนั้น น้ำหนักคาร์บอนในชาร์} &= \text{น้ำหนักคาร์บอนในไม้กระถินยักษ์} - (\text{น้ำหนัก} \\ &\quad \text{คาร์บอนในชาร์} + \text{น้ำหนักคาร์บอนในแก๊ส}) \\ &= 0.053 - (0.017 + 0.031) \\ &= 0.006 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

ดังนั้น ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนคิดเป็น

$$\text{ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นแก๊ส} = (0.031/0.053) \times 100 = 58.161$$

$$\text{ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นชาร์} = (0.017/0.053) \times 100 = 31.144$$

$$\text{ร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นชาร์} = (0.006/0.053) \times 100 = 10.694$$

5. การหาความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด (gas production) ในกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา

- กรณีใช้ไม้กระถินยักษ์

ครั้งที่ 1

ชั่งน้ำหนักไม้กระถินยักษ์	0.121 กรัม
อุณหภูมิในโซนที่ 1	400 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิในโซนที่ 2	800 องศาเซลเซียส
อัตราการป้อนไอน้ำ	0.14 มิลลิลิตรต่อนาที
อัตราการไหลของแก๊สรวม	118.93 มิลลิลิตรต่อนาที

เวลาที่เก็บแก๊สทุก 10 นาที บรรจุในถุงเก็บแก๊ส เป็นเวลา 50 นาที

ปริมาตรแก๊สในถุงเก็บแก๊ส 1 ถุง เท่ากับ 1189.3 มิลลิลิตร

ตาราง ค1 ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิดของตัวมาตรฐาน (Standard)

ชนิดแก๊ส	area	% balance in N ₂
H ₂	43690.5	1.00
CO	2463.3	1.00
CH ₄	9289.8	1.00
CO ₂	3431.1	1.00

ตาราง ค2 ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด

ถังที่ 1 (10 นาทีแรก)

ชนิดแก๊ส	area	% เทียบกับ std	ปริมาตรแก๊สในถัง (mL)	จำนวนโมล (mmol)
H ₂	50344.1	1.152	13.704	0.560
CO	3795.5	1.540	18.324	0.750
CH ₄	4392.6	0.472	5.623	0.230
CO ₂	1090.6	0.317	3.780	0.155

วิธีการคำนวณถังที่ 1

ชนิดแก๊ส	area	% เทียบกับ std	ปริมาตรแก๊สในถัง (mL)	จำนวนโมล (mmol)
H ₂	50344.1	50344.1/43690.5	1.152x1189.3	13.704/(0.08206x298)
CO	3795.5	3795.5/2463.3	1.540 x1189.3	18.324/(0.08206x298)
CH ₄	4392.6	4392.6/9289.8	0.472 x1189.3	5.623/(0.08206x298)
CO ₂	1090.6	1090.6/3431.1	0.317 x1189.3	3.780/(0.08206x298)

ถังที่ 2

ชนิดแก๊ส	area	% เทียบกับ std	ปริมาตรแก๊สในถัง (mL)	จำนวนโมล (mmol)
H ₂	46841.3	1.072	12.750	0.521
CO	2741.6	1.112	13.236	0.541
CH ₄	3324.1	0.357	4.255	0.174
CO ₂	2150.6	0.626	7.454	0.305

รูปที่ 3

ชนิดแก๊ส	area	% เทียบกับ std	ปริมาตรแก๊สในถุง (mL)	จำนวนโมล (mmol)
H ₂	12305	0.281	3.349	0.136
CO	505.3	0.205	2.439	0.099
CH ₄	722.5	0.077	0.924	0.037
CO ₂	1292.4	0.376	4.479	0.183

รูปที่ 4

ชนิดแก๊ส	area	% เทียบกับ std	ปริมาตรแก๊สในถุง (mL)	จำนวนโมล (mmol)
H ₂	3859	0.088	1.050	0.042
CO	80.3	0.032	0.387	0.015
CH ₄	157.9	0.016	0.202	0.008
CO ₂	428.4	0.124	1.484	0.060

รูปที่ 5 (ถุงสุดท้าย)

ชนิดแก๊ส	area	% เทียบกับ std	ปริมาตรแก๊สในถุง (mL)	จำนวนโมล (mmol)
H ₂	1192.2	0.027	0.324	0.013
CO	0	0	0	0
CH ₄	52.6	0.005	0.067	0.002
CO ₂	173.5	0.050	0.601	0.024

ดังนั้นผลิตภัณฑ์แก๊สที่เก็บได้ในเวลา 50 นาที

ชนิดแก๊ส	จำนวนโมล (mmol)	จำนวนโมล/น้ำหนักชีวมวล (mmol/g biomass)
H ₂	1.275	10.546
CO	1.406	11.631
CH ₄	0.452	3.745
CO ₂	0.727	6.020

ภาคผนวก ง
ข้อมูลการทดลอง

1. ข้อมูลการวิเคราะห์หาปริมาณและองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากกระบวนการต่างๆ

ตาราง ง 1 ข้อมูลการทดลองของผลอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในกระบวนการไพโรไลซิสของไม้กระถินยักษ์

ไม้กระถินยักษ์												
อุณหภูมิไพโรไลซิส	แก๊ส				ชาร์				ทาร์			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	SD	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	SD	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	SD
400	7.24	7.67	7.45	0.298	33.78	34.10	33.93	0.233	58.99	58.24	58.62	0.531
500	11.47	12.08	11.78	0.438	27.59	27.43	27.51	0.110	60.94	60.49	60.71	0.318
600	25.67	24.99	25.33	0.482	20.19	19.83	20.01	0.256	54.13	55.18	54.65	0.738
700	41.81	42.07	41.94	0.184	16.72	17.01	16.86	0.206	41.47	40.92	41.20	0.390
800	58.07	58.80	58.44	0.519	9.21	10.09	9.65	0.619	32.72	31.11	31.91	1.138

ตาราง ง 2 ข้อมูลการทดลองของผลอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของไม้กระถินยักษ์

ไม้กระถินยักษ์												
อุณหภูมิไพโรไลซิส	แก๊ส				ชาร์				ทาร์			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	SD	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	SD	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	SD
400	42.06	43.92	42.99	1.315	32.92	33.70	33.31	0.556	25.03	22.38	23.70	1.871
500	46.43	47.02	46.73	0.419	25.52	23.80	24.66	1.216	28.04	29.17	28.61	0.797
600	47.94	47.67	47.81	0.194	18.91	18.21	18.56	0.496	33.15	34.12	33.63	0.690
700	57.35	57.34	57.35	0.008	12.40	12.99	12.69	0.420	30.25	29.67	29.96	0.411
800	61.15	59.89	60.52	0.895	8.96	8.44	8.70	0.376	29.88	31.67	30.78	1.271

ตาราง ง 3 ข้อมูลการทดลองของผลอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของไม้กระถินยักษ์

ไม้กระถินยักษ์															
อุณหภูมิไพโรไลซิส	แก๊ส					ชาร์					ทาร์				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
400	58.16	59.10	60.17	59.16	0.99	31.14	30.77	31.08	30.99	0.19	10.69	10.13	8.75	9.85	0.99
500	66.76	62.54	64.85	64.65	2.98	24.67	27.06	25.77	25.86	1.69	8.58	10.41	9.38	9.49	1.29
600	60.61	56.96	57.45	58.34	1.98	22.82	23.17	23.62	23.20	0.40	16.58	19.88	18.93	18.46	1.69
700	65.61	69.67	69.65	68.31	2.34	20.22	17.15	16.58	17.98	1.96	14.17	13.18	13.77	13.71	0.49
800	74.52	77.55	71.18	74.42	3.18	11.41	9.73	11.43	10.85	0.97	14.07	12.71	17.39	14.72	2.40

ตาราง ง 4 ข้อมูลการทดลองของผลอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อปริมาณองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สในกระบวนการไพโรไลซิสของไม้กระถินยักษ์

ไม้กระถินยักษ์								
อุณหภูมิไพโรไลซิส	H ₂				CO			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	SD	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	SD
400	0.03	0.04	0.03	0.005	0.96	0.98	0.97	0.009
500	0.24	0.26	0.25	0.013	1.69	1.78	1.74	0.061
600	1.40	1.38	1.39	0.017	5.51	4.65	5.08	0.606
700	3.54	4.31	3.92	0.541	9.96	9.95	9.95	0.008
800	6.17	5.71	5.94	0.323	14.54	14.17	14.36	0.266
อุณหภูมิไพโรไลซิส	CH ₄				CO ₂			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	SD	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	SD
400	0.19	0.15	0.17	0.026	1.51	1.69	1.60	0.13
500	0.52	0.51	0.51	0.008	2.00	2.15	2.08	0.10
600	0.84	1.28	1.06	0.311	3.09	3.26	3.17	0.12
700	2.74	2.62	2.68	0.084	2.67	2.90	2.79	0.16
800	3.84	4.24	4.04	0.280	2.97	3.21	3.09	0.17

ตาราง ง 5 ข้อมูลการทดลองของผลอุณหภูมิไฟโรไลซิสต่อปริมาณองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สในกระบวนการรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของไม้กระถินยักษ์

ไม้กระถินยักษ์								
อุณหภูมิไฟโรไลซิส	H ₂				CO			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	SD	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	SD
400	2.95	2.99	2.97	0.027	9.85	10.24	10.05	0.270
500	3.40	3.24	3.32	0.112	11.50	11.58	11.54	0.058
600	3.76	3.30	3.53	0.322	10.78	10.79	10.78	0.010
700	5.67	5.42	5.55	0.172	13.05	12.76	12.90	0.202
800	8.38	8.60	8.49	0.154	14.70	14.82	14.76	0.086
อุณหภูมิไฟโรไลซิส	CH ₄				CO ₂			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	SD	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	SD
400	3.14	3.21	3.17	0.051	2.47	2.70	2.59	0.162
500	3.49	3.58	3.54	0.062	2.08	2.13	2.11	0.034
600	3.42	3.44	3.43	0.016	3.44	3.29	3.37	0.097
700	3.78	3.76	3.77	0.017	4.26	4.56	4.41	0.215
800	3.74	3.59	3.66	0.103	4.05	3.61	3.83	0.311

ตาราง ง 6 ข้อมูลการทดลองของผลอุณหภูมิไฟโรไลซิสต่อปริมาณองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สในกระบวนการรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของไม้กระถินยักษ์

ไม้กระถินยักษ์										
อุณหภูมิไฟโรไลซิส	H ₂					CO				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
400	10.55	12.07	11.57	11.39	0.778	11.63	11.35	11.75	11.58	0.203
500	13.96	11.604	13.56	12.78	1.668	13.68	12.93	13.29	13.30	0.531
600	9.59	10.51	12.65	10.92	1.570	12.54	11.17	11.99	11.90	0.692
700	12.74	15.82	15.62	14.73	1.722	12.40	14.17	14.98	13.85	1.321
800	15.28	20.89	13.56	16.56	3.831	16.27	16.69	14.96	15.97	0.902
อุณหภูมิไฟโรไลซิส	CH ₄					CO ₂				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
400	3.75	3.74	3.81	3.77	0.038	6.02	6.64	6.57	6.41	0.337
500	4.72	4.31	4.59	4.52	0.290	6.15	5.76	5.97	5.95	0.276
600	4.26	3.75	4.58	4.20	1.399	5.49	6.03	4.56	5.36	0.743
700	4.14	4.94	4.59	4.56	0.401	7.59	6.51	6.04	6.71	0.795
800	4.87	4.32	4.46	4.55	0.290	6.26	7.51	6.76	6.85	0.632

ตาราง ง 7 ข้อมูลการทดลองของผลอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในกระบวนการไพโรไลซิสของซีเลื่อย

ซีเลื่อย												
อุณหภูมิ ไพโรไลซิส	แก๊ส				ชาร์				ทาร์			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	SD	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	SD	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	SD
400	7.35	6.88	7.11	0.337	40.87	41.31	41.09	0.318	51.78	51.81	51.79	0.020
500	13.49	10.96	12.22	1.793	33.82	34.96	34.39	0.799	52.68	54.09	53.39	0.993
600	22.39	25.91	24.15	2.484	29.82	29.45	29.64	0.261	47.78	44.64	46.21	2.222
700	42.99	39.87	41.44	1.560	24.95	23.29	24.12	1.172	32.05	36.83	34.44	3.381
800	50.32	48.85	49.58	1.034	21.31	21.75	21.53	0.312	28.37	29.39	28.88	0.722

ตาราง ง 8 ข้อมูลการทดลองของผลอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของซีเลื่อย

ซีเลื่อย												
อุณหภูมิ ไพโรไลซิส	แก๊ส				ชาร์				ทาร์			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	SD	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	SD	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	SD
400	37.44	37.78	37.61	0.241	42.56	42.25	42.41	0.220	20	19.97	19.99	0.022
500	40.62	39.18	39.90	1.012	34.05	35.71	34.88	1.176	25.33	25.10	25.22	0.164
600	44.69	42.24	43.47	1.731	29.21	29.25	29.23	0.019	26.10	28.52	27.31	1.712
700	45.35	43.52	44.44	1.293	25.74	26.10	25.92	0.259	28.91	30.37	29.65	1.034
800	50.68	48.85	49.76	1.289	22.85	21.76	22.30	0.771	26.48	29.39	27.95	2.061

ตาราง ง 9 ข้อมูลการทดลองของผลอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อร้อยละการเปลี่ยนของคาร์บอนเป็นผลิตภัณฑ์ในกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของซีลี้อย

ซีลี้อย															
อุณหภูมิ ไพโรไล ซิส	แก๊ส					ชาร์					ทาร์				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
400	44.27	49.15	-	46.71	3.450	47.14	44.48	-	45.81	1.883	8.59	6.37	-	7.48	1.57
500	53.40	49.85	52.64	51.96	1.865	38.82	39.30	39.03	39.05	0.238	7.78	10.85	8.33	8.99	1.64
600	61.42	59.95	56.28	59.21	2.647	24.88	24.09	25.85	24.94	0.881	13.70	15.96	17.88	15.85	2.09
700	60.17	60.16	-	60.17	0.009	26.70	24.34	-	25.52	1.666	13.13	15.49	-	14.31	1.68
800	66.51	68.05	-	67.28	1.087	17.70	17.01	-	17.36	0.488	15.78	14.94	-	15.36	0.60

ตาราง ง 10 ข้อมูลการทดลองของผลอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อปริมาณองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สในกระบวนการไพโรไลซิสของซีลี้อย

ซีลี้อย								
อุณหภูมิ ไพโรไลซิส	H ₂				CO			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	SD	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	SD
400	0.02	0.03	0.026	0.009	0.74	0.85	0.79	0.083
500	0.14	0.12	0.13	0.012	2.10	1.98	2.04	0.086
600	0.87	0.97	0.92	0.074	5.47	5.82	5.65	0.251
700	3.75	3.18	3.47	0.402	11.59	10.61	11.10	0.693
800	5.60	5.54	5.57	0.047	13.92	13.13	13.53	0.556
อุณหภูมิ ไพโรไลซิส	CH ₄				CO ₂			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	SD	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	SD
400	0.073	0.13	0.099	0.038	2.21	1.84	2.024	0.259
500	0.53	0.49	0.51	0.031	2.90	2.02	2.46	0.618
600	1.31	1.31	1.31	0.006	2.40	3.49	2.94	0.773
700	3.06	2.63	2.85	0.305	2.98	3.11	3.043	0.093
800	3.57	3.24	3.40	0.232	3.15	3.66	3.403	0.364

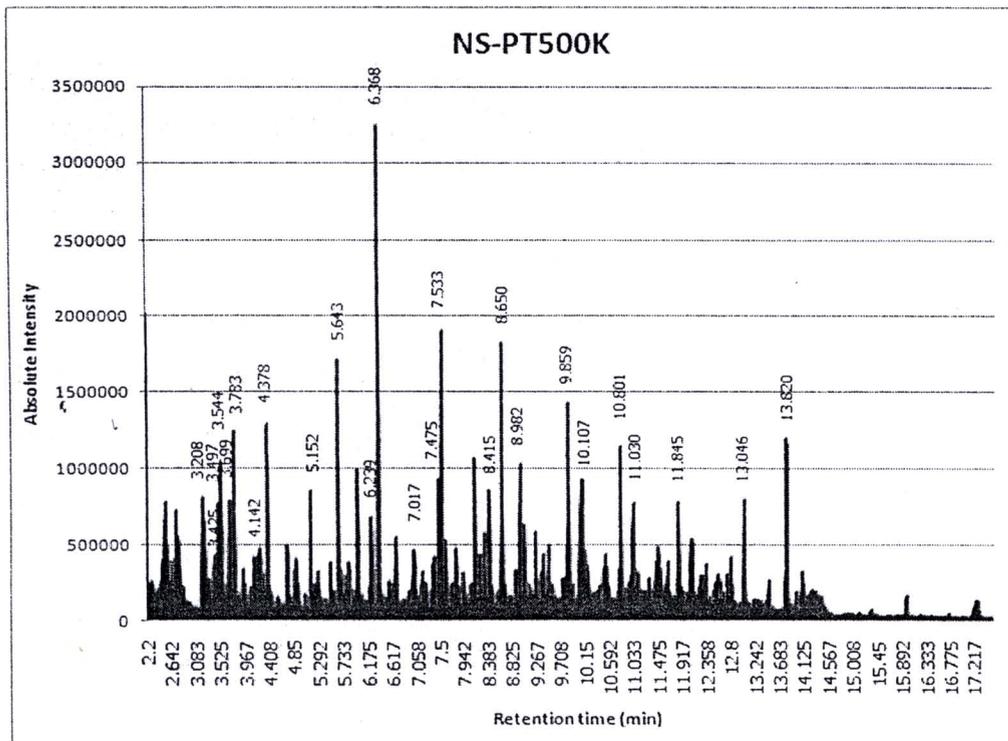
ตาราง ง 11 ข้อมูลการทดลองของผลอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อปริมาณองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สในกระบวนการรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำแบบไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของซีลี้อย

ซีลี้อย								
อุณหภูมิไพโรไลซิส	H ₂				CO			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	SD	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	SD
400	3.41	3.25	3.33	0.109	9.63	9.93	9.78	0.210
500	2.79	2.85	2.82	0.046	10.50	10.35	10.42	0.106
600	3.17	3.01	3.09	0.114	11.72	11.68	11.70	0.022
700	4.22	2.57	3.39	1.171	11.85	11.44	11.64	0.292
800	5.97	5.84	5.91	0.092	14.44	13.40	13.92	0.739
อุณหภูมิไพโรไลซิส	CH ₄				CO ₂			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	SD	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย	SD
400	3.02	2.76	2.89	0.182	2.69	2.80	2.75	0.072
500	3.31	3.01	3.16	0.215	2.84	2.71	2.78	0.093
600	3.62	3.87	3.74	0.175	2.99	1.77	2.38	0.862
700	3.61	2.95	3.28	0.468	3.13	3.46	3.30	0.230
800	3.60	3.28	3.44	0.227	2.73	3.28	3.01	0.389

ตาราง ง 12 ข้อมูลการทดลองของผลอุณหภูมิไพโรไลซิสต่อปริมาณองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์แก๊สในกระบวนการรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของซีลี้อย

ซีลี้อย										
อุณหภูมิไพโรไลซิส	H ₂					CO				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
400	15.3	15.56	-	15.43	0.177	9.25	10.89	-	10.07	1.159
500	15.32	17.21	12.12	14.88	2.574	13.18	12.64	12.15	12.65	0.513
600	14.87	15.47	12.63	14.32	1.498	16.15	15.51	13.32	14.99	1.485
700	17.09	14.06	-	15.57	2.144	15.20	15.06	-	15.13	0.093
800	22.10	19.47	-	20.78	1.864	17.50	17.93	-	17.72	0.302
อุณหภูมิไพโรไลซิส	CH ₄					CO ₂				
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	SD
400	2.99	3.016	-	3.01	0.014	5.903	6.244	-	6.074	0.241
500	3.88	4.62	3.43	3.98	0.600	4.83	3.19	6.00	4.68	1.415
600	4.24	3.38	3.53	3.71	0.463	4.79	5.69	6.23	5.57	0.728
700	4.06	4.06	-	4.06	0	5.42	5.54	-	5.48	0.089
800	4.65	4.57	-	4.61	0.057	5.11	5.39	-	5.25	0.200

1.2 ข้อมูลการวิเคราะห์ขององค์ประกอบของสารจากไม้กระถินยักษ์ในกระบวนการต่างๆ



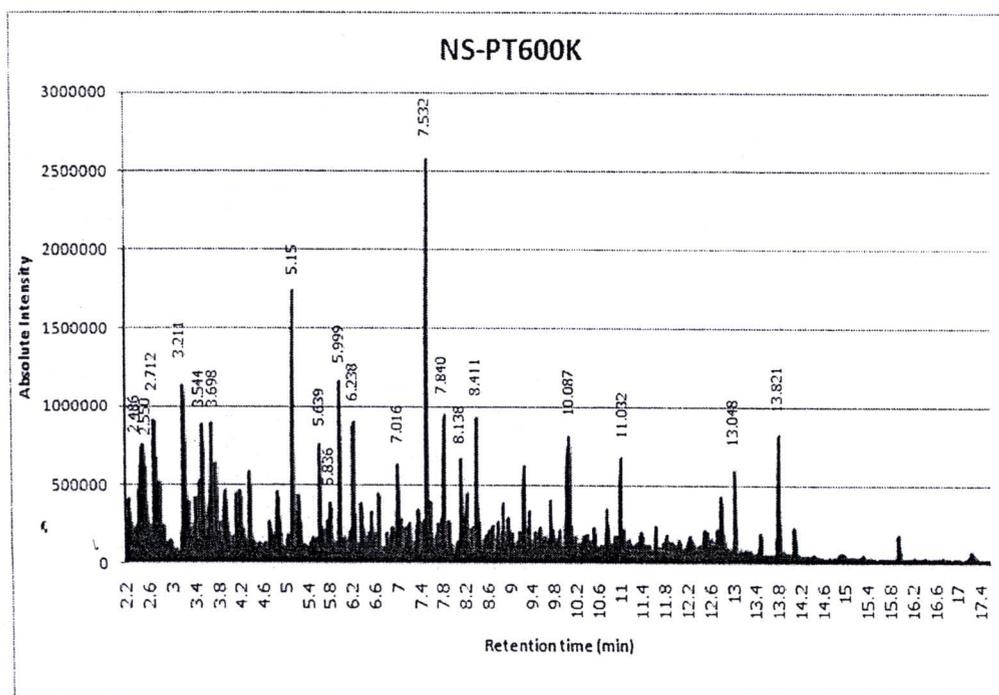
รูปที่ 1 แสดงโครมาโทแกรมของสารที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสของไม้กระถินยักษ์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

ตาราง 13 แสดงองค์ประกอบของสารที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสของไม้กระถินยักษ์ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

Peak#	Ret.Time	Area	Height	% Area	Compound
1	3.208	3077140	622934	2.524	furfural
2	3.425	657321	326799	0.535	propanedioic acid
3	3.497	925521	662062	0.765	2-(1-methylethoxy)-ethanol
4	3.544	1773113	930289	1.456	2-furanmethanol
5	3.699	1782418	682263	1.464	3-methoxymethoxybutyric acid
6	3.783	1031252	1127830	0.847	2-(1-methylethoxy)-ethanol
7	4.142	2538501	319929	2.089	2-methyl-2-cyclopentenone
8	4.378	1607832	1162970	1.324	2-cyclopenten-1-one

Peak#	Ret.Time	Area	Height	% Area	Compound
9	5.152	815849	769835	0.674	phenol
10	5.643	1740403	1553795	1.431	1-2-cyclopentanedione
11	6.239	725291	504604	0.600	3-methyl-phenol
12	6.368	3250802	3072598	2.673	1-(1-cyclohexen-1-yl)-ethanone
13	7.017	856686	366410	0.707	2,5-dimethyl-phenol
14	7.475	928191	820559	0.765	2-methoxy-4-methyl-phenol
15	7.533	1848851	1789362	1.521	1,2-benzenediol
16	8.415	886531	703462	0.732	4-methyl-1,2-benzenediol
17	8.65	1480115	1615597	1.217	4-ethenyl-2-methoxy-phenol
18	8.982	1031225	873894	0.847	2,6-dimethoxy-phenol
19	9.859	987505	1121131	0.814	2-methoxy-4-(1-propenyl)-phenol
20	10.107	2392865	612288	1.965	levoglucosan
21	10.801	802076	881038	0.658	3,5-dimethoxyacetophenone
22	11.03	1077717	592197	0.888	diethyl phthalate
23	11.845	801299	624476	0.658	2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)-phenol
24	13.046	863439	681347	0.707	1,2-benzenedicarboxylic acid
25	13.82	1269197	955506	1.044	1,2-benzenedicarboxylic acid



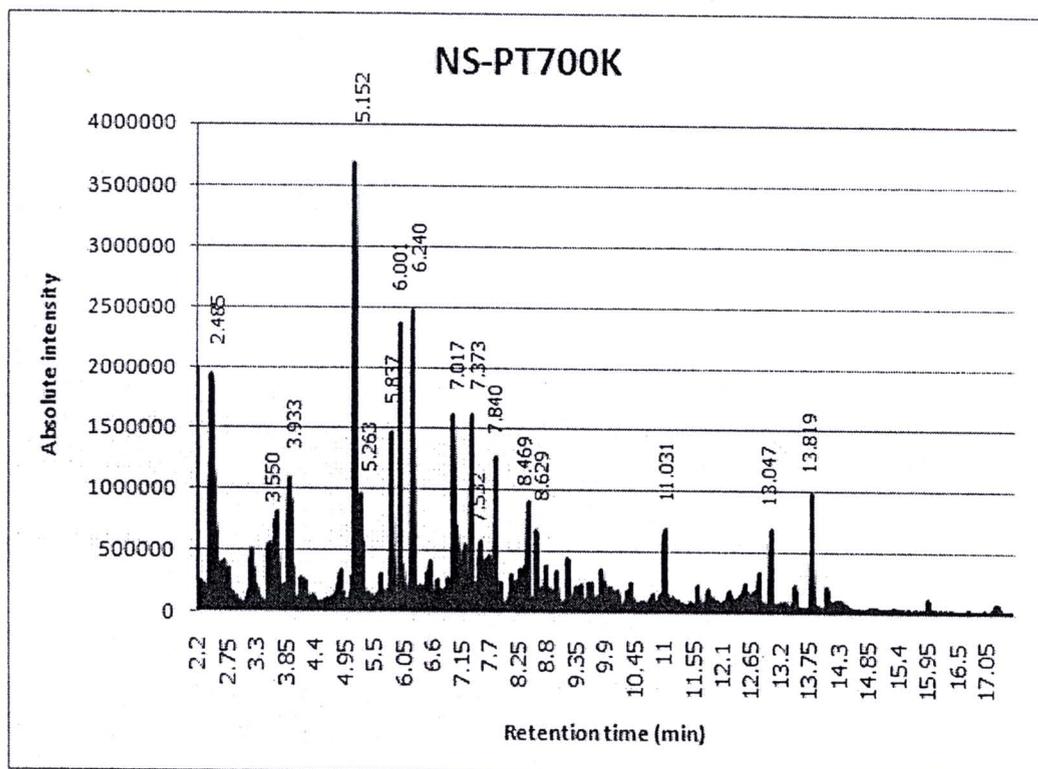


รูปที่ ง 2 แสดงโครมาโทแกรมของสารที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสของไม้กระถินยักษ์ที่
อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

ตาราง ง 14 แสดงองค์ประกอบของสารที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสของไม้กระถินยักษ์ที่
อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

Peak#	Ret. Time	Area	Height	% Area	BP (°C)	Compound
1	2.486	2508603	540873	2.932	110.6	toluene
2	2.55	951679	408179	1.110	118.09	acetoxyacetic acid
3	2.712	2519180	696125	2.944	160.3	5-methoxy-2-pentanone
4	3.211	2400553	931309	2.804	161.7	furfural
5	3.544	1373860	759772	1.600	171	2-furanmethanol
6	3.698	2162192	779034	2.523	-	3-methoxymethoxybutyric acid
7	5.15	1663941	1657052	1.939	182	phenol
8	5.639	938399	679049	1.086	171.11	1-2-cyclopentanedion
9	5.836	1248937	291088	1.460	176.5	indene
10	5.999	1353850	1056843	1.577	191.0	2-methyl-phenol

Peak#	Ret.Time	Area	Height	% Area	BP (°C)	Compound
11	6.238	1225243	723000	1.437	202.0	3-methyl-phenol
12	7.016	674687	512521	0.783	212	2,5-dimethyl-phenol
13	7.532	2721395	2485420	3.177	245.5	1,2-benzenediol
14	7.84	860934	809524	1.005	194.18	diacetate-1,2-benzenediol
15	8.138	769601	580438	0.899	241	3-methyl-1,2-benzenediol
16	8.411	1161458	794855	1.355	251	4-methyl-1,2-benzenediol
17	10.087	2692222	681764	3.143	383.8	levoglucosan
18	11.032	741221	544109	0.864	295	diethyl phthalate
19	13.048	616044	513420	0.724	340	1,2-benzenedicarboxylic acid
20	13.821	939480	672671	1.098	340	1,2-benzenedicarboxylic acid

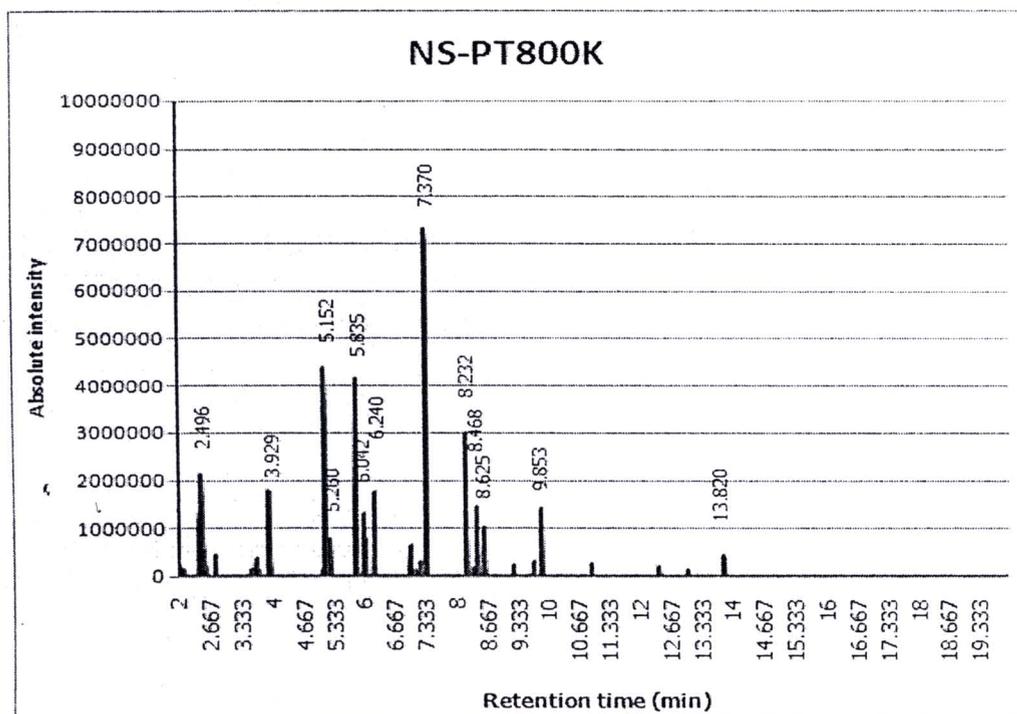


รูปที่ 3 แสดงโครมาโทแกรมของสารที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสของไม้กระถินยักษ์ที่

อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

ตาราง ง 15 แสดงองค์ประกอบของสารที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสของไม้กระถินยักษ์ที่
อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

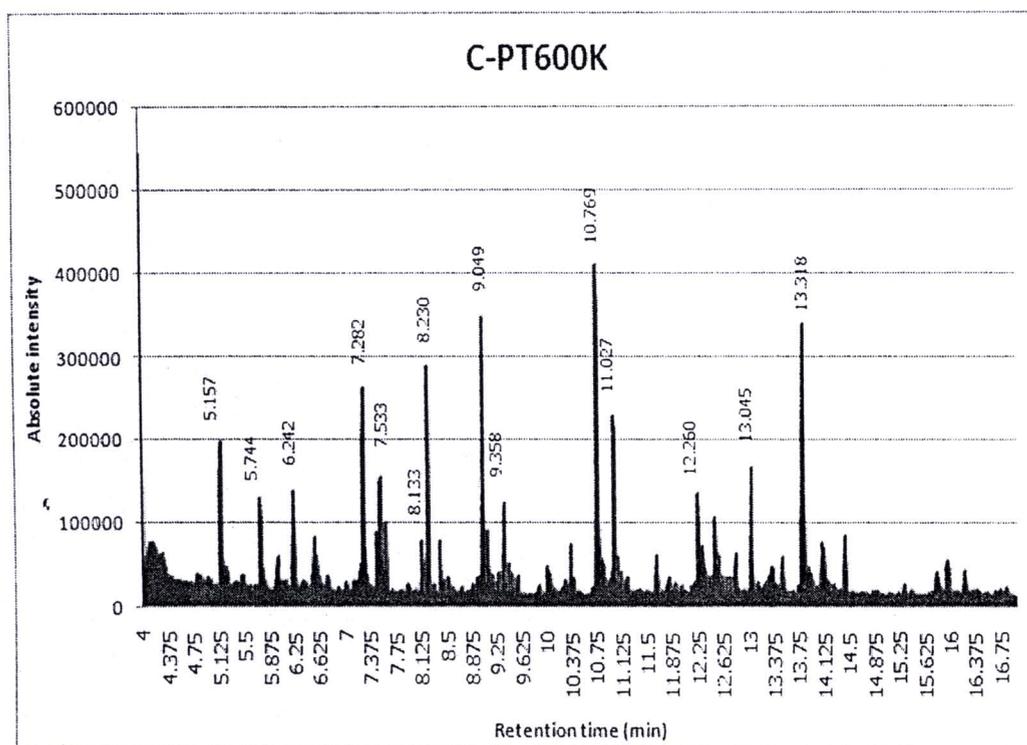
Peak#	Ret.Time	Area	Height	% Area	Compound
1	2.485	8286708	1745195	8.546	toluene
2	3.55	1261018	439314	1.299	ethylbenzene
3	3.933	3444101	965397	3.546	styrene
4	5.152	4081642	3570395	4.206	phenol
5	5.263	2524714	841690	2.598	m-methyl-styrene
6	5.837	2138416	1375623	2.206	indene
7	6.001	2307944	2275521	2.371	2-methyl-phenol
8	6.24	3915473	2375332	4.031	3-methyl-phenol
9	7.017	1891436	1487454	1.948	2,5-dimethyl-phenol
10	7.373	1931401	1541531	1.989	naphthalene
11	7.532	651004	539831	0.670	1,2-benzenediol
12	7.84	1510048	1196276	1.546	diacetate-1,2-benzenediol
13	8.469	769553	753419	0.794	2-methyl-naphthalene
14	8.629	679324	570708	0.701	2-methyl-naphthalene
15	11.031	1009892	569528	1.031	1,2-benzenedicarboxylic acid
16	13.047	750536	600125	0.722	1,2-benzenedicarboxylic acid
17	13.819	1272957	900982	1.237	1,2-benzenedicarboxylic acid



รูปที่ 4 แสดงโครมาโทแกรมของสารที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสของไม้กระถินยักษ์ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

ตาราง 16 แสดงองค์ประกอบของสารที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสของไม้กระถินยักษ์ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

Peak#	Ret.Time	Area	Height	% Area	Compound
1	2.496	10112370	2233762	10.11	toluene
2	3.929	6006198	1919339	6.01	styrene
3	5.152	4163924	3953432	4.16	phenol
4	5.260	2699956	1083328	2.7	m-methyl-styrene
5	5.835	6249814	4021172	6.25	indene
6	6.042	1334912	1128545	1.33	phenol acetate
7	6.240	2077766	1545344	2.08	3-methyl-phenol
8	7.370	8766002	7925142	8.77	naphthalene
9	8.468	1881982	1745115	1.88	2-methyl-naphthalene
10	8.625	1397120	1328057	1.4	2-methyl-naphthalene
11	9.853	2054184	1757807	2.05	2-methoxy-4-(1-propenyl)-phenol
12	13.820	1099541	773042	1.1	1,2-benzenedicarboxylic acid



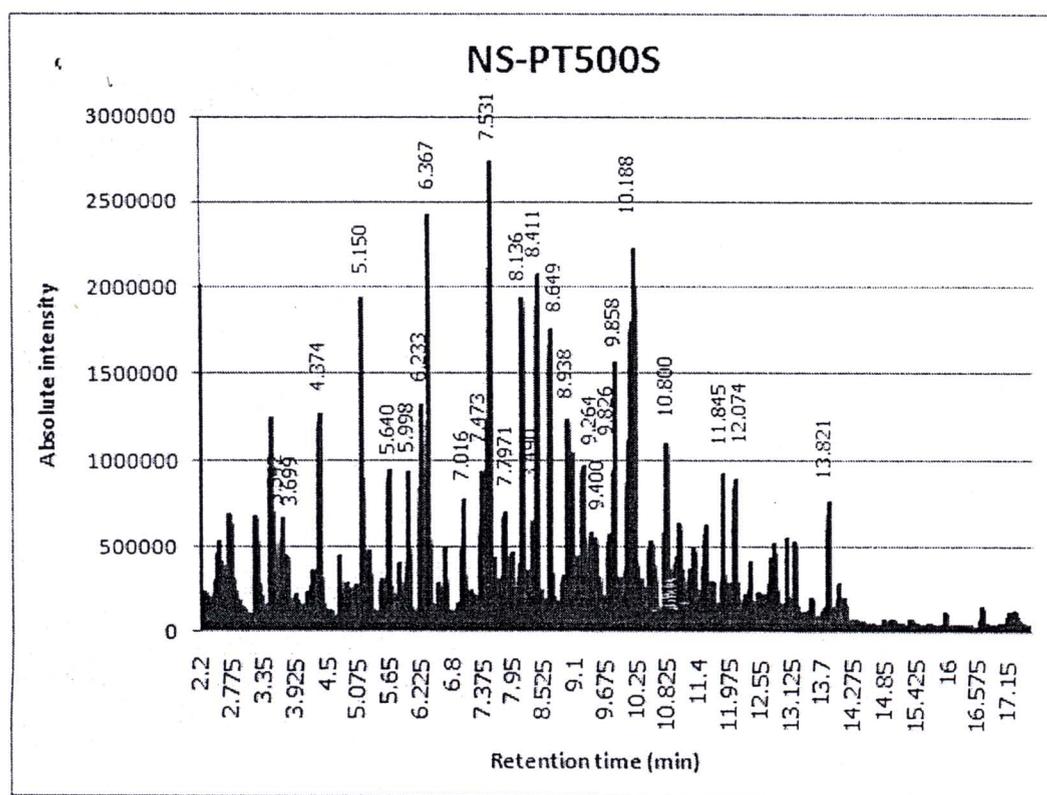
รูปที่ 5 แสดงโครมาโทแกรมของสารที่เหลือจากกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของไม้กระถินยักษ์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

ตาราง 17 แสดงองค์ประกอบของสารที่เหลือจากกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำแบบใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาของไม้กระถินยักษ์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

Peak#	Ret.Time	Area	Height	% Area	BP (°C)	Compound
1	5.157	238016	167813	1.967	482.1	phenyl-beta-D-glucoside
2	5.744	158664	102752	1.311	205	benzyl alcohol
3	6.242	185510	115412	1.557	191	2-methyl-phenol
4	7.282	361596	235265	2.951	237	octanoic acid
5	7.533	123175	112230	0.984	245.5	1,2-benzenediol
6	8.133	71092	59636	0.574	251	4-methyl-1,2-benzenediol
7	8.23	363269	271018	2.951	248	benzylidenemalonaldehde
8	9.049	351690	331571	2.869	254	3-allyl-2-methoxyphenol
9	9.358	110918	98991	0.902	233.3	1-tridecene
10	10.769	588666	388423	4.836	298.9	dodecanoic acid

Peak#	Ret.Time	Area	Height	% Area	BP (°C)	Compound
11	11.027	267123	192657	2.213	340	1,2-benzenedicarboxylic acid
12	12.26	137879	106730	1.148	319.6	tetradecanoic acid
13	13.045	168069	143738	1.393	340	1,2-benzenedicarboxylic acid
14	13.818	623832	305650	5.082	340	1,2-benzenedicarboxylic acid

1.3 ข้อมูลการวิเคราะห์หาค่าองค์ประกอบของสารจากซีเลียมในกระบวนการต่างๆ

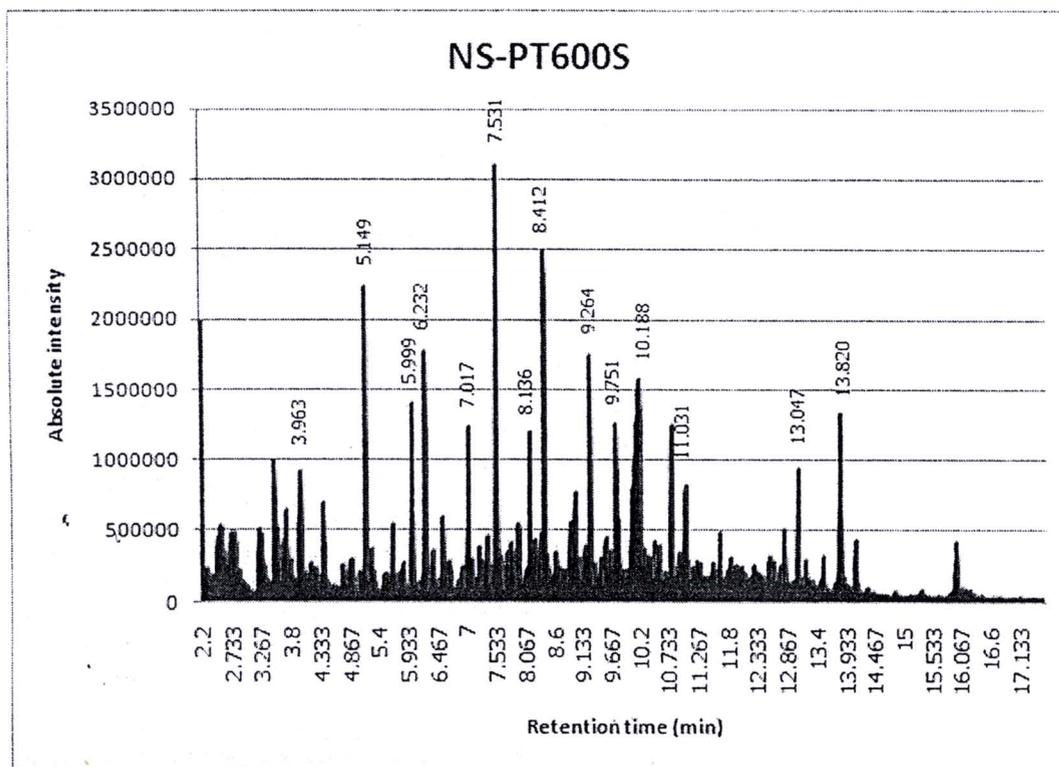


รูปที่ 6 แสดงโครมาโทแกรมของสารที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสของซีเลียมที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

ตาราง ง 18 แสดงองค์ประกอบของสารที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสของซีเลียมที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

Peak#	Ret.Time	Area	Height	% Area	Compound
1	3.49	2086946	1160311	1.599	2-(1-methylethoxy)-ethanol
2	3.542	1420271	617445	1.086	2-furanmethanol

Peak#	Ret.Time	Area	Height	% Area	Compound
3	3.699	1689154	577196	1.293	2-cyclopenten-1-one
4	4.374	1625706	1127759	1.247	2-cyclopenten-1-one
5	5.15	1989216	1855990	1.523	phenol
6	5.64	999142	822100	0.765	1,2-cyclopentanedione
7	5.998	1136730	796446	0.872	2-methyl-phenol
8	6.233	1358233	1124736	1.041	3-methyl-phenol
9	6.367	2828888	2308887	2.165	1-(1-cyclohexen-1-yl)-ethanone
10	7.016	1233373	681232	0.941	2,5-dimethyl-phenol
11	7.473	1343929	1144668	1.025	2-methoxy-4-methyl-phenol
12	7.531	2944452	2608482	2.249	1,2-benzenediol
13	7.797	1335580	607215	1.018	2-furancarboxaldehyde
14	8.136	2080948	1817533	1.53	4-methyl-1,2-benzenediol
15	8.322	928724	496481	0.712	4-ethyl-2-methoxy-phenol
16	8.411	2314128	1894622	1.76	4-methyl-1,2-benzenediol
17	8.649	1762154	1603051	1.347	4-ethenyl-2-methoxy-phenol
18	8.983	1574830	1148612	1.201	2,6-dimethoxy-phenol
19	9.264	1292151	869949	0.918	4-ethyl-1,2-benzenediol
20	9.4	714145	476414	0.543	Vanillin
21	9.826	890688	715793	0.612	2,5-dimethoxy-benzenemethanol
22	9.858	1331476	1369564	1.018	2-methoxy-4-(1-propenyl)-phenol
23	10.188	7750914	1528167	5.929	levoglucosan
24	10.8	1673666	952896	1.278	3,5-dimethoxyacetophenone
25	11.845	1015867	783968	0.78	2,6-dimethoxy-4-(2-propenyl)-phenol
26	12.074	730815	692472	0.559	2-(1-methylethoxy) ethanol
27	13.821	818047	601738	0.62	1,2-benzenedicarboxylic acid

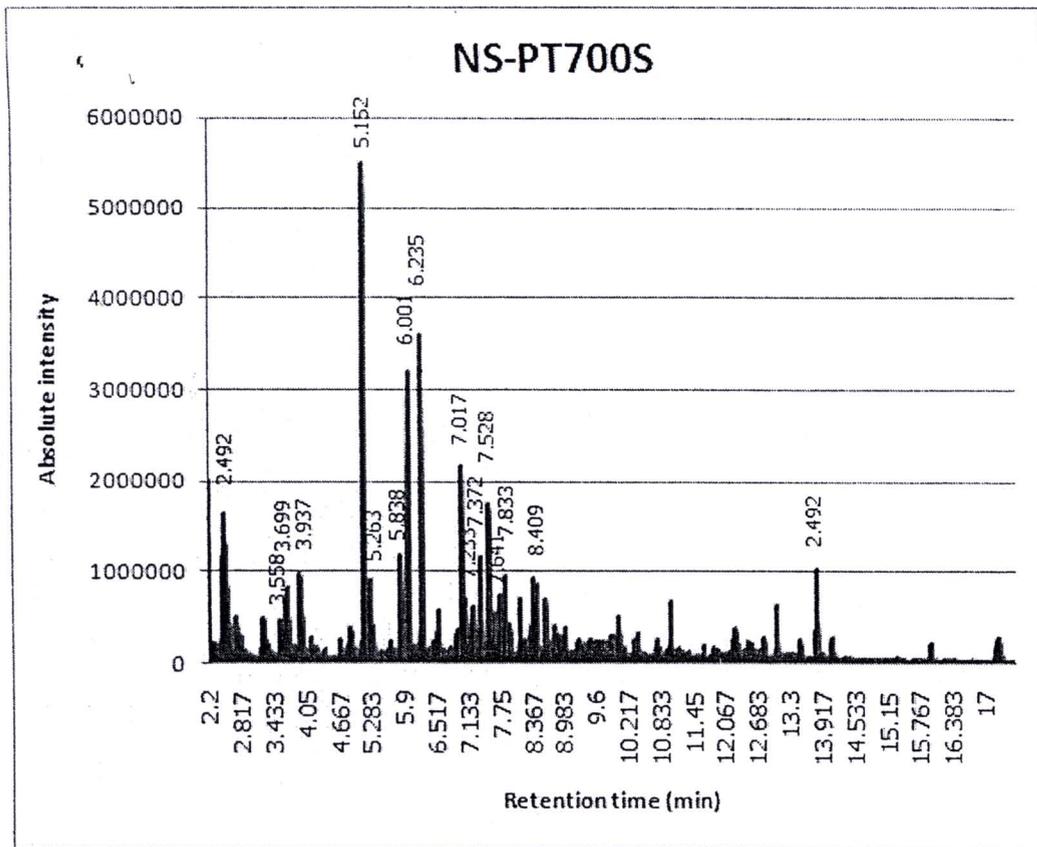


รูปที่ ๗ แสดงโครมาโทแกรมของสารที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสของซีเลียมที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

ตาราง ๑๙ แสดงองค์ประกอบของสารที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสของซีเลียมที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส

Peak#	Ret.Time	Area	Height	% Area	Compound
1	3.49	1367271	826699	1.079	2-(1-methylethoxy)-ethanol
2	3.963	2056638	771698	1.622	2-hydroxy-propanoic acid
3	5.149	2512358	2135115	1.976	phenol
4	5.999	1435867	1302871	1.134	2-methyl-phenol
5	6.232	2316826	1637829	1.827	3-methyl-phenol
6	7.017	1367559	1152911	1.079	2,5-dimethyl-phenol
7	7.531	3177004	2979181	2.504	1,2-benzenediol
8	8.136	1312534	1091244	1.024	4-methyl-1,2-benzenediol
9	8.412	2964368	2312479	2.283	4-methyl-1,2-benzenediol

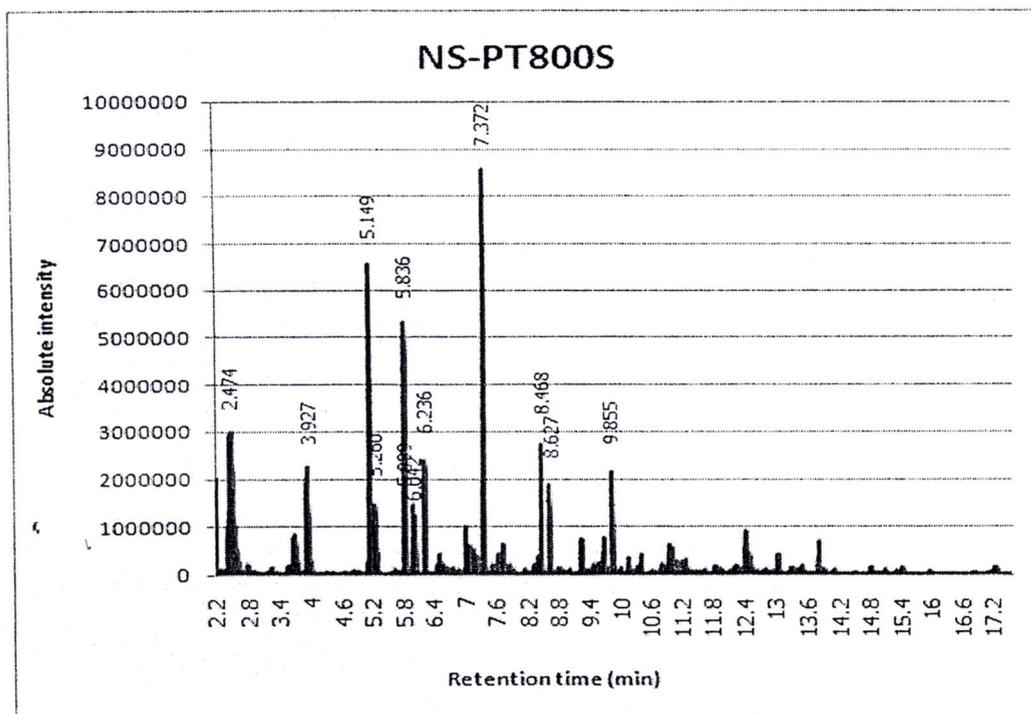
Peak#	Ret.Time	Area	Height	% Area	Compound
10	9.264	1580149	1511367	1.181	4-ethyl-1,2-benzenediol
11	9.751	1076255	1052662	0.787	1-methoxy-3,5-dimethyl-bezene
12	10.188	8504090	1279138	6.693	levoglucosan
13	11.031	1106201	609027	0.866	diethyl ester 1,2-benzenedicarboxylic acid
14	13.047	952497	794707	0.709	1,2-benzenedicarboxylic acid
15	13.82	2278370	1221939	1.732	1,2-benzenedicarboxylic acid



รูปที่ 8 แสดงโครมาโทแกรมของสารที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสของซีเลียมที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

ตาราง ง 20 แสดงองค์ประกอบของสารที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสของซีดีเอชที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส

Peak#	Ret.Time	Area	Height	% Area	Compound
1	2.492	7216375	1463000	6.748	toluene
2	3.558	1051516	373656	0.981	ethylbenzene
3	3.699	2965703	740501	2.776	toluene
4	3.937	3406021	869226	3.187	styrene
5	5.152	6555664	5402611	6.131	phenol
6	5.263	2258757	807374	2.112	m-methyl-styrene
7	5.838	1666669	1095878	1.561	indene
8	6.001	3113699	3109632	2.907	2-methyl-phenol
9	6.235	5189505	3522344	4.850	3-methyl-phenol
10	7.017	2608860	2102980	2.439	2,5-dimethyl-phenol
11	7.233	1073846	552583	1.000	3,4-dimethyl-phenol
12	7.372	1828042	1103198	1.710	naphthalene
13	7.528	2062356	1697499	1.879	1,2-benzenediol
14	7.641	986534	494949	0.925	2,3-dihydro-benzofuran
15	7.833	1542509	860286	1.439	2-(1-methylethoxy)-phenol
16	8.409	1322716	816332	1.234	4-methyl-1,2-benzenediol
17	13.82	1704134	926145	1.589	1,2-benzenedicarboxylic acid



รูปที่ 9 แสดงโครมาโทแกรมของสารที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสของซีเลียมที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

ตาราง ง 21 แสดงองค์ประกอบของสารที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสของซีเลียมที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

Peak#	Ret.Time	Area	Height	% Area	Compound
1	2.474	13073683	2707292	11.364	toluene
2	3.927	7045506	2136675	6.163	styrene
3	5.149	6963066	6455994	6.084	phenol
4	5.26	3383073	1403401	2.955	m-methyl-styrene
5	5.836	8027566	5289860	7.019	indene
6	5.999	1449422	1444193	1.267	2-methyl-phenol
7	6.042	1427188	1214849	1.250	phenol acetate
8	6.236	3565985	2346517	3.121	3-methyl-phenol
9	7.372	10335379	8543154	9.030	naphthalene
10	8.468	2787926	2658797	2.430	2-methyl-naphthalene
11	8.627	2004424	1868475	1.748	2-methyl-naphthalene
12	9.855	2439329	2081754	2.133	2-methoxy-4-(1-propenyl)-phenol

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวศิวพรรณ มหาสุภาพ เกิดเมื่อวันที่ 26 มิถุนายน พ.ศ.2528 สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (ปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์) คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ในปีการศึกษา 2550 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2551



