

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- พัฒนาและส่งเสริมพลังงาน, กรม. การศึกษาพฤติกรรมและรูปแบบการใช้พลังงานในการเพาะปลูก. กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม, 2535.
- พัฒนาและส่งเสริมพลังงาน, กรม. รายงานผลการสำรวจวัสดุเหลือใช้จากปาล์มน้ำมัน. กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม, 2538.
- พัฒนาและส่งเสริมพลังงาน, กรม. รายงานผลการสำรวจวัสดุเหลือใช้จากมะพร้าว. กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม, 2537.
- พัฒนาและส่งเสริมพลังงาน, กรม. รายงานพลังงานของประเทศไทย. กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม, 2544.
- สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ. ฟลูอิดไดเซชัน. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2528.
- วิโรจน์ บุญอำนาจวิทยา. จลนพลศาสตร์และการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์เคมี. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ธรราร มงคลศรี. หลักมูลทางวิศวกรรมปฏิกิริยาตัวเร่ง. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อาภาณี เหลืองนฤมิตรชัย. การผลิตแก๊สเชื้อเพลิงจากแกลบในเบตนึ่ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.

ภาษาอังกฤษ

- Akyurtlu J.F. and Akyurtlu A. Catalytic gasification of Pittsburgh coal char by potassium sulphate and ferrous sulphate mixtures. Fuel Processing Technology 43 (1995): 71-86.
- Andy R. Solid Fuel Technology. Department of Chemical Technology, Faculty of Science. Chulalongkorn University.

- Asadullah M., Miyazawa T., Ito S., Kunimori K., Yamada M. and Tomishige K. Gasification of different biomass in a dual-bed gasifier system combined with novel catalysts with high energy efficiency. Applied Catalysis A: General 267 (2004): 95-102.
- Asadullah M., Miyazawa T., Ito S., Kunimori K., Yamada M. and Tomishige K. Demonstration of real biomass gasification drastically promoted by effective catalyst. Applied Catalysis A: General 246 (2004): 103-116.
- Asadullah M., Miyazawa T., Ito S., Kunimori K., Koyama S. and Tomishige K. A comparison of Rh/CeO₂/SiO₂ catalysts with steam reforming catalysts, dolomite and inert materials as bed materials in low throughput fluidized bed gasification systems. Biomass and Bioenergy 26 (2004): 269-279.
- Asadullah M., Tomishige K. and Fujimoto K. A novel catalytic process for cellulose gasification to synthesis gas. Catalysis Communications 2 (2001): 63-68.
- Chaudhari S. T., Dalai A. K. and Bakhshi N. N. Production of Hydrogen and/or Syngas (H₂ + CO) via Steam Gasification of Biomass-Derived Chars. Energy & Fuels 17 (2003): 1062-1067.
- Chen G., Andries J. and Spliethoff H. Catalytic pyrolysis of biomass for hydrogen rich fuel gas production. Energy Conversion and Management 44 (2003): 2289-2296.
- Chen S. G. and Yang R. T. Unified Mechanism of Alkali and Alkaline Earth Catalyzed Gasification Reactions of Carbon by CO₂ and H₂O. Energy & Fuels 11 (1997): 421-427.
- Demirbas A. Yields of hydrogen-rich gaseous products via pyrolysis from selected biomass samples. Fuel 80 (2001): 1885-1891.
- Encinar J.M., Beltran F.J., Ramiro A. and Gonzalez J.F. Fuel Process Technology 55 (1998): 219.
- Franco C., Pinto F., Gulyurtlu I. and Cabrita I. The study of reactions influencing the biomass steam gasification process. Fuel 82 (2003): 835-842.
- Garcia L., Benedicto A., Romeo E., Salvador M.L., Arauzo J. and Bilbao R. Hydrogen production by steam gasification of biomass using Ni-Al coprecipitated catalysts promoted with magnesium. Energy & Fuels 16 (2002): 1222-1230.

- Hallen R.T., Sealock L.T., Cuello R. and Bridgwater A.V. Research in Thermochemical Biomass Conversion. Elsevier Applied Science (1988): 157.
- 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.
- Lv P.M., Xiong Z.H., Chang J., Wu C.Z., Chen Y. and Zhu J.X. An experimental study on biomass air-steam gasification in a fluidized bed. Bioresource Technology (2004).
- Lv P.M., Chang J., Wang T., Fu Y. and Chen Y. Hydrogen-Rich Gas Production from Biomass Catalytic Gasification. Energy & Fuels 18 (2004): 228-233.
- Mudge L.K., Baker E.G., Mitchell D.H. and Brown M.D. Solar Energy Eng. 107 (1985): 89.
- Osaki T. and Mori T. Role of Potassium in Carbon-Free CO₂ Reforming of Methane on K-Promoted Ni/Al₂O₃ Catalysts. Journal of Catalysis 204 (2001): 89-97.
- Probstein and Hicks, Synthetic Fuels. McGraw Hill : 1982.
- Sutton D. and Kelleher B. Review of literature on catalysts for biomass gasification. Fuel Processing Technology 73 (2001): 155-173.
- Yaman S. Pyrolysis of biomass to produce fuels and chemical feedstocks. Energy Conversion and Management 45 (2004): 651-671.
- Zhang R., Brown R.C., Suby A. and Cummer K. Catalytic destruction of tar in biomass derived producer gas. Energy Conversion and Management 45 (2004): 995-1014.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

วิธีวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของแกลบ

1. การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis): ASTM D3172

1.1 ความชื้น (Moisture): ASTM D3173

วิธีการทดลอง

1) อบถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาในเตาอบ (drying oven) 104-110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำเข้าเดสิเคเตอร์ (desiccator) ทิ้งไว้ประมาณ 15 นาที นำไปชั่งแล้วบันทึกน้ำหนัก

2) ชั่งตัวอย่างประมาณ 1 กรัม ลงในถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาที่ทราบน้ำหนักแล้ว บันทึกน้ำหนักตัวอย่างแกลบ

3) นำไปเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 104-110 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง หรือจนน้ำหนักตัวอย่างคงที่

4) นำถาดอลูมิเนียมออกมาทิ้งไว้ให้เย็นลง แล้วนำเข้าเดสิเคเตอร์ประมาณ 15 นาที แล้วชั่งถาดอลูมิเนียมพร้อมฝาที่มีตัวอย่างอบแล้วอยู่ภายในบันทึกผล

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

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

เมื่อ M = ร้อยละของความชื้น

W_1 = น้ำหนักของถาดอลูมิเนียมพร้อมฝารวมกับน้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้นก่อนอบ (กรัม)

W_2 = น้ำหนักของถาดอลูมิเนียมพร้อมฝารวมกับน้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้นหลังอบ (กรัม)

W = น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)

1.2 เถ้า (Ash): ASTM D3174

วิธีการทดลอง

- 1) เผาครุชิลเบลพร้อมฝานในเตาเผา (Muffle Furnace) ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำออกมาทำให้เย็นในเดสิเคเตอร์ ชั่งน้ำหนักครุชิลเบลพร้อมฝาน
- 2) ชั่งน้ำหนักตัวอย่างใส่ครุชิลเบล ประมาณ 1 กรัม
- 3) นำไปเผาบนตะเกียงเบนเซนจนควันระเหยหมด
- 4) ใส่ครุชิลเบลพร้อมฝานในเตาเผาที่อุณหภูมิประมาณ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา ประมาณ 2 ชั่วโมงหรือจนน้ำหนักคงที่
- 5) นำครุชิลเบลออกจากเตาเผาวางทิ้งไว้ให้เย็น แล้วนำไปใส่ในเดสิเคเตอร์ ชั่งน้ำหนัก พร้อมบันทึกผล

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

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

- เมื่อ A = ร้อยละของเถ้า
- W_3 = น้ำหนักของครุชิลเบลพร้อมฝานที่มีเถ้า (กรัม)
- W_4 = น้ำหนักของครุชิลเบลพร้อมฝาน (กรัม)
- W = น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)

1.3 ปริมาณสารระเหย (Volatile Matter): ASTM D3175

วิธีการทดลอง

- 1) เผาครุชิลเบลพร้อมฝานในเตาเผาอุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส ประมาณ 30 นาที นำออกจากเตาเผา ทำให้เย็นในเดสิเคเตอร์ แล้วชั่งน้ำหนักครุชิลเบลพร้อมฝาน บันทึกผล
- 2) ชั่งตัวอย่างใส่ในครุชิลเบลประมาณ 1 กรัม แล้วปิดฝาให้เรียบร้อย
- 3) นำไปให้ความร้อนโดยอยู่เหนือปากเตาเผา (Tubular Furnace) อุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที
- 4) หย่อนครุชิลเบลให้อยู่บริเวณปากเตา ที่อุณหภูมิประมาณ 600 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 นาที

- 5) หย่อนครุชิลเบิลให้อยู่กึ่งกลางเตา อุณหภูมิประมาณ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 นาที
- 6) นำครุชิลเบิลออกมาทิ้งไว้ให้เย็น แล้วนำไปใส่ในเดสิเคเตอร์ประมาณ 15 นาที นำไปชั่งและบันทึกผล

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

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

- เมื่อ V = ร้อยละของสารระเหย
- W_5 = น้ำหนักของครุชิลเบิลพร้อมฝา รวมกับน้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา (กรัม)
- W_6 = น้ำหนักของครุชิลเบิลพร้อมฝา รวมกับน้ำหนักตัวอย่างหลังเผา (กรัม)
- W = น้ำหนักของตัวอย่าง (กรัม)
- M = ร้อยละของความชื้น

1.4 ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon)

สูตรที่ใช้ในการคำนวณ

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

ภาคผนวก ข

วิธีการวิเคราะห์โดยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี

ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี ยี่ห้อ Agilent 3000A Gas chromatograph (GC) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการแยกสารผสมที่ระเหยง่าย โดยสารผสมจะถูกฉีดเข้าไปในคอลัมน์ (Column) ที่บรรจุด้วยสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวยึดจับที่เรียกว่า Stationary phase และมีแก๊สพา (Carrier gas) เป็นเฟสเคลื่อนที่ (Mobile phase) เคลื่อนที่ไปตามคอลัมน์เข้าสู่เครื่องวัด (Detector) สัญญาณที่เครื่องตรวจวัดได้รับนั้นจะถูกส่งไปบันทึกเป็นโครมาโตแกรม (Chromatogram) โดยเครื่องบันทึก (Recorder)

โดยแก๊สโครมาโตกราฟีมีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้

1. แก๊สพา (Carrier gas)
2. ตัวควบคุมการไหล (Flow controller)
3. ส่วนที่ฉีดสารตัวอย่าง (Injector port)
4. คอลัมน์ (Column)
5. ดีเทคเตอร์ (Detector)
6. เครื่องบันทึก (Recorder)

รายละเอียดของส่วนประกอบที่สำคัญมีดังนี้

1. แก๊สพา

แก๊สพาเป็นแก๊สที่ใช้สำหรับพาสารตัวอย่าง ที่ถูกทำให้เป็นไอหรือแก๊สเฟสแล้วที่ส่วนที่ฉีดสารตัวอย่างให้เข้าสู่คอลัมน์ต่อไป แก๊สพานี้ต้องมีการควบคุมอัตราการไหล (Flow rate) ให้คงที่เสมอ โดยสามารถเลือกใช้อัตราการไหลให้เหมาะสมได้ตามต้องการ อัตราการไหลของแก๊สพามีส่วนสำคัญต่อการวิเคราะห์ทั้งเชิงคุณภาพและปริมาณ ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมให้คงที่

แก๊สพาโดยทั่วไปควรมีคุณสมบัติคือ มีสมบัติเฉื่อย ไม่เกิดปฏิกิริยากับสารตัวอย่าง มีมวลโมเลกุลต่ำและมีการแพร่กระจาย มีความบริสุทธิ์สูงและราคาไม่แพง แก๊สพาที่ใช้กันโดยทั่วไป ได้แก่ แก๊สไนโตรเจน ฮีเลียม และแก๊สไฮโดรเจน

2. คอลัมน์

คอลัมน์เป็นส่วนสำคัญของการแยกสารด้วยเทคนิคทาง GC เมื่อแก๊สหรือไอของสารผสมในสารตัวอย่างผ่านคอลัมน์ สารที่บรรจุในคอลัมน์เปล่านั้นจะทำหน้าที่เป็นตัวแยกแก๊สหรือไอของสารผสมเหล่านั้นออกจากกันเป็นส่วน ๆ ดังนั้นโครมาโทแกรมที่ได้จะดีหรือไม่จึงขึ้นอยู่กับชนิดของคอลัมน์มาก

3. ดีเทคเตอร์

ดีเทคเตอร์คือเครื่องที่สามารถบ่งบอกว่ามีสารที่ต้องการวิเคราะห์หรือมีสารอื่นที่แตกต่างไปจากแก๊สพาออกมาจากคอลัมน์หรือไม่ ถ้ามีก็จะสามารถวัดได้ว่ามีปริมาณเท่าใดได้ด้วย ดังนั้นเครื่องตรวจวัดจึงต้องเป็นเครื่องที่มีลักษณะเฉพาะ สามารถให้สัญญาณกับสารต่าง ๆ ได้ ให้สภาพไวที่สูงพอ มีการตอบสนองที่ดีในช่วงความเข้มข้นของสารที่กว้างพอ และมีหลากหลายชนิด ตามความเหมาะสมของงานก็ได้

ลักษณะเฉพาะที่ต้องการของดีเทคเตอร์นั้น ควรจะมีลักษณะเฉพาะในการตอบสนองต่อสารเคมีที่ต้องการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

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

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

ดีเทคเตอร์แบบ TCD

วิเคราะห์สารที่ออกมาด้วยแก๊สพา โดยใช้หลักการทำงานดังนี้ แก๊สพาบริสุทธิ์ (Reference gas) กับแก๊สพาที่มีสารตัวอย่างอยู่ด้วยจะมีคุณสมบัติในการนำความร้อน (Thermal conductivity) ที่ต่างกัน เมื่อสารตัวอย่างที่ถูกแยกจากคอลัมน์พร้อมด้วยแก๊สพาผ่านเข้าไปในเครื่องตรวจวัดและผ่านขดลวด (Filament) ซึ่งทำให้ร้อนด้วยกระแสไฟฟ้าปริมาณหนึ่งขดลวดจะเสียความร้อนให้กับแก๊สพาที่มีสารตัวอย่างที่เข้ามาในดีเทคเตอร์แล้ว ดีเทคเตอร์ก็จะทำการปรับกระแสไฟฟ้าเพื่อให้ขดลวดมีความร้อนเท่าเดิม กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการปรับความร้อนนี้จะเป็นสัญญาณส่งเข้าเครื่องบันทึกออกมาเป็นโครมาโทแกรม

ภาคผนวก ค

การคำนวณ

1. หาอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนเข้าท่อชั้นในและชั้นนอก

เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อชั้นใน 9 มิลลิเมตร

เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อชั้นใน 11 มิลลิเมตร

เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อชั้นนอก 22 มิลลิเมตร

เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อชั้นนอก 25 มิลลิเมตร

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

เพราะฉะนั้น

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

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

$$\text{flow}_{\text{ท่อชั้นใน}} / \text{flow}_{\text{ท่อชั้นนอก}} = \pi (4.5)^2 / \pi [(11)^2 - (5.5)^2]$$

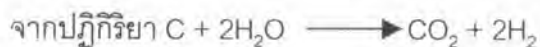
จะได้

$$\text{flow}_{\text{ท่อชั้นใน}} = 1/4 \text{flow}_{\text{ท่อชั้นนอก}}$$

2. หาอัตราการป้อนไอน้ำ

น้ำหนักแคลบ 0.12 กรัม

ร้อยละคาร์บอนในแคลบ 41.66



$$C = 0.12 * (41.66/100) = 0.0499 \text{ กรัม} = 0.0499/12 = 0.0042 \text{ โมล}$$

$$H_2O = 0.0042 * 2 = 0.0084 \text{ โมล} = 0.0084 * 18 = 0.1512 \text{ กรัม} = 0.1512 \text{ มิลลิลิตร}$$

จะได้ อัตราการป้อนไอน้ำ 0.1512 มิลลิลิตร/นาที

3. หาร้อยละโดยปริมาตรของไอน้ำ

เปิดตารางไอน้ำ (Steam Table) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ได้ specific volume 4.952

ลูกบาศก์เมตร/กิโลกรัม

อัตราการไหลของไอน้ำ 0.15 มิลลิลิตร/นาที = 0.15 กรัม/นาที

$$\begin{aligned} \text{เพราะฉะนั้น Specific Volume} &= 4.952 \text{ ลูกบาศก์เมตร/กิโลกรัม} * 0.15 \text{ กรัม/นาที} * \\ & (1 \text{ กิโลกรัม}/1000 \text{ กรัม}) * (1000 \text{ ลิตร}/1 \text{ ลูกบาศก์เมตร}) * \\ & (1000 \text{ มิลลิลิตร}/1 \text{ ลิตร}) \\ & = 742.8 \text{ มิลลิลิตร/นาที} \end{aligned}$$

อัตราการไหลของไนโตรเจน 150 มิลลิลิตร/นาที

$$\begin{aligned} \text{จาก } V_1/V_2 &= T_1/T_2 \\ 150/V_2 &= 298/1073 \end{aligned}$$

$$\text{จะได้ } V_2 = 540.1006 \text{ มิลลิลิตร/นาที}$$

$$\begin{aligned} \text{เพราะฉะนั้น ร้อยละโดยปริมาตรของไอน้ำ} (\% \text{Vol}) &= 742.8 / (540.1006 + 742.8) * 100 \\ &= 58 \end{aligned}$$

4. หาสัดส่วนช่องว่างของเบดและตัวเร่งปฏิกิริยา

ทดลองด้วยวิธีการแทนที่ของน้ำ

กรณีตัวเร่งปฏิกิริยาสูง 1 เซนติเมตร

- ตัวเร่งปฏิกิริยาสูง 1 เซนติเมตร ในกระบอกตวงมีปริมาตร 1.4 มิลลิลิตร
- น้ำสูง 1 เซนติเมตร ในกระบอกตวงมีปริมาตร 1.4 มิลลิลิตร
- เหน้้ำสูง 1 เซนติเมตรในกระบอกตวงที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา
- หาปริมาตรของช่องว่างได้ 0.86 มิลลิลิตร
- คำนวณหาสัดส่วนช่องว่างจากสูตร

$$\mathcal{E} = \text{ปริมาตรของช่องว่าง} / \text{ปริมาตรทั้งหมดของเบด}$$

$$\mathcal{E} = 0.86 / 2.8$$

$$\mathcal{E} = 0.31$$

5. หาระยะเวลาที่ตัวเร่งปฏิกิริยาสัมผัสกับสารระเหยง่าย (Contact time)

กรณีตัวเร่งปฏิกิริยาสูง 1 เซนติเมตร

สัดส่วนช่องว่าง 0.31

จากสูตร
$$Vg = \frac{\pi D^2}{4} h * \epsilon_s$$

$$Vg = [((22/7 * 2^2)/4) * 1 * 0.31]$$

$$Vg = 0.97 \text{ ลูกบาศก์มิลลิเมตร}$$

จาก $V_{25}/T_{25} = V_{800}/T_{800}$

$$150/298 = V_{800}/1073$$

$$V_{800} = 4800 \text{ ลูกบาศก์มิลลิเมตร/นาที}$$

เพราะฉะนั้น $Vg/F_{(T800)} = 0.97/4800 = 0.000202 \text{ นาที}$

$$= 0.000202 * 60 = 0.012 \text{ วินาที}$$

6. หาระยะเวลาที่สารตั้งต้นอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ (Resident time)

กรณีตัวเร่งปฏิกิริยาสูง 1 เซนติเมตร

สัดส่วนช่องว่าง 0.31

จากสูตร
$$Vg = \frac{\pi D^2}{4} h * \epsilon_s$$

$$Vg = [((22/7 * 2^2)/4) * 1 * 0.31] + [((22/7 * 2^2)/4) * 1 * 1]$$

$$Vg = 4.11 \text{ ลูกบาศก์มิลลิเมตร}$$

จาก $V_{25}/T_{25} = V_{800}/T_{800}$

$$150/298 = V_{800}/1073$$

$$V_{800} = 4800 \text{ ลูกบาศก์มิลลิเมตร/นาที}$$

เพราะฉะนั้น $Vg/F_{(T800)} = 4.11/4800 = 0.000857 \text{ นาที}$

$$= 0.000857 * 60 = 0.05142 \text{ วินาที}$$

7. หาผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (Total Balance) ในกระบวนการไพโรไลซิส

กรณี แกลบ + ตัวเร่งปฏิกิริยาไพแทสเซียมคาร์บอเนต-นิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา
(ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส)

น้ำหนักแกลบ 0.12 กรัม

ร้อยละโดยน้ำหนักของความชื้นของแกลบ เท่ากับ 9.02

ร้อยละโดยน้ำหนักของเถ้าแกลบ เท่ากับ 23.55

น้ำหนักแกลบที่ปราศจากเถ้าและความชื้น = $0.12 \cdot (1 - 23.55/100 - 9.02/100) = 0.0809$ กรัม

น้ำหนักเถ้าแกลบ = $0.12 \cdot 23.55/100 = 0.02826$ กรัม

เพราะฉะนั้น น้ำหนักขาร์ที่ได้จากการทดลอง เท่ากับ $0.0309 - 0.02826 = 0.00264$ กรัม

น้ำหนักแก๊สทั้งหมดที่ได้จากการทดลอง ($H_2 + CO + CH_4 + CO_2$) เท่ากับ 0.0533 กรัม

ดังนั้น น้ำหนักน้ำมันทาร์ = น้ำหนักแกลบที่ปราศจากเถ้าและความชื้น - น้ำหนักขาร์ - น้ำหนักแก๊สทั้งหมด

$$= 0.0809 - 0.00264 - 0.0533 = 0.0249 \text{ กรัม}$$

เพราะฉะนั้น คิดเป็นร้อยละ จะได้

$$\text{ร้อยละโดยน้ำหนักของขาร์} = 0.00264/0.0809 \cdot 100 = 3.2626$$

$$\text{ร้อยละโดยน้ำหนักในน้ำมันทาร์} = 0.0249/0.0809 \cdot 100 = 30.7832$$

$$\text{ร้อยละโดยน้ำหนักในแก๊ส} = 0.0533/0.0809 \cdot 100 = 65.9542$$

8. Carbon Balance ในกระบวนการแกซีฟิเคชัน

กรณี แกลบ + ตัวเร่งปฏิกิริยาไพแทลเซียมคาร์บอนเนต-นิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา
(ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนไอน้ำ 0.15 มิลลิลิตรต่อนาที)

น้ำหนักแกลบ 0.12 กรัม

คาร์บอนในแกลบ เท่ากับ 31.85 %wt

เพราะฉะนั้น น้ำหนักคาร์บอนในแกลบ = $0.12 \cdot 31.85/100 = 0.03822$ กรัม

น้ำหนักขาร์ที่ได้จากการทดลอง เท่ากับ 0.0365 กรัม

คาร์บอนในขาร์ (C, Char) เท่ากับ 22.43 %wt

เพราะฉะนั้น น้ำหนักคาร์บอนในขาร์ = $0.0365 \cdot 22.43/100 = 0.00818$ กรัม

คาร์บอนในแก๊สที่ได้จากการทดลอง ($CO + CH_4 + CO_2$) เท่ากับ 0.02059 กรัม

$$\begin{aligned}
 \text{ดังนั้น น้ำหนักคาร์บอนในน้ำมันทาร์} &= \text{น้ำหนักคาร์บอนในแกลป์} - (\text{น้ำหนักคาร์บอนในซาร์} + \\
 &\quad \text{น้ำหนักคาร์บอนในแก๊ส}) \\
 &= 0.03822 - (0.00818 + 0.02059) \\
 &= 0.00944 \text{ กรัม}
 \end{aligned}$$

เพราะฉะนั้น คิดเป็นร้อยละ จะได้

$$\text{คาร์บอนในซาร์} = 0.00818/0.03822*100 = 21.4158 \% \text{wt}$$

$$\text{คาร์บอนในน้ำมันทาร์} = 0.00944/0.03822*100 = 24.7109 \% \text{wt}$$

$$\text{คาร์บอนในแก๊ส} = 0.02059/0.03822*100 = 53.8732 \% \text{wt}$$

ภาคผนวก ง

การหาความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิด

ตาราง ง1 ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิดของตัวมาตรฐาน (Standard)

std	ครั้งที่ 1 area	ครั้งที่ 2 area	เฉลี่ย area	% balance in N ₂
H ₂	2781.625	2635.598	2708.611	0.993
CO	1858.729	1849.068	1853.899	1.02
CH ₄	4613.594	4935.33	4774.462	1.01
CO ₂	15537.479	15517.500	15527.487	1.01

อัตราการไหลแก๊สรวม 50 มิลลิลิตรต่อนาที

เวลาที่เก็บแก๊สทุกๆ 10 นาที

ปริมาตรที่เก็บ 500 มิลลิลิตร

ตัวอย่างเช่น แกลบ + 9%K₂CO₃/NiO/Al₂O₃ ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนไอน้ำ
0.05 มิลลิลิตรต่อนาที น้ำหนักแกลบ 120.5 มิลลิกรัม

ตาราง ง2 ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์แก๊สแต่ละชนิดของตัวอย่าง

1) 10 นาทีแรก

	ครั้งที่ 1 area	ครั้งที่ 2 area	เฉลี่ย area	%	mmole/mg- sample
H ₂	3107.235	3175.679	3141.457	1.151	0.0023
CO	2773.861	2788.023	2780.942	1.530	0.0031
CH ₄	1910.682	1954.745	1932.713	0.409	0.0008
CO ₂	26159.559	25191.070	25675.316	1.670	0.0034

2) 10 นาทีที่สอง

	ครั้งที่ 1 area	ครั้งที่ 2 area	เฉลี่ย area	%	mmole/mg- sample
H ₂	3401.416	3401.416	3401.416	1.246	0.0025
CO	1955.002	1955.002	1955.002	1.075	0.0022
CH ₄	1573.146	1573.146	1573.146	0.333	0.0007
CO ₂	29102.928	29102.928	29102.928	1.893	0.0038

3) 10 นาทีที่สาม

	ครั้งที่ 1 area	ครั้งที่ 2 area	เฉลี่ย area	%	mmole/mg- sample
H ₂	2152.236	2152.236	2152.236	0.789	0.0016
CO	288.541	288.541	288.541	0.158	0.0003
CH ₄	571.226	571.226	571.226	0.121	0.0002
CO ₂	15742.399	15742.399	15742.399	1.023	0.0021

ดังนั้นผลผลิตก๊าซที่เก็บได้ = 10 นาทีแรก + 10 นาทีที่สอง + 10 นาทีที่สาม

	mmole/mg-sample
H ₂	0.0064
CO	0.0056
CH ₄	0.0017
CO ₂	0.0093

ภาคผนวก จ

ข้อมูลการทดลอง

ตาราง จ1 ข้อมูลการทดลองในกระบวนการไพโรไลซิส

	องค์ประกอบ แก๊ส	ครั้งที่ 1 (area)	ครั้งที่ 2 (area)	เฉลี่ย (area)	%	mmole/mg- sample	%Error
RH+9%K ₂ CO ₃ / Al ₂ O ₃ (800°C)	H ₂	1135.802	1002.710	1069.256	0.432	0.0026	± 6.223
	CO	4471.444	4471.444	4471.444	0.864	0.0052	± 0.000
	CH ₄	2519.536	2519.536	2519.536	0.589	0.0036	± 0.000
	CO ₂	9373.362	9356.313	9364.837	0.612	0.0037	± 0.091
RH+9%NiO/ Al ₂ O ₃ (800°C)	H ₂	1028.277	1083.042	1055.659	0.581	0.0035	± 2.594
	CO	7069.720	7451.267	7260.494	1.149	0.0069	± 2.628
	CH ₄	3455.628	3525.400	3490.514	0.714	0.0043	± 0.999
	CO ₂	7884.435	7859.537	7871.986	0.537	0.0033	± 0.158
RH+9%K ₂ CO ₃ / NiO/Al ₂ O ₃ (800°C)	H ₂	1370.979	1475.769	1423.374	0.784	0.0048	± 3.681
	CO	9298.603	9463.773	9381.187	1.485	0.0090	± 0.880
	CH ₄	1202.485	1223.613	1213.048	0.248	0.0015	± 0.871
	CO ₂	8574.456	8642.852	8608.653	0.587	0.0036	± 0.397
RH+9%K ₂ CO ₃ / NiO/Al ₂ O ₃ (700°C)	H ₂	1094.162	1176.097	1135.129	0.625	0.0038	± 3.609
	CO	7736.830	8084.624	7910.726	1.253	0.0076	± 2.198
	CH ₄	1304.396	1458.637	1381.516	0.283	0.0017	± 5.582
	CO ₂	8049.538	8069.905	8059.721	0.550	0.0033	± 0.126
RH+9%K ₂ CO ₃ / NiO/Al ₂ O ₃ (600°C)	H ₂	864.071	902.659	883.365	0.487	0.0029	± 2.184
	CO	6177.636	6139.720	6158.678	0.975	0.0059	± 0.308
	CH ₄	1434.201	1429.566	1431.883	0.293	0.0018	± 0.162
	CO ₂	7547.823	7570.434	7559.128	0.516	0.0031	± 0.149
RH+5%K ₂ CO ₃ / NiO/Al ₂ O ₃ (800°C)	H ₂	1169.656	1094.863	1132.259	0.623	0.0038	± 3.303
	CO	9844.542	8573.960	9209.251	1.458	0.0088	± 6.898
	CH ₄	1482.889	1698.822	1590.855	0.326	0.0020	± 6.787
	CO ₂	8061.870	7563.436	7812.653	0.533	0.0032	± 3.189

ตาราง จ2 ข้อมูลการทดลองในกระบวนการแกซีฟิเคชัน

	องค์ประกอบ แก๊ส	ครั้งที่ 1 (area)	ครั้งที่ 2 (area)	เฉลี่ย (area)	%	mmole/mg- sample	%Error
RH (800°C) steam 0.15 ml/min	H ₂	1896.245	1859.797	1878.021	0.702	0.0043	± 0.970
	CO	5682.650	5470.233	5576.441	1.247	0.0076	± 1.904
	CH ₄	2643.430	2608.138	2625.784	0.666	0.0040	± 0.672
	CO ₂	4489.364	4474.113	4481.739	0.293	0.0018	± 0.170
RH+Al ₂ O ₃ (800°C) steam 0.15 ml/min	H ₂	2336.353	2320.856	2328.604	0.832	0.0050	± 0.333
	CO	7202.197	7414.116	7308.156	1.028	0.0062	± 1.449
	CH ₄	2888.389	2888.162	2888.276	0.460	0.0028	± 0.004
	CO ₂	10758.311	10773.680	10765.994	0.724	0.604	± 0.071
RH+9%K ₂ CO ₃ / Al ₂ O ₃ (800°C) steam 0.15 ml/min	H ₂	3091.110	3082.834	3086.972	0.907	0.0055	± 0.134
	CO	7272.217	7340.992	7306.604	1.027	0.0062	± 0.471
	CH ₄	2643.430	2608.138	2625.784	0.418	0.0025	± 0.672
	CO ₂	13356.372	13456.670	13406.522	0.902	0.0054	± 0.374
RH+9%NiO/ Al ₂ O ₃ (800°C) steam 0.15 ml/min	H ₂	3183.161	2959.891	3071.526	1.127	0.0068	± 3.634
	CO	8815.179	8687.901	8751.540	1.230	0.0074	± 0.727
	CH ₄	1871.074	1788.098	1829.586	0.291	0.0017	± 2.268
	CO ₂	14347.163	14314.810	14330.987	0.964	0.0058	± 0.113
RH+9%K ₂ CO ₃ / NiO/Al ₂ O ₃ (800°C) steam 0.15 ml/min	H ₂	4334.8003	4561.040	4447.919	1.307	0.0079	± 2.543
	CO	8642.677	8513.824	8578.251	1.206	0.0073	± 0.751
	CH ₄	1378.183	1345.183	1361.683	0.217	0.0013	± 1.212
	CO ₂	17417.154	17525.710	17471.430	1.175	0.0071	± 0.311
RH+9%K ₂ CO ₃ / NiO/Al ₂ O ₃ (700°C) steam 0.15 ml/min	H ₂	2925.449	2846.454	2885.952	1.079	0.0065	± 1.369
	CO	2717.357	2833.281	2775.319	0.621	0.0038	± 2.088
	CH ₄	1643.430	1608.138	1625.784	0.412	0.0025	± 1.085
	CO ₂	14692.767	14765.080	14728.923	0.964	0.0058	± 0.245
RH+9%K ₂ CO ₃ / NiO/Al ₂ O ₃ (600°C) steam 0.15 ml/min	H ₂	2548.872	2640.480	2594.676	0.969	0.0059	± 1.765
	CO	1399.452	1331.378	1365.415	0.305	0.0019	± 2.493
	CH ₄	1810.858	1699.396	1755.127	0.445	0.0027	± 3.175
	CO ₂	13777.055	13961.420	13869.239	0.907	0.0055	± 0.665
RH+9%K ₂ CO ₃ / NiO/Al ₂ O ₃ (900°C) steam 0.15 ml/min	H ₂	3978.062	3975.679	3976.871	1.168	0.0071	± 0.030
	CO	6956.302	6188.023	6572.162	0.924	0.0056	± 5.845
	CH ₄	2051.889	1954.745	2003.317	0.319	0.0019	± 2.424
	CO ₂	18743.397	18657.230	18700.315	1.257	0.0076	± 0.230
RH+9%K ₂ CO ₃ / NiO/Al ₂ O ₃ (800°C) steam 0.225 ml/min	H ₂	4211.289	4144.106	4177.697	1.503	0.0091	± 0.804
	CO	6086.779	6081.613	6084.196	1.176	0.0071	± 0.042
	CH ₄	1213.422	1604.405	1408.913	0.267	0.0016	± 13.875
	CO ₂	19208.653	19388.190	19298.420	1.306	0.0079	± 0.465
RH+9%K ₂ CO ₃ / NiO/Al ₂ O ₃ (800°C) steam 0.3 ml/min	H ₂	5584.506	5584.506	5584.506	1.201	0.0072	± 0.000
	CO	3097.540	3097.540	3097.540	0.902	0.0054	± 0.000
	CH ₄	2525.870	2525.870	2525.870	0.373	0.0022	± 0.000
	CO ₂	24632.570	24632.570	24632.570	1.623	0.0098	± 0.000

	องค์ประกอบ แก๊ส	ครั้งที่ 1 (area)	ครั้งที่ 2 (area)	เฉลี่ย (area)	%	mmole/mg- sample	%Error
RH+Al ₂ O ₃ -ball 2 cm. (800°C) steam 0.15 ml/min	H ₂	1811.011	1819.613	1815.312	0.391	0.0024	± 0.237
	CO	3873.755	3742.335	3808.045	1.108	0.0067	± 1.726
	CH ₄	1993.739	1842.815	1918.277	0.284	0.0017	± 3.934
	CO ₂	7074.746	7101.813	7088.279	0.467	0.0028	± 0.191
RH+Al ₂ O ₃ - ball+cat. 2 cm. (800°C) steam 0.15 ml/min	H ₂	3111.211	3090.921	3101.066	0.668	0.0040	± 0.327
	CO	3908.327	3927.480	3917.903	1.014	0.0061	± 0.244
	CH ₄	2043.560	2307.547	2175.554	0.411	0.0025	± 6.067
	CO ₂	17727.513	18088.210	17907.861	1.157	0.0069	± 1.007
RH+ cat. 2 cm. (800°C) steam 0.15 ml/min	H ₂	2693.789	2888.135	2790.962	1.023	0.0061	± 3.482
	CO	2357.819	2510.841	2434.330	1.339	0.0080	± 3.143
	CH ₄	2270.304	2763.031	2516.668	0.532	0.0032	± 9.789
	CO ₂	17362.202	17309.720	17335.959	1.128	0.0068	± 0.151
RH+used K ₂ CO ₃ /Al ₂ O ₃ (800°C) steam 0.15 ml/min	H ₂	3019.969	3060.160	3040.064	0.893	0.0054	± 0.661
	CO	4996.919	4885.214	4941.066	0.694	0.0042	± 1.130
	CH ₄	1850.101	1753.200	1801.651	0.433	0.0026	± 2.689
	CO ₂	16234.544	16190.330	16212.434	1.090	0.0066	± 0.136
RH+regenerate K ₂ CO ₃ /Al ₂ O ₃ (800°C) steam 0.15 ml/min	H ₂	3019.813	3148.867	3084.339	0.906	0.0055	± 2.092
	CO	6782.775	6873.922	6828.348	0.960	0.0058	± 0.667
	CH ₄	1594.245	1686.747	1640.496	0.395	0.0024	± 2.819
	CO ₂	12941.153	12834.590	12887.869	0.867	0.0052	± 0.413
RH+used NiO/Al ₂ O ₃ (800°C) steam 0.15 ml/min	H ₂	2563.498	2448.004	2505.751	0.919	0.0056	± 2.304
	CO	6639.129	6445.149	6542.139	0.919	0.0055	± 1.482
	CH ₄	1959.552	2032.690	1996.121	0.318	0.0019	± 1.832
	CO ₂	11184.670	11195.260	11189.964	0.752	0.0045	± 0.047
RH+regenerate NiO/Al ₂ O ₃ (800°C) steam 0.15 ml/min	H ₂	2534.547	2499.445	2516.996	0.923	0.0056	± 0.697
	CO	6601.006	6636.804	6618.904	0.931	0.0057	± 0.270
	CH ₄	2005.340	1917.902	1961.621	0.312	0.0019	± 2.229
	CO ₂	12970.970	13074.120	13022.543	0.876	0.0053	± 0.396
RH+used K ₂ CO ₃ /NiO/Al ₂ O ₃ (800°C) steam 0.15 ml/min	H ₂	3295.169	3212.452	3253.810	1.194	0.0072	± 1.271
	CO	7676.933	7691.045	7683.989	1.080	0.0065	± 0.092
	CH ₄	2904.968	2843.069	2874.019	0.458	0.0028	± 1.077
	CO ₂	15011.423	15069.970	15040.698	1.012	0.0061	± 0.195
RH+regenerate K ₂ CO ₃ /NiO/Al ₂ O ₃ (800°C) steam 0.15 ml/min	H ₂	3499.081	3526.622	3512.851	1.289	0.0078	± 0.392
	CO	7743.154	7674.635	7708.894	1.084	0.0066	± 0.444
	CH ₄	2633.833	2619.332	2626.583	0.418	0.0025	± 0.276
	CO ₂	15614.742	15591.590	15603.166	1.049	0.0064	± 0.074

หมายเหตุ การหา %Error คำนวณดังตัวอย่างที่ ๑1

ตัวอย่าง จ1 แกลบ ทำที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนไอน้ำ 0.15 มิลลิลิตรต่อนาที
ในระบบวนการแกซีฟิเคชัน

$$\%error H_2 = (1896.245 - 1878.021) / 1878.021 * 100 = \pm 0.970$$

$$\%error CO = (5682.650 - 5576.441) / 5576.441 * 100 = \pm 1.904$$

$$\%error CH_4 = (2643.430 - 2625.784) / 2625.784 * 100 = \pm 0.672$$

$$\%error CO_2 = (4489.364 - 4481.739) / 4481.739 * 100 = \pm 0.170$$

ภาคผนวก จ

ข้อมูลการวิเคราะห์

1. การวิเคราะห์ธาตุด้วยเครื่อง X-ray Fluorescence (XRF)

1.1 โพลแทลเซียมคาร์บอเนต-แกมมาอะลูมินา

โพลแทลเซียมคาร์บอเนต-แกมมาอะลูมินา (ก่อนใช้)		โพลแทลเซียมคาร์บอเนต-แกมมาอะลูมินา (หลังใช้)	
	ความเข้มข้น		ความเข้มข้น
MgO	1061 ppm	MgO	0.21 wt%
Al ₂ O ₃	58.72 wt%	Al ₂ O ₃	58.89 wt%
SiO ₂	1.75 wt%	SiO ₂	1.41 wt%
SO ₃	0.74 wt%	SO ₃	1.16 wt%
Cl	0.27 wt%	Cl	0.21 wt%
K ₂ O	34.94 wt%	K ₂ O	34.16 wt%
Fe ₂ O ₃	2.41 wt%	Fe ₂ O ₃	2.87 wt%
Cu ₂ O	399 ppm	Cu ₂ O	287 ppm
ZnO	202 ppm	ZnO	166 ppm

1.2 นิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา

นิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา (ก่อนใช้)		นิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา (หลังใช้)	
Al ₂ O ₃	57.07 wt%	Al ₂ O ₃	59.39 wt%
SiO ₂	1.06 wt%	SiO ₂	1.05 wt%
SO ₃	1.58 wt%	SO ₃	2.26 wt%
CaO	1826 ppm	CaO	1852 ppm
K ₂ O	332 ppm	K ₂ O	20 ppm
Fe ₂ O ₃	0.77 wt%	Fe ₂ O ₃	0.78 wt%
TiO ₂	337 ppm	TiO ₂	0.22 wt%
NiO	38.61 wt%	NiO	35.28 wt%

1.3 โพลีเทสเทียมคาร์บอนเนต-นิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา

โพลีเทสเทียมคาร์บอนเนต-นิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา (ก่อนใช้)		โพลีเทสเทียมคาร์บอนเนต-นิกเกิลออกไซด์-แกมมาอะลูมินา (หลังใช้)	
	ความเข้มข้น		ความเข้มข้น
MgO	734 ppm	MgO	0.00 wt%
Al ₂ O ₃	42.76 wt%	Al ₂ O ₃	46.57 wt%
SiO ₂	0.64 wt%	SiO ₂	0.98 wt%
SO ₃	1.59 wt%	SO ₃	1.84 wt%
Cl	1124 ppm	Cl	1247 ppm
K ₂ O	15.82 wt%	K ₂ O	15.61 wt%
Fe ₂ O ₃	0.81 wt%	Fe ₂ O ₃	0.75 wt%
NiO	35.14 wt%	NiO	31.07 wt%
GaO	211 ppm	GaO	193 ppm
Y ₂ O ₃	341 ppm	Y ₂ O ₃	356 ppm

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวบุปผา พุทธสวัสดิ์ เกิดวันที่ 23 ธันวาคม พ.ศ. 2524 สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2546 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2547