

รายการอ้างอิง

1. อีระพงศ์ จันทนิยม. กระบวนการรั่วของเสียในอุตสาหกรรมการสกัดน้ำมันปาล์ม. หาดใหญ่วิชาการ 6(2) (กรกฎาคม-ธันวาคม) 2551 : 159-164
2. ศุภวรรณ ตันตยานนท์. ปิโตรเคมี. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2535.
3. Tutors Globe. Chlorophyll [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.tutorsglobe.com/homework-help/inorganic-chemistry/chlorophyll-72589.aspx> [26 มีนาคม 2557].
4. พลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.electron.rmutphysics.com/sciTech/pdf/c07_2554_energy.pdf [26 มีนาคม 2557].
5. พลังงานทดแทน. [ออนไลน์] แหล่งที่มา: <http://www3.egat.co.th/re/> [26 มีนาคม 2557].
6. พลังงานทดแทน. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: https://wiki.stjohn.ac.th/groups/poly_ordinarycourse1/wiki/4cb32/_8_.html [26 มีนาคม 2557].
7. เชื้อเพลิงจากพลังงานหมุนเวียนและพลังงานทดแทน. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: http://www.trueplookpanya.com/new/cms_detail/knowledge/16304-00/ [26 มีนาคม 2557].
8. น้ำมันปาล์ม. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1300/palm-oil-%E0%B8%99%E0%B9%89%E0%B8%B3%E0%B8%A1%E0%B8%B1%E0%B8%99%E0%B8%9B%E0%B8%B2%E0%B8%A5%E0%B9%8C%E0%B8%A1> [28 มีนาคม 2557].
9. การแปรรูปปาล์มน้ำมัน. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.doa.go.th/palm/linkTechnical/oil%20palm%20processing.html> [28 มีนาคม 2557].
10. Tan, C.-H., et al., *Extraction and physicochemical properties of low free fatty acid crude palm oil*. Food Chemistry, 2009. 113(2): p. 645-650.
11. Tani, H., Shimouchi, M., Haga, H. and Fujimoto, K., *Development of Direct Production Process of Diesel. Fuel from Vegetable Oilsl*. Journal of the Japan Institute of Energy, 2011. 90: p. 466-470.
12. Biodiesel Production by Using Heterogeneous Catalysts. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: www.intechopen.com [29 มีนาคม 2556].
13. hydrocracking. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: [http://en.wikipedia.org/wiki/Cracking_\(chemistry\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Cracking_(chemistry)) [29 มีนาคม 2557].
14. Gary J.H., Handwerk G.H. Catalytic Hydrocracking and Hydroprocessing. NewYork: Marcel Dekker, 1994.



15. Harold H. Schobert, *The Chemistry of Hydrocarbon fuel*. New York, 1991.
16. ดร.วิชากร จารุศิริ. การแตกตัวของพลาสติก น้ำมันพืช และน้ำมันหล่อลื่นใช้แล้วด้วยความร้อนเป็นแก๊สโซลีนในเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง. รายงานวิจัย. กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2551.
17. จตุพร วิทยาคุณ และนุรักษ์ กฤษดานุรักษ์. การเร่งปฏิกิริยาพื้นฐานและการประยุกต์. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์, 2547.
18. Bartholomew, C. H., *Mechanisms of catalyst deactivation*. Applied Catalysis A, 2001. **212**: p. 17-60.
19. ปราโมทย์ ไชยเวช. *ปิโตรเลียมเทคโนโลยี*. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
20. วีระ เปรมโยธิน. *เชื้อเพลิงและปิโตรเคมี*. ภาควิชาเคมี มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2534.
21. Ito, T., Sakurai, S., Kakuta, Y., Sugano, M. and Hirano, K., *Biodiesel production from waste animal fats using pyrolysis method*. Fuel Processing Technology, 2012. **94**: p. 47-52.
22. Kalam, M.A. and H.H. Masjuki, *Emissions and deposit characteristics of a small diesel engine when operated on preheated crude palm oil*. Biomass and Bioenergy, 2004. **27**(3): p. 289-297.
23. Tani, H., Shimouchi, M., Haga, H. and Fujimoto, K., *Development of Direct Production Process of Diesel Fuel from Vegetable Oils*. Journal of the Japan Institute of Energy, 2011. **90**: p. 466-470.
24. Tamunaidu, P. and S. Bhatia, *Catalytic cracking of palm oil for the production of biofuels: optimization studies*. Bioresour Technol, 2007. **98**(18): p. 3593-601.
25. Tani, H., et al., *Selective catalytic decarboxy-cracking of triglyceride to middle-distillate hydrocarbon*. Catalysis Today, 2011. **164**(1): p. 410-414.
26. Xu, J., et al., *Biofuel production from catalytic cracking of woody oils*. Bioresour Technol, 2010. **101**(14): p. 5586-91.
27. Wang, D., et al., *Comparison of catalytic pyrolysis of biomass with MCM-41 and CaO catalysts by using TGA-FTIR analysis*. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2010. **89**(2): p. 171-177.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก.
ข้อมูลการทดลอง

ตาราง ก 1 ข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองระดับของน้ำมันจากทะเลสาบ
ปาล์มเปล่าบนแมกนีเซียมออกไซด์และถ่านกัมมันต์

parameter				Product yield (%wt.)				Product distribution (%wt.)			
Temperature (°C)	Time (min)	Pressure (bar)	Catalyst (%wt)	Gas yield (%wt)	Solid yield (%wt)	Liquid yield (%wt)	conversion	Naphtha yield (%wt)	Kerosene yield (%wt)	Diesel yield (%wt)	Residue yield (%wt)
380	30	1	1	4.13	15.47	80.40	74.42	4.38	1.87	76.25	17.50
380	30	1	1	0.27	12.45	87.28	74.21	3.13	1.25	79.37	16.25
440	30	1	1	30.00	4.00	66.00	76.00	18.75	13.75	47.50	20.00
440	30	1	1	28.64	5.13	66.24	74.41	20.00	13.75	45.00	21.25
380	60	1	1	3.54	18.91	77.55	70.04	7.50	3.75	67.50	21.25
380	60	1	1	0.60	10.97	88.43	67.84	4.38	1.87	73.75	20.00
440	60	1	1	24.19	7.51	68.30	95.34	50.00	16.25	30.00	3.75
440	60	1	1	20.84	6.19	72.96	95.03	46.25	17.50	32.50	3.75
380	30	5	1	1.87	27.77	70.35	80.81	2.50	2.50	80.00	15.00
380	30	5	1	9.86	11.32	78.82	78.50	2.50	1.25	81.25	15.00
440	30	5	1	11.54	3.98	84.48	94.24	28.75	17.5	50	3.75
440	30	5	1	21.79	5.86	72.35	93.42	31.25	13.75	50	5.00
380	60	5	1	5.67	11.58	82.75	81.19	5.00	2.50	80.00	12.50
380	60	5	1	4.87	11.78	83.35	81.06	5.00	3.75	78.75	12.50
440	60	5	1	23.93	7.51	68.56	95.33	47.50	17.50	31.25	3.75
440	60	5	1	24.91	5.19	69.90	93.65	43.75	17.50	33.75	5.00

ตาราง ก 1 (ต่อ) ข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลสองระดับของน้ำมันจาก
ทะลายปาล์มเปล่าบนแมกนีเซียมออกไซด์และถ่านกัมมันต์

parameter				Product yield (%wt.)				Product distribution (%wt.)			
Temperature (°C)	Time (min)	Pressure (bar)	Catalyst (%wt)	Gas yield (%wt)	Solid yield (%wt)	Liquid yield (%wt)	conversion	Naphtha yield (%wt)	Kerosene yield (%wt)	Diesel yield (%wt)	Residue yield (%wt)
380	30	1	5	3.32	14.86	81.81	72.48	3.75	2.50	75.00	18.50
380	30	1	5	4.20	13.79	82.00	70.18	3.75	1.25	75.00	20.00
440	30	1	5	23.53	14.09	62.39	84.40	20.00	18.75	47.50	13.75
440	30	1	5	23.24	12.42	64.34	85.38	21.25	16.25	50.00	12.50
380	60	1	5	4.21	18.65	77.13	75.46	5.00	3.75	73.75	17.50
380	60	1	5	4.66	16.95	78.38	73.28	3.75	2.50	75.00	18.75
440	60	1	5	27.15	12.19	60.66	93.11	18.75	21.25	53.75	6.25
440	60	1	5	25.09	12.57	62.34	92.92	22.50	21.25	50.00	6.25
380	30	5	5	8.33	14.11	77.56	80.61	3.12	1.88	81.25	13.75
380	30	5	5	4.27	15.39	80.34	81.74	2.50	1.25	83.75	12.50
440	30	5	5	19.39	12.33	68.28	84.48	28.75	13.75	45.00	12.50
440	30	5	5	22.38	11.98	65.64	85.08	23.75	17.50	46.25	12.50
380	60	5	5	3.95	14.39	81.66	83.30	5.00	3.75	80.00	11.25
380	60	5	5	2.67	16.50	80.83	81.63	5	5.00	77.50	12.50
440	60	5	5	16.59	13.32	70.10	98.41	32.50	22.50	43.75	1.25
440	60	5	5	20.07	12.47	67.47	98.47	40	18.75	40.00	1.25
410	45	3	3	13.44	10.37	76.19	72.29	12.50	8.75	58.75	20.00
410	45	3	3	14.74	9.40	75.86	70.69	16.5	7.25	55.00	21.25
410	45	3	3	13.86	9.93	76.21	72.29	12.5	10	57.50	20



2700240046

ภาคผนวก ข.
การคำนวณร้อยละผลได้ของเชื้อเพลิง

การคำนวณ

1. การคำนวณร้อยละผลได้ของเหลว

$$\text{ร้อยละผลได้ของเหลว (Daf)} = \left[\frac{W_{\text{Liq}}}{W_{\text{Daf}}} \right] \times 100$$

2. การคำนวณร้อยละผลได้ของแข็ง

$$\text{ร้อยละผลได้ของแข็ง (Daf)} = \left[\frac{W_{\text{R}}}{W_{\text{Daf}}} \right] \times 100$$

3. การคำนวณร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊ส

$$\text{ร้อยละผลได้ผลิตภัณฑ์แก๊ส(Daf)} = 100 - \text{ร้อยละผลิตภัณฑ์เหลว} - \text{ร้อยละผลิตภัณฑ์ของแข็ง}$$

$$\text{โดย } W_{\text{Daf}} = \text{น้ำหนักเริ่มต้นที่ปราศจากความชื้น}$$

$$W_{\text{R}} = \text{น้ำหนักกากของแข็งที่ปราศจากความชื้น}$$

$$W_{\text{Liq}} = \text{น้ำหนักของผลิตภัณฑ์เหลว}$$

4. การคำนวณร้อยละการเปลี่ยนแปลงของเชื้อเพลิงเหลว

$$\text{ร้อยละการเปลี่ยนแปลงของเชื้อเพลิงเหลว} = \frac{\text{long residue}_{\text{before}} - \text{long residue}_{\text{actual}}}{\text{long residue}_{\text{before}}}$$

$$\text{เมื่อ } \text{long residue}_{\text{actual}} = \frac{\text{long residue}_{\text{after}} \times \text{ร้อยละผลได้ของเหลว}}{100}$$

$$\text{โดย } \text{long residue}_{\text{before}} = \text{ปริมาณกาน้ำมันของน้ำมันจากทะเลสาบก่อนทำปฏิกิริยา}$$

$$\text{Long residue}_{\text{actual}} = \text{ปริมาณกาน้ำมันจริงที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงเหลว}$$

$$\text{Long residue}_{\text{after}} = \text{ปริมาณกาน้ำมันในผลิตภัณฑ์เหลวที่ได้หลังทำปฏิกิริยา}$$

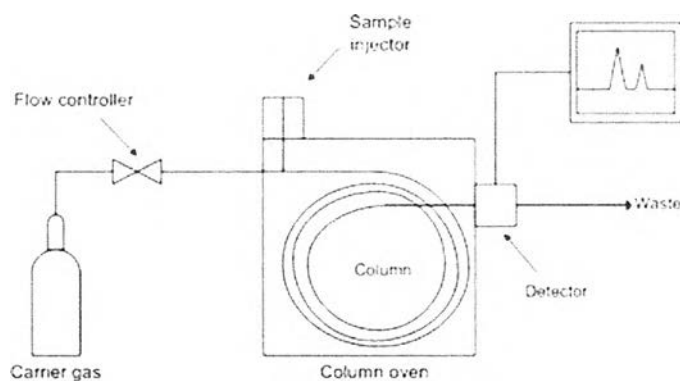


ภาคผนวก ค.

การวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการกระจายตัวของเชื้อเพลิงเหลวตามคาบจุดเดือด

แก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography)

แก๊สโครมาโทกราฟี เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับการแยกสารตัวอย่างซึ่งเป็นของผสมออกจากกัน แต่มีข้อจำกัดอยู่ที่สารตัวอย่างนั้นๆจะต้องสามารถเปลี่ยนให้เป็นแก๊สเฟสและมีความเสถียรที่อุณหภูมิที่เหมาะสม โดยอาศัยหลักความแตกต่างของความสามารถในการเคลื่อนที่และกระจายตัวผ่านเฟสคงที่ของแต่ละองค์ประกอบในสารตัวอย่าง ทำให้สารแต่ละชนิดสามารถแยกออกจากกันได้ ซึ่งเทคนิคการวิเคราะห์นี้สามารถบอกได้ทั้งชนิดและปริมาณของสารตัวอย่างส่วนประกอบของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีแสดงดังรูปที่ ฉ. 1



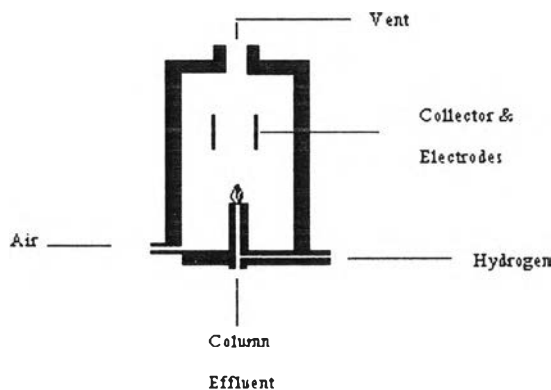
รูปภาพที่ ค. 1 ส่วนประกอบของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

โดยทั่วไปมีส่วนประกอบดังนี้

1. แก๊สที่ใช้งานกับเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี มี 3 ชนิด คือ
 - 1.1 แก๊สเฉื่อย ได้แก่ ฮีเลียม อาร์กอน หรือไนโตรเจน ซึ่งใช้เป็นแก๊สพา (Carrier Gases) เพื่อจะพาไอของสารหรือแก๊สตัวอย่างเข้าคอลัมน์
 - 1.2 แก๊สไฮโดรเจนเพื่อใช้ใน Flame Ionization Detector (FID)
 - 1.3 อากาศ เพื่อใช้ผสมกับไฮโดรเจนใน FID
2. Gas Traps และ Filters เป็นส่วนช่วยทำให้ระบบของแก๊สที่จะใช้งานสะอาดและบริสุทธิ์ขึ้น ซึ่งมีลักษณะเป็น Cartridge คือ
 - 2.1 Molecular Sieve Trap ใช้ดูดความชื้น
 - 2.2 Oxygen Trap เป็นที่จับแก๊สออกซิเจน

2.3 Hydrocarbon Filter ใช้จับแก๊สไฮโดรคาร์บอนและไอของน้ำมัน สำหรับแก๊สพาควรจะต้องผ่าน Filter อากาศควรจะต้องผ่าน Charcoal Filter

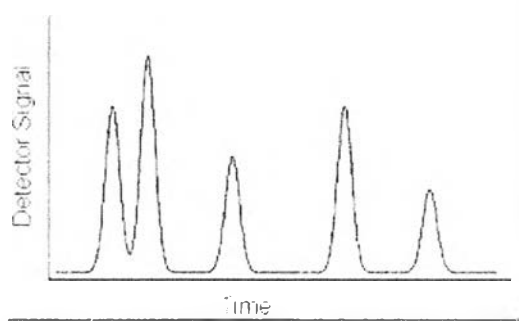
3. ตัวควบคุมอัตราการไหล (Flow Regulator) ทำหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลของแก๊สพา
4. ส่วนที่จะฉีดสารเข้าคอลัมน์ (Injection Port) ทำหน้าที่ฉีดสารเข้าคอลัมน์และให้ความร้อนให้สารตัวอย่างเปลี่ยนเป็นเฟสไอ
5. คอลัมน์ (Column) เป็นส่วนที่ใช้สำหรับแยกสารซึ่งสำคัญที่สุด นิยมใช้คอลัมน์ที่ทำจากทองแดง นิกเกิล หรือเหล็กกล้าไร้สนิม อาจอยู่ในรูป U Tube ความยาวของคอลัมน์ประมาณ 1-2 เมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง (Inner Diameter) 3-6 มม. อาจมีการใช้คอลัมน์ที่ทำจากแก้วในการแยกสาร สเตียรอยด์ ยา หรือสารประกอบชีวภาพ นอกจากนี้ยังมีคอลัมน์ชนิดขนาดรูเล็ก (Capillary Column) ซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1 มม. แบ่งได้เป็น 3 ชนิด ดังนี้
 - 5.1 Wall-Coated Open Tubular (WCOT) คอลัมน์ที่มีเฟสหยุดนิ่งเป็นของเหลวเคลือบเป็นฟิล์มบางๆ (0.1-1 ไมครอน) อยู่ที่ผนังด้านใน ความยาวของคอลัมน์ประมาณ 10-100 เมตร
 - 5.2 Support Coated Open Tubular (SCOT) คอลัมน์ที่มีตัวรองรับ หรือเมทริกซ์บรรจุอยู่ภายในความยาวของคอลัมน์ ประมาณ 10-100 เมตร
 - 5.3 Micropacked Column คอลัมน์ขนาดเล็ก มีความยาวประมาณ 0.7-1.0 เมตร
6. Flame Ionization Detector (FID) สารที่ผ่านจากคอลัมน์จะถูกเผาโดยเปลวไฟ (Flame) ทำให้แตกตัวเป็นไอออน ภายในตัวตรวจวัดมีขั้วไฟฟ้า (Electrode) ที่จะจับกับไอออนซึ่งมีผลทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น ตัวตรวจวัดชนิด FID นี้เป็นชนิดที่นิยมใช้มากที่สุด



รูปภาพที่ ค. 2 Flame Ionization Detector

สารตัวอย่างที่มีอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จะถูกฉีดเข้าไปที่ช่องสำหรับฉีดสารตัวอย่าง (Injection Port) เพื่อให้ความร้อนจนเปลี่ยนเป็นเฟสไอ แล้วผ่านเข้าไปในคอลัมน์หลอดแก้วรูเล็ก (Capillary Glass Column) รุ่น CP-SIL5CB เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.25 มิลลิเมตร ความยาว 15 เมตร และความหนาของชั้นฟิล์ม 0.25 ไมครอน โดยอาศัยการพาของเฟสเคลื่อนที่หรือแก๊สพา ในที่นี้

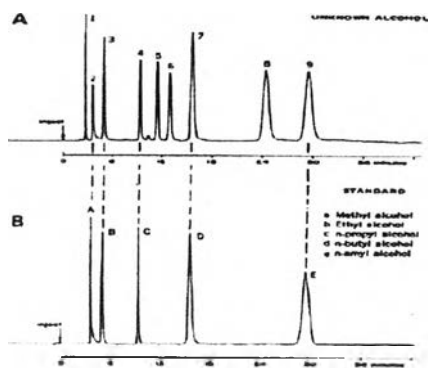
ใช้แก๊สฮีเลียม อัตราการไหล 1.5 ไมโครลิตร/นาที ไปยังคอลัมน์ เพื่อแยกสารออกจากกัน อุณหภูมิของเตาอบปรับอุณหภูมิให้มีการเปลี่ยนแปลงได้ในขณะทำการทดลอง (Temperature Programming Operation) โดยตั้งอัตราการให้ความร้อนที่ $10^{\circ}\text{C}/\text{นาที}$ โดยอุณหภูมิอยู่ในช่วง 30-320 องศาเซลเซียส ใช้ไนโตรเจนเหลวเป็นสารหล่อเย็น เพื่อควบคุมอุณหภูมิ ตั้งแต่ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 0.01 วินาที จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิด้วยอัตราการให้ความร้อนที่ $10^{\circ}\text{C}/\text{นาที}$ จนถึงอุณหภูมิสุดท้าย 320 องศาเซลเซียส ทั้งไว้ที่อุณหภูมินี้ 8.50 นาที มีตัวตรวจวัด ทำหน้าที่ตรวจจับสัญญาณที่เกิดขึ้น เมื่อสารแยกออกจากคอลัมน์ จะถูกบันทึก และแสดงออกในรูปแบบโครมาโทแกรม (Chromatogram) แสดงดังรูปที่ ค.3



รูปภาพที่ ค. 3 โครมาโทแกรมที่ได้จากเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ

การวิเคราะห์เชิงคุณภาพ

Retention Time คือ เวลาที่สารแต่ละชนิดใช้ในการเคลื่อนที่ผ่านคอลัมน์นับจากเริ่มต้นของการวิเคราะห์ถึงตำแหน่งเวลาที่ตัวตรวจวัดอ่านค่าสัญญาณสูงสุด (Peak) จากการตรวจวัดของสารตัวอย่างนั้น ซึ่ง Retention Time เป็นลักษณะเฉพาะของสารแต่ละชนิด โดยขึ้นกับอัตราการไหลของแก๊สพา และอุณหภูมิที่ใช้กับคอลัมน์ เมื่อให้การวิเคราะห์หรืออยู่ในสภาวะคงที่ ค่า Retention Time ของสารต่างๆที่ใช้วิเคราะห์ควรจะต้องมีค่าคงที่หรือใกล้เคียงกันมากที่สุด ดังนั้นการตรวจพิสูจน์องค์ประกอบของสารตัวอย่างต้องทำการวิเคราะห์ทั้งสารตัวอย่างและสารมาตรฐานในภาวะเดียวกัน เมื่อนำค่า Retention Time มาเปรียบเทียบกัน ดังแสดงในรูปที่ ค.4 จะสามารถบอกองค์ประกอบในสารตัวอย่างได้



รูปภาพที่ ค. 4 การเปรียบเทียบค่า Retention Time ของสารตัวอย่างกับสารมาตรฐาน

การวิเคราะห์เชื้อเพลิงเหลวด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีพร้อมซอฟต์แวร์จำลองการกลั่น
จะวิเคราะห์ตามคาบจุดเดือดของสาร ดังนี้

IBP	$\leq 200\text{ }^{\circ}\text{C}$	=	Naphtha
	$200\text{ }^{\circ}\text{C} \leq 250\text{ }^{\circ}\text{C}$	=	Kerosene
	$250\text{ }^{\circ}\text{C} \leq 350\text{ }^{\circ}\text{C}$	=	Light Gas Oils
	$350\text{ }^{\circ}\text{C} \leq 370\text{ }^{\circ}\text{C}$	=	Heavy Gas Oils
	$370\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \text{FBP}$	=	Long Residue

ภาคผนวก ง.

การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2k

การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลนิยมใช้ในการทดลองที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยหลายปัจจัย ซึ่งต้องการศึกษาผลรวมที่มีต่อผลกระทบที่เกิดขึ้นจากปัจจัยเหล่านั้น การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลที่มีความสำคัญมากที่สุดคือ กรณีปัจจัย k ปัจจัย ซึ่งแต่ละปัจจัยประกอบด้วยสองระดับ แต่ละระดับเกิดจากข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น อุณหภูมิ ความดัน หรือเวลา เป็นต้น หรือเกิดจากข้อมูลเชิงคุณภาพได้ เช่น เครื่องจักร หรือคนงาน เป็นต้น และในสองระดับที่กล่าวถึงนี้จะแทนระดับ “สูง” หรือ “ต่ำ” ของปัจจัยหนึ่งๆ หรือการ “มี” หรือ “ไม่มี” ของปัจจัยนั้นก็ได้ ใน 1 เพลทเคดที่บริบูรณ์ สำหรับการออกแบบเช่นนี้จะประกอบด้วยข้อมูลทั้งสิ้น $2 \times 2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$ และเราเรียกการออกแบบลักษณะนี้ว่าการออกแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับมีประโยชน์มากต่องานทดลองในช่วงแรก เมื่อมีปัจจัยหลายปัจจัยที่ต้องการจะตรวจสอบ การออกแบบเช่นนี้ทำให้เกิดการทดลองลดจำนวนลงเพื่อที่สามารถศึกษาถึงผลของปัจจัยทั้ง k ชนิดได้อย่างบริบูรณ์โดยใช้การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับ ดังนั้นจึงไม่น่าแปลกใจเลยที่การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับจะถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายเพื่อกรองปัจจัยที่มีอยู่เป็นจำนวนมากให้ลดน้อยลง เนื่องจากแต่ละปัจจัยของการทดลองแบบเชิงแฟคทอเรียล ประกอบด้วย 2 ระดับ ผลตอบที่ได้จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงตลอดช่วงของระดับของปัจจัยที่เลือกขึ้นมาทำการทดลอง ซึ่งสมมติฐานสามารถยอมรับได้สำหรับการทดลองเพื่อใช้ปัจจัยทำการศึกษาระบบ

การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับ

การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับชนิดแรกคือการออกแบบที่ประกอบด้วย 2 ปัจจัย (A และ B) แต่ละปัจจัยจะประกอบด้วย 2 ระดับ การออกแบบชนิดนี้เรียกว่า การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k ระดับของปัจจัยแต่ละตัวจะอยู่ที่ “ต่ำ” และ “สูง” การทดลองร่วมปัจจัย สำหรับการออกแบบสามารถแสดงผลของปัจจัยด้วยตัวอักษรลาตินตัวใหญ่ ดังนั้น A จะแทนผลของปัจจัย A, B แทนผลของปัจจัย B และ AB แทนอันตรกิริยาของปัจจัย AB ในการออกแบบ 2^2 ระดับต่ำและสูงจะแทนด้วยเครื่องหมาย + และ - บนแกน A และ B ตามลำดับ

การทดลองร่วมปัจจัยทั้ง 4 ปัจจัย สำหรับการออกแบบจะแทนด้วยตัวอักษรเล็ก จะเห็นได้ว่าสำหรับระดับสูงของปัจจัยใดๆจะแทนด้วยตัวอักษรตัวเล็กของปัจจัยนั้น ในการทดลองร่วมปัจจัยที่เกิดขึ้นสำหรับระดับต่ำจะไม่ปรากฏตัวอักษรใดๆ ในการทดลองร่วมปัจจัย ดังนั้นสำหรับการออกแบบ 2^k ในที่นี้ a จะแทนการทดลองร่วมปัจจัยของปัจจัย A ที่ระดับสูงและ B ที่ระดับต่ำ, b แทน A ที่



ระดับต่ำและ B ที่ระดับสูง ab แทนทั้ง ปัจจัย A และ B อยู่ที่ระดับสูง และ (1) แทนทั้งปัจจัย A และ B อยู่ที่ระดับต่ำ

สูตรการคำนวณ

1. Contrast = (ผลรวมของค่าการทดลองแต่ละ Treatment) \times [สัมประสิทธิ์ (-1 หรือ +1) ของตัวแปรหรืออันตรกิริยาระหว่างตัวแปร]
2. Effect Estimate = $2 \frac{(\text{Contrast}_{AB\dots K})}{n^{2^k}}$
3. Sum of Squares_{AB...K} (SS)

$$SS_{AB\dots K} = (\text{Contrast}_{AB\dots K})^2$$
4. Total of sum of squares (SS_T)

$$SS_T = \sum_{i=1} \sum_{j=1} \sum_{k=1} y_{ijk}^2 - y^2 \dots / N; N = \text{จำนวนค่าสังเกตทั้งหมด}$$
5. Sum of Squares Error (SS_E)

$$SS_E = SS_T - SS \text{ main effect}$$
6. Mean of Square (MS)

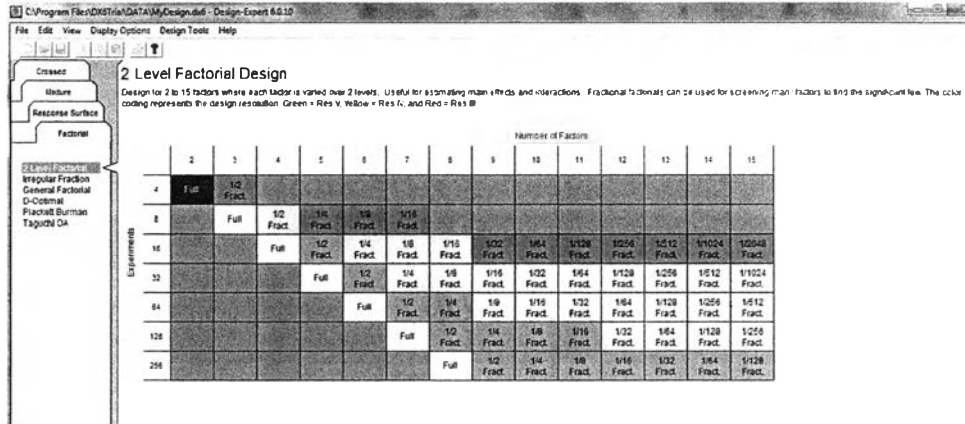
$$MS = SS / \text{Degree of freedom}$$
7. % Normal Probability = $\frac{(\text{Cumulative frequency} - 0.5) \times 100}{\text{Total Cumulative frequency}}$
8. $F_0 = MS \text{ effect} / MS \text{ error}$

ตัวอย่างงานวิจัย ไพโรไลซิสของน้ำมันจากทะเลลายปาล์มเปล่าเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพเหลวบนแมกนีเซียมออกไซด์และถ่านกัมมันต์ ออกแบบการทดลองเป็น 2^4 แฟกทอเรียลแบบ 2 เรพลิเคต โดยกำหนดสัญลักษณ์และระดับของตัวแปรดังนี้

ตัวแปร	ระดับ	
	ระดับต่ำ (-)	ระดับสูง (+)
A อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	380	440
B เวลา (นาที)	30	60
C ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น (บาร์)	1	5
D ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	1	5

การใช้โปรแกรม Design-Expert ในการคำนวณ

- เมื่อเข้าสู่โปรแกรม คลิกไปที่ file → New Design และจะแสดงดังรูปภาพที่ ง.1



รูปภาพที่ ง. 1 ตารางของ 2 level Factorial Design

- เลือกจำนวนตัวแปรที่ใช้ในงานวิจัยเพื่อศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ ความดันไฮโดรเจนเริ่มต้น เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยารวมทั้งหมด 4 ปัจจัย เลือกที่ Full ของช่อง 4 จากนั้นกรอกจำนวนที่ทำการทดลองซ้ำในช่อง Replicates = 2, Center point per block = 3 กดที่ Continue จะปรากฏดังรูปภาพที่ ง.2 เมื่อกรอกตัวแปรเสร็จคลิกที่ Continue

Factors

	Name	Units	Type	Low	High
A:	Temperature	C	Numeric	220	440
B:	Time	min	Numeric	20	60
C:	Pressure	car	Numeric	1	5
D:	Catalyst	%wt	Numeric	1	5

รูปภาพที่ ง. 2 ตัวแปรและหน่วยที่ใช้ในการทดลอง

- กรอกชื่อตัวแปร, หน่วยของตัวแปร และช่วงขอบเขตของตัวแปรที่ต้องการศึกษาให้ครบ จากนั้นคลิกที่ Continue จะปรากฏดังรูปภาพที่ ง.3

Responses: 2

	Name	Units
	conversion	%wt
	diesel	%wt

รูปภาพที่ ง. 3 Response และหน่วยที่ใช้ในการทดลอง

4. กรอกชื่อและหน่วยของ Response ที่ต้องการศึกษาทั้งหมด คลิกที่ Continue จะพบปัจจัยที่ใช้ในการทดลองทั้งหมด เช่น การทดลองทั้งหมด 16 การทดลอง ค่ากลาง 3 การทดลอง ทำซ้ำ 1 ครั้ง รวมการทดลอง 35 การทดลอง จากนั้นนำค่าที่ได้จากการทดลองกรอกลงในแต่ละช่อง Response ดังแสดงในรูปภาพที่ ง.3

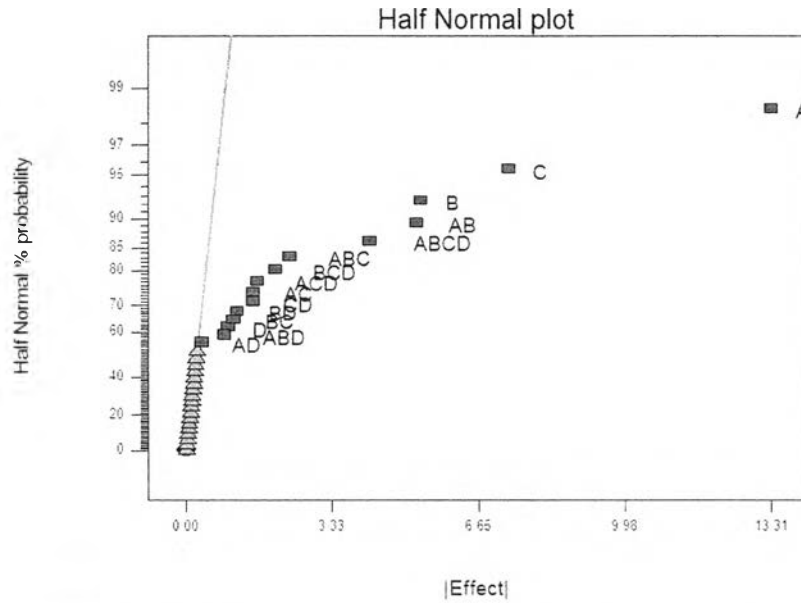
Run	Block	Factor 1 Temperature degrees Celsius	Factor 2 Stone mm	Factor 3 Compression mm	Factor 4 Stability %	Response 1 conversion %	Response 2 diesel %
1	1	147.00	40.00	4.00	1.00	33.644	11.74
2	2	100.00	30.00	0.00	0.00	31.743	10.76
3	3	142.00	30.00	0.00	0.00	32.381	10.00
4	4	100.00	40.00	0.00	1.00	32.287	10.90
5	5	100.00	30.00	0.00	0.00	32.612	11.26
6	6	147.00	40.00	0.00	1.00	34.544	11.00
7	7	100.00	30.00	0.00	0.00	32.180	10.00
8	8	100.00	30.00	0.00	0.00	32.278	10.00
9	9	100.00	30.00	0.00	1.00	34.236	10.37
10	10	142.00	30.00	0.00	0.00	34.287	10.00
11	11	100.00	40.00	0.00	1.00	33.810	10.00
12	12	100.00	30.00	0.00	1.00	34.324	11.42
13	13	142.00	30.00	0.00	0.00	33.489	10.76
14	14	142.00	30.00	0.00	1.00	34.016	10.90
15	15	142.00	30.00	0.00	0.00	34.024	10.90
16	16	147.00	40.00	0.00	1.00	33.769	10.90
17	17	142.00	30.00	0.00	0.00	33.274	10.00
18	18	142.00	30.00	0.00	0.00	33.487	10.00
19	19	142.00	30.00	0.00	1.00	33.001	10.00
20	20	100.00	40.00	0.00	0.00	32.886	10.00
21	21	100.00	30.00	0.00	1.00	31.937	10.00

รูปภาพที่ ง. 4 ตารางการทดลองและผลที่ได้จากการทดลองที่ภาวะต่างๆ

5. วิเคราะห์ผลที่ได้จากการทดลองโดยโปรแกรม เช่น วิเคราะห์ร้อยละผลได้ของการเปลี่ยนแปลงไปของเชื้อเพลิงเหลว โดยกดที่ conversion จากนั้นคลิกที่ Effect

รูปภาพที่ ง. 5 แถบของ conversion และ diesel

6. เมื่อคลิก Effect จากนั้นทำการเลือกจุดในกราฟ Half Normal % Probability เพื่อให้แนวโน้มเป็นเส้นตรง



รูปภาพที่ ง. 6 Half-Normal plot ของร้อยละการเปลี่ยนแปลงไปของเชื้อเพลิงชีวภาพเหลวจากการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันจากทะเลลายปาล์มเปล่าบนแมกนีเซียมออกไซด์และถ่านกัมมันต์

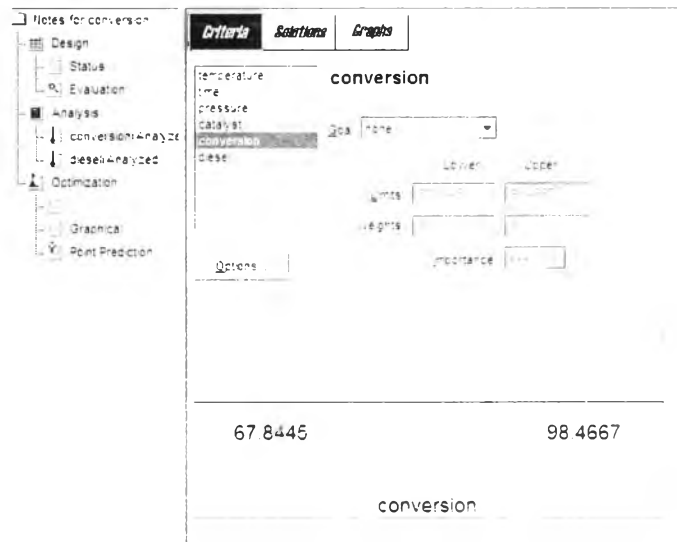
7. กตที่ค้ำว่า ANOVA เพื่อวิเคราะห์ผลที่ได้จากการคำนวณและเป็นการยืนยันผลของ Normal probability

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F Value	Prob > F	Significant
Model	2603.24	16	162.70	177.82	< 0.0001	significant
A	1418.48	1	1418.48	1448.60	< 0.0001	
B	229.23	1	229.23	254.49	< 0.0001	
C	430.88	1	430.88	449.67	< 0.0001	
D	7.44	1	7.44	7.81	0.0120	
AB	200.48	1	200.48	225.46	< 0.0001	
AC	12.68	1	12.68	13.70	0.0004	
AD	1.04	1	1.04	1.06	0.3182	
BC	3.46	1	3.46	3.62	0.0660	
BD	10.39	1	10.39	11.24	0.0026	
CD	12.53	1	12.53	13.32	0.0004	
ABC	44.59	1	44.59	45.59	< 0.0001	
BCD	6.28	1	6.28	6.40	0.0207	
ACD	21.21	1	21.21	21.69	0.0002	
BCD	23.07	1	23.07	23.20	< 0.0001	
ABCD	129.87	1	129.87	142.05	< 0.0001	
Residual	167.08	1	167.08	179.29	< 0.0001	significant
Pure Error	17.80	12	1.48			
Total	2692.87	34				

รูปภาพที่ ง. 7 การคำนวณผลของ ANOVA

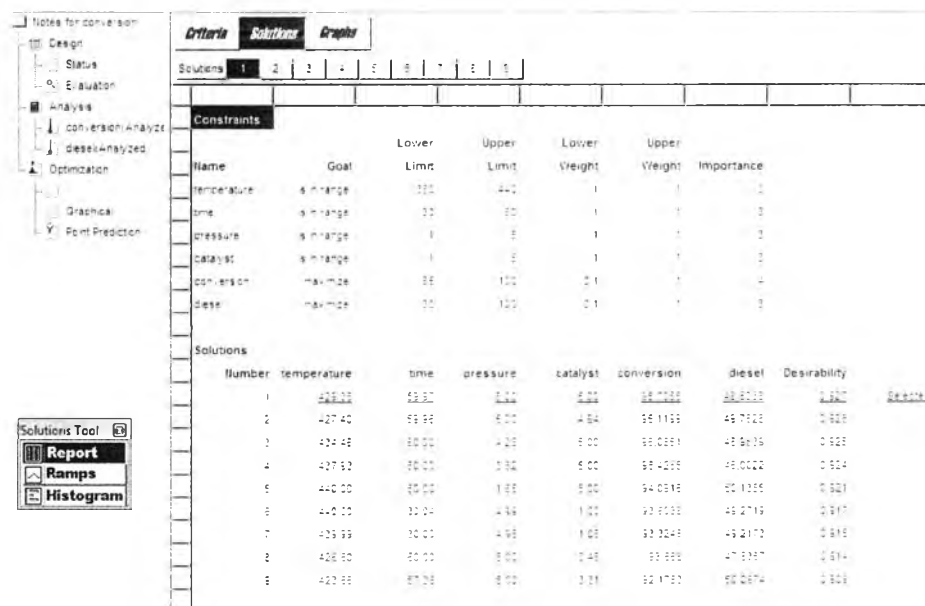
จากการคำนวณด้วยโปรแกรม Design-Expert ซึ่งบ่งบอกถึงปัจจัยใดที่มีค่า Prob > F น้อยกว่า 0.05 ของปัจจัยนั้น

8. จากนั้นวิเคราะห์ปัจจัยอื่นๆ ตามข้อ 5-7
9. หามภาวะที่เหมาะสมของการทดลอง กตที่ numerical → พร้อมกรอกขอบเขตที่ต้องการในช่อง Limit ดังรูปภาพที่ ง.8



รูปภาพที่ ง. 8 ขอบเขตที่ต้องการในการทดลอง

10. กตที่ Solution จะได้สภาวะที่เหมาะสม



รูปภาพที่ ง.9 ภาวะที่เหมาะสมของการแตกตัวเชิงเร่งปฏิกิริยาของน้ำมันจากทะเลหลายปาล์มเปล่าเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพเหลวบนแมกนีเซียมออกไซด์และถ่านกัมมันต์

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวณาดา ปาลกะวงศ์ ณ อยุธยา เกิดวันที่ 13 กรกฎาคม 2533 ที่กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรมและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ปีการศึกษา 2554 ต่อมาเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2555 และสำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2556

