



รายงานฉบับสมบูรณ์

เรื่อง

การพัฒนาการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับอากาศยานจากแป้งมันสำปะหลัง
Development of Bio-jet fuel production from cassava starch

หัวหน้าโครงการ

รองศาสตราจารย์ ดร. อภิชาติ บุญทาวัน

ได้รับเงินสนับสนุนจากกองทุนนวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์ สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

กันยายน พ.ศ. 2558

รายงานฉบับสมบูรณ์

เรื่อง

การพัฒนาการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับอากาศยานจากแป้งมันสำปะหลัง
Development of Bio-jet fuel production from cassava starch

หัวหน้าโครงการ

รองศาสตราจารย์ ดร. อภิชาติ บุญทาวัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ได้รับเงินสนับสนุนจากกองทุนนวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์ สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

กันยายน พ.ศ. 2558



ศูนย์บรรณสารและสื่อการศึกษา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

กิตติกรรมประกาศ

หัวหน้าโครงการการพัฒนาการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับอากาศยานจากแป้งมันสำปะหลัง ขอขอบคุณ
กองทุนนวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์ สมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
สุรนารี ในการสนับสนุนด้านงบประมาณ



คำนำ

จากสภาวะวิกฤตการณ์ด้านพลังงานน้ำมัน (oil crisis) เมื่อหลายปีที่ผ่านมา ได้ส่งผลกระทบต่อประเทศต่างๆ ในโลกเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะประเทศไทยซึ่งไม่มีแหล่งน้ำมันดิบเป็นของตัวเอง ในปัจจุบัน น้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพได้ถูกนำมาใช้มากขึ้น เช่นเอทานอลซึ่งสามารถผลิตได้จากกระบวนการหมักมันสำปะหลัง ซึ่งเมื่อทำการกลั่นลำดับส่วนและกำจัดน้ำออกแล้ว สามารถนำไปใช้เป็นส่วนผสมของเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ ได้ ยกตัวอย่างเช่นเครื่องยนต์เบนซินได้มีการผสมเอทานอลกับน้ำมันเบนซินเพื่อผลิตเป็นแก๊ซโซฮอล์ชนิดต่าง ๆ เช่น E10, E20, และ E85 เป็นต้น นอกจากนี้เอทานอลยังสามารถนำไปทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน (trans-esterification) กับกรดอินทรีย์ (organic acids) ซึ่งสามารถผลิตได้จากกระบวนการหมักแป้งมันสำปะหลังเช่นกัน โดยจะเกิดเป็นสารในกลุ่มของเอทิลเอสเทอร์ที่มีจุดเดือดต่าง ๆ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในเครื่องยนต์ชนิดต่างๆ ได้ด้วยเช่นกัน นอกจากนี้เอทานอลยังสามารถทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันกับไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride) โดยมีกรดหรือด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) ได้ผลิตภัณฑ์คือเอทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (fatty acid ethyl ester, FAEE) ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ให้ความสำคัญกับสารประกอบในกลุ่มเอสเทอร์ซึ่งผลิตจากเอทานอลและกรดไขมันสายกลาง (medium chain fatty acid) ซึ่งพบว่ามียุทธศาสตร์มากในน้ำมันจากน้ำมันมะพร้าว (coconut oil) และน้ำมันจากเนื้อเมล็ดปาล์ม (Palm kernel oil) โดยเมื่อทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันสมบูรณ์แล้ว จะนำเอทิลเอสเทอร์ที่ได้นี้ไปกลั่นลำดับส่วนเพื่อให้ได้ medium chain fatty acid ethyl ester ก่อนที่จะนำไปผสมกับเอสเทอร์ของกรดอินทรีย์เพื่อทดสอบกับเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์ไบน์ขนาดเล็กต่อไป โดยจุดเด่นของโครงการวิจัยนี้คือต้องการที่จะพัฒนาเชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับอากาศยานโดยทำการผลิตเอทานอลและกรดอินทรีย์จากแป้งมันสำปะหลัง และใช้น้ำมันจากเนื้อเมล็ดปาล์มซึ่งเป็นวัตถุดิบทางการเกษตรที่สำคัญของประเทศ โดยสามารถลดการพึ่งพาน้ำมันจากปิโตรเลียมได้ 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับอากาศยานที่ได้ผลิตขึ้นนี้ ได้มีการนำไปทดสอบกับเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์ไบน์ขนาดเล็ก โดยเป็นเครื่องยนต์ที่ผลิตขึ้นภายในประเทศจากบริษัท PST jet จำกัด เครื่องยนต์ก๊าซเทอร์ไบน์ดังกล่าวจะใช้เชื้อเพลิงชนิดเดียวกันกับเครื่องยนต์ไอพ่นในเชิงพาณิชย์ทั่ว ๆ ไป และจะทำการทดสอบโดยมีอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ ความดัน ณ จุดต่าง ๆ รวมถึงความเร็วรอบ และแรงขับเคลื่อน (thrust) เป็นต้น

สารบัญ

	หน้า
คำนำ.....	3
กิตติกรรมประกาศ.....	4
สารบัญ.....	5
สารบัญภาพ.....	7
สารบัญตาราง.....	9
1. บทนำ.....	10
1.1 น้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์โบจากปิโตรเลียม.....	10
1.2 คุณสมบัติในการเป็นเชื้อเพลิงของน้ำมันเจ็ต.....	12
1.2.1 อุณหภูมิการกลั่น (Distillation)	12
1.2.2 จุดวาบไฟ (Flash point)	12
1.2.3 ค่าความร้อน (Heating value)	13
1.2.4 ค่าความหนืด (Viscosity)	13
1.2.5 ความหนาแน่น (Density)	13
1.3 น้ำมันเชื้อเพลิงอากาศยานหรือน้ำมันเจ็ตสังเคราะห์.....	14
1.3.1 น้ำมันสังเคราะห์โดยกระบวนการฟิชเชอร์-ทรอปช์ (Fischer-Tropsch process)....	14
1.4 น้ำมันเจ็ตสังเคราะห์ทางชีวภาพ (Bio-Derived Jet Fuel).....	15
1.4.1 Hydro-treated Renewable Jet fuel : HRJ fuel.....	15
1.4.2 การผลิต Biojet ด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน (Trans-esterification).....	16
1.5 การผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลโดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.....	18
1.5.1 การแยกเอทานอลควบคู่กับกระบวนการหมักด้วยเทคนิคการกลั่นลำดับส่วน	
แบบสูญญากาศ.....	18
1.5.2 การผลิตเอทานอลไร้น้ำ.....	21
1.6 กรดแล็กติก.....	24
1.7 ปาล์มน้ำมัน.....	27
1.8 ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน.....	28
1.9 เครื่องยนต์ไอพ่น (jet engine)	29
1.10 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	31
2. วิธีการทดลอง.....	32
2.1 อุปกรณ์และสารเคมี.....	32

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2 การเตรียมเอทานอลบริสุทธิ์.....	32
2.3 การหมักกรดแล็กติกจากแป้งมันสำปะหลัง.....	34
2.4 ปฏิกริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน.....	35
3. ผลการทดลอง.....	37
3.1 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่มีต่อผลผลิตของเอทิลแล็กเตท.....	37
3.2 การกลั่นลำดับส่วนแบบสุญญากาศ.....	44
3.3 กระบวนการผลิตเอทานอลไร้น้ำและเอทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (FAEE).....	46
3.4 ส่วนประกอบหลักของเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์ไบน์.....	49
3.5 การวัดค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการสันดาปของเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์ไบน์ขนาดเล็ก.....	58
3.6 ระบบควบคุมการทำงานของเครื่องยนต์.....	60
3.7 การสตาร์ทและการปิดเครื่องยนต์.....	63
3.8 การทดสอบค่าพลังงานของเชื้อเพลิงชีวภาพ.....	66
3.9 การทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์.....	67
4.สรุปผลการทดลอง.....	70
References.....	71
ประวัตินักวิจัย.....	72

สารบัญภาพ

รูปภาพ	หน้า
1 การกลั่นลำดับส่วนของปีโตรเลียมเพื่อได้ผลิตภัณฑ์ชนิดต่าง ๆ.....	11
2 กระบวนการทางเคมีของเชื้อเพลิงชนิด HRJ.....	16
3 ปฏิกิริยา Trans-esterification ระหว่างไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์.....	16
4 แสดงหลักการการทำงานของระบบการแยกเอทานอลควบคู่กับกระบวนการหมักด้วยเทคนิคการกลั่นลำดับส่วนแบบสูญญากาศ	19
5 เอทานอล 90% ที่ผลิตได้จากการแยกเอทานอลด้วยการกลั่นลำดับส่วนแบบสูญญากาศ.....	20
6 การแยกไอน้ำผ่านเยื่อแผ่นในระดับห้องปฏิบัติการโดยใช้ท่อใยกลวงเซรามิกเชิงประกอบ; 1 = Feed tank, 2 = Compressor, 3 = Super heater, 4 = Permeate, 5 = Condenser 1, 6 = Membrane module, และ 7 = Condenser 2.....	23
7 แสดงการควบแน่นของเอทิลแอลกอฮอล์ระหว่างการกลั่นเอทานอลออกจากระบบ.....	26
8 หลักการทำงานโดยทั่ว ๆ ไปของเครื่องยนต์เจ็ทหรือเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์โบ.....	29
9 การทำงานของเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์โบ (A) และ วัฏจักรเบร์ตันแสดง P-v และ T-s ไดอะแกรม..	30
10 อุปกรณ์สำหรับวัดปริมาณน้ำในสารละลายเอทานอล (Density meter) แสดงความเข้มข้น 0.81% (บน) กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น และความเข้มข้น ของเอทานอล (ล่าง).....	33
11 การหมักกรดแล็กติกขนาดถังหมัก 5 ลิตร โดยใช้แคลเซียมโทรออกไซด์ในการควบคุม pH.....	34
12 การทดสอบการละลายของตะกอนแคลเซียมแล็กเตทในสารละลายเอทานอล ณ ความเข้มข้นของน้ำต่าง ๆ (A) น้ำ 5.2 %, (B) น้ำ 10.5%, (C) น้ำ 12.0 %, และ (D) แสดงการเกิดตะกอนของแคลเซียมซัลเฟตที่มีลักษณะขาวหลังจากเติมกรดซัลฟูริก (65 °C).....	37
13 แผนภาพแสดงการทำงานของระบบการแยกไอน้ำผ่านเยื่อแผ่นร่วมกับปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (บน) และภาพถ่ายการทดลองระบบการแยกไอน้ำผ่านเยื่อแผ่นร่วมกับปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันในถังขนาด 2 ลิตร (ล่าง).....	42
14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์เมื่อใช้ระบบการแยกไอน้ำผ่านเยื่อแผ่นร่วมกับปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดแล็กติกกับเอทานอลเมื่อเทียบกับเวลา.....	43
15 สมดุลวัฏภาคของของเหลวและไอ (Vapor/liquid equilibria, VLE) ระหว่างเอทิลแอลกอฮอล์กับเอทานอลบริสุทธิ์ ณ ความดัน 1 บรรยากาศ (Gmehling and Onken, 1982).....	44
16 การออกแบบระบบการกลั่นลำดับส่วนแบบสูญญากาศเพื่อแยกเอทานอลออกจากเอทิลแอลกอฮอล์.....	45

สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปภาพ	หน้า
17	กระบวนการผลิตเอทานอลไร้น้ำและเอทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (FAEE) โดยการแยกกลีเซอรอลแบบต่อเนื่องด้วยระบบไซโคลน.....47
18	กระบวนการผลิต FAEE และการแยกกลีเซอรอลแบบต่อเนื่องด้วยระบบไซโคลน.....48
19	Fatty acid ethyl ester ของน้ำมันจากเนื้อเมล็ดปาล์มที่ผ่านการกลั่นลำดับส่วนแล้ว.....48
20	แสดงชิ้นส่วนและส่วนประกอบของเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์โบขนาดเล็ก.....49
21	ภาคตัดภายในของเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์โบขนาดเล็กในโครงการนี้.....51
22	การออกแบบส่วนที่เป็นการอัดอากาศและส่วนของเทอร์โบ.....52
23	ลักษณะของการอัดอากาศตามแนวรัศมี (centrifugal flow) แบบชั้นตอนเดียว52
24	Diffuser (บน) และการประกอบเข้ากับใบพัดอัดอากาศ (ล่าง).....54
25	แสดงห้องเผาไหม้แบบ single annular (บน) และห้องนำเชื้อเพลิงสู่ห้องเผาไหม้ (ล่าง).....56
26	การวางตำแหน่งของ Nozzle guide vane (บน) เพื่อขับแกนเพลลาผ่านเทอร์โบ (ล่าง).....57
27	ชุดเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์โบขนาดเล็กพร้อมจอแสดงผลภายในศูนย์เครื่องมือ 10.....58
28	อุปกรณ์โหลดเซลล์ (load cell) สำหรับวัดแรงขับ (thrust) ของเครื่องยนต์.....59
29	แผนผังจรรีเลคทรอนิกส์สำหรับเก็บข้อมูลต่าง ๆ ในระหว่างการทำงานของเครื่องยนต์.....60
30	การเชื่อมต่อระหว่างสายส่งสัญญาณและสายคำสั่งเข้าสู่ FADEC.....62
31	การเชื่อมต่อระหว่าง FADEC และอุปกรณ์ต่าง ๆ ของเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์โบ.....62
32	การควบคุมการทำงานของเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์โบผ่านเครื่องบังคับวิทยุ.....63
33	กราฟแสดงความเร็วรอบของการหมุนและอุณหภูมิ EGT ในระหว่างการทดสอบเครื่องยนต์.....64
34	ค่าพลังงานความร้อนจากการสันดาปของผสมระหว่างเอทิลแล็กเตทกับส่วนกลั่นของ FAEE ที่ได้จากน้ำมันเนื้อเมล็ดปาล์ม.....66
35	การทดสอบการสันดาปของเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์โบด้วย FAEE ที่ผลิตได้.....67
36	ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของเครื่องยนต์กับแรงขับ (thrust) ที่ได้ (บน) และความสัมพันธ์ระหว่างความดัน (P4) กับแรงขับของเครื่องยนต์ (ล่าง).....69

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1	มาตรฐานคุณสมบัติของน้ำมันเจ็ต A และ เจ็ต A-1.....13
2	คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำและเอทานอล.....22
3	โครงสร้างทางเคมีและคุณสมบัติของเอทิลแล็กเตทบริสุทธิ์.....24
4	กรดไขมัน (fatty acid) ที่เป็นองค์ประกอบของน้ำมันที่ได้จากพืชชนิดต่าง ๆ.....27
5	ความเข้มข้นของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ในขณะเริ่มต้นและเมื่อถึงจุดสมดุลของปฏิกิริยา การทดลองนี้ใช้อุณหภูมิในการทดลองที่ 70 องศาเซลเซียส pH 2.0 และค่าผลผลิตโดยโมลของ เอทิลแล็กเตท (ELA) คำนวณจากปริมาณของเอทิลแล็กเตท ณ จุดสมดุลเทียบกับปริมาณของ แล็กเตท ณ จุดเริ่มต้น.....39
6	การแยกไอผ่านเยื่อแผ่นของสารละลายเอทานอล ณ สภาวะการทำงานที่แตกต่างกัน โดยใช้ เมมเบรนเซรามิกชนิดโซเดียมเอ และอัตราการไหลของสารละลายเอทานอลที่ 0.70 กิโลกรัมต่อ ชั่วโมง.....41
7	สภาวะของอุณหภูมิและความดันที่ใช้ ระหว่างขั้นตอนการกลั่นเอทิลแล็กเตทบริสุทธิ์ โดย T_1 คือ อุณหภูมิของของเหลวส่วน T_2 คืออุณหภูมิของไอน้ำตามลำดับ.....46



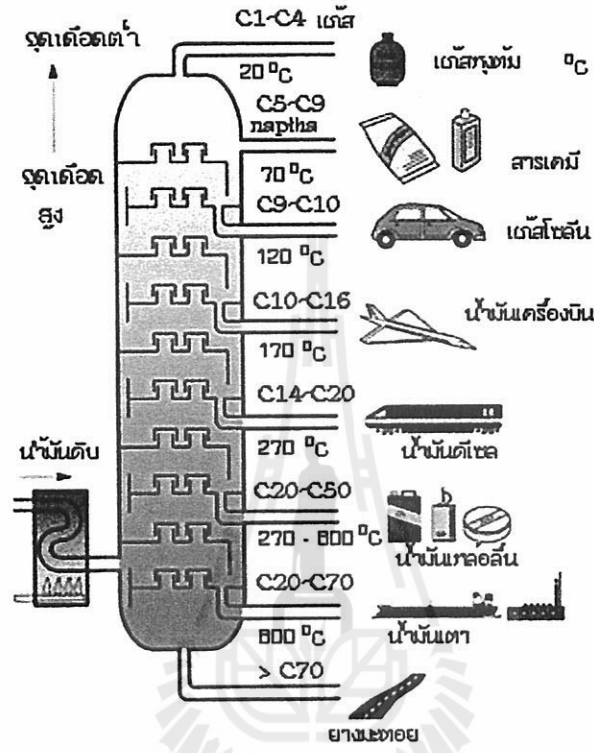
1. บทนำ

1.1 น้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์โบจากปิโตรเลียม

ปิโตรเลียม หรือน้ำมันดิบ เป็นทรัพยากรธรรมชาติที่สามารถพบได้ในชั้นหินในบางพื้นที่ของโลก และประกอบไปด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดต่าง ๆ และมีโลหะหนักชนิดต่าง ๆ ปะปนมาด้วย ซึ่งสารไฮโดรคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบนั้น จะมีความผันแปรไปตามแหล่งของน้ำมันดิบที่ขุดขึ้นมาได้ แต่โดยส่วนรวมแล้วจะมีส่วนประกอบที่คล้ายกันโดยส่วนมากมักจะเป็นสารประเภทอัลเคน (alkane) ไซโคลอัลเคน (cycloalkane) และสารประกอบประเภทอะโรมาติก (aromatic compounds) และเมื่อทำการวิเคราะห์ถึงแร่ธาตุที่เป็นส่วนประกอบแล้วนั้นจะพบว่าน้ำมันดิบ ประกอบไปด้วยธาตุต่าง ๆ โดยประมาณ ดังนี้ คาร์บอนร้อยละ 83-89 ไฮโดรเจนร้อยละ 10-14 ไนโตรเจนร้อยละ 0.1-2 ออกซิเจนร้อยละ 0.1-1.5 ซัลเฟอร์ร้อยละ 0.5-6 และโลหะ ซึ่งมีประมาณ 1000 ppm ไฮโดรคาร์บอนชนิดแรกคือพาราฟิน ซึ่งเป็นชื่อเรียกรวมๆของสารประกอบในกลุ่มอัลเคน ซึ่งมีสูตรเคมี อย่างคร่าว ๆ คือ C_nH_{2n+2} โดยจะมีลักษณะโมเลกุลเป็นแบบสายโซ่ยาวหรือเป็นกิ่งก้านก็ได้ และจะมีการ จับกันของคาร์บอนอะตอมด้วยพันธะเดี่ยว พาราฟินชนิดที่เล็กที่สุดคือมีเทน (CH_4) ซึ่งเป็นส่วน ประกอบหลักของก๊าซธรรมชาติ ส่วนแนฟทีนนั้นจะหมายถึงสารประกอบในพวกไซโคลอัลเคน ซึ่งจะมี คาร์บอนอะตอมจับกันในลักษณะที่เป็นวงแหวน อาจจะมี 1 วงหรือมากกว่านั้นก็ได้ ยกตัวอย่างเช่น cyclohexane เป็นต้น ส่วนสารประกอบอะโรมาติกนั้นจะ สารเคมีในกลุ่มที่มีวงแหวนของคาร์บอน หกอะตอมจับตัวกันด้วยพันธะคู่และพันธะเดี่ยวสลับกันไป ซึ่ง เรียกว่าวงแหวนเบนซีน (benzene ring) ยกตัวอย่าง เช่น เบนซีน โทลูอิน (toluene) และ ไซลีน (xylene) เป็นต้น ส่วนไฮโดรคาร์บอนชนิดสุดท้ายคือแอสฟัลท์หรือบิทูเมนซึ่งเป็นส่วนที่เหลือสุดท้ายจากการกลั่นลำดับส่วนของน้ำมันดิบ มีลักษณะเป็นของเหลวข้นหนืด มีสีดำ มักนำไปใช้ในการปูพื้นถนนเป็น อยางมะตอย

น้ำมันปิโตรเลียม นั้น จัดได้ว่าเป็นผลิตภัณฑ์ทางธรรมชาติที่ได้จากการสลายตัวของสิ่งมีชีวิต ทั้งพืช และสัตว์รวมกัน โดยผ่านกระบวนการบีบอัดภายใต้อุณหภูมิสูงภายใต้เปลือกโลก เป็นเวลาหลายล้านปี ใน สภาวะที่ไร้ออกซิเจน โดยน้ำมันดิบที่ผ่านการบีบขึ้นมายังผิวโลกนั้น จะถูกนำไปกลั่นแบบลำดับส่วน (fractionation distillation) เพื่อแยกเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ เช่น ก๊าซหุงต้ม (liquidified petroleum gas, LPG) น้ำมันเบนซิน เคอโรซีน (kerosene) สำหรับเครื่องบินเจ็ต น้ำมันดีเซล น้ำมัน เตา และบิทูเมน เป็นต้น สำหรับน้ำมันเครื่องบินไอพ่นนั้น จะเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีช่วงจุดเดือด เช่นเดียวกับน้ำมันก๊าดแต่สะอาดบริสุทธิ์ มีคุณสมบัติดีกว่าน้ำมันก๊าด ทั้งนี้ น้ำมันเครื่องบินไอพ่นแบ่งได้เป็น 2 เกรดคือ น้ำมันเครื่องบินไอพ่นทหาร ใช้ในกิจการทหาร มีองค์ประกอบของไฮโดรคาร์บอนเบา ที่ระเหย อยู่มาก ทำให้เครื่องบินสามารถเร่งอัตราความเร็วสูง และน้ำมันเครื่องบินไอพ่นพาณิชย์ใช้ในการพาณิชย์ เครื่องบินมีความเร็วไม่สูงมากนัก ในเครื่องยนต์เจ็ท จะใช้น้ำมันเชื้อเพลิงที่ให้อัตราการ เผาไหม้ที่สูง เพื่อให้

ได้ผลทางประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดนี้เราเรียกว่า น้ำมันเครื่องบิน เจ็ทเอวัน (JET A-1 หรือ JP-1) ซึ่งเป็นน้ำมันที่อยู่ในระดับเดียวกับน้ำมันก๊าด (Kerosene) มีคุณภาพที่ดีกว่าน้ำมันก๊าดที่ขายในท้องตลาด ซึ่งมีลักษณะใสไม่มีสีเหมือนน้ำ



รูปภาพ 1 การกลั่นลำดับส่วนของปิโตรเลียมเพื่อได้ผลิตภัณฑ์ชนิดต่าง ๆ

น้ำมันอากาศยานเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์ไบน์ ได้จากการนำน้ำมันดิบมาผ่านกระบวนการกลั่นบรรยากาศในส่วนตรงของ straight-run kerosene การพัฒนาน้ำมันอากาศยานเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์ไบน์ ได้มีการคำนึงถึงความปลอดภัยมากขึ้น ปัจจุบันถูกปรับปรุงมาเป็น JP-8 ส่วนน้ำมันอากาศยานเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์ไบน์ที่ใช้ในเชิงพาณิชย์เป็นผลิตภัณฑ์เดียวกันทั่วโลกคือ Jet A-1 คุณสมบัติที่ต้องการสำหรับน้ำมันอากาศยานเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์ไบน์ จะต้องมียอดประกอบทางเคมีเป็นสารไฮโดรคาร์บอนเกือบทั้งหมด มีสารประกอบกำมะถันและสารเพิ่มคุณภาพปนอยู่เล็กน้อย จะต้องมีการควบคุมปริมาณ สารประเภทโอรมาติกให้อยู่ในปริมาณที่จำกัดเนื่องจากจะทำให้เกิดการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ เกิดควันมาก และมีการสะสมของคาร์บอนในเครื่องยนต์อีกด้วย

คุณสมบัติที่เด่นของน้ำมันอากาศยานเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์ไบน์ ได้แก่ ค่าความหนาแน่นและความร้อนจากการเผาไหม้ (Density and Heat of Combustion) โดยค่าความหนาแน่นของน้ำมันเชื้อเพลิง เป็น

การวัดหน่วยมวลต่อปริมาตร น้ำมันเชื้อเพลิงที่มีความหนาแน่นสูงจะให้ความร้อนต่อหน่วย ปริมาตร สูง ส่วนค่าความร้อนจากการเผาไหม้เป็นค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้ น้ำมันเชื้อเพลิงกับ ออกซิเจนที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติความคงตัวต่อความร้อน (Thermal Stability) และคุณสมบัติที่อุณหภูมิต่ำ (Low – Temperature Properties) ซึ่งเป็นคุณสมบัติ ที่จะต้องคำนึงถึงเป็นอย่างมากในการผลิตน้ำมันอากาศยานเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์โบเน่ คุณสมบัติน้ำมัน อากาศยานเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์โบเน่ กำหนดตาม MIL-DTL-83133E เป็นที่คาดการณ์กันว่าน้ำมัน บีโตรีเลียมมีแนวโน้มที่จะหมดลงไปภายในอนาคตข้างหน้า เนื่องจากปริมาณการสำรวจและขุดเจาะ ขึ้นมาใช้มีมากกว่าอัตราการเกิด ประเทศไทยนั้นจะต้องมีการตื่นตัวและต้องมีการเตรียมพร้อมรับกับ สถานการณ์ในวันข้างหน้า ทั้งนี้เนื่องจากประเทศไทยมีแหล่งน้ำมันบีโตรีเลียมเพียงเล็กน้อยเท่านั้น จึงต้อง นำเข้าจากต่างประเทศเกือบทั้งหมด

1.2 คุณสมบัติในการเป็นเชื้อเพลิงของน้ำมันเจ็ต

การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของน้ำมันเจ็ต มีความหมายและผลกระทบต่อพฤติกรรมกาเผาไหม้ของเชื้อเพลิง ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

1.2.1 อุณหภูมิการกลั่น (Distillation)

คือความสามารถในการระเหยของน้ำมันซึ่งวัดโดยการกลั่น สมบัติข้อนี้มีความสำคัญต่อการทำงานของเครื่องยนต์ การใช้เชื้อเพลิงที่ระเหยง่ายเกินไปจะทำให้กำลังและประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ลดลงเนื่องจากอาจเกิด Vapour locks ในระบบเชื้อเพลิงหรือหยดน้ำมันเชื้อเพลิงที่ถูกฉีดออกจากหัวฉีด ไม่สามารถไปไกลได้เท่าที่ควร โดยทั่วไปช่วงการกลั่นของน้ำมันควรต่ำสุด โดยไม่ทำให้สมบัติทางด้านจุดวาบไฟ การลุกติดไฟ ค่าความร้อนตลอดจนค่าความใสเปลี่ยนไป การระเหยตัวและค่าการกลั่นที่เหมาะสม จะช่วยให้ เครื่องยนต์ติดง่ายและเกิดควันจากท่อไอเสียน้อย เครื่องยนต์มีกำลังและประหยัดเชื้อเพลิง

1.2.2 จุดวาบไฟ (Flash point)

อุณหภูมิที่น้ำมันได้รับความร้อนแล้วสามารถทำให้เกิดการผสมระหว่างอากาศและไอของ น้ำมันเหนือของเหลวแล้วติดไฟได้เมื่อมีประกายไฟเพียงเล็กน้อย หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือเป็นอุณหภูมิต่ำสุดที่น้ำมัน จะลุกวาบไฟได้ ซึ่งจุดวาบไฟเป็นจุดที่บอกถึงความปลอดภัยในการเก็บรักษามีความสำคัญในด้านอันตราย จากอัคคีภัยในการขนส่งและการใช้งานเท่านั้น แต่ไม่มีความสำคัญโดยตรงต่อการสันดาป และประสิทธิภาพ ของเครื่องยนต์นอกจากนี้ยังใช้จุดวาบไฟ สำหรับการตรวจสอบหากมีน้ำมันชนิดเบาเจือปนอยู่

1.2.3 ค่าความร้อน (Heating value)

แสดงถึงปริมาณความร้อนที่เชื้อเพลิงปล่อยออกมาเมื่อมีการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งค่าความร้อน จะรวมความร้อนจากการควบแน่นไอน้ำที่เกิดปฏิกิริยาและความชื้นของเชื้อเพลิงค่านี้แสดงถึงพลังงานสูงสุดของเครื่องยนต์ที่สามารถเป็นไปได้ในทางทฤษฎี

1.2.4 ค่าความหนืด (Viscosity)

เป็นค่าแสดงความต้านทานการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการเคลื่อนที่ของของไหล ซึ่งเกิดจากแรง ยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล และบอกถึงคุณสมบัติในการหล่อลื่นพื้นผิวด้วย มีผลต่อการทำงานของปั๊มและ หัวฉีด เพราะถ้าใสเกินไปหรือข้นเกินไปจะฉีดเป็นฝอยได้ไม่ค่อยดีเป็นผลเสียต่อการเผาไหม้ ทำให้กำลังของเครื่องยนต์ตกลงและเกิดควันดำ เครื่องยนต์รอบต่ำสามารถใช้น้ำมันที่มีความหนืดสูงกว่าเครื่องยนต์รอบสูง ความหนืดของน้ำมันมีความสำคัญมากในการใช้งาน เพราะเป็นเครื่องบอกถึงความต้านทานการไหลตัวของน้ำมันและบอกถึงคุณสมบัติในการหล่อลื่นพื้นผิวด้วย

1.2.5 ความหนาแน่น (Density)

เป็นค่าที่บอกถึงน้ำหนักของเชื้อเพลิงต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรที่อุณหภูมิคงที่ค่าหนึ่ง ซึ่งจะมีผลต่อประสิทธิภาพของเครื่องยนต์โดยตรง กล่าวคือ การฉีดเชื้อเพลิงในแต่ละครั้งเครื่องยนต์จะวัดค่าในรูปของปริมาตร ดังนั้นเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันที่มีความหนาแน่นมากกว่าจะให้กำลังและโอกาสเกิดควันได้มากกว่า เนื่องจากมีมวลของน้ำมันเชื้อเพลิงที่เผาไหม้มากกว่า โดยทั่วไปความหนาแน่นที่ยอมรับได้จะมีค่าระหว่าง 0.8 - 0.86 กิโลกรัมต่อลิตร ซึ่งมาตรฐานของน้ำมันเจ็ต A และ A-1 แสดงในตาราง 1

ตาราง 1 มาตรฐานคุณสมบัติของน้ำมันเจ็ต A และ เจ็ต A-1

คุณสมบัติ	Jet A-1	Jet A
Flash point	42 °C	51.1 °C
Auto-ignition temperature	210 °C	
Freezing point	-47 °C	-40 °C
Open air burning temperatures	260-315 °C	
Density at 15 °C	.804 kg/L	.820 kg/L
Specific energy	43.15 MJ/kg	43.02 MJ/kg
Viscosity at -20 °C	8.0 (cSt)	
Energy density	34.7 MJ/L	35.3 MJ/L

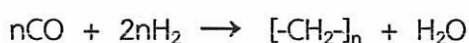
1.3 น้ำมันเชื้อเพลิงอากาศยานหรือน้ำมันเจ็ตสังเคราะห์

ขณะนี้ในหลายประเทศ ได้ให้ความสำคัญกับงานวิจัยและพัฒนาการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงอากาศยานจากพลังงานทดแทน โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงที่นำมาใช้กับอากาศยาน ซึ่งเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีคุณลักษณะเฉพาะ มีความโดดเด่นสูงในด้านสมรรถนะและต้องให้เกิดความปลอดภัยในการทำการบินสูงด้วย สำหรับน้ำมันเชื้อเพลิงจากพลังงานทดแทนที่จะนำมาใช้กับอากาศยาน

นั้น นอกจากต้องมีคุณสมบัติด้านสมรรถนะเช่นเดียวกับน้ำมันเชื้อเพลิงอากาศยานเดิมแล้ว ยังต้องมีคุณสมบัติอื่นๆเช่นเดียวกันกับน้ำมันเชื้อเพลิงอากาศยานเดิมทุกประการอีกด้วย สำหรับน้ำมันเชื้อเพลิงอากาศยานจากพลังงานทดแทนที่มีศักยภาพนั้น จากการทำการทบทวนวรรณกรรม พบว่าเทคโนโลยีสำหรับการสังเคราะห์นั้นสามารถแบ่งเป็นประเภทต่าง ๆ ดังนี้คือ การย่อยสลายชีวมวลให้ได้เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับอากาศยาน และการสังเคราะห์ขึ้นมาใหม่จากชีวมวลต่างๆ ซึ่งในที่นี้จะกล่าวโดยสังเขป ดังนี้

1.3.1. น้ำมันสังเคราะห์โดยกระบวนการฟิชเชอร์-ทรอปช์ (Fischer-Tropsch process)

กระบวนการฟิชเชอร์-ทรอปช์เป็นปฏิกิริยาเคมีที่มีสารตั้งต้น คือ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (carbon monoxide) และ ไฮโดรเจน (hydrogen) และมีตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ร่วมด้วย ซึ่งได้จากการสังเคราะห์ชีวมวลต่าง ๆ โดยจะอยู่ในรูปของก๊าซเรียกว่า synthesis gas หรือ syngas กระบวนการฟิชเชอร์-ทรอปช์ เกิดขึ้นได้โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นโลหะ ที่มักนิยมใช้กัน ได้แก่ เหล็กและ โคบอลต์ โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่และสายยาวขึ้น โดยองค์ ประกอบของ ก๊าซสังเคราะห์ที่ได้จะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจน กับก๊าซคาร์บอน มอนอกไซด์ และตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งโดยรวมแล้วจะอยู่ในรูปของน้ำมันดิบสังเคราะห์ (Syn-Crude) โดยเมื่อนำไปปรับปรุงคุณภาพ ก็จะทำให้ได้น้ำมันเชื้อเพลิงสังเคราะห์สำหรับอากาศยานในที่สุด กล่าวโดยสรุปแล้ว ใน การผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงสังเคราะห์สำหรับอากาศยานโดยกระบวนการฟิชเชอร์-ทรอปช์นี้ จะมีขั้นตอนหลัก ๆ ที่สำคัญ 3 ขั้นตอนคือ 1. การผลิตก๊าซสังเคราะห์ (Synthesis Gas , Syngas, Production) ก๊าซสังเคราะห์ซึ่งมีองค์ประกอบสำคัญคือ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจนนั้น สามารถผลิตได้จากแหล่งต่างๆได้แก่ ถ่านหิน (ซึ่งเมื่อนำไปผลิตจนได้เชื้อเพลิง เหลวจะเรียกว่า Coal To Liquid : CTL), ก๊าซธรรมชาติ (Gas To Liquid ; GTL) , ชีวมวล (Biomass To Liquid ; BTL) เป็นต้น ก๊าซสังเคราะห์ที่ได้จะถูกนำไปทำปฏิกิริยาเคมีในขั้นตอนต่อไป 2. การนำก๊าซสังเคราะห์ผ่านกระบวนการ ฟิชเชอร์-ทรอปช์ (Fischer-Tropsch Liquid Synthesis) ซึ่งขั้นตอนนี้จะได้รับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนสายตรง ซึ่งมีขนาดความยาวต่างๆ กันขึ้นอยู่กับอัตราส่วน ของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์และก๊าซไฮโดรเจน ตัวเร่งปฏิกิริยาและสภาวะของการทำปฏิกิริยาโดยมี สมการเคมีของการเกิดปฏิกิริยาคือ



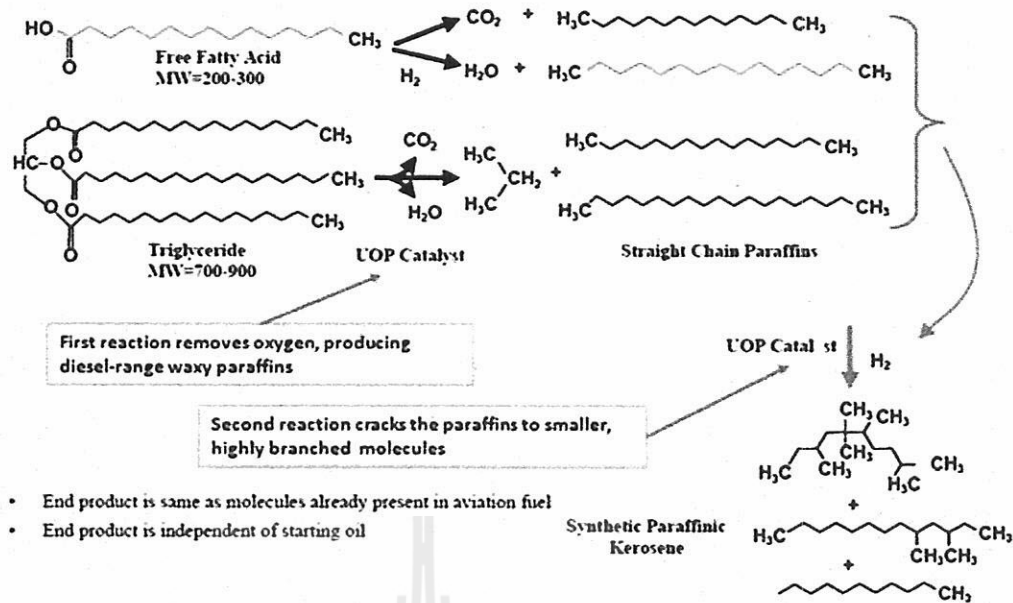
จากนั้นจะเป็นการนำน้ำมันดิบสังเคราะห์ที่ได้นี้ ไปเข้าสู่กระบวนการต่างๆ เช่น การตัดสายโซ่ให้สั้นลง (Cracking) การปรับตำแหน่งอะตอม (Rearranging) เพื่อให้ได้น้ำมันเชื้อเพลิงสังเคราะห์ประเภทที่ต้องการใช้งาน ได้แก่ แนฟทา (naphtha) สำหรับผลิตน้ำมันเบนซิน, เคโรซีน (Kerosine) สำหรับผลิตน้ำมันอากาศยาน และน้ำมันดีเซล สำหรับรถยนต์ เป็นต้น น้ำมันเชื้อเพลิงสังเคราะห์โดย

กระบวนการฟิชเชอร์-ทรอปช์นี้มีความบริสุทธิ์สูง ไม่มีกำมะถัน หรือไนโตรเจนเจือปนเหมือนน้ำมันเชื้อเพลิงอากาศยานเดิม และยังมีสารอโรมาติกเจือปนด้วย ซึ่งมีข้อดีคือ ทำให้การเผาไหม้ของเครื่องยนต์สะอาด ไม่มีเขม่า รวมทั้งไม่มีมลพิษปล่อยออกมาอีกด้วย แต่อย่างไรก็ตามกระบวนการ ฟิชเชอร์-ทรอปช์เป็นขั้นตอนที่ต้องใช้พลังงานสูงในระหว่างปฏิบัติการและค่า yield ของน้ำมันเจ็ทที่ต้องการนี้มีค่าค่อนข้างต่ำ เนื่องจากจะเกิดผลพลอยได้ (by-product) มากมาย

1.4 น้ำมันเจ็ทสังเคราะห์ทางชีวภาพ (Bio-Derived Jet Fuel)

1.4.1 Hydro-treated Renewable Jet fuel : HRJ fuel

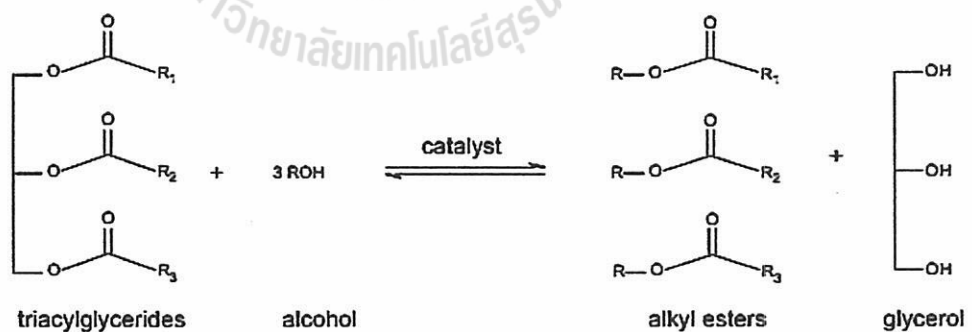
เชื้อเพลิงชีวภาพชนิดนี้ จะใช้น้ำมันพืชหรือน้ำมันต่าง ๆ เช่น น้ำมันจากสบู่ดำ น้ำมันปาล์ม น้ำมันมะพร้าว เป็นต้น โดยมาทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเพื่อให้อยู่ในรูปของ Hydro-treated Renewable Jet fuel : HRJ fuel ได้เป็นน้ำมันดิบจากพืช ก่อนเข้าสู่กระบวนการ Hydroprocessing แล้วได้ ผลผลิตออกมาเป็นน้ำมันเจ็ทในที่สุด นอกจากพืชน้ำมันที่คุ้นเคยคืออยู่แล้ว เช่น สบู่ดำ ในปัจจุบัน ยังมีสิ่งมีชีวิตจำพวกพืชให้น้ำมันอีกชนิดหนึ่งที่น่าสนใจเป็นอย่างมาก คือ สาหร่าย โดยน้ำมันจากสาหร่ายจะถูกนำเข้าสู่การผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงอากาศยานตามกระบวนการ HRJ เช่นเดียวกัน (รูปภาพ 2) ซึ่งการสังเคราะห์เชื้อเพลิงชีวภาพด้วยกระบวนการนี้ จะใช้หลักการที่ว่าองค์ประกอบหลักของน้ำมัน จากพืชประกอบด้วย Triglycerides และ Free fatty acid จะผ่านเข้าสู่ขั้นตอนการกำจัดออกซิเจน ออกไปจากโครงสร้างโมเลกุลก่อนแล้วเติมไฮโดรเจนลงไปเพื่อให้ได้น้ำมันเชื้อเพลิงสังเคราะห์ตามต้องการ โดยมีขั้นตอนของปฏิกิริยาสำคัญ 2 ขั้นตอน เริ่มจากการนำน้ำมันพืชไปผ่านขั้นตอนการทำความสะอาด เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของ Triglycerides และ Free fatty acid มีรูปร่างเป็นสายโซ่ยาว และมีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย จากนั้นจะถูกนำเข้าสู่ขั้นตอนทำให้โครงสร้างโมเลกุลเป็นสายโซ่ที่สั้นลง และกำจัดออกซิเจนในโมเลกุลออกไป ในรูปของน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ โดยที่ขั้นตอนนี้จะทำให้ได้น้ำมันเชื้อเพลิงสังเคราะห์ ขนาดความยาวสายโซ่เป็นกลุ่มน้ำมันดีเซล (Diesel-range paraffins) ต่อจากนั้น จะนำน้ำมันเชื้อเพลิงสังเคราะห์ดังกล่าวมาแตกตัวด้วยไฮโดรเจนเพื่อให้ได้น้ำมันเชื้อเพลิงสังเคราะห์ขนาดความยาวสายโซ่น้ำมันเชื้อเพลิงอากาศยาน (Jet-range paraffins) โดยน้ำมันเชื้อเพลิงสังเคราะห์สำหรับอากาศยานที่ได้รับในขั้นตอนนี้จะมีการสร้างโมเลกุลในรูปแบบเช่นเดียวกับน้ำมันเชื้อเพลิงอากาศยานแบบที่ใช้อยู่เดิม โดยน้ำมันเชื้อเพลิงสังเคราะห์ ที่ผ่านขั้นตอนปฏิกิริยาดังกล่าวแล้วนี้จะถูกนำไปกลั่น ซึ่งจะได้ผลผลิตเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงอากาศยาน น้ำมันเบนซินและน้ำมันดีเซลสำหรับรถยนต์



รูปภาพ 2 กระบวนการทางเคมีของเชื้อเพลิงชนิด HRJ

1.4.2 การผลิต Biojet ด้วยปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน (Trans-esterification)

นอกเหนือจากงานวิจัยการสังเคราะห์น้ำมันเชื้อเพลิงอากาศยานจากพืชน้ำมันชนิด HRJ แล้ว ยังมีเชื้อเพลิงชีวภาพอีกชนิดหนึ่งที่มีความน่าสนใจมากคือสารเคมีประเภทเอสเทอร์ซึ่งได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างเอทานอลที่ได้จากการหมักวัตถุดิบทางการเกษตรกับกรดอินทรีย์ หรือกรดไขมันที่ได้จากพืช ตามธรรมชาติ โดยทั่วไปแล้วกรดไขมันในสิ่งมีชีวิตจะอยู่ในรูปของไตรกลีเซอไรด์ (triglycerides) ซึ่งประกอบไปด้วยกลีเซอรอล 1 โมเลกุลและจับกับกรดไขมัน (fatty acid) 3 ชนิดด้วยพันธะเอสเทอร์ (ester bond) โดยปริมาณและชนิดของกรดไขมันนั้น จะขึ้นอยู่กับชนิดของสิ่งมีชีวิตเป็นสำคัญ



รูปภาพ 3 ปฏิกิริยา Trans-esterification ระหว่างไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์

รูปภาพ 3 แสดงปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชัน (trans-esterification) ของไตรกลีเซอไรด์ และแอลกอฮอล์ (alcohol) โดยมีกรดหรือด่างเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ได้ผลิตภัณฑ์เป็นอัลคิลเอสเทอร์ (alkyl ester) และกลีเซอรอล ซึ่งสมดุลของปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างอัลกอฮอล์กับกรดอินทรีย์นั้น จะถูกจำกัด

ด้วยกลีเซอรอลที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา ทำให้เกิดเป็นสารเอสเทอร์ได้บางส่วนเท่านั้น หากต้องการที่จะเพิ่มผลผลิต (yield) จำเป็นที่จะต้องทำการปรับสมดุลของระบบ โดยทั่ว ๆ ไปแล้ว มักจะทำการกำจัดผลพลอยได้ออกจากระบบ (กลีเซอรอล) ส่งผลให้สมดุลของระบบเลื่อนไปทางขวา และเมื่อปฏิกิริยาเกิดขึ้นโดยสมบูรณ์แล้วก็จะทำการกลั่นแยกเอาเอทานอลส่วนเกินและเอสเทอร์ออกจาก กัน เนื่องด้วยหัวหน้าโครงการวิจัยได้มีความเชี่ยวชาญในการผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลซึ่งสามารถนำไปใช้ทดแทนเครื่องยนต์เบนซินได้อยู่แล้ว จึงได้มีแนวความคิดเพิ่มเติมในการเพิ่มมูลค่าของเชื้อเพลิงเอทานอล โดยนำไปใช้ ในการเพิ่มคุณสมบัติของการเป็นเชื้อเพลิงให้กับเครื่องยนต์ประเภทอื่น ๆ ด้วย ซึ่งเชื้อเพลิงอีกชนิดหนึ่ง ที่มีความสำคัญต่อประเทศไทยในด้านของการคมนาคมขนส่งและการผลิตพลังงานด้านกระแสไฟฟ้า คือ น้ำมัน ที่อยู่ในกลุ่มของดีเซลและเคโรซีนหรือน้ำมันเครื่องบิน ซึ่งในปัจจุบัน น้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพที่มีศักยภาพ ในการใช้ทดแทนประเภทน้ำมันดังกล่าวจากปิโตรเลียมก็คือ เอสเทอร์ของกรดไขมัน (ester of fatty acid) ซึ่งกรดไขมันนั้นจะได้มาจากน้ำมันหรือไขมันจากสัตว์หรือพืชที่เรียกว่าไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride) โดยมีองค์ประกอบทางเคมีคือกลีเซอรอลซึ่งมีหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl, -OH) ยึดเกาะด้วยพันธะเอสเทอร์ (ester bond) กับหมู่พันธะคาร์บอกซิลิก (Carboxylic, -COOH) ของกรดไขมันชนิดต่าง ๆ ส่วนอัลกอฮอล์นั้น แต่เดิมมักจะใช้เมทานอลซึ่งเป็นสารที่มีพิษสูง ประกอบกับเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปิโตรเลียม ทำให้ราคาของ เมทานอลมีความผันผวนเป็นอย่างมาก ดังนั้นในข้อเสนอโครงการวิจัยนี้ จึงได้มุ่งเน้นการใช้เอทานอล เป็นสารตัวรับเอซิล (acyl receptor) จากไตรกลีเซอไรด์เพื่อผลิตเป็นเอทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (FAEE) โดยสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับเครื่องยนต์ชนิดต่าง ๆ โดยจะขึ้นอยู่กับขนาดของกรดไขมันนั้น ๆ เช่น เอทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันที่เป็นสายยาว (long chain fatty acid) จะมีจุดเดือดประมาณ 250-270 องศาเซลเซียส เหมาะสำหรับเครื่องยนต์ดีเซล ส่วนเอทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันที่เป็นสายกลาง (medium chain fatty acid) จะมีจุดเดือดต่ำกว่า คือประมาณ 170-220 องศาเซลเซียส เหมาะสำหรับเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์โบหรือเครื่องยนต์ไอพ่น เป็นต้น

1.5 การผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลโดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

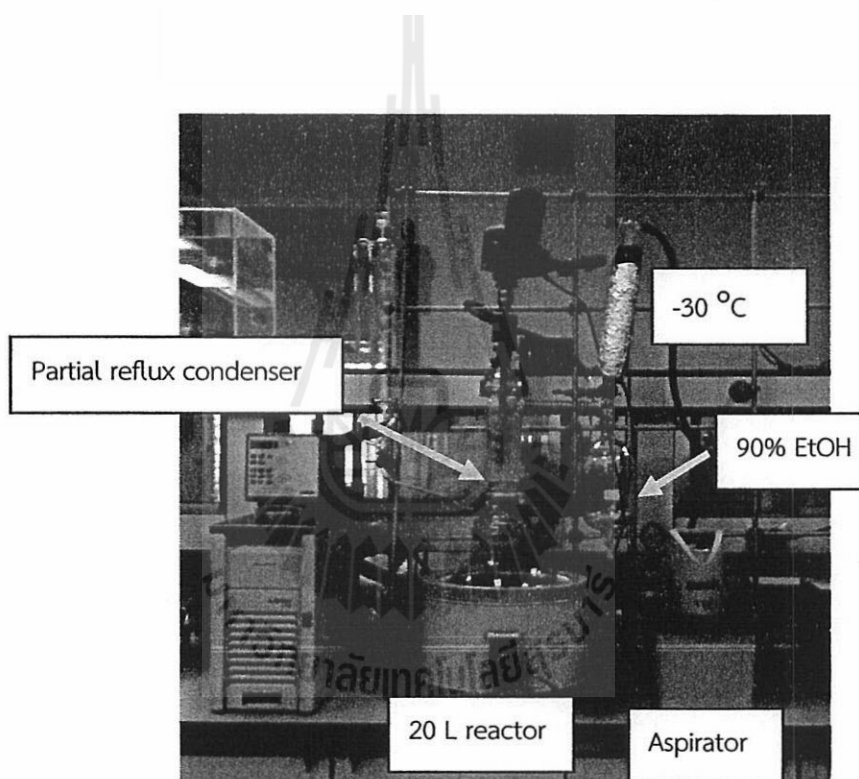
หัวหน้าโครงการวิจัยมีประสบการณ์ในการทำงานวิจัยเกี่ยวกับการผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลมาเป็นเวลากว่า 10 ปีแล้ว โดยได้แบ่งงานวิจัยออกเป็นสองด้านใหญ่ ๆ คือ การพัฒนาระบบการแยกผลิตภัณฑ์เอทานอลควบคู่กับกระบวนการหมักและการพัฒนาเมมเบรนแบบเซรามิกเพื่อจุดประสงค์ในการกำจัดน้ำด้วยเทคนิคการแยกไอผ่านเยื่อแผ่น (vapor permeation) และผลิตเป็นเชื้อเพลิงเอทานอลต่อไป

1.5.1 การแยกเอทานอลควบคู่กับกระบวนการหมักด้วยเทคนิคการกลั่นลำดับส่วนแบบ สุญญากาศ

เอทานอลเป็นสารเคมีที่สำคัญสำหรับการผลิต E100 ไบโอดีเซลและไบโอเจ็ต โดยทั่วไปแล้ว ไตรกลีเซอไรด์เป็นสารที่ผลิตได้ไม่มากนัก เนื่องจากมีการสะสมตัวอยู่ในเซลล์ของสิ่งมีชีวิตอยู่แล้วทั้งพืช และสัตว์ แต่เอทานอลนั้นเป็นสารที่ทำบริสุทธิ์ได้ยาก ถึงแม้จะทำการหมักได้ง่ายก็ตาม ซึ่งจำเป็นต้องใช้ หอกกลั่นลำดับส่วน ซึ่งมีราคาแพง นอกจากนี้แล้วการกลั่นเอทานอลจะเกิดของผสมที่เรียกว่าอะซีโอโทรป (azeotrope) ที่ความเข้มข้นร้อยละ 95.6 โดยน้ำหนัก ดังนั้นการผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลจึงต้อง มีขั้นตอนเพิ่มขึ้นอีกหนึ่งขั้นตอนคือการกำจัดน้ำออกจากของผสมอะซีโอโทรปเพื่อผลิตเป็นเอทานอลไร้น้ำ เพื่อให้มีการดำเนินการตามยุทธศาสตร์เพื่อการขับเคลื่อนนโยบายสู่เป้าหมายภายใต้แผนอนุรักษ์พลังงาน 20 ปี ยุทธศาสตร์ที่ 6 ที่ว่าด้วยการพึ่งพาตนเองด้านเทคโนโลยีเพื่อลดต้นทุนเทคโนโลยี และเพิ่มโอกาส การเข้าถึงเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพ โครงการนี้จึงได้พัฒนากระบวนการผลิตเอทานอลให้มีต้นทุนการผลิต ที่ถูกลง ส่งผลทำให้การพัฒนาการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลและไบโอเจ็ตมีความเป็นไปได้ในเชิงพาณิชย์มากขึ้น นักวิจัยจึงได้มีแนวความคิดใหม่ในการพัฒนาระบบการหมัก โดยการแยกเอทานอลออกจากน้ำหมักควบคู่ ไปกับกระบวนการหมัก (*in situ product removal* หรือ *extractive fermentation*) ซึ่งจากการ ทบทวนวรรณกรรมนั้น พบว่ามีการวิจัยเกี่ยวกับการแยกเอทานอลออกจากน้ำหมักโดยใช้ เทคนิคต่าง ๆ เช่น การใช้ตัวทำละลาย (solvent extraction) การใช้เยื่อแผ่น (pervaporation) และการใช้ สุญญากาศ (vacuum fermentation) เป็นต้น โดยแนวความคิดของการแยกผลิตภัณฑ์เอทานอลออกจาก กระบวนการหมักนี้ จะทำให้มีข้อดีหลายประการคือ เอทานอลจะถูกแยกออกจากระบบอยู่ตลอดเวลา ส่งผลให้ไม่เกิดความเป็นพิษของเอทานอลต่อเชื้อยีสต์ โดยที่ความเข้มข้นของเอทานอลในน้ำหมักมีค่าต่ำ อยู่เสมอ ทำให้สามารถทำการเพิ่มผลิตผล (volumetric productivity) ของเอทานอลได้ นอกจากนี้ จากการศึกษาที่ความเข้มข้นของเอทานอลในน้ำหมักต่ำ อยู่เสมอ ทำให้สามารถใช้ความเข้มข้นของยีสต์ที่สูง (high-cell-density fermentation) หรือการหมักด้วย น้ำตาลเข้มข้น (high substrate concentration) ได้ อันจะเป็นการส่งผลให้ขนาดของถังหมักเล็กลงเมื่อเทียบกับกำลังการผลิตที่เท่ากันจากการหมักแบบกะ (batch fermentation) เนื่องจากเชื้อยีสต์จะสามารถผลิตเอทานอลได้ในปริมาณที่มากขึ้น สำหรับ กระบวนการหมักแบบกะ (Batch fermentation) นั้น หลังจากที่ทำการเติมกล้าเชื้อแล้ว เชื้อยีสต์จะใช้ เวลาประมาณ 3-4 วันในการหมักและได้ความเข้มข้นของเอทานอลในน้ำหมักก่อนกระบวนการกลั่น ลำดับส่วนประมาณร้อยละ 10-12 ขั้นตอนต่อไปคือการกลั่นลำดับส่วนเพื่อที่จะกลั่นเอทานอลให้ได้ ความเข้มข้นร้อยละ 95 โดยน้ำหนักต่อไป ส่วนการแยกควบคู่กับกระบวนการหมักนั้น (extractive fermentation) ขั้นตอนการแยกเอทานอลสามารถที่จะเริ่มได้หลังจากเติมเชื้อยีสต์ลงไป ประมาณ 3 ชั่วโมง แต่อย่างไรก็ตาม หากมีระบบที่สามารถแยกเอทานอลที่มีความเข้มข้นสูงกว่า 90 % ควบคู่กับกระบวนการ หมักได้นั้นก็จะเป็นประโยชน์อย่างมาก เนื่องจากสามารถนำเอทานอลที่ผลิตได้นี้เข้าสู่การ แยกน้ำเพื่อผลิต เป็นเชื้อเพลิงเอทานอลได้โดยตรง โดยไม่ต้องทำการกลั่นซ้ำอีกรอบหนึ่ง ซึ่งจากการพิจารณาสมบัติทาง ภายภาพและเคมีของเอทานอลนั้น พบว่ามีความสามารถในการกลายเป็นไอสูงกว่าน้ำ กล่าวคือเอ

ทานอล มีจุดเดือดอยู่ที่ 78 องศาเซลเซียส ดังนั้นกระบวนการที่เหมาะสมในการแยกเอทานอลออกจากน้ำ ก็คือการกลั่นลำดับส่วน ส่วนการใช้สมบัติอย่างอื่นจะทำให้การแยกทำได้ค่อนข้างยาก เช่นการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ในการสกัด จะพบปัญหาสำคัญคือ ค่าสัมประสิทธิ์การแยก (distribution coefficient) ที่ต่ำ โดยเฉพาะเอทานอลซึ่งสามารถละลายน้ำได้ดี เป็นต้น นอกจากนี้แล้วยังจำเป็นต้องทำการกลั่นลำดับส่วน เพื่อแยกผลิตภัณฑ์ออกจากตัวทำละลายอินทรีย์ภายหลังจากการสกัดอีกด้วย

นักวิจัยได้พัฒนาระบบการแยกเอทานอลควบคู่กับกระบวนการหมักด้วยระบบการกลั่นลำดับส่วนแบบสุญญากาศ โดยหลักการทำงานของระบบดังกล่าว จะทำการกลั่นแยกเอาเอทานอลออกมาจากระบบ ไปพร้อมกับกระบวนการหมัก และได้ทำการออกแบบหอกกลั่นลำดับส่วนประสิทธิภาพสูงขึ้นมา มีลักษณะเป็นท่อสองชั้น (jacket) ด้านบนต่อกับแกนหมุนและมีการติดชุดใบพัดเข้ากับแกนหมุนดังกล่าว



รูปภาพ 4 แสดงหลักการทำงานของระบบการแยกเอทานอลควบคู่กับกระบวนการหมักด้วยเทคนิค การกลั่นลำดับส่วนแบบสุญญากาศ

ในทางปฏิบัตินั้น เริ่มต้นจะทำการหมักเอทานอล โดยเติมยีสต์ลงไป 10 กรัมต่อลิตร และหลังจากเติมยีสต์ลงไปประมาณ 3 ชั่วโมง (รูปภาพ 4) จะทำการลดความดันบรรยากาศให้ต่ำลงเหลือประมาณ 65 มิลลิบาร์ด้วยเครื่องปั๊มสุญญากาศ ซึ่งจะส่งผลทำให้น้ำหมักเดือดที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส (ซึ่งเป็นอุณหภูมิการหมักปกติ) เอทานอลซึ่งมีจุดเดือดต่ำกว่าจะกลายเป็นไอ และลอยขึ้นสู่ด้านบนของหอกกลั่น โดยจะมีความเข้มข้นของเอทานอลบริเวณผิวหน้าของน้ำหมักประมาณร้อยละ 25 เท่านั้น แต่เมื่อไอผสมของน้ำและ

เอทานอลลอยเข้าสู่บริเวณที่มีการควบคุมอุณหภูมิด้วยท่อแลกเปลี่ยนความร้อน (Jacket หรือ partial reflux condenser) จะมีการใช้ระบบทำความเย็น (Thermostat) ในการลดอุณหภูมิของไอผสมดังกล่าวลง ซึ่งหากควบคุมอุณหภูมิให้เหมาะสม จะทำให้เกิดการควบแน่น ของน้ำบางส่วนกลายเป็นของเหลวไหลกลับลงสู่ถังหมัก ก่อนที่ไอของเอทานอลบริสุทธิ์ความเข้มข้นร้อยละ ประมาณ 90 โดยน้ำหนักจะยังคงสถานะที่เป็นไอและถูกแยกออก กลายเป็นส่วนกลั่น (distillate) ต่อไป ซึ่งในห้องปฏิบัติการนั้น ส่วนกลั่นนี้จะถูกทำให้ควบแน่นเป็นของเหลวโดยใช้อุณหภูมิเย็นจัด (-30 องศา เซลเซียส) โดยส่วนกลั่นของเอทานอลที่ทำการควบแน่นได้นี้ (รูปภาพ 5) สามารถที่จะนำไปเข้าสู่ กระบวนการแยกน้ำได้โดยตรง ซึ่งจะเห็นได้ว่า เราสามารถที่จะกำจัดหอกกลั่นที่ใช้กันอยู่ทั่วๆ ไปได้ ซึ่งหอกกลั่นนี้เป็นส่วนที่แพงที่สุดของโรงงานผลิตไบโอเอทานอล โดยจะทำให้ต้นทุนของกระบวนการผลิต เอทานอลลดลงเป็นอย่างมาก



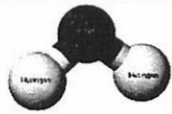
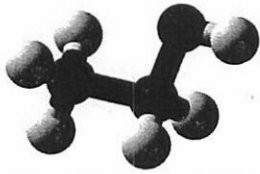
รูปภาพ 5 เอทานอล 90% ที่ผลิตได้จากการแยกเอทานอลด้วยการกลั่นลำดับส่วนแบบสุญญากาศ

1.5.2 การผลิตเอทานอลไร้น้ำ

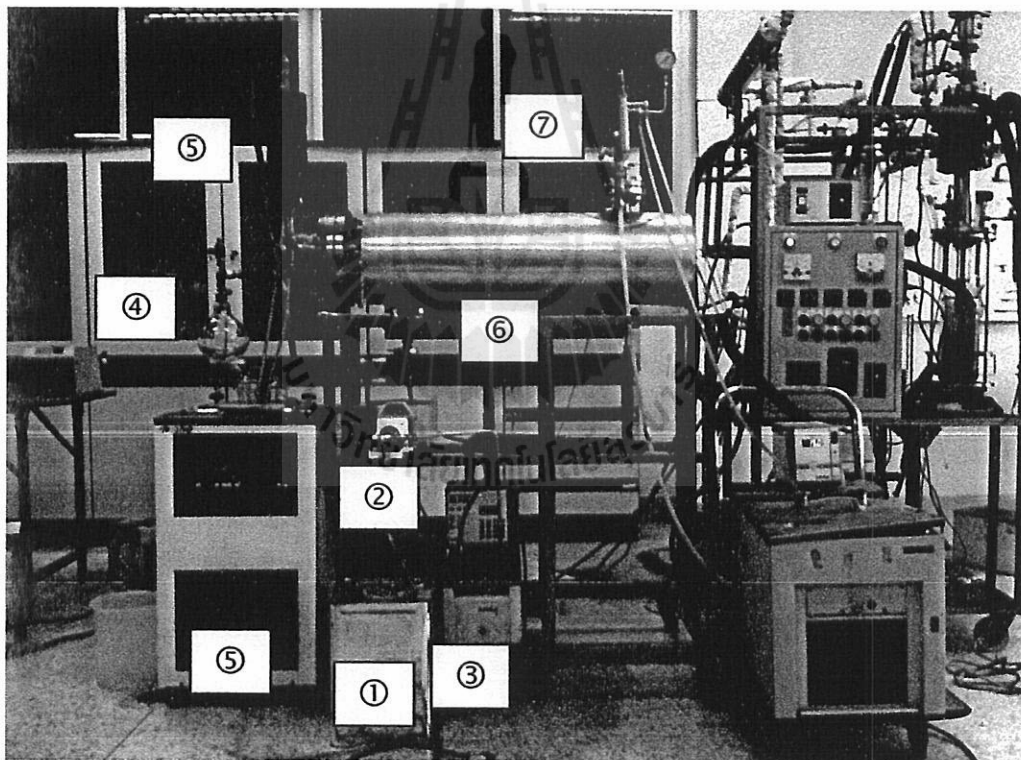
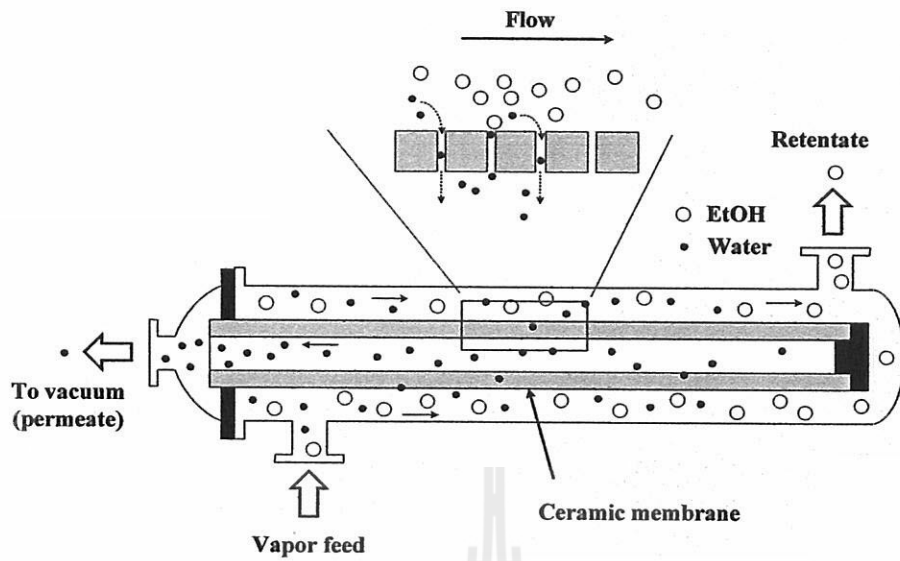
เนื่องจากการกลั่นเอทานอลด้วยความร้อนนั้น ความเข้มข้นของเอทานอลสูงสุดที่กลั่นได้ จะอยู่ที่ ร้อยละ 95.6 โดยน้ำหนัก ซึ่งของผสมเอทานอล/น้ำที่ความเข้มข้นนี้จะถูกเรียกว่าของผสมอะซีโอโทรป (azeotropic solution) และจะมีความเข้มข้นของน้ำประมาณร้อยละ 4.6 โดยน้ำหนัก จากตาราง 2 เรื่องมาตรฐานของเชื้อเพลิงเอทานอลจะเห็นได้ว่าปริมาณน้ำสูงสุดที่ยินยอมให้มีได้ในผลิตภัณฑ์เชื้อเพลิงเอทานอล

คือไม่เกินร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ดังนั้นการผลิตเอทานอลสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงนั้น จะต้องใช้ขั้นตอน พิเศษที่เพิ่มขึ้นจากการกลั่นลำดับส่วนเพื่อกำจัดน้ำออกจากสารละลายเอทานอล ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า ของผสมอะซีโโทรปของน้ำและเอทานอลจะไม่สามารถกลั่นแยกออกจากกันได้อีก ดังนั้นปัจจัยที่สำคัญ อย่างหนึ่งที่น่ามาพิจารณาในการแยกน้ำคือขนาดของโมเลกุล ซึ่งจะเห็นได้ว่าเอทานอลมีขนาดของโมเลกุล อยู่ที่ 4.4 อังสตรอม ส่วนโมเลกุลของน้ำจะมีขนาดเล็กกว่าคือ 2.6 อังสตรอม ซึ่งในทางทฤษฎีแล้ว เราสามารถแยกน้ำออกจากเอทานอลได้ถ้าหากใช้ตัวกลางที่มีขนาดของช่องประมาณ 3-4 อังสตรอมก็จะ สามารถทำให้โมเลกุลของน้ำผ่านช่องดังกล่าวได้ ส่วนโมเลกุลของเอทานอลซึ่งมีขนาดใหญ่จะไม่สามารถ ผ่านช่องนี้ไปได้ ซึ่งนักวิจัยได้ทำงานเกี่ยวข้องกับการแยกน้ำในสารละลายเอทานอลโดยการประยุกต์ ใช้เยื่อแผ่นชนิดที่ชอบน้ำ (hydrophilic membranes) และได้ทำการศึกษาเทคนิคที่เรียกว่า การแยกไอผ่านเยื่อแผ่น (vapor permeation, VP) โดยใช้แผ่นกรองเซรามิก (ceramic membrane) ที่มีขนาดของรูพรุน 3 อังสตรอมเพื่อทำการแยกน้ำออกจากเอทานอล เมื่อทำการบีบสารป้อน (เอทานอล 90-95%) ผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ 145 องศาเซลเซียส ความดันประมาณ 4 บรรยากาศ สารละลายเอทานอลจะเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอร้อน และจะเคลื่อนที่ผ่านผิวหน้าของเมมเบรนในทิศทาง ไหลตามขวาง (cross-flow) ส่วนในด้านของเพอร์มิเอท (permeate) จะทำการใช้ปั๊มสุญญากาศ ลดความดันลงเหลือ 5 มิลลิบาร์ ซึ่งผลต่างของความดันนี้จะเหนี่ยวนำให้เกิดการถ่ายเทมวลของสาร ผ่านผิวหน้าของเมมเบรน และเนื่องจากการที่ผิวหน้าของเมมเบรนมีสมบัติเป็น molecular sieve เฉพาะโมเลกุลของน้ำจะผ่านชั้นผิวของเมมเบรนได้ ในขณะที่เอทานอลซึ่งมีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเมมเบรน จะไม่ผ่านชั้นผิวของเมมเบรนได้ และจะเคลื่อนที่ผ่านผิวหน้าของเมมเบรนออกไปทาง retentate โดยที่ความเข้มข้นของน้ำในสารป้อนจะมีค่าลดลงเรื่อย ๆ ตามลำดับและหากมีการควบคุมสภาวะในการทำงานให้เหมาะสม ผลิตภัณฑ์เอทานอลที่ได้ในส่วนของ retentate ก็จะกลายเป็นเชื้อเพลิง เอทานอลได้ โดยจากการทดสอบในห้องปฏิบัติการ พบว่าสามารถผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลได้ ความเข้มข้นของน้ำต่ำสุด ที่ร้อยละ 0.1 โดยน้ำหนัก (99.9) ส่วนน้ำที่ถูกแยกออกจากระบบการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นนี้จะถูกทำให้ เกิดการควบแน่นในด้านของเพอร์มิเอท (permeate) โดยปฏิบัติการนี้มีจุดประสงค์หลักเพื่อที่จะทำให้ระบบ การแยกไอผ่านเยื่อแผ่นนี้ มีความเป็นไปได้ในเชิงพาณิชย์มากขึ้น เนื่องจากมีหลักการการทำงานที่ซับซ้อนน้อยกว่า การดูดซับแบบสลับความดัน (PSA) อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพการกำจัดน้ำของระบบการแยกไอ ผ่านเยื่อแผ่นดังกล่าว จะขึ้นอยู่กับสภาวะการทำงานหลายอย่าง เช่น ความเข้มข้นของน้ำในสารละลาย เอทานอล อัตราการป้อน อุณหภูมิ ความดันสุญญากาศ และความดันของไอเอทานอลในด้านของสารป้อน เป็นต้น

ตาราง 2 คุณสมบัติทางกายภาพของน้ำและเอทานอล

คุณสมบัติ	น้ำ	เอทานอล
จุดเดือด (1 atm)	100 องศาเซลเซียส	78.15 องศาเซลเซียส
ความหนาแน่น	1.00×10^3 (กรัมต่อลิตร)	0.78×10^3 (กรัมต่อลิตร)
สูตรโมเลกุล	H ₂ O	CH ₃ CH ₂ OH
รูปร่างโมเลกุล		
ขนาดโมเลกุล	2.6 อังสตรอม	4.4 อังสตรอม
เชื้อเพลิงเอทานอล	ไม่เกินร้อยละ 0.5	

สำหรับเยื่อแผ่นเซรามิกสำหรับการแยกน้ำออกจากสารละลายเอทานอลนั้น ในปัจจุบันมีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์แล้วจากหลายบริษัท เช่น ท่อกลวงซีโอไลท์ชนิดโซเดียมเอ (NaA zeolite tubular membrane) จาก บริษัท Fraunhofer IKTS ประเทศเยอรมัน และ จากบริษัท Mitsui Engineering & shipbuilding ประเทศญี่ปุ่น เป็นต้น โดยในห้องปฏิบัติการของนักวิจัย ได้เลือกใช้เมมเบรนเซรามิกจากประเทศ สำหรับระบบการทดลองเทคนิคการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นในระดับโรงงานต้นแบบ แสดงดังรูปภาพ 6 โดยโมดูลของเมมเบรนเซรามิก (membrane module) ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม มีลักษณะเป็นท่อ 2 ชั้น ปลายด้านหนึ่งปิดไว้ ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งทำเป็นหน้าแปลนและทำการเจาะรู เพื่อที่จะใส่ท่อใยกลวง เชิงประกอบเซรามิก โดยสามารถใส่ได้ 10 หลอด ทำให้มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 0.27 ตารางเมตร จากนั้นปิดปลายอีกด้านหนึ่งของโมดูลเพื่อทำการต่อเข้ากับปั๊มสุญญากาศ สารป้อนที่ใช้คือเอทานอล ความเข้มข้นร้อยละ 90-95 โดยน้ำหนัก ซึ่งถูกทำให้กลายเป็นไอร้อนและมีความดันสูงโดยใช้ปั๊มแรงดันสูง (compressor) และมีหัวปั๊มแบบลูกสูบ (FMI piston pump head, USA) ทำการปั๊มเอทานอลที่เป็นของเหลวจากถังป้อน (feed tank) ผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (heat exchanger) โดยใช้อ่างน้ำมันร้อน (Julabo, Germany) ไอที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ผ่านโมดูลเยื่อแผ่น เมื่อไอผสมน้ำและเอทานอลเคลื่อนที่เข้าไปในโมดูลเยื่อแผ่น จะถูกแยกออกเป็นสองสายคือ permeate ซึ่งเป็นด้านที่มีการใช้ปั๊มสุญญากาศทำการลดความดันบรรยากาศลง (5 มิลลิบาร์) โดยที่ด้านของ permeate นี้จะมีน้ำอยู่เป็นปริมาณมากและมีเอทานอลปนมาด้วยเล็กน้อย จึงจำเป็นต้องทำการจับไอของสารดังกล่าว ด้วยการใช้เครื่องควบแน่น (condenser 1) ที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส ส่วนสายที่สองจะเป็น retentate เคลื่อนที่ออกจากโมดูลเยื่อแผ่น ก่อนที่จะถูกควบแน่น (condenser 2) กลายเป็นเชื้อเพลิงเอทานอล โดยที่ความเข้มข้นของเอทานอลในด้าน retentate นี้จะถูกวัดแบบออนไลน์โดยใช้เครื่องวัดความหนาแน่น (Density meter, Anton Paar, Austria) ลักษณะการทำงานของระบบการแยกไอผ่านเยื่อแผ่น แสดงโดยรูปภาพ 6 (บน)



รูปภาพ 6 การแยกไอผ่านเยื่อแผ่นในระดับห้องปฏิบัติการโดยใช้ท่อใยกลวงเซรามิกเชิงประกอบ; 1 = Feed tank, 2 = Compressor, 3 = Super heater, 4 = Permeate, 5 = Condenser 1, 6 = Membrane module, และ 7 = Condenser 2

1.6 กรดแล็กติก

กรดแล็กติก (2-hydroxypropanoic acid, $\text{CH}_3\text{CHOHCOOH}$) หรือกรดนม ถูกค้นพบเป็นครั้งแรกในปี 1780 โดยนักเคมีชาวสวีเดน Carl Wilhelm Scheele ผู้ที่เชื่อว่ากรดแล็กติกเป็นส่วนประกอบของนม แต่ในปี 1857 นักวิทยาศาสตร์ชาวฝรั่งเศสชื่อ Louis Pasteur ได้ค้นพบว่า กรดแล็กติกไม่ได้เป็นส่วนประกอบของนม แต่เป็นถูกผลิตขึ้นจากการหมักของจุลินทรีย์ที่อยู่ในนม ในปัจจุบันกรดแล็กติก เป็นกรดอินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบสำคัญต่ออุตสาหกรรมต่าง ๆ เป็นอย่างมาก เช่น อุตสาหกรรมอาหารโดยจะทำหน้าที่เป็นตัวช่วยเพิ่มกลิ่นรสให้กับอาหารนั้น อีกทั้งยังป้องกันการเน่าเสียในอาหารหมักดองอีกด้วย นอกจากนี้ การผลิตพลาสติกชีวภาพที่สามารถย่อยสลายได้ในธรรมชาติโดยใช้กรดแล็กติก (Lactic acid) เป็นวัตถุดิบนั้น กำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากสามารถนำมาเข้ากระบวนการโพลีเมอไรเซชัน (polymerization) เพื่อผลิตเป็นโพลีแล็กเตต ซึ่งสามารถใช้ทดแทนพลาสติกที่ผลิตจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีได้เป็นอย่างดี และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม กรดแล็กติก ($\text{CH}_3\text{CHOHCOOH}$) สามารถผลิตได้โดยกระบวนการทางชีวภาพจากการย่อยสลายน้ำตาลกลูโคส ของเชื้อแบคทีเรียในกลุ่ม *Lactobacillus* ภายใต้สภาวะไร้อากาศโดยที่สามารถใช้วัตถุดิบทางการเกษตรได้หลายชนิด เช่น กากน้ำตาลอ้อย (molasses), หางนม (whey), และ น้ำตาลที่ ได้จากการย่อยแป้งชนิดต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งแป้งมันสำปะหลังซึ่งเป็นพืชทางการเกษตรหลักของจังหวัดนครราชสีมา มีปริมาณที่มากเพียงพอและมีราคาถูก ซึ่งกระบวนการหมักนั้นสามารถทำควบคู่ไปกับการย่อยแป้งให้เป็นน้ำตาลนี้จะเรียกว่า Simultaneous Saccharification and Fermentation process (SSF) และจะเป็นการลดต้นทุนในการผลิตอีกด้วย สำหรับการประยุกต์ใช้กรดอินทรีย์ให้เป็นเชื้อเพลิงทางชีวภาพนั้น จำเป็นที่จะต้องทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันกับเอทานอลเพื่อผลิตเป็นสารเอทิลแล็กเตทก่อน ตาราง 3 แสดงโครงสร้างทางเคมีของเอทิลแล็กเตท

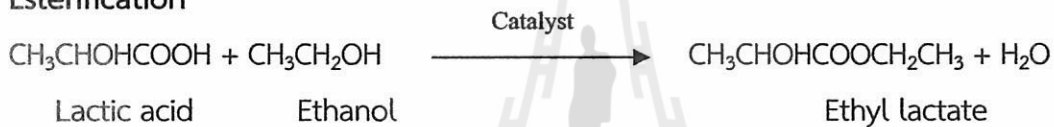
ตาราง 3 โครงสร้างทางเคมีและคุณสมบัติของเอทิลแล็กเตทบริสุทธิ์

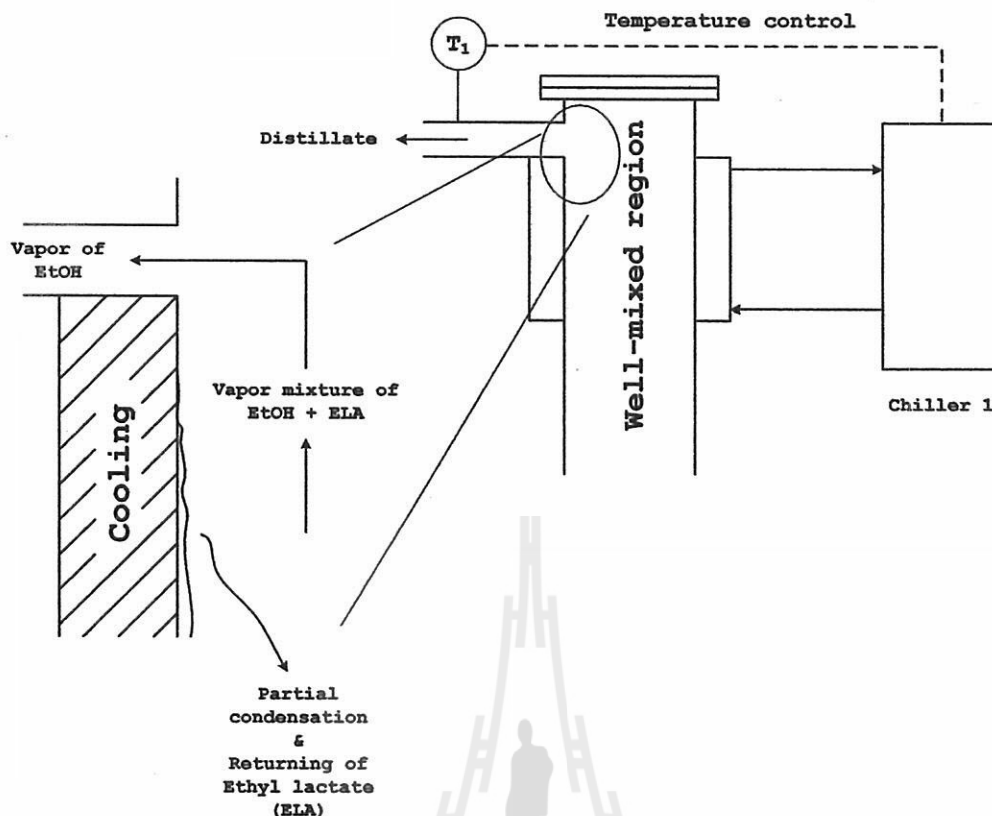
คุณสมบัติ	ค่า
Freezing point ($^{\circ}\text{C}$)	-26
Boiling point ($^{\circ}\text{C}$)	155
Flash point ($^{\circ}\text{C}$)	46
Density (g/cm^3)	1.03
Specific energy (MJ/kg)	21.3
Energy density (MJ/L)	20.7

กระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชัน เป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดในการผลิตกรดแล็กติกบริสุทธิ์จากน้ำหมัก ซึ่งเป็นขั้นตอนที่จะทำการแยกกรดแล็กติกออกจากสิ่งปนเปื้อนได้แก่ น้ำตาล อีออนต่างๆ อีกทั้ง

กรดอินทรีย์ชนิดอื่น ๆ ที่เจือปนอยู่ เช่นกรดอะซีติก กรดฟอร์มิกและกรดโพรพิโอนิก เป็นต้น สำหรับการผลิตเอทิลแล็กเตตคือการทำปฏิกิริยาของกรดแล็กติกกับเอทานอลโดยใช้กรดซัลฟูริกหรือ modified ion exchange resin เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา วิธีการ esterification เป็นการทำปฏิกิริยาของกรดแล็กติกกับแอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ เช่นเมทานอล,เอทานอลหรือบิวทานอล เป็นต้น แต่ในที่นี้จะขอเน้นการใช้เอทานอลเป็นตัวหลัก เนื่องจากสามารถผลิตได้เองในมหาวิทยาลัย โดยจะได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นเอสเทอร์ของเอทิลแล็กเตต (Ethyl lactate) และมีน้ำเกิดขึ้นในปฏิกิริยา จากนั้นจะใช้ความร้อนในการกลั่น เพื่อที่จะทำให้น้ำและเอทานอลที่เกิดขึ้นแยกตัวออกไปจากปฏิกิริยา ก่อนที่จะนำเอทานอลที่กลั่นได้ไปทำการแยกน้ำ ซึ่งเอทานอลที่ถูกกำจัดน้ำออกไปแล้วนี้ สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ในปฏิกิริยาได้อีก เมื่อน้ำถูกกำจัดออกไป จะทำให้สมดุลของระบบถูกรบกวนและมีทิศทางไปทางขวามากขึ้น กรดแล็กติกจะถูกเปลี่ยนให้เป็นเอทิลแล็กเตตมากขึ้น และปฏิกิริยาจะสิ้นสุดลงอย่างสมบูรณ์เมื่อปริมาณของน้ำในสารละลายหมดไปนั่นเอง ปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันระหว่างกรดแล็กติกและเอทานอลสามารถแสดงได้ดังปฏิกิริยา

Esterification





รูปภาพ 7 แสดงการควบแน่นของเอทิลแล็กเตทระหว่างกรกลั่นเอทานอลออกจากระบบ

หลังจากกำจัดน้ำออกจากปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์แล้ว กรดแล็กติกจะเปลี่ยนเป็นเอทิลแล็กเตททั้งหมด ซึ่งหากทำการต้มให้เดือด ไอของส่วนกลั่นจะประกอบไปด้วยเอทานอลและเอทิลแล็กเตท เท่านั้น ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องทำการกลั่นลำดับส่วน เพื่อเพิ่มความเข้มข้นของเอทิลแล็กเตทและกำจัดเอทานอล โดยใช้หอกลั่นประสิทธิภาพสูง ซึ่งพัฒนาโดย รศ.ดร. อภิชาติ บุญทาวน รูปภาพที่ 7 เป็นภาพวาดแสดงลักษณะการทำงานของหอกลั่นประสิทธิภาพสูง ซึ่งดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นว่า ส่วนกลั่นจะประกอบด้วยเอทานอลและเอทิลแล็กเตท จึงจำเป็นที่จะต้องทำการกำจัดเอทานอล ซึ่งในระหว่างการกลั่นนั้น หากระบบการกลั่นไม่ดี จะมีการสูญเสียเอทิลแล็กเตทไปในส่วนกลั่นเป็นจำนวนมาก โดยหอกลั่นที่ประดิษฐ์ขึ้นนี้จะมีส่วนที่สำคัญคือระบบการกวนภายในคอลัมน์ ซึ่งไอของสารที่ลอยขึ้นมาจะถูกผสมทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน และส่วนที่สำคัญที่สุดสำหรับหอ กลั่นประสิทธิภาพสูงที่ได้ประดิษฐ์ขึ้นนี้คือ การควบคุมอุณหภูมิ (T_1) ณ จุดปลายของคอลัมน์ให้เหมาะสม โดยได้ออกแบบส่วนปลายหอกลั่นให้มีลักษณะเป็นท่อสองชั้น (Jacket) และมีการใช้เครื่องควบคุมความเย็น (Chiller 1) ทำหน้าที่ควบคุมในการทำให้เกิดการควบแน่นที่เหมาะสม ซึ่งมีความสำคัญเป็นอย่างมาก หากทำความเย็นให้เย็นจนเกินไป ไอทั้งหมดจะเกิดการควบแน่น ทำให้ไม่มีการแยกเกิดขึ้น (total reflux) และหากทำอุณหภูมิให้สูงจนเกินไป ก็จะส่งผลทำให้เกิดการสูญเสียผลิตภัณฑ์เอทิลแล็กเตทไปกับส่วนกลั่นได้ หลังจากทำการกำจัดเอทานอลออกไปจากระบบหมดแล้ว จะทำการกลั่นเอทิลแล็กเตทบริสุทธิ์ออก

โดยทำการควบคุมอุณหภูมิ (T_1) ที่ 155 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิ ณ จุดเดือด ของเอทิลแล็กเตทบริสุทธิ์ ณ ความดัน 1 บรรยากาศ หรืออาจจะทำการกลั่นลำดับส่วนแบบสูญญากาศ โดยลดความดันบรรยากาศลงถึง 20 มิลลิบาร์และใช้อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส ก็สามารถทำได้เช่นกัน

1.7 ปาล์มน้ำมัน

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยวในตระกูลปาล์มมี เช่นเดียวกับกับมะพร้าว ตาล จาก และ ระกำ ประเทศไทยเริ่มมีการปลูกปาล์มน้ำมันเป็นพืชเศรษฐกิจครั้งแรกประมาณ พ.ศ. 2511 ที่จังหวัดกระบี่ และได้แพร่ขยายมากขึ้นในจังหวัดทาง คือ สตูล ตรัง ภูเก็ต สุราษฎร์ธานี ชุมพร สงขลา และประจวบคีรีขันธ์ ปาล์มน้ำมันที่เพาะปลูกในเชิงเศรษฐกิจในปัจจุบัน มีชื่อสามัญน้ำมันปาล์มพันธุ์แอฟริกา ส่วนที่นิยมปลูก ใน ประเทศไทย คือ พันธุ์ทีเนอรา ในระยะเวลาที่ผลปาล์มกำลังเจริญเติบโตนั้น ในผลปาล์มจะมีแป้ง ซึ่งเป็น สารประกอบประเภทคาร์โบไฮเดรต และเมื่อผลเริ่มแก่หรือสุก ปริมาณแป้งจะลดลงและแปรสภาพ เป็นไป อย่างช้าๆ จึงมีปริมาณกรดไขมันอิสระเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย ปาล์มน้ำมันเป็นพืชน้ำมันที่ให้ปริมาณ น้ำมันสูงถึง 0.6-0.8 ตัน/ไร่/ปี เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันพืชชนิดอื่น สามารถนำไปใช้ในการประกอบอาหาร เพราะมี คุณสมบัติทนความร้อนได้สูง ไม่ทำให้เกิดสารก่อมะเร็ง เนื่องจากน้ำมันปาล์มมีราคาต่ำกว่า น้ำมันพืชชนิดอื่น อีกทั้งสามารถผลิตได้เองภายในประเทศ การใช้ประโยชน์จากปาล์มน้ำมันจึงก่อให้เกิด มูลค่าเพิ่มและรายได้ โดยรวมของประเทศ น้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์แล้วนั้นจะมีสีแดง เกิดการแยกชั้นเมื่อตั้ง ทิ้งไว้ โดยส่วนที่เป็นของเหลวอยู่ด้านบนเรียกว่า ปาล์มโอเลอิน (Palm olein) ส่วนล่างที่ชั้นเรียกว่าปาล์ม สเตอริน (Palm sterin) ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่แล้ว จะประกอบ ไปด้วยกรดไขมันสายยาวเป็นส่วน ใหญ่ เช่น กรดปาล์มมิตริก ร้อยละ 39 กรดสเตอริก ร้อยละ 5.6 กรดลิโนเลนิก ร้อยละ 42 เป็นต้น ซึ่งกรดไขมัน เหล่านี้เมื่อนำมาผลิตเป็นสารเอทิลเอสเทอร์ แล้วจะมีจุดเดือดที่สูง เหมาะสำหรับนำมาผลิตเป็นน้ำมัน ประเภทไบโอดีเซลมากกว่า ดังนั้นในโครงการนี้ จึงต้องการกรดไขมันที่เป็นกรดไขมันสายกลาง (medium chain fatty acid) ซึ่งพบว่าน้ำมันมะพร้าว (coconut oil) และน้ำมันจากเนื้อด้านในของเมล็ดปาล์มหรือที่ เรียกว่า palm kernel มีองค์ประกอบของกรดไขมันสายกลางอยู่เป็น จำนวนมาก ตาราง 3 แสดงกรดไขมันที่ ได้จากพืชชนิดต่าง ๆ

ตาราง 4 กรดไขมัน (fatty acid) ที่เป็นองค์ประกอบของน้ำมันที่ได้จากพืชชนิดต่าง ๆ

Source of oil	C10	C12	C14	C16	C18	C18:1	C10	C12
Coconut	9.5	50	15	10	2.0	7.5	9.5	50
Palm kernel	6.2	47	16	8.2	17.3	15	6.2	47
Palm	-	-	2.0	39	5.6	42	-	-
Jatropha	-	-	1.0	14	8.5	55	-	-
Algae	-	-	4.5	36	1	12	-	-
Sunflower	-	-	-	5	7	20	-	-

จากตาราง 4 จะสังเกตเห็นได้ว่าน้ำมันมะพร้าวและน้ำมันจากเนื้อเมล็ดปาล์มนั้น จะมีองค์ประกอบของกรดไขมันสายกลาง (medium chain fatty acid) มากที่สุด โดยมีปริมาณที่มากถึงร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีศักยภาพในการนำมาผลิตเป็นน้ำมันเจ็ดชีวภาพ โดยน้ำมันจากเนื้อเมล็ดปาล์ม มีข้อได้เปรียบกว่าน้ำมันมะพร้าวคือมีผลผลิตที่มากกว่าและมีราคาถูกกว่า จึงถูกเลือกใช้ในข้อเสนอโครงการวิจัยนี้ ส่วนน้ำมันชนิดอื่น ๆ พบว่าประกอบด้วยกรดไขมันสายยาวชนิด palmitic, stearic, linolenic, และ linoleic ในปริมาณมาก ทำให้เมื่อทำปฏิกิริยากับเอทานอลแล้วจะได้เป็นเอทิลเอสเทอร์ที่มีขนาดของโมเลกุลใหญ่ มีจุดเดือดสูงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้กับเครื่องยนต์เจ็ท

1.8 ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน

- กรดไขมันอิสระในน้ำมัน (Free Fatty Acid; FFA)

กรดไขมันอิสระของน้ำมันพืชควรต่ำกว่าร้อยละ 1 หากกรดไขมันอิสระเกินกว่าร้อยละ 1 จะทำให้ผลผลิตที่ได้ของลดลงมาก และถ้ามีปริมาณสูง ควรลดกรดไขมันอิสระให้น้อยลงกว่าร้อยละ 1 ซึ่งปริมาณ สบู่ที่เกิดจะประมาณ 2-3 เท่าของปริมาณกรดไขมันอิสระ (Wright *et al*, 1994) สำหรับศึกษา การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นต่างของไตรกลีเซอไรด์ สารเริ่มต้นทุกตัว ควรปราศจากน้ำ และไตรกลีเซอไรด์ควรจะมีค่าความเป็นกรดน้อยกว่า 1 ถ้าความเป็นกรดมากกว่า 1 แล้ว การทำสะเทินกรดไขมันอิสระจะต้องใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นขึ้น ส่วนน้ำจะเป็นสาเหตุสำคัญของการ เกิดสบู่ ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาถูกใช้และลดประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาลง การเกิดสบู่ยังเป็นสาเหตุให้ ความหนืดของน้ำมันเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดเจล และทำให้แยกกลีเซอรอลออกยากขึ้น

- ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาและชนิดตัวเร่งปฏิกิริยา

ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน ได้แก่ เบส เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแตสเซียมไฮดรอกไซด์ และ กรด เช่น กรดซัลฟูริก และกรดไฮโดรคลอริก นอกจากนี้ยังสามารถใช้เอนไซม์ เช่น ไลเปส ได้อีกด้วย แต่เมื่อพิจารณาตัวเร่งปฏิกิริยาของทั้ง 3 ชนิด พบว่า ในกระบวนการผลิต ของโรงงานอุตสาหกรรมนิยมตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส เพราะกักร่อนน้อยกว่ากรด ใช้อุณหภูมิและเวลา ในการทำปฏิกิริยาน้อยกว่า การใช้อัตราส่วนโดยโมลที่สูงกว่าก็จะทำให้ได้ค่าการเปลี่ยนเป็นเอสเทอร์ที่สูงกว่า และใช้เวลาที่สั้นกว่าด้วย ส่วนเอนไซม์ไลเปสนั้น จากการศึกษาพบว่ายังอยู่ในช่วงของการวิจัยเท่านั้น ทั้งนี้ เนื่องจากราคาของเอนไซม์ยังมีราคาสูง ยังไม่เหมาะกับการพัฒนาในระดับอุตสาหกรรม

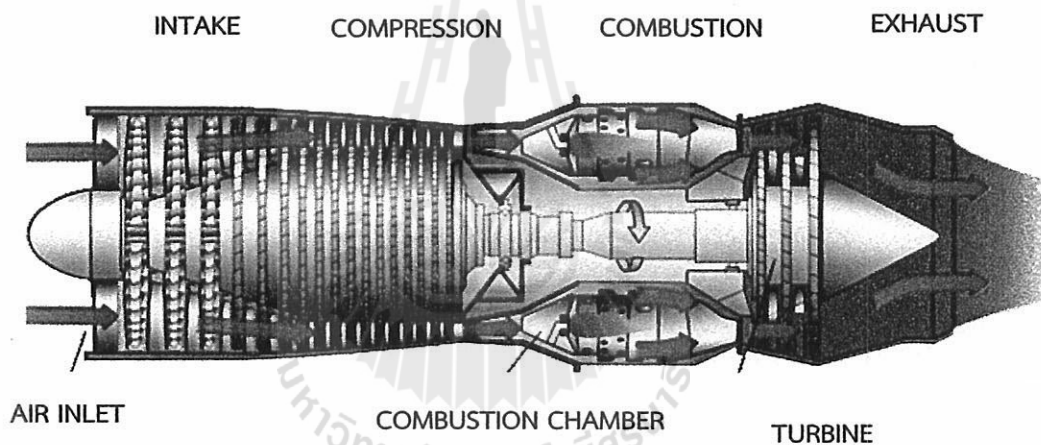
- ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (Reaction Time)

อัตราเร็วในการเปลี่ยนน้ำมันเป็นน้ำมันไบโอดีเซลสูงขึ้นตามระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา แต่เนื่องจากปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาย้อนกลับได้ ดังนั้นจึงควรหาช่วงเวลาที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาเพื่อให้ เกิดผลิตภัณฑ์หรือไบโอดีเซลสูงสุด นอกจากนี้จึงควรแยกกลีเซอรอลออกจากระบบเพื่อเป็นการรบกวนสมดุล ของระบบดังที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้นด้วย

1.9 เครื่องยนต์ไอพ่น (jet engine)

เครื่องยนต์ไอพ่น (jet engine) โดยทั่วไปจะหมายถึง เครื่องยนต์ที่ใช้หลักการของเครื่องยนต์ เทอร์โบเจ็ท จัดเป็นเครื่องยนต์แบบกังหันก๊าซ (gas turbine engine) ที่ใช้อากาศสันดาปภายใน ซึ่งปกติ จะประกอบด้วย ชุดอัดอากาศ (compressor) อัดอากาศจากทางด้าน หน้าของเครื่องยนต์ ซึ่งจะเป็นชนิดอัดอากาศตามแนวแกน (axial) หรืออัดอากาศตามแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (centrifugal) หรือแบบผสมก็ได้ จากนั้น จะมีการผสมเชื้อเพลิงเข้ากับอากาศที่ถูกบีบอัดแล้ว เพื่อเข้าไปเผาไหม้ ในห้องเผาไหม้ (combustion) จากนั้น ก๊าซร้อน (hot gas) ที่ได้จากการเผาไหม้ก็จะผ่านเข้าไปขับกังหัน (turbine) เพื่อสร้างกำลังออกมา แล้วผ่าน เข้าสู่หัวฉีด (nozzle) เพื่อเร่งความเร็วของก๊าซ และปล่อยออก ทางด้านท้ายเครื่องยนต์ทางด้าน exhaust ต่อไป โดยส่วนหลัก ๆ ของเครื่องยนต์ไอพ่นมีส่วนประกอบ ดังแสดงในรูปภาพ 8

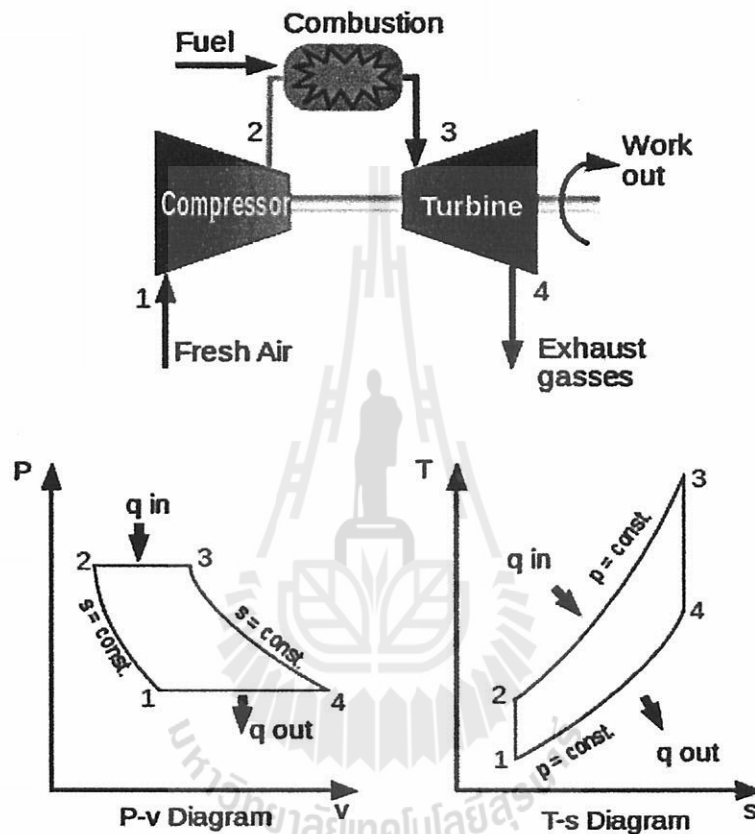
- 1.คอมเพรสเซอร์ ทำหน้าที่อัดอากาศที่ไหลเข้ามา เพื่อให้เกิดความดันสูง และป้อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้
- 2.ห้องเผาไหม้ (combustion) ทำหน้าที่เผาไหม้เชื้อเพลิง เพื่อเพิ่มความเร็วและความดันของก๊าซ
- 3.กังหันเทอร์โบน์ เปลี่ยนพลังงานของก๊าซที่ได้จากห้องเผาไหม้ไปเป็นการหมุน



รูปภาพ 8 หลักการทำงานโดยทั่ว ๆ ไปของเครื่องยนต์เจ็ทหรือเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์โบ

การทำงานเบื้องต้นของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ คือ การเปลี่ยนพลังงานจลน์ของก๊าซร้อนที่ขยายตัว ที่ความดันสูงให้เป็นพลังงานกล เพื่อนำไปหมุนชุดกังหันเครื่องยนต์กังหันก๊าซให้ทำงาน โดยเริ่มจากนำอากาศ จำนวนมากเข้าสู่เครื่องยนต์ โดยอาศัยแรงดูดจากคอมเพรสเซอร์ จากนั้นอัดอากาศให้มีอุณหภูมิและ ความดันสูงขึ้น แล้วส่งเข้าห้องเผาไหม้ ขณะเดียวกันเชื้อเพลิงจะถูกฉีดเข้าห้องเผาไหม้ ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาเคมี ระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศแล้วถูกจุดระเบิดขึ้น ทำให้ก๊าซร้อนจากการสันดาปขยายตัวไปปะทะกับใบกังหัน เมื่อล้อกังหันหมุน จะทำให้เกิดการหมุนของเพลาคู่มือเครื่องยนต์ขึ้น การหมุนนี้ส่วนหนึ่งจะนำกลับไป ขับคอมเพรสเซอร์ ที่ชุดกังหันนั่นเอง พลังงานจลน์ของก๊าซร้อนที่ขยายตัวส่วนใหญ่ จะถูกเปลี่ยนให้เป็น พลังงานกลอยู่ในลักษณะ ของการหมุนขึ้น การทำงานในลักษณะแบบนี้ เรียกว่า การทำงานแบบระบบเปิด เนื่องจากก๊าซที่ขยายตัวแล้ว ถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศ เครื่องยนต์กังหัน เป็นเครื่องยนต์ที่ทำงาน โดยนำ หลักการและทฤษฎีของวัฏจักร

เบรย์ตัน (Breyton's cycle) มาประยุกต์ใช้งาน ซึ่งแบบที่เหมาะสม กับการใช้งานจริง ๆ คือ แบบที่มีการสันดาปที่ความดันคงที่และต่อเนื่อง มีส่วนประกอบหลักสำคัญ ได้แก่ เครื่องอัดอากาศ (Air Compressor) ห้องเผาไหม้ (Combustion Chamber) ชุดกังหัน (Turbine) และอุปกรณ์สำหรับป้อนเชื้อเพลิง เนื่องจากเพลลาของกังหัน (Turbine) และเพลลาของ เครื่องอัดอากาศ (Compressor) เป็นเพลลาเดียวกัน ดังนั้นเพลลาที่ได้จากกังหันจึงนำไปใช้อัดอากาศบางส่วน แต่งานส่วนใหญ่ จะถูกส่งออกที่เพลลาส่งกำลังออกเพื่อนำไปใช้งานตามต้องการ



รูปภาพ 9 การทำงานของเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์ไบน์ (A) และ วัฏจักรเบรย์ตันแสดง P-v และ T-s ไดอะแกรม

จากรูปภาพ 9 หลักการทำงานของเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์ไบน์สามารถอธิบายได้ด้วยวัฏจักรเบรย์ตัน จาก P-v ไดอะแกรม กระบวนการ (1-2) อากาศจะถูกดูดจากภายนอกที่ความดันบรรยากาศ แล้วอัดให้มี ความดันและอุณหภูมิสูงขึ้นด้วยคอมเพรสเซอร์ จากระบบเป็นกระบวนการอัดแบบแอดิเอบาติก กล่าวคือ ไม่มี ความร้อนสูญเสียจากระบบเอนโทรปีคงที่ ($s = \text{constant}$) จากนั้นเข้าสู่กระบวนการ (2-3) เมื่ออากาศถูกอัด จะทำให้เกิดความร้อนและความดัน จากนั้นถูกส่งเข้าไปยังห้องเผาไหม้และสันดาปกับเชื้อเพลิงที่ถูกส่งเข้ามา ซึ่ง กระบวนการดังกล่าว ถือว่าเป็นการให้ความร้อนแบบความดันคงที่ ($\text{pressure} = \text{constant}$) และเมื่อเกิดการสันดาปของเชื้อเพลิงแล้ว จะเข้าสู่กระบวนการ (3-4) ซึ่งภายหลังการสันดาป จะได้ก๊าซไอเสียที่มีความร้อนและความดันสูง เกิดการขยายตัวของก๊าซ ซึ่งก๊าซดังกล่าวจะถูกส่งเข้าสู่ชุดกังหัน กระบวนการนี้เรียกว่าการ

ขยายตัวแบบอะเดียบาติก (adiabatic process) ในขั้นตอนสุดท้ายกระบวนการ (4-1) เป็นกระบวนการส่งความร้อนออกแบบความดันคงที่ กระบวนการนี้ไอเสียที่ผ่านการขยายตัว จะถูกขับออกสู่บรรยากาศ อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าวัฏจักรเบร์ตันเป็นวัฏจักรเชิงทฤษฎี เพราะพลังงานที่ได้ กับพลังงานที่ให้มีความเท่ากัน ซึ่งในทางปฏิบัติไม่สามารถเป็นไปได้ เนื่องจากต้องเกิดการสูญเสียพลังงานขึ้น เช่น การสูญเสียเนื่องจากความฝืด เป็นต้น จากที่กล่าวมาแล้วว่า หากต้องการทราบงานของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ สามารถดูได้จาก P-v ไดอะแกรม และหากต้องการทราบปริมาณความร้อนที่ถ่ายเท ก็สามารถดูได้จาก T-s ไดอะแกรม สำหรับการทำงานของเครื่องยนต์กังหันก๊าซนั้น ใช้อากาศเป็นสารตัวกลาง ซึ่งสารตัวกลาง มีการไหลสม่ำเสมอ ดังนั้นสมการในขณะที่มีการอัดตัวและขยายตัวของก๊าซร้อนเชิงทฤษฎีเมื่อวิเคราะห์จาก P-v ไดอะแกรม จะได้เท่ากับ $-\int VdP$ ส่วนความร้อนที่คายออกสามารถคำนวณได้จากพื้นที่ใต้กราฟ T-s ไดอะแกรม

แต่อย่างไรก็ตามในวัฏจักรการทำงานจริง (Actual cycle) จะมีความแตกต่างออกไป และกระบวนการต่าง ๆ ก็ไม่ได้เป็นไปตามวัฏจักรในเชิงทฤษฎี กล่าวคือในกระบวนการจาก (1) ไป (2) และ (3) ไป (4) ไม่เป็นกระบวนการอะเดียบาติก เนื่องจากยังมีการถ่ายเทความร้อนเข้าหรือออกจากระบบ หรือมีการสูญเสีย ความร้อนในระบบการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้กระบวนการ (2) ไป (3) มีการสูญเสียความดัน จึงไม่เป็น กระบวนการการสันดาปแบบความดันคงที่ เพื่อให้เห็นความแตกต่างที่ชัดเจนจึงสรุปลักษณะของวัฏจักร เครื่องยนต์กังหันก๊าซทำงานจริง (Actual Cycle) เมื่อเทียบกับวัฏจักรอุดมคติ ดังนี้

- กระบวนการทุกกระบวนการไม่สามารถย้อนกลับได้ เนื่องจากระบบมีความฝืด การไหลของสาร ทำงานไม่ได้ คงที่สม่ำเสมอการไหลเป็นแบบไม่คงที่ ซึ่งแต่ละอุปกรณ์ไม่สามารถทำงานได้ประสิทธิภาพ 100 เปอร์เซ็นต์
- ความร้อนจำเพาะมีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลง และคุณลักษณะสารทำงานที่เปลี่ยนแปลง เช่น จากอากาศเป็นส่วนผสมเชื้อเพลิงกับอากาศและไอเสียที่ได้จากการสันดาปเป็นต้น
- จำนวนของสารทำงานในระบบมีการเปลี่ยนแปลงไม่คงที่ หรือมีการไหลที่ต่อเนื่อง
- เกิดการสูญเสียความร้อนที่ได้จากการสันดาปเชื้อเพลิงอาจเกิดจากการสันดาปที่ไม่สมบูรณ์ หรือการสันดาปไม่ได้ เป็นไปตามกระบวนการความดันคงที่
- เกิดการสูญเสียความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อม การอัดอากาศที่คอมเพรสเซอร์และการขยายตัวของก๊าซร้อนที่กังหันไม่ได้เป็นไปตามกระบวนการอะเดียบาติก มีการสูญเสียความร้อนออกจากระบบ และสูญเสียความร้อนออกจากห้องเผาไหม้

1.10 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- เพื่อสร้างเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์โบขนาดเล็กพร้อมทั้งอุปกรณ์วัดและบันทึกข้อมูลต่าง ๆ
- เพื่อทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์โบขนาดเล็กด้วยเชื้อเพลิงอากาศยานชีวภาพที่ได้ผลิตขึ้นในห้องปฏิบัติการ

2. วิธีการทดลอง

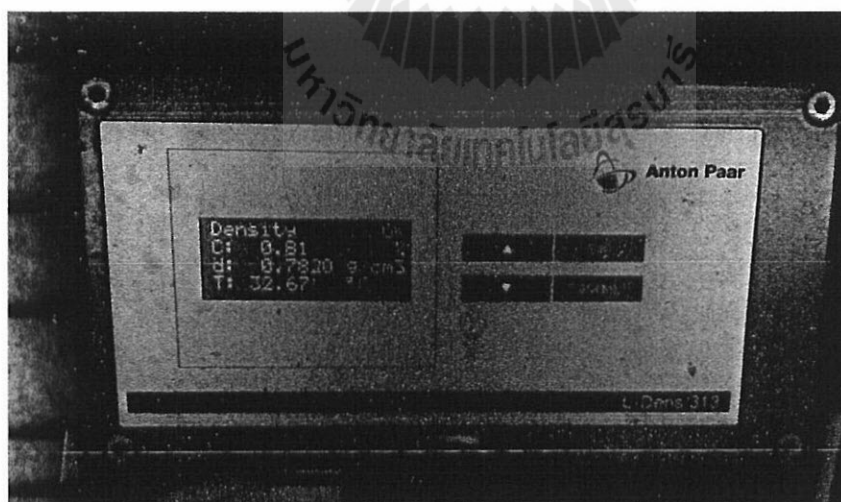
2.1 อุปกรณ์และสารเคมี

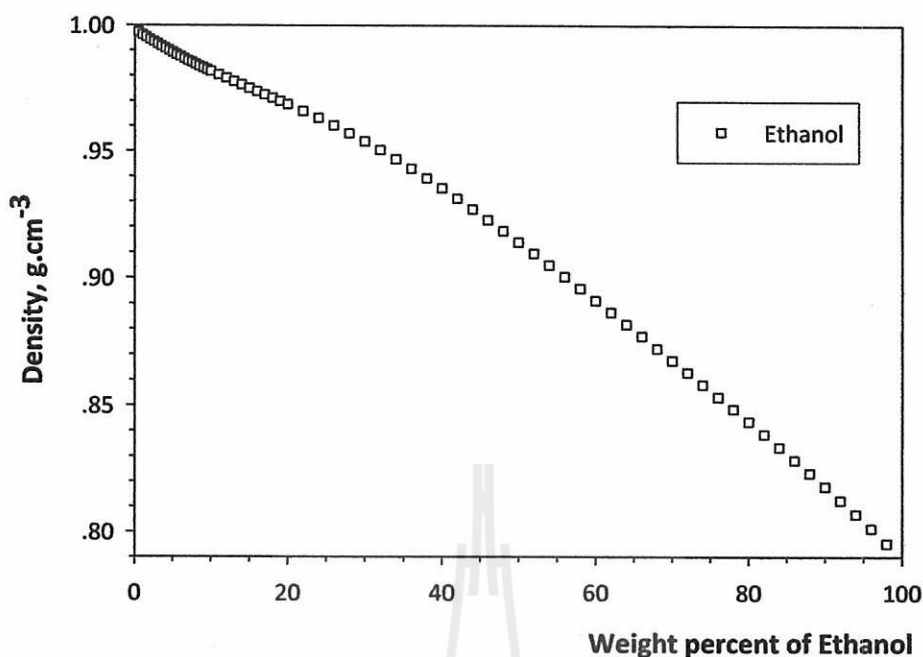
สำหรับอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยนี้ จะเป็นเครื่องมือที่มีอยู่แล้วบางส่วน ณ อาคาร ปฏิบัติการ ศูนย์เครื่องมือ 10 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยยกตัวอย่างเครื่องมือที่มีใช้อยู่แล้ว ในอาคารปฏิบัติการ เช่น

2.2 การเตรียมเอทานอลบริสุทธิ์

ในระบบมีความจำเป็นที่จะต้องทำการกลั่นแยกน้ำออกจากระบบ (reactive distillation) โดยไอผสมของเอทานอลและน้ำจะระเหยเข้าสู่หอกลั่น (distillation column) ซึ่งจะทำการสร้างให้เป็นแบบหอกลั่นประสิทธิภาพสูง โดยจะมีการออกแบบและทำการผลิตหอกลั่นเอง ซึ่งหน้าที่ของหอกลั่นนี้ จะทำการกลั่นลำดับส่วนเพื่อแยกน้ำออกจากระบบไป (stillage) จากนั้นไอเอทานอลที่ได้จากการกลั่น (ความเข้มข้นเอทานอลประมาณร้อยละ 95 โดยน้ำหนัก) จะเข้าสู่โมดูลของเยื่อแผ่นโดยตรง (vapor permeation, VP) เพื่อทำการแยกน้ำส่วนใหญ่ออกใน ขั้นตอนแรกและไอของเอทานอลที่ออกมาจากเยื่อแผ่นจะถูกป้อน เข้าสู่คอลัมน์ molecular sieve เพื่อเป็นการกำจัดน้ำในขั้นตอนสุดท้าย (dehydration bed) เพื่อที่จะได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็น เอทานอลไร้น้ำ (Dehydrate Ethanol, 99.9%)

- การหาปริมาณน้ำในเชื้อเพลิงเอทานอลโดยการใช้เครื่องวัดความหนาแน่น





รูปภาพ 10 อุปกรณ์สำหรับวัดปริมาณน้ำในสารละลายเอทานอล (Density meter) แสดงความเข้มข้น 0.81% (บน) กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่น และความเข้มข้น ของเอทานอล (ล่าง)

เนื่องจากการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นนั้น เป็นระบบที่มีประสิทธิภาพสูง มีอัตราการผลิตของเชื้อเพลิง เอทานอลที่มาก ดังนั้นการควบคุมคุณภาพในส่วนของความเข้มข้นของน้ำในผลิตภัณฑ์จึงมีความจำเป็นมาก การควบคุมแบบออนไลน์จึงเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งหากความเข้มข้นของน้ำไม่ผ่านมาตรฐาน ก็สามารถไหลเวียนผลิตภัณฑ์เอทานอลให้กลับเข้าสู่ด้านของสารป้อนได้อีกด้วย การวัดปริมาณน้ำที่รวดเร็วอีกวิธีหนึ่ง คือ การใช้เครื่องวัดความหนาแน่น (Density meter) ซึ่งในห้องปฏิบัติการนักวิจัยได้ใช้เครื่องวัด ความหนาแน่นรุ่น L-Dens 313 ของบริษัท Anton Paar ประเทศออสเตรีย รูปภาพ 10 (บน) ซึ่งสามารถวัดความหนาแน่นได้ถึง 3 ตำแหน่ง ซึ่งค่าความหนาแน่นดังกล่าวที่ได้จากการวัดความหนาแน่น ของเชื้อเพลิงเอทานอล ที่ไหลผ่านเครื่องทดสอบ และจะถูกนำไปคำนวณเป็นค่าความเข้มข้นของน้ำ โดยการ เทียบกับกราฟมาตรฐาน ที่ได้ทำการเทียบ (Calibration curve) ดังรูปภาพ 10 (ล่าง) โดยความสัมพันธ์ ของความหนาแน่น (แกน y) กับสัดส่วนของเอทานอลและน้ำที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (แกน x) พบว่า มีความสัมพันธ์กันแบบพาราโบลา ดังสมการ

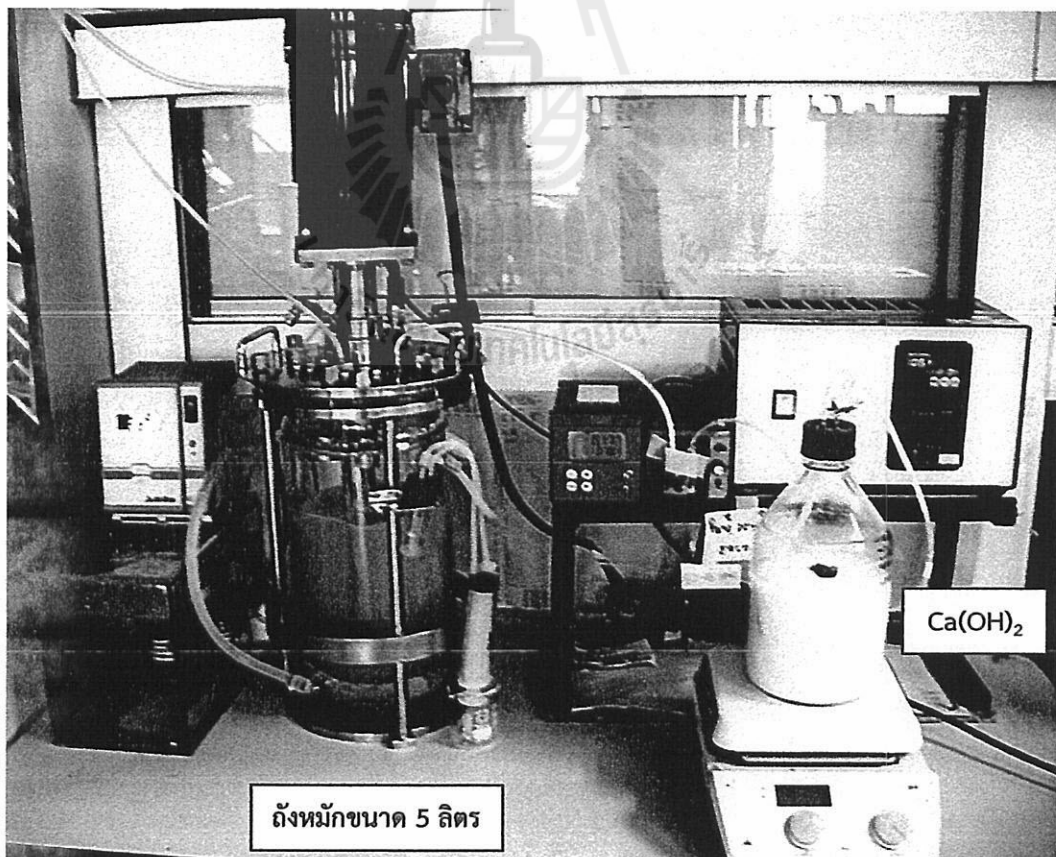
$$y = a + bx + cx^2$$

โดยค่าสัมประสิทธิ์ $a = 6.104032$, $b = -4.658177 \times 10^2$, และ $c = -8.703533 \times 10^2$ ตามลำดับ และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (R^2) เท่ากับ 0.8896

2.3 การหมักกรดแล็กติกจากแป้งมันสำปะหลัง

สำหรับกระบวนการทำบริสุทธิ์กรดแล็กติกจากน้ำหมักนั้น ได้มีการใช้น้ำหมักที่เป็นชนิด enrichment media กล่าวคือมีการเติมสารอาหารที่กระตุ้นการเจริญของเชื้อแบคทีเรียกรดแล็กติกลงไป เพื่อให้เชื้อดังกล่าวสามารถทำการผลิตกรดแล็กติกให้ได้มาก ๆ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้เชื้อ *Lactobacillus* sp. จาก โดยใช้อาหารเลี้ยงเชื้อชนิด Tapioca starch medium ซึ่งมีส่วนประกอบดังนี้

Tapioca starch	10.0%
Yeast extract	1.5%
K_2HPO_4	0.6%
$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	0.057%
$MnSO_4 \cdot 4H_2O$	0.012%
$FeSO_4 \cdot 7H_2O$	0.003%



รูปภาพ 11 การหมักกรดแล็กติกขนาดถังหมัก 5 ลิตรโดยใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ในการควบคุม pH

โดยก่อนที่จะทำการนึ่งฆ่าเชื้อนั้น จะทำการย่อยแป้งก่อนด้วยเอนไซม์ 2 ชนิดคือ alpha-amylase และ gluco-amylase เพื่อให้แป้งกลายเป็นน้ำตาลกลูโคส และในระหว่างการหมักจะมีการใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ในการปรับสภาพให้เป็นกลางอยู่เสมอ (pH ประมาณ 6.5) ซึ่งกรดแล็กติกจะแตกตัวและทำปฏิกิริยากับแคลเซียมกลายเป็นเกลือแคลเซียมแล็กเตท (Ca-lactate) เมื่อกระบวนการหมักสิ้นสุดลงพบว่ามีความเข้มข้นของกรดแล็กติกในน้ำหมักอยู่ที่ 9.86% ขั้นตอนถัดไปคือการทำบริสุทธิ์กรดแล็กติกในเบื้องต้น โดยจะเป็นการกำจัดของแข็งและเซลล์แบคทีเรียกรดแล็กติกด้วยเทคนิคการปั่นเหวี่ยง (centrifugation) และ การกรองแบบไมโครฟิวเตรชัน (micro-filtration) ซึ่งน้ำหมักส่วนที่กรองได้ จะถูกนำมาระเหยงน้ำออกร้อยละ 85 ด้วยวิธีการระเหยภายใต้สุญญากาศ จากนั้นนำตะกอนใสในตูบเพื่อทำให้แห้งเพื่อเตรียมไว้สำหรับทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันกับเอทานอลต่อไป

2.4 ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน

จะศึกษาการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างเอทานอลกับกรดแล็กติกหรือน้ำมันจากเนื้อเมล์ตปาล์ม พร้อมทั้งทำการวิเคราะห์ผลผลิตภัณฑ์ที่ได้

การวิเคราะห์

การวิเคราะห์	วิธีวิเคราะห์ / เครื่องมือวิเคราะห์
1. การวัดปริมาณเอทิลเอสเทอร์	โดยการวิเคราะห์ค่าเปอร์เซ็นต์เอทิลเอสเทอร์ (percentage of methyl ester) ใช้เครื่อง แก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatograph, GC) ตามมาตรฐาน prEN 14103:2001 ใช้คอลัมน์ capillary column ชนิด CP WAX 52CB (30 m × 0.32 mm × 0.25 1- μm film thickness) สภาพของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีคือ อุณหภูมิ injector 200 $^{\circ}\text{C}$ อัตราการไหลก๊าซผ่านคอลัมน์ 1.2 ml/min อุณหภูมิคอลัมน์เริ่มต้น 120 องศาเซลเซียส คงอุณหภูมินี้ไว้เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิในอัตรา 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส คงอุณหภูมินี้ไว้เป็นเวลา 10 นาที
2. การวัดจุดวาบไฟ	วัดจุดวาบไฟของตัวอย่าง FAEE ปริมาณ 50 มิลลิลิตรโดยใช้เครื่อง Pensky- Martens ตามวิธีของมาตรฐาน ASTM D93
3. การวัดความหนาแน่น	เตรียมตัวอย่าง FAEE 1.2 มิลลิลิตร วัดความหนาแน่นของตัวอย่างไบโอดีเซลด้วย เครื่อง Mettler Toledo density meter ซึ่งใช้หลักการวัดความถี่เรโซแนนซ์ของตัวอย่าง สามารถวัดความหนาแน่น

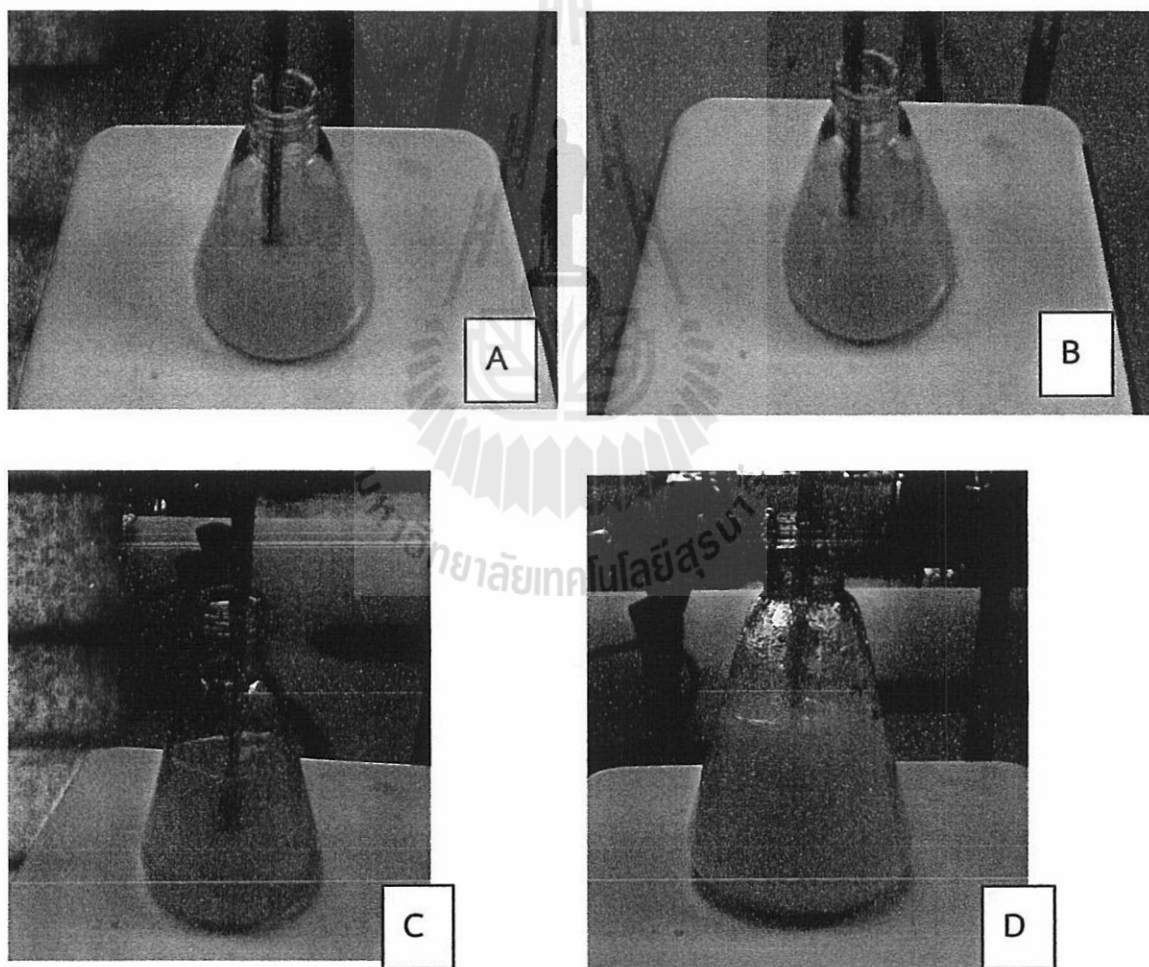
การวิเคราะห์	วิธีวิเคราะห์ / เครื่องมือวิเคราะห์
	ได้ในช่วง 0-3 g/cm ³ และมีความถูกต้อง 0.0001 g/cm ³
4. การวัดความหนืด	วัดความหนืดด้วยเครื่อง viscometer ตามมาตรฐาน ASTM D445
5. ค่าพลังงานความร้อน	วัดค่าพลังงานความร้อนด้วยเครื่อง Bomb Calorimeter มาตรฐาน ASTM D240



3. ผลการทดลอง

3.1 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่มีต่อผลผลิตของเอทิลแอลกอฮอล์

ตะกอนของแคลเซียมแล็กเตทที่ได้จากกระบวนการหมักและการทำแห้งแล้ว ได้ถูกนำมาล้างตะกอนด้วยน้ำเย็นก่อนจะกำจัดน้ำออกในขั้นสุดท้ายโดยการปั่นเหวี่ยง ซึ่งจะทำให้สามารถกำจัดน้ำส่วนใหญ่ออกไปได้ โดยตะกอนของแคลเซียมแล็กเตทที่ได้จากกระบวนการนี้จะมีลักษณะเป็นสีขาว สามารถนำไปทำปฏิกิริยากับเอทานอลได้โดยตรง ซึ่งการทดลองนี้ จะเป็นการศึกษาถึงอิทธิพลของความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่มีผลต่อเอทิลแอลกอฮอล์ ทั้งนี้แคลเซียมแล็กเตทซึ่งมีลักษณะเป็นของแข็ง จะต้องอยู่ในรูปของสารละลายก่อนเท่านั้น จึงจะสามารถทำปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันกับเอทานอลได้ โดยที่เอทานอลจะไม่ทำปฏิกิริยากับแคลเซียมแล็กเตทที่อยู่ในรูปของของแข็ง ดังนั้นการหาปริมาณน้ำเริ่มต้นที่เหมาะสม จะทำให้สารทั้งสองชนิดทำปฏิกิริยากันได้ดี ส่งผลให้เกิดเอทิลแอลกอฮอล์ได้ในปริมาณที่สูงที่สุด



รูปภาพ 12 การทดสอบการละลายของตะกอนแคลเซียมแล็กเตทในสารละลายเอทานอล ณ ความเข้มข้นของน้ำต่าง ๆ (A) น้ำ 5.2 %, (B) น้ำ 10.5%, (C) น้ำ 12.0 %, และ (D) แสดงการเกิดตะกอนของแคลเซียมซัลเฟตที่มีลักษณะขาวหลังจากเติมกรดซัลฟูริก (65°C)

รูปภาพ 12 แสดงการทดสอบการละลายของแคลเซียมแล็กเตทที่ความเข้มข้นของน้ำต่าง ๆ โดยทำการผสม แคลเซียมแล็กเตท เอทานอลและน้ำที่ความเข้มข้นต่าง ๆ จากนั้นทำการเพิ่มอุณหภูมิของระบบให้ได้ 70 องศาเซลเซียส ก่อนที่จะทำการวัดความเข้มข้นของน้ำโดยวิธี Karl's Fischer titration ซึ่งผลการทดลองพบว่า ความเข้มข้นของน้ำต่ำกว่าร้อยละ 10.5 โดยน้ำหนัก (รูปภาพ 12 (A) และ (B)) เกลือของแคลเซียมแล็กเตทจะยังละลายได้ไม่หมด โดยมีการละลายได้บางส่วน นอกจากนี้จะยังสังเกตเห็นเป็นตะกอนสีขาวของแคลเซียมแล็กเตทเหลืออยู่ ในขณะที่หากทำการเพิ่มความเข้มข้นของน้ำเริ่มต้นเป็นร้อยละ 12.0 โดยน้ำหนัก จะเห็นได้ว่าสารละลายจะมีสีใสและตะกอนของแคลเซียมแล็กเตทได้ละลายจนหมดแล้ว ซึ่งหากทำการเติมกรดซัลฟูริกลงไป ก็จะทำให้แล็กเตทสามารถทำปฏิกิริยากับเอทานอลได้ทั้งหมด โดยเมื่อทำการปรับค่า pH ให้ได้ 2.0 แล้ว กรดซัลฟูริกจะเข้าไปทำปฏิกิริยากับแคลเซียมแล็กเตท ได้เป็นแคลเซียมซัลเฟต (ยิบซัม) ซึ่งมีลักษณะเป็นตะกอนสีขาวขุ่นซึ่งมีลักษณะคล้ายกันกับแคลเซียมแล็กเตท (รูปภาพ 12 (D)) ดังนั้นข้อสังเกตก่อนการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของแคลเซียมแล็กเตทกับเอทานอลคือ จะต้องมือน้ำเริ่มต้นที่เหมาะสมเพื่อให้สารละลายใสก่อนเสมอ ถึงจะทำการปรับค่า pH ด้วยกรดซัลฟูริกได้ มิฉะนั้นเราจะไม่สามารถทราบได้ว่า แคลเซียมแล็กเตทได้ทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันกับเอทานอลหรือยัง นอกเหนือ จากปริมาณน้ำเริ่มต้นที่น้อยไปจะทำให้เกลือแคลเซียมแล็กเตทละลายไม่หมดแล้ว ปริมาณน้ำเริ่มต้นที่มากเกินไปก็จะส่งผลต่อค่าผลผลิตของเอทิลแล็กเตทเช่นกัน ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดแล็กติกและเอทานอลนั้น เป็นปฏิกิริยาที่ผันกลับได้ (reversible reaction) โดยมีน้ำเป็นผลพลอยได้ (by-product) ของปฏิกิริยา ซึ่งหากใช้ปริมาณของน้ำเริ่มต้นที่สูง ก็ส่งผลกระทบต่อค่าผลผลิตของเอทิลแล็กเตท นอกจากนี้เมื่อกรดแล็กติกทำปฏิกิริยากับเอทานอล น้ำที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาจะทำให้สมดุลของปฏิกิริยาเลื่อนไปทางด้านซ้าย เอทิลแล็กเตทจะแตกตัวกลับไปเป็นกรดแล็กติกเพิ่มมากขึ้น

ตาราง 5 แสดงผลการทดลองความเข้มข้นของน้ำเริ่มต้นที่มีต่อค่าผลผลิตของเอทิลแล็กเตท โดยทำการผสมแคลเซียมแล็กเตทจำนวน 44 g (คิดเป็นเกลือแล็กเตทจำนวน 20 g) และเอทานอลจำนวน 62 g โดยคิดเป็นอัตราส่วนโดยโมลของเอทานอลต่อแล็กเตทคือ 6:1 จากนั้นทำการเติมน้ำให้ได้ความเข้มข้นต่าง ๆ กัน โดยความเข้มข้นของน้ำเริ่มต้นในการทดลองที่ 1-5 คิดเป็นร้อยละ 5.2, 10.5, 12.0, 15.0, และ 20.2 โดยน้ำหนักตามลำดับ ซึ่งการทดลองที่ 1-3 นั้น แท้จริงแล้วก็คือการทดลองการละลายของตะกอนแคลเซียมแล็กเตทในสารละลายเอทานอล ณ ความเข้มข้นของน้ำต่าง ๆ ที่แสดงในรูปภาพ 12 (A), (B), และ (C) นั่นเอง ซึ่งผลการทดลองนั้นพบว่า ณ ความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำที่ร้อยละ 5.2 และ 10.5 โดยน้ำหนัก ตะกอนของแคลเซียมแล็กเตทจะละลายไม่หมด ทำให้เกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันไม่สมบูรณ์ ปริมาณของเอทิลแล็กเตทที่เกิดขึ้นนั้น มีเพียง 9.75 และ 13.31 กรัม คิดเป็นผลผลิต(โดยโมล)ของเอทิลแล็กเตทที่ร้อยละ 36.09 และ 50.19 เท่านั้น โดยที่ยังมีกรดแล็กติกที่ยังไม่ถูกทำปฏิกิริยาอีกจำนวน 12.78 และ 9.96 กรัมตามลำดับ ส่วนการทดลองที่ 3 นั้น พบว่าความเข้มข้นของน้ำเริ่มต้นที่ร้อยละ 12.0 นั้น จะทำให้เกลือแคลเซียมแล็กเตทเกิดการละลายตัวจนหมดพอดี และเมื่อทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันกับเอทานอลแล้ว จะเกิดผลผลิตของเอทิลแล็กเตทสูงที่สุดคือร้อยละ 70.97 และมีกรดแล็กติกเหลืออยู่ในปฏิกิริยา 5.81 กรัม โดยความเข้มข้นของน้ำ

พบว่าเพิ่มขึ้นจาก 11.2 กรัมไปเป็น 14.07 กรัม คิดเป็นร้อยละ 15.07 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ในการทดลองที่ 4 และ 5 ได้มีการเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของน้ำเป็นร้อยละ 15.0 และ 20.2 ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการที่มีน้ำเริ่มต้นในปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันมากเกินไป จะส่งผลทางด้านลบต่อการเกิดเอทิลแล็กเตท กล่าวคือค่าผลผลิตเอทิลแล็กเตทลดลงจาก 61.13 ไปเป็น 50.23 และยังมีกรดแล็กติกที่ยังไม่ถูกทำปฏิกิริยาอีก 7.77 และ 9.95 กรัม ตามลำดับ กล่าวโดยสรุปแล้ว ถึงแม้ว่าการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าปริมาณน้ำเริ่มต้นที่ทำให้เกิดผลผลิตของเอทิลแล็กเตท เมื่อปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันเข้าสู่สมดุลคือร้อยละ 12.0 จากการทำปฏิกิริยานี้ได้ผลิตน้ำเป็นผลพลอยได้ ซึ่งได้ส่งผลทำให้สมดุลของปฏิกิริยาเลื่อนไปทางซ้าย กรดแล็กติกจะไม่สามารถเปลี่ยนไปเป็นเอทิลแล็กเตทได้ทั้งหมด ดังนั้นหากต้องการที่จะทำให้สมดุลของปฏิกิริยาเลื่อนไปทางขวา จึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการแยกผลิตภัณฑ์ออกจากปฏิกิริยา ซึ่งอาจจะเป็นน้ำหรือเอทิลแล็กเตทก็ได้ โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองและเปรียบเทียบการแยกสารทั้งสองชนิดออกจากระบบ

ตาราง 5 ความเข้มข้นของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ในขณะเริ่มต้นและเมื่อถึงจุดสมดุลของปฏิกิริยา การทดลองนี้ใช้อุณหภูมิในการทดลองที่ 70 องศาเซลเซียส pH 2.0 และค่าผลผลิตโดยโมลของเอทิลแล็กเตท (ELA) คำนวณจากปริมาณของเอทิลแล็กเตท ณ จุดสมดุลเทียบกับปริมาณของแล็กเตท ณ จุดเริ่มต้น

No.	At the beginning (g)			At equilibrium (g)				Y _{ELA/LA} (%)
	Lactate	EtOH	H ₂ O	LA	ELA	EtOH	H ₂ O	
1	20	62.0	4.5	12.78	9.57	58.29	5.96	36.09
2	20	62.0	9.6	9.96	13.31	56.83	11.63	50.19
3	20	62.0	11.2	5.81	18.82	54.69	14.07	70.97
4	20	62.0	14.5	7.77	16.21	55.70	16.97	61.13
5	20	62.0	20.8	9.95	13.32	56.83	22.83	50.23

เนื่องจากน้ำเป็นสารที่มีขนาดของโมเลกุลเล็กที่สุดของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ในการใช้การกรองในระดับโมเลกุล (molecular sieving) ในการกำจัดน้ำออกจากระบบ ซึ่งเทคนิคที่จะใช้นี้เรียกว่าการแยกไอผ่านเยื่อแผ่น (vapor permeation, VP) โดยการทดลองนี้จะใช้เอทานอลร้อยละ 95 ที่ผลิตได้จากห้องปฏิบัติการนำมาใช้เป็นสารตั้งต้น จากนั้นจะทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันที่อุณหภูมิสูงเพื่อที่จะทำการกลั่นเอทานอลออกมาเพื่อทำการแยกน้ำ ซึ่งเอทานอลใรน้ำนี้สามารถนำไปใช้หมุนเวียนในกระบวนการเอสเทอร์ฟิเคชันได้อีกด้วย (Dehydrated Ethanol, 99.9%) ส่วนน้ำที่ถูกแยกออกจากระบบการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นนี้ จะถูกทำให้เกิดการควบแน่นในด้านของเพอร์มิเอท (permeate) เพื่อที่จะทำให้ระบบนี้มีความเป็นไปได้ในเชิงพาณิชย์มากขึ้น จะต้องมึระบบการกำจัดน้ำออกจากปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพสูง เพื่อจุดประสงค์หลักในการทำให้ปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์และภายในเวลาอันสั้น

จุดประสงค์หลักของการประยุกต์ใช้ระบบการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นนั้น ก็คือหลีกเลี่ยงการสัมผัสกันโดยตรงของตัวเมมเบรนกับสารละลายซึ่งมีสถานะที่เป็นกรดสูง ซึ่งจะทำให้สามารถช่วยยืดอายุของเมมเบรน

ให้ยาวนานขึ้นได้อีกมาก ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการทำปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ณ อุณหภูมิที่เป็นจุดเดือดของสารละลาย แล้วทำการกลั่นลำดับส่วนเอาเอทานอลที่มีน้ำปนอยู่ประมาณไม่เกินร้อยละ 7.0 เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนการกำจัดน้ำด้วยระบบการแยกไอน้ำผ่านเยื่อแผ่นดังกล่าว ก่อนที่จะนำเอาเอทานอลไร้รสน้ำนี้ไหลเวียนกลับเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ต่อไป อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพการกำจัดน้ำของระบบการแยกไอน้ำผ่านเยื่อแผ่นดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับสภาวะการทำงานหลายอย่าง เช่น ความเข้มข้นของน้ำในสารละลายเอทานอล อุณหภูมิและความดันของเอทานอลในด้านของสารป้อน เป็นต้น ตาราง 6 แสดงผลการทดลองของค่าฟลักซ์ของน้ำและค่าสัมประสิทธิ์การแยก (separation factor) ในสภาวะการทำงานต่าง ๆ โดยเน้นอุณหภูมิและความดันของสารป้อน โดยทำการทดลองที่ 1-4 เป็นการศึกษาถึงอิทธิพลของอุณหภูมิต่าง ๆ ของสารละลายเอทานอลที่มีความเข้มข้นของน้ำที่ร้อยละ 5 และมีความดัน 100 กิโลปาสกาล ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าฟลักซ์โดยรวม (total flux) นั้น จะเพิ่มขึ้นเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิของสารป้อน ทั้งนี้เนื่องมาจากการเพิ่มอุณหภูมินั้น จะทำให้แรงขับ (driving force) ระหว่างทั้งสองด้านของเมมเบรนมีเพิ่มมากขึ้น โดยลักษณะการเพิ่มขึ้นนั้นจะเป็นแบบเอ็กโปเนนเชียล (exponential) โดยค่าฟลักซ์โดยรวมมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 6.3, 19.61, และ 39.71 เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิจาก 100 องศาเซลเซียสขึ้นไปเป็น 115, 130, และ 145 องศาเซลเซียสตามลำดับ และค่าฟลักซ์ย่อยของเอทานอลนั้น พบว่ามีค่าน้อยมาก โดยเกือบจะเป็นศูนย์ของทุก ๆ การทดลอง นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์การแยกที่คำนวณได้จะแปรค่าเป็นสัดส่วนผกผันกับค่าฟลักซ์ โดยค่าสัมประสิทธิ์การแยกจะมีค่าลดลงจาก 2735 ไปเป็น 1773 เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิจาก 100 ไปเป็น 145 องศาเซลเซียส ในด้านของเพอร์มิเอชัน พบว่าความเข้มข้นของน้ำสูงสุดที่วัดได้คือร้อยละ 98.9 ซึ่งส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การแยกสูงสุดคือ 2735 ซึ่งการที่ค่าดังกล่าวสูงมากนั้น เกิดเนื่องมาจากการเคลื่อนผิวของเมมเบรนด้วยสารซีโอไลท์ชนิดโซเดียมเอ (NaA zeolite) ซึ่งมีคุณสมบัติในการกรองสารระดับโมเลกุล (Molecular sieve) โดยมีขนาดของรูพรุนทางทฤษฎีคือ 3-4 อังสตรอม ซึ่งเป็นขนาดของรูพรุนที่ทำให้น้ำซึมผ่านได้ (ขนาดโมเลกุลของน้ำคือ 2.6 อังสตรอม) ในขณะที่เอทานอลซึ่งมีขนาดโมเลกุลอยู่ที่ 4.4 อังสตรอมจะไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านรูพรุนเหล่านี้ไปได้และจะเคลื่อนที่ออกจากระบบออกไปทางรีเทนเตต (retentate) สำหรับการทดลองที่ 5-8 นั้น เป็นการศึกษาอิทธิพลของความดันด้านสารป้อนที่มีต่อค่าฟลักซ์ โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 145 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เนื่องจากระบบการแยกไอน้ำผ่านเยื่อแผ่นนี้ เป็นระบบที่ถูกเหนี่ยวนำด้วยความดัน ดังนั้นค่าฟลักซ์จะแปรผันโดยตรงกับความดันของระบบ ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่าดังกล่าวมีความสัมพันธ์กันเป็นเส้นตรง เมื่อความดันของระบบเพิ่มขึ้นไปจนถึง 300 กิโลปาสกาล ก่อนที่ความสัมพันธ์จะเป็นแบบเอ็กโปเนนเชียลเมื่อความดันของระบบเพิ่มเป็น 400 กิโลปาสกาลตามลำดับ โดยค่าฟลักซ์ที่วัดได้คือ 2.85, 3.98, 4.82, และ 5.11 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อชั่วโมงตามลำดับ ส่วนการทดลองที่ 9-12 จะเป็นการศึกษาถึงอิทธิพลของความเข้มข้นของน้ำในด้านของสารป้อน (ร้อยละ 2.5 ถึง 10) ที่มีต่อประสิทธิภาพในการแยกน้ำ โดยทำการทดลองที่ความดันคงที่ 400 กิโลปาสกาลและอุณหภูมิของไอที่ 145 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อความเข้มข้นของน้ำเพิ่มสูงขึ้น ค่าฟลักซ์ก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยเป็นผลสืบเนื่องจากการที่มีความดันไอย่อยของน้ำ (water partial pressure) ในด้านของสารป้อนที่มากขึ้นนั่นเอง และเมื่อความเข้มข้นของน้ำลดลง ปริมาณน้ำ

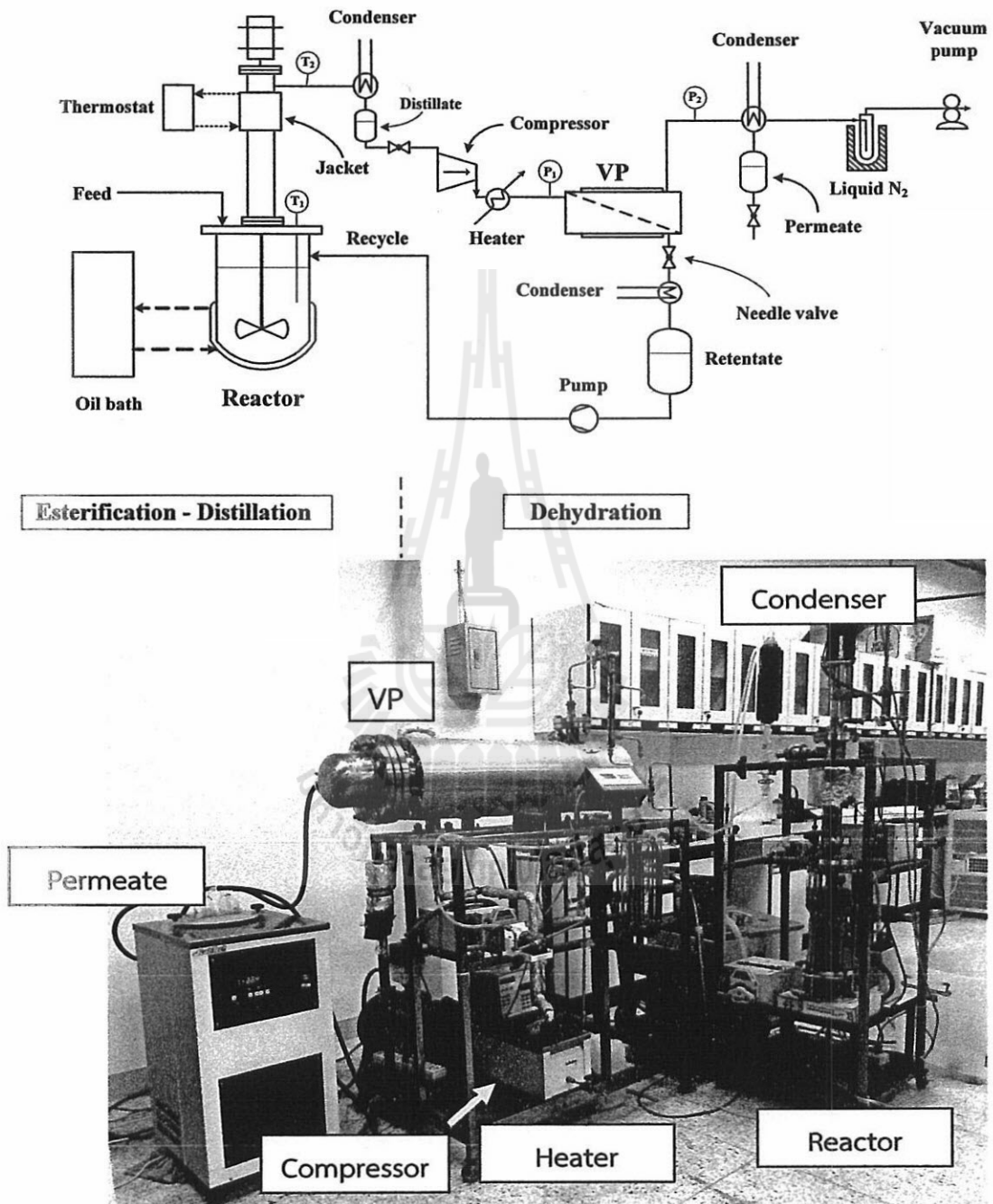
ที่จะซึมผ่านเมมเบรนก็จะลดลง ส่งผลให้ค่าฟลักซ์ลดลงตามไปด้วย ซึ่งจากการทดลองพบว่าค่าฟลักซ์สูงสุดที่สามารถวัดได้คือ 11.13 กิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อชั่วโมง ณ ความเข้มข้นของน้ำที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ซึ่งมากกว่า 2.5 เท่าของความเข้มข้นของน้ำที่ร้อยละ 2.5 โดยน้ำหนัก

ตาราง 6 การแยกไอผ่านเยื่อแผ่นของสารละลายเอทานอล ณ สภาวะการทำงานที่แตกต่างกัน โดยใช้เมมเบรนเซรามิกชนิดโซเดียมเอ และอัตราการไหลของสารละลายเอทานอลที่ 0.70 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

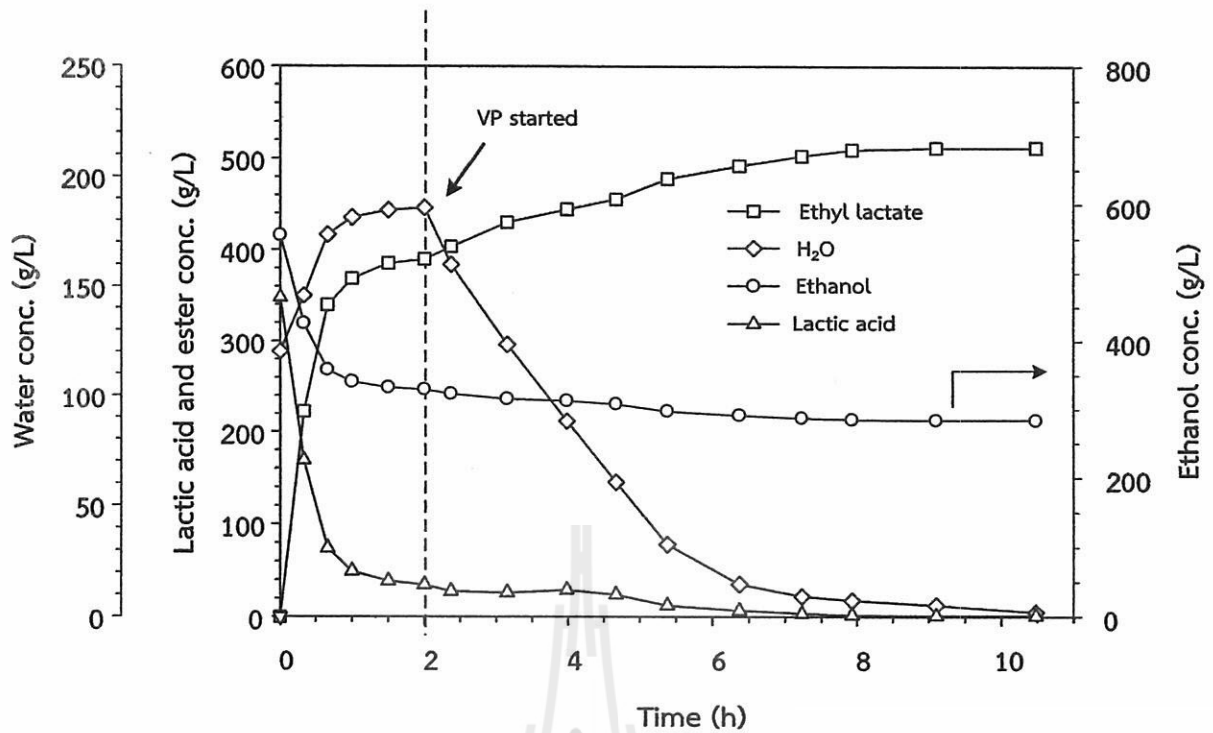
No.	Temp. (°C)	Pressure (kPa)	Water conc. in feed (wt%)	Water conc. in permeate (wt%)	Total flux (kg/m ² .h)	α
1	100	100	5.0	99.64	2.04	2735
2	115	100	5.0	99.41	2.17	2356
3	130	100	5.0	99.13	2.44	2165
4	145	100	5.0	98.94	2.85	1773
5	145	100	5.0	98.94	2.85	1773
6	145	200	5.0	98.91	3.98	1724
7	145	300	5.0	98.71	4.82	1454
8	145	400	5.0	98.05	5.11	955
9	145	400	2.5	96.64	4.21	1122
10	145	400	5.0	98.05	5.10	955
11	145	400	7.5	98.73	6.95	959
12	145	400	10.0	99.02	11.13	909

รูปภาพ 13 แสดงการนำเอาระบบการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นมาใช้ร่วมกับปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ซึ่งในขั้นแรกจะทำการผสมแคลเซียมแล็กเตทกับเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 95 โดยน้ำหนักก่อน ซึ่งในที่นี้จะใช้อัตราส่วนโดยโมลเริ่มต้นของเอทานอลต่อกรดแล็กติกที่ 4 ต่อ 1 จากนั้นเพิ่มความร้อนจนกระทั่งตะกอนของแคลเซียมแล็กเตทละลายจนหมด จากนั้นทำการปรับ pH ให้ได้ 2.0 ด้วยกรดซัลฟูริก โดยการปรับค่าความเป็นกรด-ด่างนี้ จะถือเป็นเวลาเริ่มต้นของปฏิกิริยา ซึ่งระบบจะถูกทำให้เข้าสู่สมดุลประมาณ 2 ชั่วโมง

จากนั้นจะทำการเพิ่มอุณหภูมิจนกระทั่งถึงจุดเดือดของปฏิกิริยา ซึ่งส่วนกลั่นเอทานอลที่ได้นี้ จะมีความเข้มข้นประมาณร้อยละ 7 โดยน้ำหนัก และจะถูกบีบเข้าสู่ระบบการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นเพื่อทำการกำจัดน้ำ โดยที่ปฏิกิริยาจะสิ้นสุดลงเมื่อความเข้มข้นของน้ำลดลงเหลือน้อยกว่าร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก



รูปภาพ 13 แผนภาพแสดงการทำงานของระบบการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นร่วมกับปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน (บน) และภาพถ่ายการทดลองระบบการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นร่วมกับปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันในถังขนาด 2 ลิตร (ล่าง)



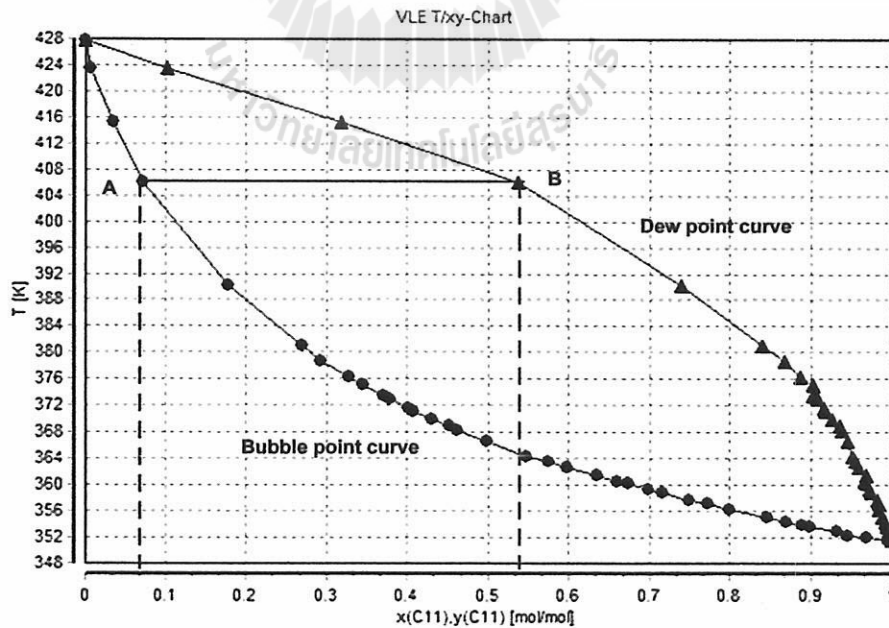
รูปภาพ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์เมื่อใช้ระบบการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นร่วมกับปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกรดแล็กติกกับเอทานอลเมื่อเทียบกับเวลา

รูปภาพ 14 แสดงผลการทดลองการใช้ระบบการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นร่วมกับปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน ซึ่งการทดลองการแยกน้ำด้วยสารละลายเอทานอลนั้น พบว่าผลผลิตและผลิตผลของเอทิลแล็กเตทภายหลัง จากที่ทำการรบกวนสมดุลของระบบแล้ว จะขึ้นอยู่กับอัตราการกำจัดน้ำเป็นสำคัญ และจะขึ้นอยู่กับ สภาวะการทำงานต่าง ๆ ด้วย ดังนั้นในการออกแบบระบบให้สามารถกำจัดน้ำได้ภายในเวลาที่กำหนด จึงต้อง ขึ้นอยู่กับขนาดของพื้นที่ผิวและปริมาตรของปฏิกิริยาเริ่มต้นเป็นสำคัญ ซึ่งการทดลองนี้ใช้พื้นที่ผิวของเมม เบรนเท่ากับ 2,300 ตารางเซนติเมตรและใช้ปริมาตรของปฏิกิริยาเริ่มต้นคือ 2.0 ลิตรตามลำดับ สำหรับ สภาวะการทำงานอื่น ๆ มีดังนี้คือ อุณหภูมิของไอที่เข้าสู่ระบบการกำจัดน้ำคือ 145 องศาเซลเซียส ความดัน 400 กิโลปาสกาล pH 2.0 และความดันสูญญากาศในด้านของเพอร์มิเอท 20 มิลลิบาร์ตามลำดับ ซึ่งก่อนที่จะ เริ่มทำการแยกน้ำด้วยระบบการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นนั้น เมื่อเวลาผ่านไป 2 ชั่วโมง พบว่าปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิ เคชันเข้าสู่สมดุล โดยความเข้มข้นของน้ำเพิ่มขึ้นจาก 120 กรัมต่อลิตร ไปเป็น 188.3 กรัมต่อลิตร หลังจากนั้น เริ่มทำการแยกน้ำ ซึ่งจะทำให้ความเข้มข้นของน้ำลดลงอย่างต่อเนื่อง ในช่วง 4 ชั่วโมงแรกหลังจากเริ่มทำ การแยกน้ำ พบว่าความเข้มข้นลดลงอย่างต่อเนื่องจนเหลือ 35.54 กรัมต่อลิตร ซึ่งอัตราการกำจัดน้ำที่รวดเร็ว นี้ เป็นผลสืบเนื่องมาจากการที่ความเข้มข้นของน้ำในสารละลายเอทานอลมีสูง ส่งผลทำให้ค่าฟลักซ์ของน้ำนั้น มีสูงตามไปด้วย แต่หลังจากที่ความเข้มข้นของน้ำลดลงมากกว่าจุดนี้ อัตราการกำจัดน้ำจะลดต่ำลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งปฏิกิริยาสิ้นสุดลงเมื่อความเข้มข้นของน้ำลดลงถึง 1.98 กรัมต่อลิตร รวมการใช้เวลาในการกำจัดน้ำ

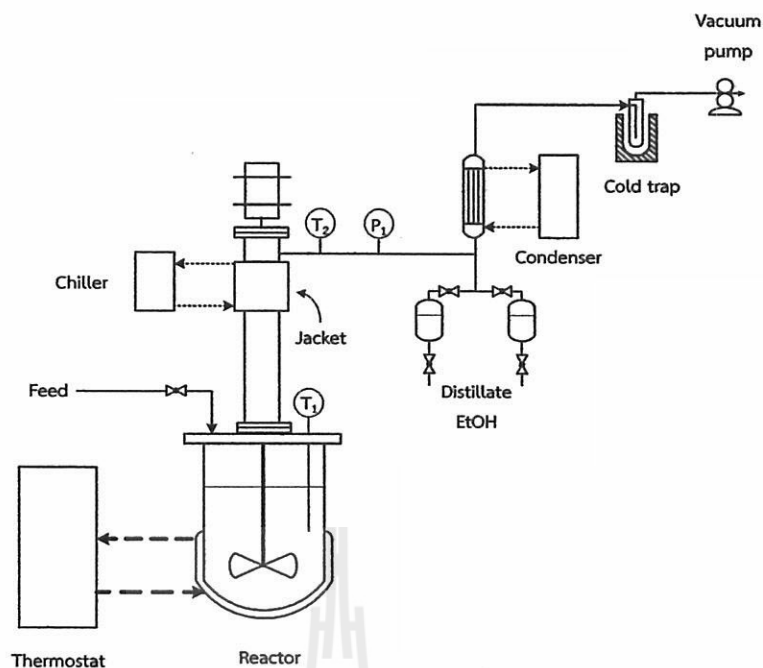
ออกจากปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันทั้งสิ้น 9 ชั่วโมง ซึ่ง ณ จุดนี้ กรดแล็กติกจะเปลี่ยนเป็นแอทิลแล็กเตททั้งหมด

3.2 การกลั่นลำดับส่วนแบบสุญญากาศ

ภายหลังจากปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ และกรดแล็กติกได้เปลี่ยนไปเป็นแอทิลแล็กเตททั้งหมดแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการกลั่นแยกเอทานอลและแอทิลแล็กเตทออกจากกัน โดยรูปภาพ 15 แสดงการศึกษาถึงระบบสมดุลของเหลวและไอ (vapor-liquid equilibrium, VLE) ของระบบนี้ ซึ่งมีความสำคัญมาก โดย VLE ของระบบเอทานอลและแอทิลแล็กเตท แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโมลของแอทิลแล็กเตท (แกน x) และจุดเดือดของสารละลาย (แกน y) โดยที่จุด x เท่ากับศูนย์หมายถึง สารแอทิลแล็กเตทบริสุทธิ์ และจุด x เท่ากับหนึ่งแสดงถึงเอทานอลบริสุทธิ์ โดยกราฟจะแสดงความสัมพันธ์สองลักษณะคือ เส้นกราฟด้านล่างแสดงถึงจุดเดือดของสารละลายที่สัดส่วนโมลแตกต่างกัน (bubble point curve) ในขณะที่ความสัมพันธ์ของเส้นด้านบนจะแสดงถึงอุณหภูมิที่ไอควบแน่นเป็นของเหลวหรือที่เรียกว่า dew point curve ยกตัวอย่างเช่น หากมีของผสมแอทิลแล็กเตทและเอทานอลที่มีสัดส่วนโมลของเอทานอลในแอทิลแล็กเตทที่ 0.067 เมื่อทำการให้ความร้อนสารละลายนี้ จะทำให้อุณหภูมิของระบบเพิ่มขึ้น จนกระทั่งอุณหภูมิของระบบเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 406 เคลวิน (133 องศาเซลเซียส) ณ จุด A และจะทำให้เกิดการแยกสถานะเป็นฟอง ก่อนที่จะเกิดการเดือดของสารละลายตามมา ซึ่งการเกิดฟองนี้จะทำให้เกิดไอของของผสมเอทานอลและแอทิลแล็กเตท โดยที่ไอนี้ เมื่อเกิดการควบแน่น สถานะของไอจะกลับมาเป็นของเหลว (จุด B) ที่มีสัดส่วนโมลของเอทานอลอยู่ที่ประมาณ 0.54 เป็นต้น



รูปภาพ 15 สมดุลวัฏภาคของของเหลวและไอ (Vapor/liquid equilibria, VLE) ระหว่างแอทิลแล็กเตทกับเอทานอลบริสุทธิ์ ณ ความดัน 1 บรรยากาศ (Gmehling and Onken, 1982)



รูปภาพ 16 การออกแบบระบบการกลั่นลำดับส่วนแบบสุญญากาศเพื่อแยกเอทานอลออกจากเอทิลแล็กเตท

จากรูปภาพ 16 แสดงให้เห็นว่ามีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการกลั่นลำดับส่วน เพื่อทำการแยกเอทานอลและเอทิลแล็กเตทบริสุทธิ์ออกมาจากระบบ โดยทั่วไปแล้วข้อมูลสำหรับสมดุลวัฏภาคของเหลวและไอของระบบของเหลวสองส่วน จะมีความสำคัญเป็นอย่างมากในการออกแบบระบบการกลั่นลำดับส่วน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการออกแบบจำนวนของชั้น (plate) ที่อยู่ภายในของหอกลั่นลำดับส่วน (fractionating column) แต่อย่างไรก็ตาม ในโครงการวิจัยนี้ ได้ทำการควบคุมการแยกด้วยการบังคับให้เกิดการควบแน่นที่เหมาะสมในหอกลั่น ซึ่งผลการแยกที่ดีนั้น จะต้องได้จากการทำการทดลองเท่านั้น โดยทำการปรับค่าสภาวะต่าง ๆ เช่น ความดันสุญญากาศของระบบและอุณหภูมิของไอที่เป็นส่วนกลั่นเป็นต้น โดยทำการวัดความเข้มข้นของเอทิลแล็กเตทที่อยู่ในส่วนกลั่นเอทานอล โดยทั่วไปแล้วนั้น หากทำการกลั่นได้แต่เอทานอลและไม่มีเอทิลแล็กเตทปนมาเลย แสดงให้เห็นว่าระบบการกลั่นลำดับส่วนมีประสิทธิภาพดีมาก รูปภาพ 16 แสดงการกลั่นลำดับส่วนแบบสุญญากาศเพื่อทำการแยกเอทานอลออกจากเอทานอล โดยการแยกเอทานอลบริสุทธิ์จะเริ่มจากการลดความดันสุญญากาศลงให้เหลือ 250 มิลลิบาร์ โดยใช้อุณหภูมิของสารละลายอยู่ที่ 70-90 องศาเซลเซียส ซึ่งจะส่งผลให้สารละลายเดือด ไอผสมของเอทานอลและเอทิลแล็กเตทจะถูกกลั่นลำดับส่วนให้เหลือแต่เอทานอลบริสุทธิ์ โดยทำการควบคุมอัตราการหมุนของใบพัดที่ 1000 รอบต่อนาที เพื่อให้ไอผสมของเอทานอลและเอทิลแล็กเตทที่ลอยขึ้นมานั้นมีลักษณะที่เป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) นอกจากนี้ได้ทำการออกแบบระบบให้สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง กล่าวคือมีการใช้ขวดแก้ว 2 ใบทำหน้าที่ในการเก็บส่วนที่กลั่นได้ เมื่อขวดใบแรกเต็ม ก็จะมีการสลับวาล์วให้ส่วนกลั่นไหลไปรวมกันในขวดใบที่สอง เมื่อเอทานอลออกจากระบบหมดแล้วก็จะเปลี่ยนขั้นตอนการกลั่นเอทิลแล็กเตทบริสุทธิ์โดยการลดความดันสุญญากาศให้เหลือ 20 มิลลิบาร์

ซึ่งจะทำให้สามารถกลั่นเอทิลแอลกอฮอล์ออกมาได้ โดยตาราง 7 เป็นการสรุปขั้นตอนในการกลั่นเอทิลแอลกอฮอล์ออกจากระบบ

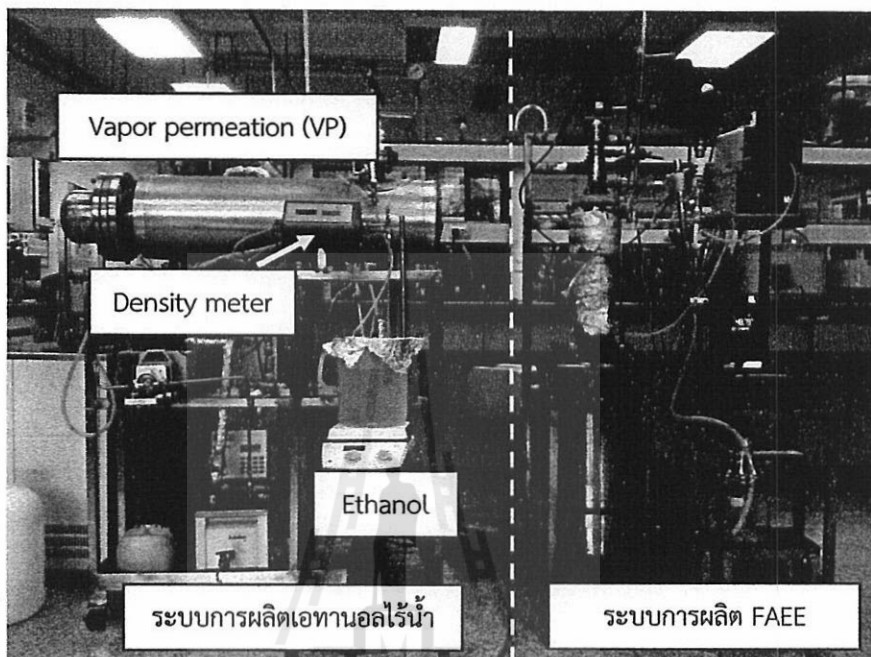
ตาราง 7 สภาวะของอุณหภูมิและความดันที่ใช้ ระหว่างขั้นตอนการกลั่นเอทิลแอลกอฮอล์ โดย T_1 คืออุณหภูมิของของเหลวส่วน T_2 คืออุณหภูมิของไอตามลำดับ

สภาวะ	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)		ความดันสุญญากาศ (mBar)	ส่วนกลั่น
	T_1	T_2		
การกลั่นเอทิลแอลกอฮอล์				
ขั้นตอนที่ 1	70-90	35	250	97 wt% เอทานอล
ขั้นตอนที่ 2	60	55	20	98.2 wt% เอทิลแอลกอฮอล์

3.3 กระบวนการผลิตเอทานอลไร้น้ำและเอทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (FAEE)

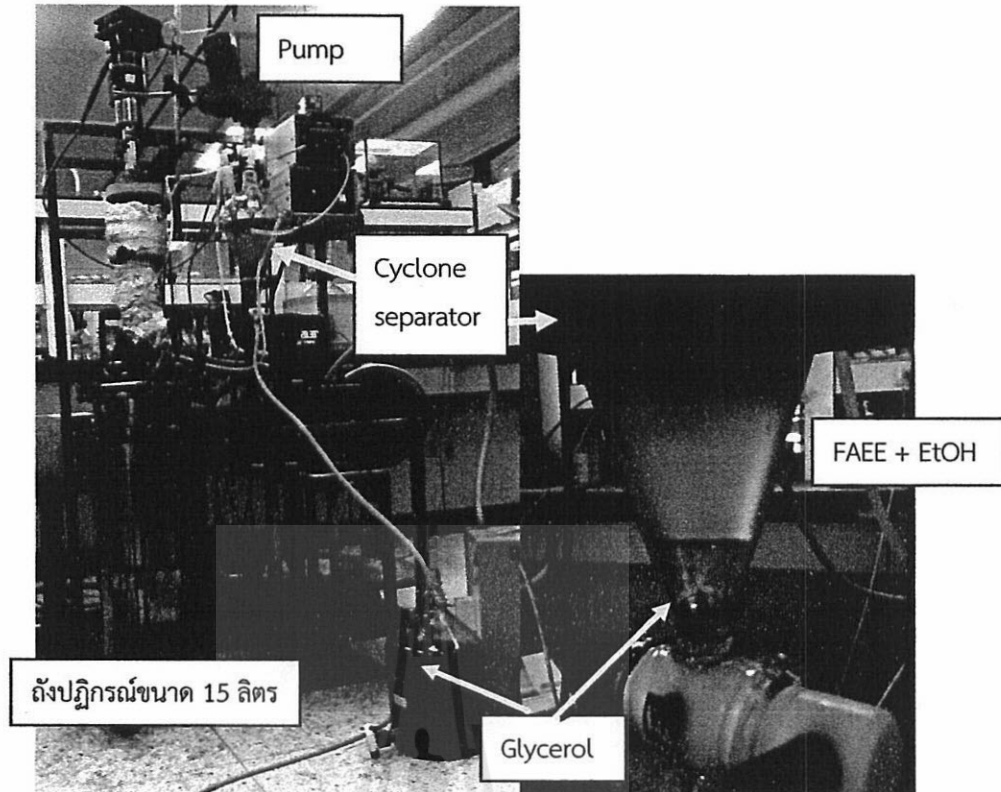
รูปภาพ 17 แสดงกระบวนการผลิตเอทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันจากน้ำมันปาล์ม โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบ continuous deglycerolization (CD reactor) ซึ่งนักวิจัยได้ออกแบบถังปฏิกรณ์ให้สามารถผลิตเอทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันและแยกกลีเซอรอลออกจากระบบอย่างต่อเนื่อง โดยที่กลีเซอรอลจะไม่ละลายในเอทิลเอสเทอร์ โดยกลีเซอรอลมีค่าความหนาแน่นที่ 1.29 กรัมต่อมิลลิเมตร ในขณะที่ค่าเฉลี่ย ความหนาแน่นของเอทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันจะอยู่ที่ประมาณ 0.86 กรัมต่อมิลลิเมตร ทำให้สารสองชนิดนี้ สามารถแยกออกจากกันอย่างมีประสิทธิภาพโดยใช้หลักการของการแยกชั้นเป็นต้น ในการทดสอบการแยกนี้ ได้ใช้เอทานอลที่ทำการหมักขึ้นภายในห้องปฏิบัติการ ก่อนที่จะทำการกลั่นลำดับส่วนแบบสุญญากาศ และทำการกำจัดน้ำด้วยระบบการแยกไอน้ำเยื่อแผ่น (VP) โดยมีความเข้มข้นของน้ำในเอทานอลที่ร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก (ปริมาตร 5 ลิตร) จากนั้นทำการเติมเกล็ดดของโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นสารเร่งปฏิกิริยาในอัตราส่วนร้อยละ 1 โดยน้ำหนักของน้ำหนักน้ำมันปาล์ม จากนั้นได้ทำการบีบเอทานอลที่ผสมกับ KOH หรือที่เรียกว่า K-ethoxide เข้าไปในถังปฏิกรณ์ที่ได้ทำการอุ่นน้ำมันปาล์มไว้ก่อนหน้านี้แล้ว (10 ลิตร น้ำมันปาล์ม) เพื่อให้ k-ethoxide ทำปฏิกิริยาทรานส์ เอสเทอร์ฟิเคชันกับน้ำมันปาล์ม ซึ่งในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันนั้น กลีเซอรอล จะแยกตัวออกมากลายเป็นเม็ดเล็ก ๆ คล้ายกับอิมัลชัน เพื่อเป็นการเร่งสมดุลของระบบให้ไปทางขวาเร็วขึ้น นักวิจัยได้พัฒนาระบบการแยกกลีเซอรอลออกอย่าง

ต่อเนื่องด้วยการใช้ไซโคลน (cyclone) โดยทำการบีบ ของผสมออกจากถังหมักเข้าสู่ตัวไซโคลน ซึ่งกลีเซอรอลที่มีความหนาแน่นมากกว่าจะรวมตัวกันตกอยู่ด้านล่าง ของไซโคลนและสามารถกำจัดออกจากระบบได้โดยใช้ วาล์วที่ติดอยู่ด้านล่างของไซโคลน ส่วนของเหลวที่ ประกอบด้วย FAEE และกลีเซอรอลบางส่วน (FAEE + Glycerol) จะไหลกลับเข้าไปในถังปฏิกรณ์ และเมื่อปฏิกิริยาลิ้นสุดลงจะได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่เป็น FAEE บริสุทธิ์มีลักษณะใสและมีสีเหลือง ซึ่งขั้นตอนนี้จะใช้ระยะเวลาประมาณ 16 ชั่วโมง



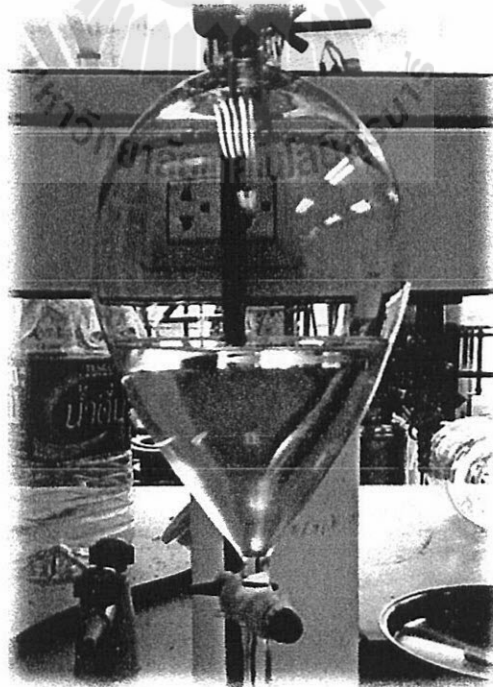
รูปภาพ 17 กระบวนการผลิตเอทานอลไร้น้ำและเอทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (FAEE) โดยการแยกกลีเซอรอลแบบต่อเนื่องด้วยระบบไซโคลน

รูปภาพ 18 แสดงกระบวนการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบ continuous deglycerolization (CD reactor) ซึ่งนักวิจัยได้ออกแบบถังปฏิกรณ์ในการผลิตเอทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันจากน้ำมันปาล์ม ซึ่งสามารถผลิตเอทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันและแยกกลีเซอรอล ออกจากระบบอย่างต่อเนื่อง โดยกลีเซอรอล จะไม่ละลายในเอทิลเอสเทอร์และจะมีค่าความหนาแน่นที่ 1.29 กรัมต่อมิลลิลิตร ในขณะที่ค่าเฉลี่ยความ หนาแน่นของเอทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันจะอยู่ที่ประมาณ 0.86 กรัมต่อมิลลิลิตร ทำให้สารสองชนิดนี้ สามารถแยกออกจากกันอย่างมีประสิทธิภาพโดยใช้หลักการของการแยกชั้นเป็นต้น โดยที่กลีเซอรอลจะแยก ชั้นอยู่ด้านล่างและสามารถไหลออกจากระบบได้โดยใช้วาล์วที่ติดอยู่ด้านล่างของถังปฏิกรณ์ และเมื่อทำการ แยกเอาชั้นของกลีเซอรอลออกจากระบบจนหมดแล้ว ขั้นตอนถัดไปคือการกลั่นลำดับส่วนเพื่อเอาเอทานอล ออกจากระบบ ตามด้วยการกลั่นลำดับส่วนเพื่อแยก FAEE ซึ่งในขั้นตอนนี้ก็คือเชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับอากาศยาน นั่นเอง



รูปภาพ 18 กระบวนการผลิต FAEE และการแยกกลีเซอรอลแบบต่อเนื่องด้วยระบบไซโคลน

รูปภาพ 19 แสดงส่วนกลั่นที่เป็น FAEE จากกระบวนการกลั่นลำดับส่วน แสดงให้เห็นถึงลักษณะที่ใส ซึ่งคาดว่าจะมีความสะอาดมากกว่าน้ำมันไบโอดีเซลที่ยังไม่ได้ผ่านขั้นตอนการกลั่นลำดับส่วน



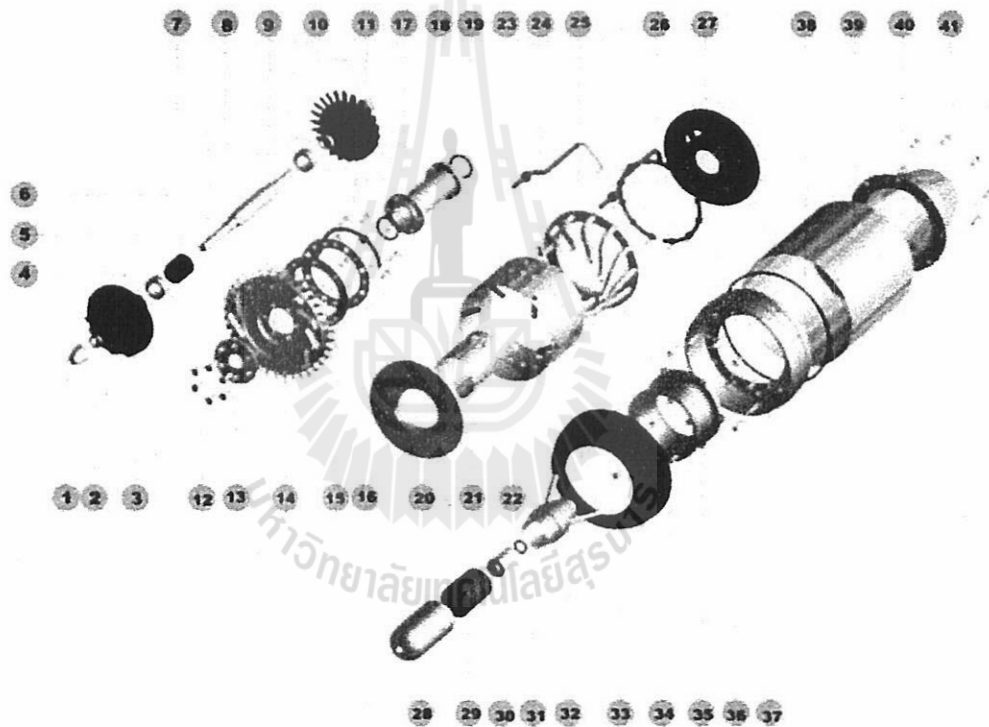
รูปภาพ 19 Fatty acid ethyl ester ของน้ำมันจากเนื้อเมล็ดปาล์มที่ผ่านการกลั่นลำดับส่วนแล้ว

3.4 ส่วนประกอบหลักของเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์ไบน์

ส่วนประกอบหลักของเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์ไบน์ขนาดเล็กจะมีส่วนประกอบหลัก ๆ ดังแสดงในรูปภาพ 20 ซึ่งสามารถอธิบายในส่วนต่าง ๆ ได้ดังนี้

- ส่วนอัดอากาศและกังหัน (Compressor and turbine Section)

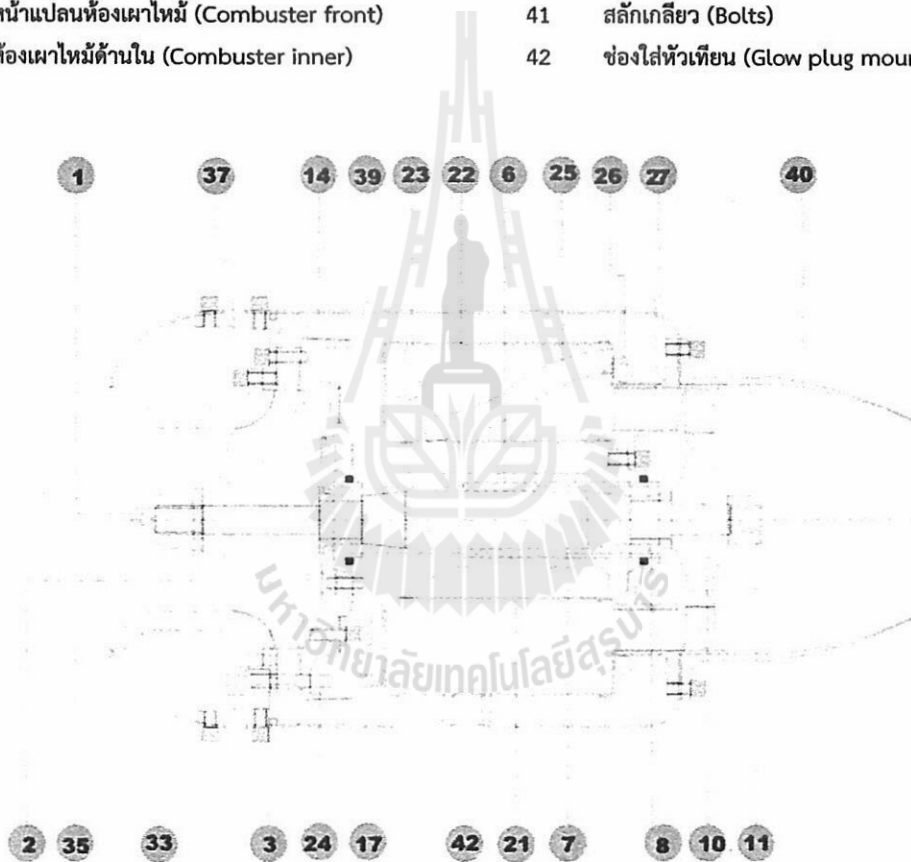
ส่วนนี้เป็นส่วนที่สำคัญที่สุดของเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์ไบน์ขนาดเล็ก โดยเป็นส่วนที่ทำหน้าที่หลักในการผลิตพลังงานในกับระบบ โดยล้อกังหัน (turbine wheel) จะทำหน้าที่ในการเอาพลังงานจลน์ จากการขยายตัวของก๊าซร้อนที่ออกมาจากส่วนสันดาป แล้วเปลี่ยนพลังงานเหล่านี้ให้เป็นพลังงานขับเคลื่อนที่เพลานำไปขับเคลื่อนเครื่องอัดอากาศ (compressor wheel) อีกขั้นตอนหนึ่ง ส่วนของเครื่องอัดอากาศของเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์ไบน์มีหลายหน้าที่ด้วยกัน ซึ่งในที่นี้การทำหน้าที่หลักก็คือการส่งอากาศเข้าไปในเครื่องให้เพียงพอต่อความต้องการของเครื่องยนต์

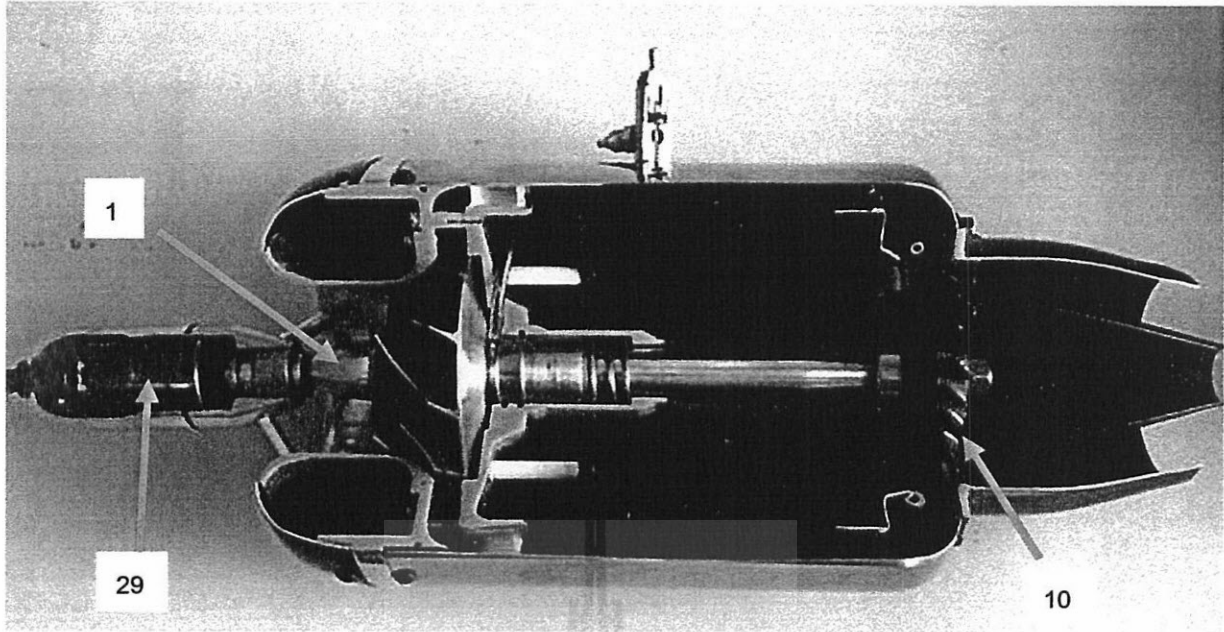


รูปภาพ 20 แสดงชิ้นส่วนและส่วนประกอบของเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์ไบน์ขนาดเล็ก

ลำดับ	รายการ	ลำดับ	รายการ
1	น็อตยึด (Spinner nut)	22	ห้องเผาไหม้ด้านนอก (Combustor outer)
2	วงแหวนแม่เหล็ก (Magnet ring)	23	Swirl jets
3	ล้ออัดอากาศ (Compressor wheel)	24	ท่อนำก๊าซ (Gas line)
4	แผ่นตะแกรงด้านหน้า (Front spacer)	25	ส่วนระเหยน้ำมันให้เป็นก๊าซ (Vaporizer)
5	ตลับลูกปืนด้านหน้า (Front bearing)	26	หัวฉีดเชื้อเพลิง (Fuel injectors)
6	สปริง (Preload spring)	27	ช่องนำไอเสียออก (Nozzle guide vane)
7	แกนเพลลา (Rotor shaft)	28	ตัวหุ้มมอเตอร์สตาร์ทด้านหน้า (Starter case front)

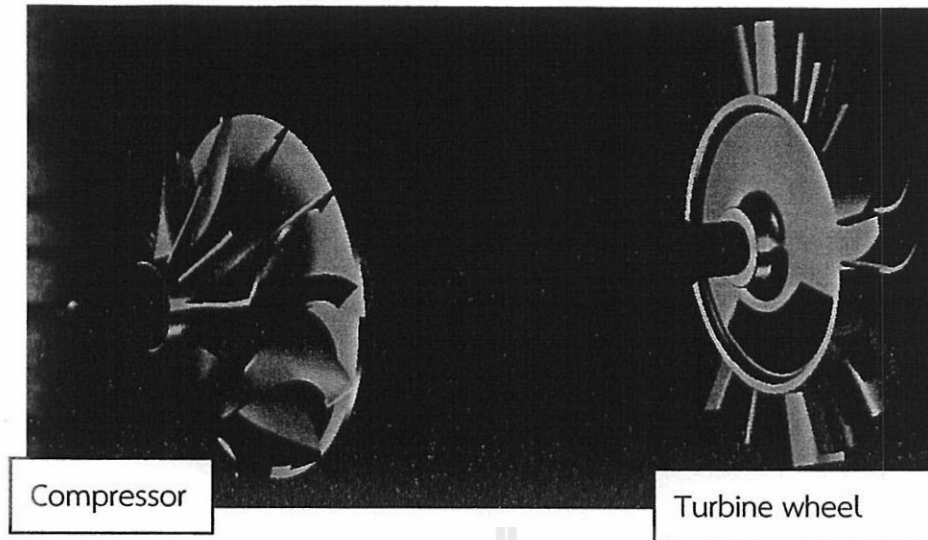
- | | | | |
|----|---------------------------------------|----|---|
| 8 | ตลับลูกปืนด้านหลัง (Rear Bearing) | 29 | มอเตอร์สตาร์ทไฟฟ้า (Electric motor) |
| 9 | แผ่นตะแกรงด้านหลัง (Rear spacer) | 30 | ครัช (Clutch) |
| 10 | ล้อใบพัด (Turbine wheel) | 31 | ปะเก็นครัช (Clutch o-ring) |
| 11 | น็อตยึดใบพัด (Turbine nut) | 32 | ฝาครอบส่วนหลังมอเตอร์สตาร์ท (Starter case rear) |
| 12 | สลักเกลียว (Bolts) | 33 | ฝาครอบเครื่องยนต์ด้านหน้า (Engine front cover) |
| 13 | ปะเก็นเพลา (Shaft seal) | 34 | สลักเกลียว (Bolts) |
| 14 | ดิฟฟิวเซอร์ (Diffuser) | 35 | Bell mount intake |
| 15 | แผ่นกรอง (Filter mesh) | 36 | สลักเกลียว (Bolts) |
| 16 | แผ่นปิดตัวกรอง (Filter cover) | 37 | ฝาครอบดิฟฟิวเซอร์ (Diffuser cover) |
| 17 | ท่อ Lubrication line | 38 | Case o-ring |
| 18 | ท่อ Bearing tube | 39 | ตัวเรือนด้านนอก (Case outer) |
| 19 | ยางกันรั่ว (O-ring) | 40 | ท่อไอเสีย (Exhaust cone) |
| 20 | หน้าแปลนห้องเผาไหม้ (Combuster front) | 41 | สลักเกลียว (Bolts) |
| 21 | ห้องเผาไหม้ด้านใน (Combuster inner) | 42 | ช่องใส่หัวเทียน (Glow plug mount) |





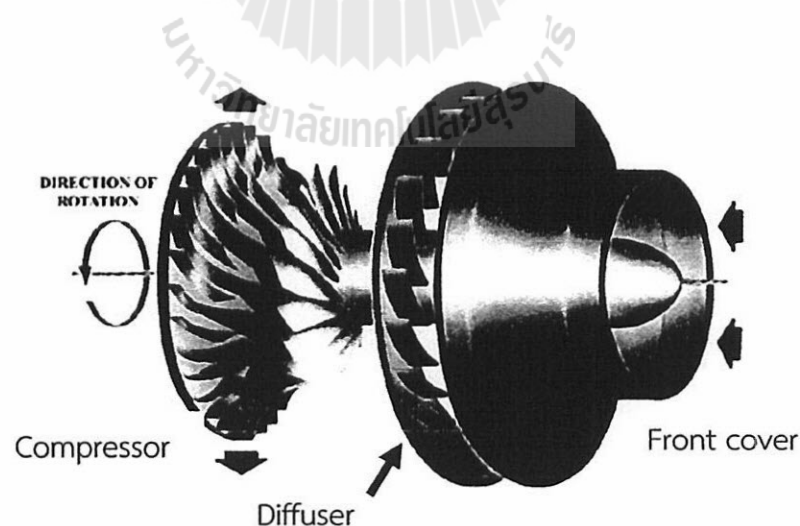
รูปภาพ 21 ภาคตัดภายในของเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์โบขนาดเล็กในโครงการนี้

เครื่องอัดอากาศต้องทำหน้าที่ในการเพิ่มความดันของมวลอากาศที่ได้รับต่อมาจากส่วนนำอากาศเข้า และจากนั้นก็ส่งเข้าไปยังหัวเทียนหรือ glow plug ในห้องสันดาป เพื่อทำการเผาไหม้ต่อไป โดยการส่งผ่านอากาศเข้าไปนี้จะต้องทำในปริมาณและความดันที่เหมาะสม ระบบการอัดอากาศสำหรับ เครื่องยนต์ก๊าซเทอร์โบขนาดเล็กนี้ ใช้ระบบการอัดอากาศแบบแรงเหวี่ยง (centrifugal flow) โดยเครื่องอัดอากาศแบบแรงเหวี่ยงประกอบด้วยจานอัดอากาศแบบหน้าเดียวจำนวน 1 ชั้น โดยมีลักษณะ เป็นครีบอก (รูปภาพ 22) โดยเมื่อมีการหมุนของ compressor wheel อากาศถูก นำเข้าจากทางด้านหน้าของเครื่องยนต์ก่อนที่จะเข้าสู่ส่วนที่เป็นด้านในของเครื่องยนต์ต่อไป



รูปภาพ 22 การออกแบบส่วนที่เป็นการอัดอากาศและส่วนของเทอร์ไบน์

เครื่องอัดอากาศจะต่อเข้ากับแกนเพลลาทางด้านหน้าของเครื่องยนต์และต่อเข้ากับกังหันทางด้านท้ายของเครื่องยนต์ กังหันประกอบด้วยใบจักรโค้งที่เป็นอัลลอยด์ ติดเข้ากับจานหมุน ซึ่งกังหันต้องรองรับการทำงานที่ความเร็วรอบและอุณหภูมิสูงๆ ความเร็วสูงทำให้เกิดแรงหนีศูนย์กลางที่มีค่าสูง ค่าความเร็ว รอบของกังหัน อัตราการไหลของก๊าซ อุณหภูมิทางเข้าและออกของกังหัน ความเร็วของไอเสีย ที่ออกจากกังหัน และพลังงานที่ต้องการ จะต้องได้รับการพิจารณาจากผู้ออกแบบเครื่องยนต์ ก๊าซสามารถ ไปถึงด้านท้ายของกังหัน (ซึ่งขับเครื่องอัดอากาศความดันต่ำ) เมื่อมีการขยายตัวของก๊าซก็ย่อมต้องการ เอาพลังงานออกมาให้มากที่สุด นั่นก็ต่อเมื่อมีใบของกังหันให้มีพื้นที่มากๆ เพื่อการรักษาสมดุลของงานหรือ พลังงาน

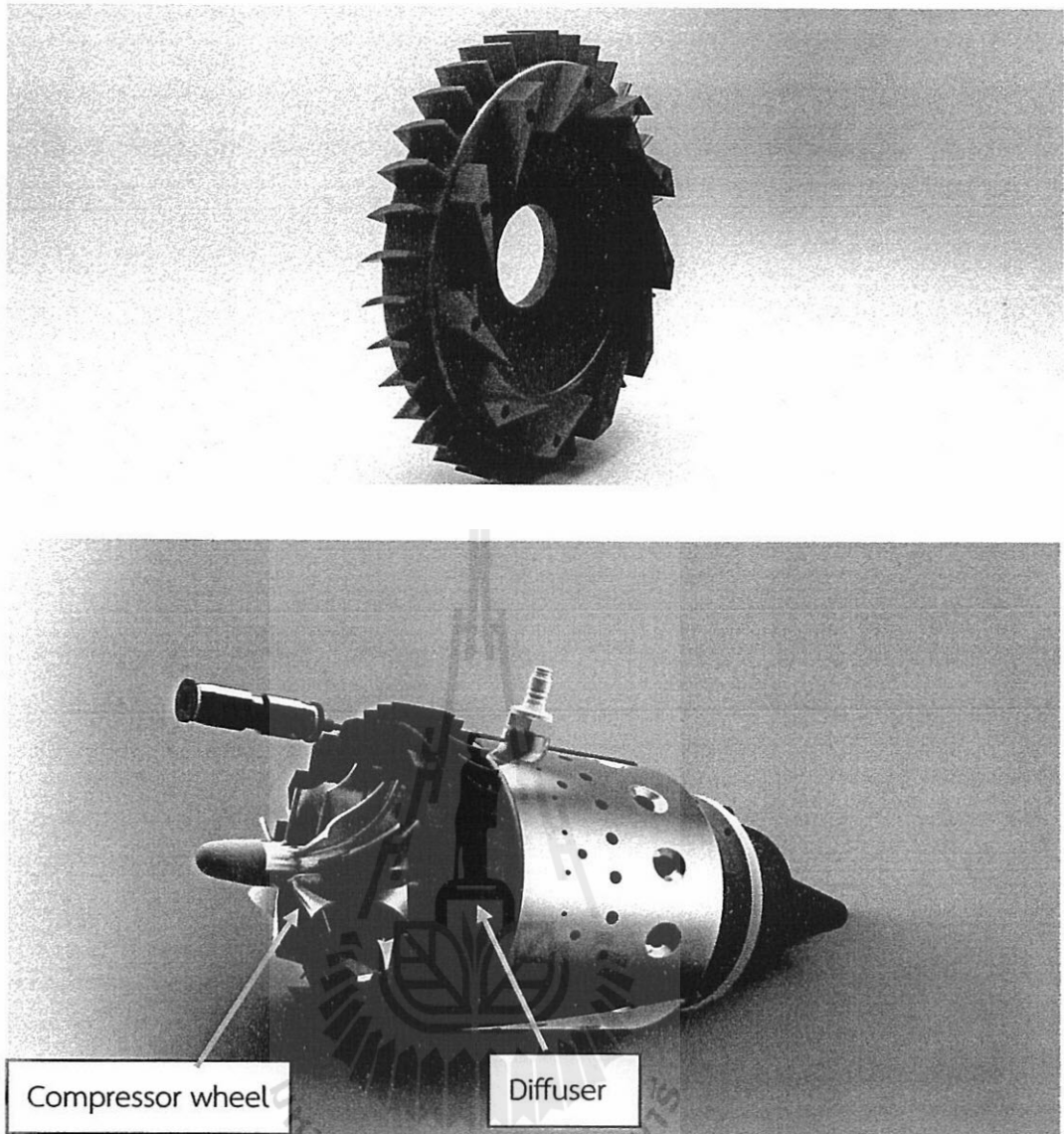


รูปภาพ 23 ลักษณะของการอัดอากาศตามแนวรัศมี (centrifugal flow) แบบขั้นตอนเดียว

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าเครื่องยนต์กังหันแก๊สขนาดเล็กในโครงการนี้ ได้ใช้เครื่องอัดอากาศแบบไหลตามแนวรัศมี (centrifugal flow) และใช้ระบบการอัดอากาศแบบขั้นตอนเดียว (single stage) เพราะเป็นแบบที่มีความลักษณะโครงสร้างที่ออกแบบง่าย มีความทนทาน เมื่อวงล้ออัดอากาศหมุน อากาศจะถูกดูดเข้าจากทางด้านฝาครอบด้านหน้าของตัวเครื่อง (front cover) และจะไหลในทิศทาง เดียวกันกับแกนหมุน (axial direction) จากนั้นอากาศจะไหลไปตามทางเดินของใบพัดและไหลไปทาง ด้านนอกในทิศทางตามแนวรัศมี ภายใต้อิทธิพลแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง โดยท้ายสุดอากาศจะออกจาก งานใบพัด และไหลที่ความเร็วสูง ส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานศักย์ตกค้างให้เป็นความดัน ซึ่งความดันทั้งหมดที่เพิ่มขึ้น จะกระจายอยู่ระหว่างใบพัดคอมเพรสเซอร์และระบบบังคับทิศทางลม สัดส่วนของความดันที่เพิ่มขึ้นในวงล้ออัดอากาศจะเปลี่ยนแปลงการหักเหของอากาศในทิศทางของการเคลื่อนที่รอบนอกคอมเพรสเซอร์แบบไหลตามแนวรัศมี ความเร็วรอบนอกจะไม่คงที่และเป็นข้อได้เปรียบของ คอมเพรสเซอร์แบบนี้ เมื่ออากาศไหลเข้าเส้นผ่านศูนย์กลางของงานใบพัดจะเล็ก และความเร็วรอบนอก จะต่ำด้วย เมื่อเปรียบเทียบให้เห็นข้อแตกต่างที่ชัดเจน ความเร็วรอบนอกจะเข้าใกล้ความเร็วสูงสุดที่ทางออก ของงานใบพัด

- ดิฟฟิวเซอร์ (Diffuser)

เมื่ออากาศผ่านเข้าใบพัดอัดอากาศ (compressor wheel) จะถูกใบพัดเหวี่ยงอากาศให้เคลื่อนที่ ไปยัง ส่วนปลายใบพัดเกิดแรงหนีศูนย์กลางขึ้น (centrifugal force) ตัวใบพัดออกแบบให้อากาศเกิดการ เคลื่อนที่ ด้วยความเร็วสูง และเกิดการอัดขึ้น เมื่ออากาศไหลออกจากปลายใบพัดจะไหลเข้าสู่ส่วนดิฟฟิวเซอร์ (diffuser) ซึ่งจะทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานจลน์จากความเร็วปลายใบพัดเป็น static pressure ที่สูงขึ้น โดย ขณะที่อากาศถูกผลักให้เคลื่อนที่ผ่านไปที่ปลายใบพัดอากาศจะถูกบังคับให้อัดตัวแล้วส่งต่อไปให้ท่อร่วมอากาศ เพื่อที่จะส่งต่อไปยังห้องเผาไหม้อีกที โดยปริมาณอากาศที่เครื่องยนต์ก๊าซเทอร์โบต้องการมี ค่าประมาณสิบเท่าของเครื่องยนต์ลูกสูบทางเข้า ของอากาศถูกออกแบบมาเพื่อดำเนินการนำเอาอากาศเข้ามายังเครื่องอัดอากาศ โดยให้มีการสูญเสียพลังงาน จากแรงต้านอากาศหรือความดันกระแทกเข้ามาน้อยที่สุด ซึ่งการไหลของอากาศเข้าไปในเครื่องอัดอากาศ ควรจะปราศจากการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulence) เพื่อที่ได้ประสิทธิภาพการทำงานเต็มที่ ดิฟฟิวเซอร์ มีลักษณะเป็นแผ่นจานกลม ล้อมรอบด้วยช่องนำอากาศต่ออนุกรมกันเป็นวงรอบๆ ช่องอากาศของดิฟฟิวเซอร์ จะรับอากาศจากใบพัดอัดอากาศแล้วส่งเข้าไปยังท่อร่วมอากาศโดยตรง จากนั้นตัวดิฟฟิวเซอร์ก็ยังทำหน้าที่ ในการส่งเข้าห้องเผาไหม้ด้วยความดันและความเร็วที่เหมาะสม



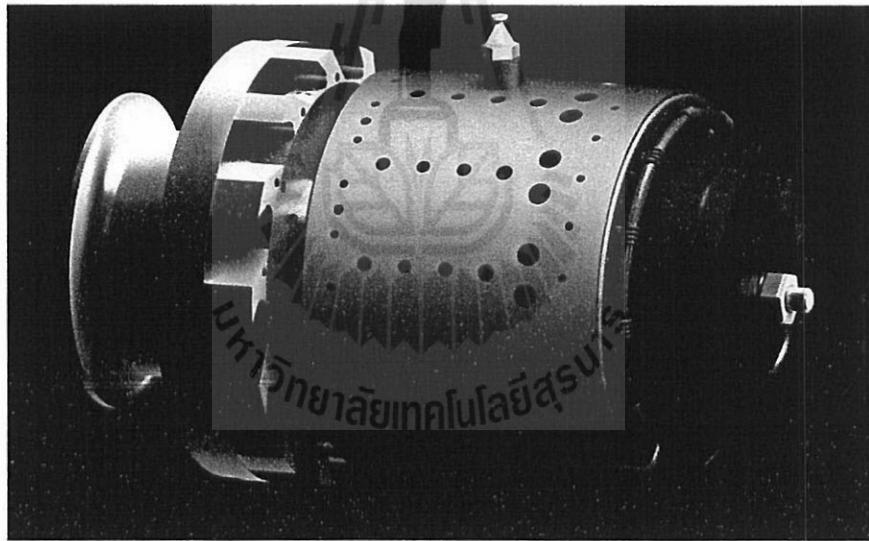
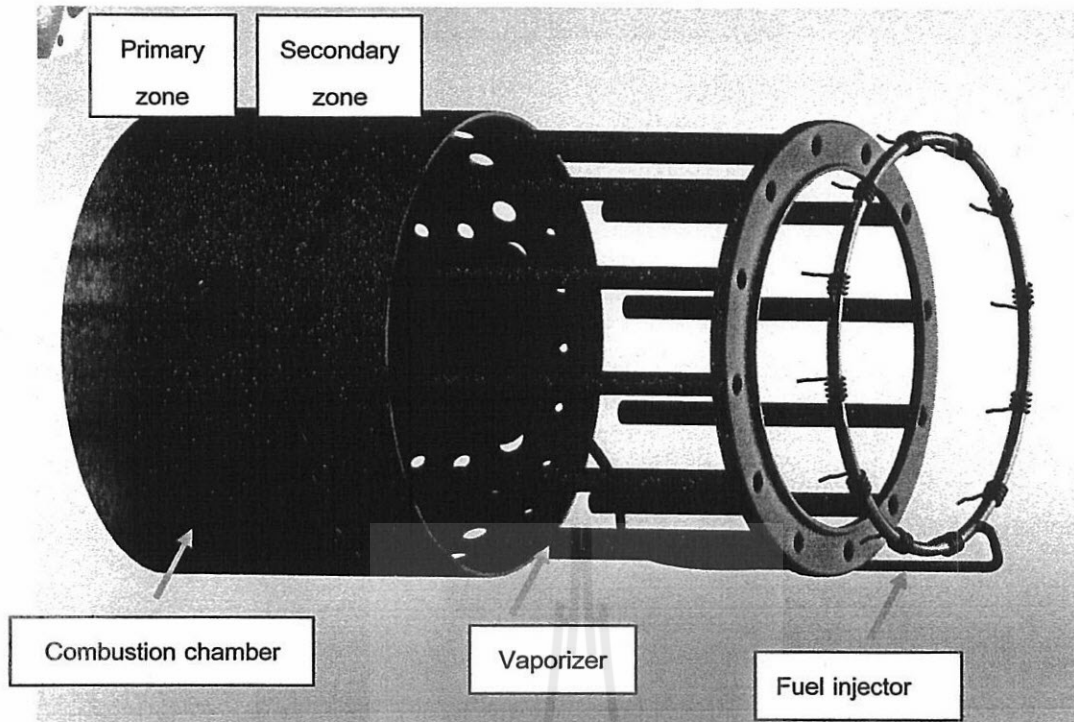
รูปภาพ 24 Diffuser (บน) และการประกอบเข้ากับใบพัดอัดอากาศ (ล่าง)

ส่วนสันดาป (Combustion Section)

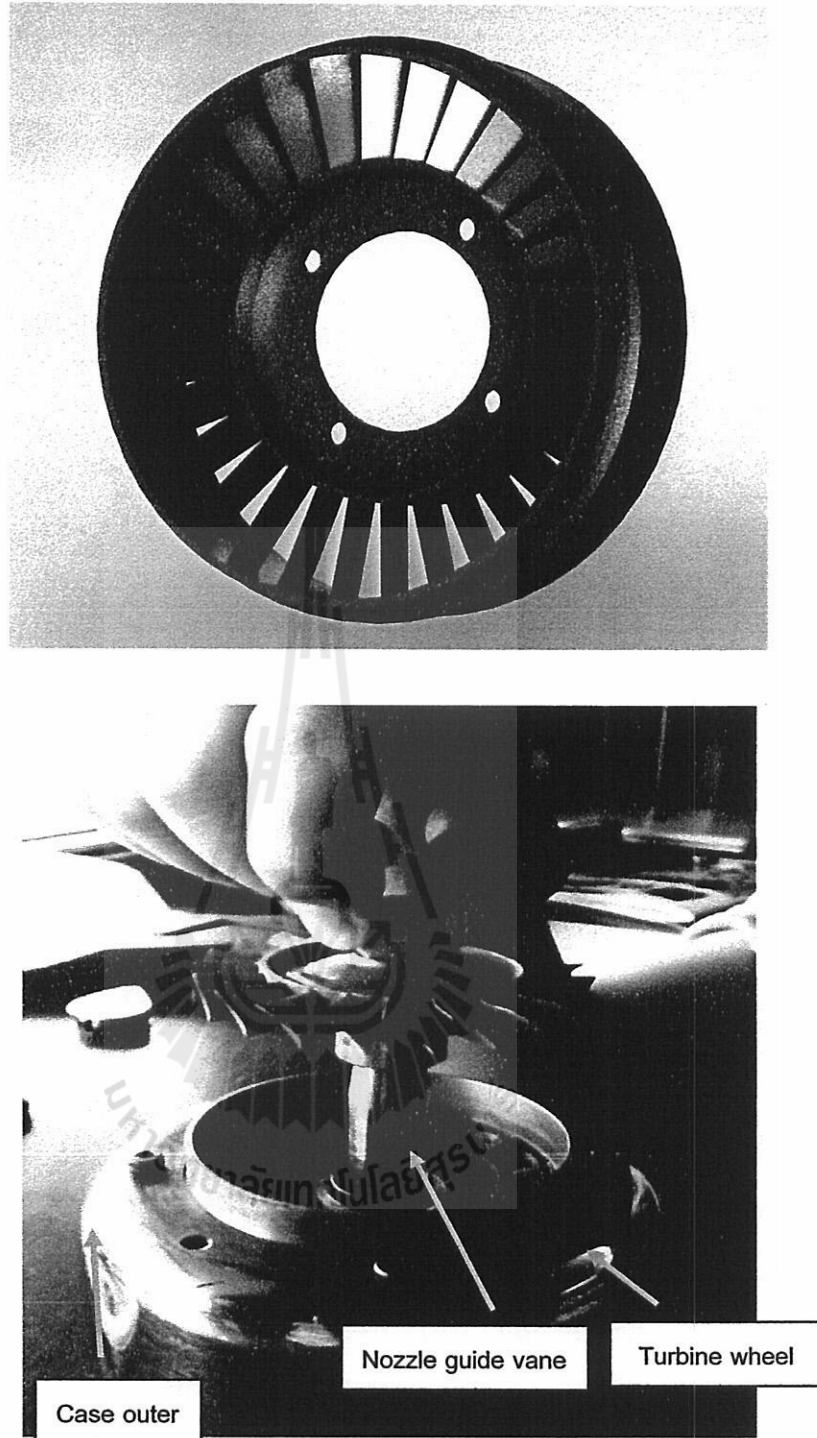
ส่วนสันดาป ประกอบไปด้วยห้องเผาไหม้ หัวจุด หัวฉีดเชื้อเพลิง ถูกออกแบบมาเพื่อสันดาป ส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ และส่งก๊าซที่เผาไหม้แล้วไปยังกังหัน เมื่อก๊าซร้อนความดันสูง ไหลออกมาจากห้องเผาไหม้ ก็จะออกมาปะทะกับใบของกังหัน ผลักดันให้กังหันเกิดการหมุนขึ้น เพลลาของ เครื่องอัดอากาศ และเพลลาของกังหันเป็นเพลลาเดียวกัน ดังนั้นหากว่าใบของกังหันหมุน ก็จะทำให้ใบพัด อัดอากาศ หมุนตามไปด้วย การเผาไหม้ของเชื้อเพลิงกับอากาศจะเกิดขึ้นในส่วนของห้องเผาไหม้ ในเครื่องยนต์ ก๊าซเทอร์ไบน์ขนาดเล็กนี้จะใช้ระบบห้องเผาไหม้ที่เรียกว่า single annular combustion chamber ในขั้นตอนแรกเชื้อเพลิงจะถูกจ่ายมาตามท่อและกระจายตัวออกทางหัวจ่าย (fuel injector) ก่อนที่จะ ถูกปล่อยเข้าสู่ท่อ

เล็ก ๆ ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวระเหยเชื้อเพลิงเหลวให้กลายเป็นไอ (vaporizer) ซึ่งไอ ของเชื้อเพลิงนี้จะเคลื่อนที่ไปยังด้านปลายของท่อเพื่อที่จะผสมกับอากาศที่ถูกอัดเข้ามาทางเครื่องอัดอากาศและถูกจุดระเบิด โดยหัวเทียน (glow plug) โดยอากาศที่ถูกอัดเข้าในระบบนั้นจะถูกใช้ในการสันดาป ประมาณร้อยละ 25 เท่านั้น ซึ่งอากาศส่วนที่ใช้ในการสันดาปนี้จะเรียกว่าอากาศปฐมภูมิ (Primary Air) ในขณะที่อากาศส่วนที่เหลือจะถูกใช้ในการระบายความร้อนเรียกว่าอากาศทุติยภูมิ โดยจะทำหน้าที่ในการลด อุณหภูมิของก๊าซร้อนลงในส่วนท้ายของห้องสันดาปซึ่งจะเรียกว่าส่วนทุติยภูมิ (Secondary zone) อากาศส่วนนี้ถูกจะควบคุมลักษณะการไหลด้วยรูอากาศขนาดใหญ่ที่อยู่รอบๆ โครงของห้องเผาไหม้ โดยหน้าที่หลัก ๆ ของห้องเผาไหม้ นี้คือ เผาไหม้ส่วนผสมระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศอย่างมีประสิทธิภาพ จากนั้นระบายความร้อนที่ส่วนทุติยภูมิ เพื่อให้อุณหภูมิลดลงจนถึงจุดที่กังหันสามารถทำงานได้ ก่อนที่จะส่ง ก๊าซร้อนไปยังส่วนของกังหันผ่านช่องนำไอเสียออก (nozzle guide vane) เพื่อทำให้เกิดการหมุน ของแกนเพลลาขึ้น ตำแหน่งของส่วนสันดาป จะอยู่ระหว่างเครื่องอัดอากาศกับส่วนของกังหันห้องเผาไหม้ จะเรียงอยู่แนวเดียวกับเครื่องอัดอากาศกับกังหัน ห้องเผาไหม้มีส่วนประกอบที่เป็นพื้นฐานคือ ตัวเรือน (Casing), โครงด้านใน เจาะรู (Perforated inner liner), ระบบฉีดเชื้อเพลิง และ อุปกรณ์จุดระเบิด รูปภาพ 25 แสดงห้องเผาไหม้แบบ single annular (แบน) และท่อ นำเชื้อเพลิงสู่ห้องเผาไหม้ (ล่าง)



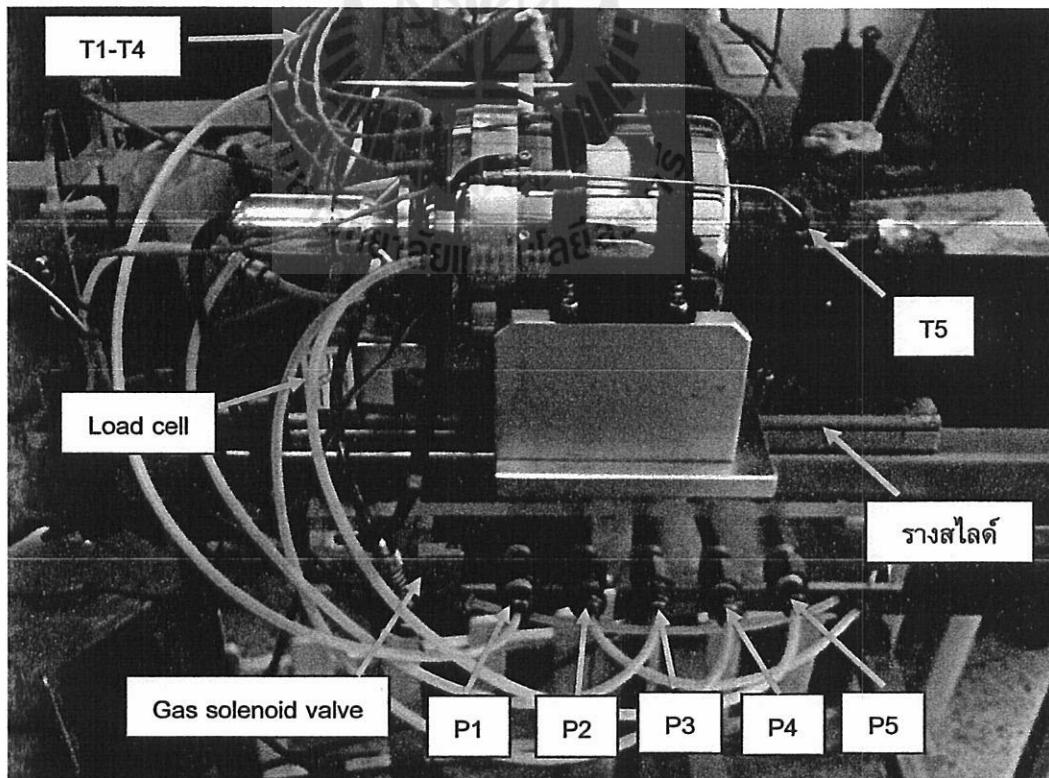
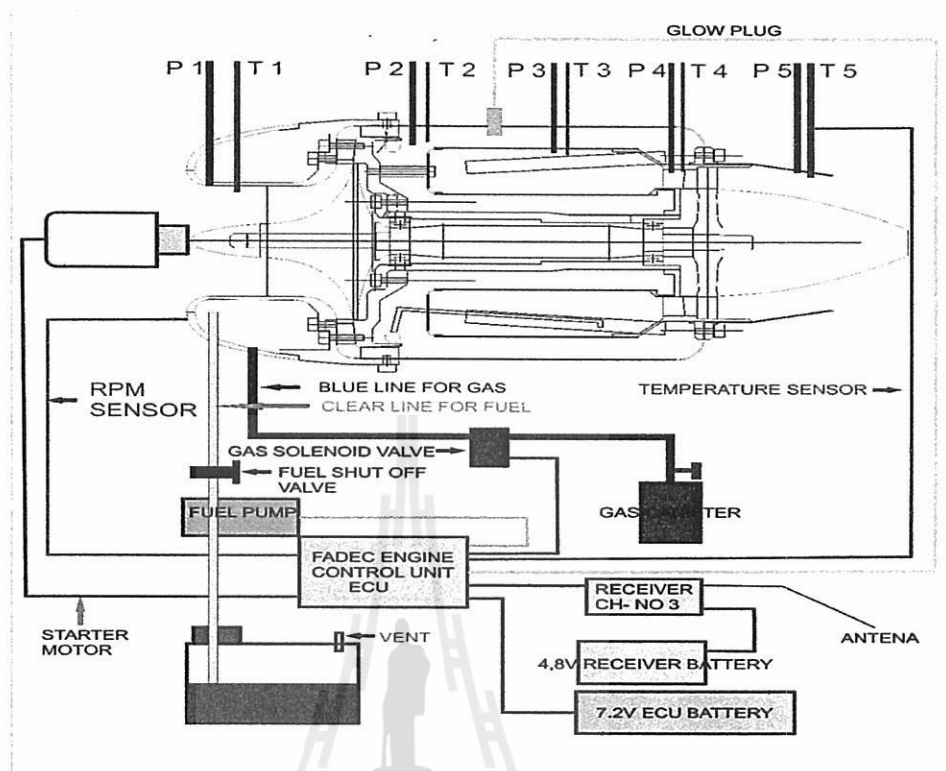


รูปภาพ 25 แสดงห้องเผาไหม้แบบ single annular (บน) และท่อนำเข้าเพลิงสู่ห้องเผาไหม้ (ล่าง)

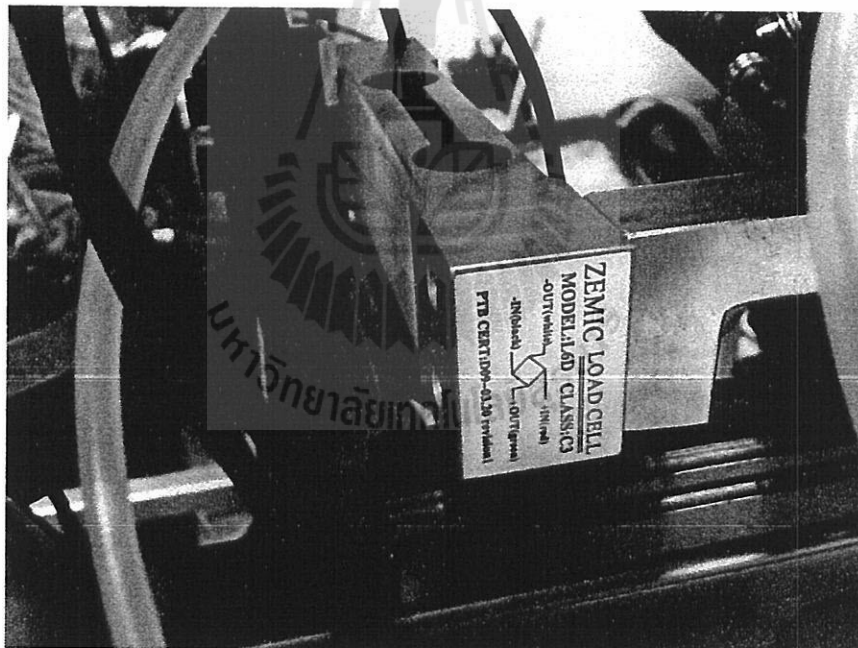
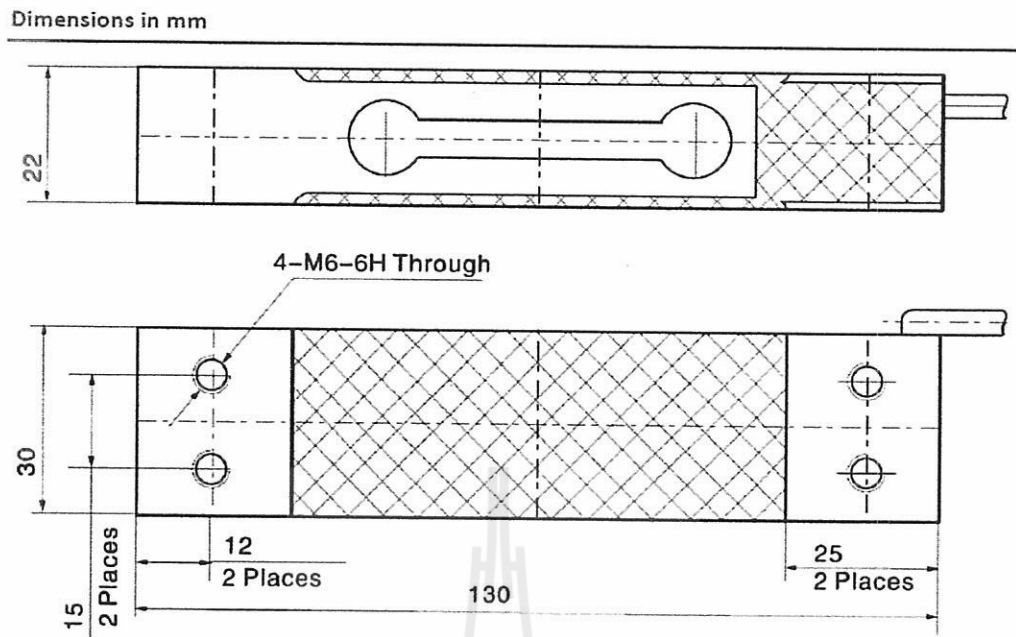


รูปภาพ 26 การวางตำแหน่งของ Nozzle guide vane (บน) เพื่อขับแกนเพลลาผ่านเทอร์ไบน์ (ล่าง)

3.5 การวัดค่าต่าง ๆ ที่ได้จากการสันดาปของเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์โบขนาดเล็ก



รูปภาพ 27 ชุดเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์โบขนาดเล็กพร้อมจอแสดงผลภายในศูนย์เครื่องมือ 10



รูปภาพ 28 อุปกรณ์โหลดเซลล์ (load cell) สำหรับวัดแรงขับ (thrust) ของเครื่องยนต์

รูปภาพ 28 แสดงแผนภาพการควบคุมการทำงานและการวัดค่าต่าง ๆ ในระหว่างการทำงาน ของเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์โบ ซึ่งตัวเครื่องยนต์จะวางอยู่บนรางสไลด์และได้มีการติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิ ความดัน ความเร็วรอบของการหมุนเทอร์โบและการวัดแรงขับ โดยใช้ โหลดเซลล์ ซึ่งโหลดเซลล์คือ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้แปลงค่าของแรงไปเป็นสัญญาณไฟฟ้า (ทรานส์ซิสเตอร์) การแปลงค่านี้ไม่ใช่การ

แปลงค่าโดยตรงหากแต่เกิดขึ้นสองขั้นตอน จากการแปลงค่าทางกลศาสตร์ แรงจะถูกตรวจจับได้จากการเปลี่ยนรูปร่างของสแตนเกจ และสแตนเกจแปลงค่าการเปลี่ยนรูปร่าง (ความเครียด) นี้ไปเป็นสัญญาณไฟฟ้า โหลดเซลล์มักจะประกอบไปด้วยสแตนเกจสี่ตัวซึ่งจัดเรียงวงจรในรูปแบบของวงจรวิสต์อนบริดจ์ (Wheatstone Bridge) สัญญาณไฟที่จ่ายออกไปนี้มักจะมีขนาดเพียง ไม่มีมิลลิโวลต์ และต้องการการขยายสัญญาณด้วยการใช้อุปกรณ์ขยายสัญญาณก่อนที่จะถูกนำไป ใช้งานได้ และจะต้องทำกราฟมาตรฐาน (standard curve) ก่อนใช้งานจริงด้วย



รูปภาพ 29 แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์สำหรับเก็บข้อมูลต่าง ๆ ในระหว่างการทำงานของเครื่องยนต์

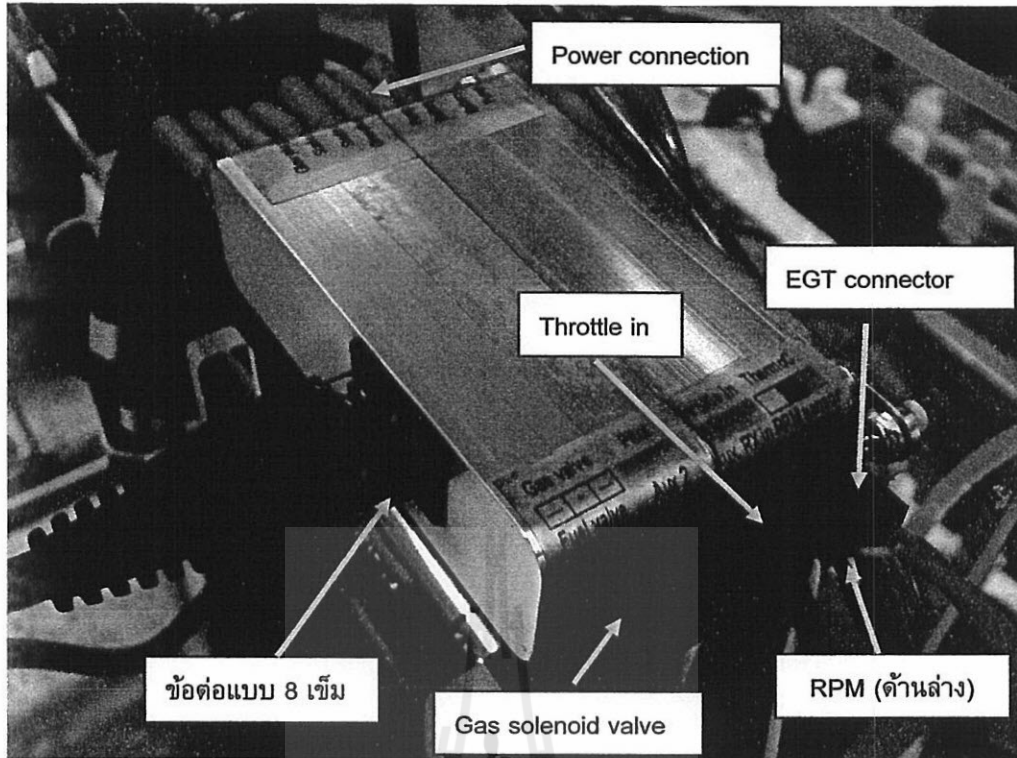
3.6 ระบบควบคุมการทำงานของเครื่องยนต์

สำหรับอุปกรณ์การควบคุมระบบการทำงานของเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์โบไบนขนาดเล็กนี้ ได้ใช้ระบบ ที่มีชื่อว่า “FADEC” (Full Authority Digital Engine Control) ซึ่งมีหน้าที่หลัก ในการควบคุมการทำงานของ ป้อนน้ำมันเข้าเครื่องยนต์ให้มีปริมาณที่เหมาะสมในระดับที่ปลอดภัยต่อผู้ใช้งาน นอกจากนี้แล้วยังทำหน้าที่ในการควบคุมการจุดระเบิดของเครื่องยนต์ในช่วงเริ่มต้นอีกด้วย ระบบ FADEC นี้จะทำการวัดอุณหภูมิของไอเสียร้อนที่ออกด้านท้ายเครื่อง (exhaust gas temperature, EGT) ตำแหน่งของปั๊มเร่งและความเร็วรอบของ เครื่อง นอกจากนี้ยังทำหน้าที่ในการดูแลเกี่ยวกับระบบควบคุมต่าง ๆ ที่จะทำให้การทำงานของเครื่องยนต์อยู่ภายในขอบเขตของการทำงาน ถ้าหากเครื่องยนต์มีการทำงานที่เกินค่า ที่ได้ตั้งไว้หรือเกิดการขัดข้องอื่น ๆ ระบบจะทำการหยุดจ่ายเชื้อเพลิงในทันที ภายใน FACED จะมีช่องออก คำสั่งและรับสัญญาณต่าง ๆ เช่น ตัววัดรอบการหมุนของใบพัด ตัววัดอุณหภูมิ EGT อุปกรณ์รับสัญญาณวิทยุสำหรับเร่งเครื่อง อุปกรณ์เชื่อมต่อทาง

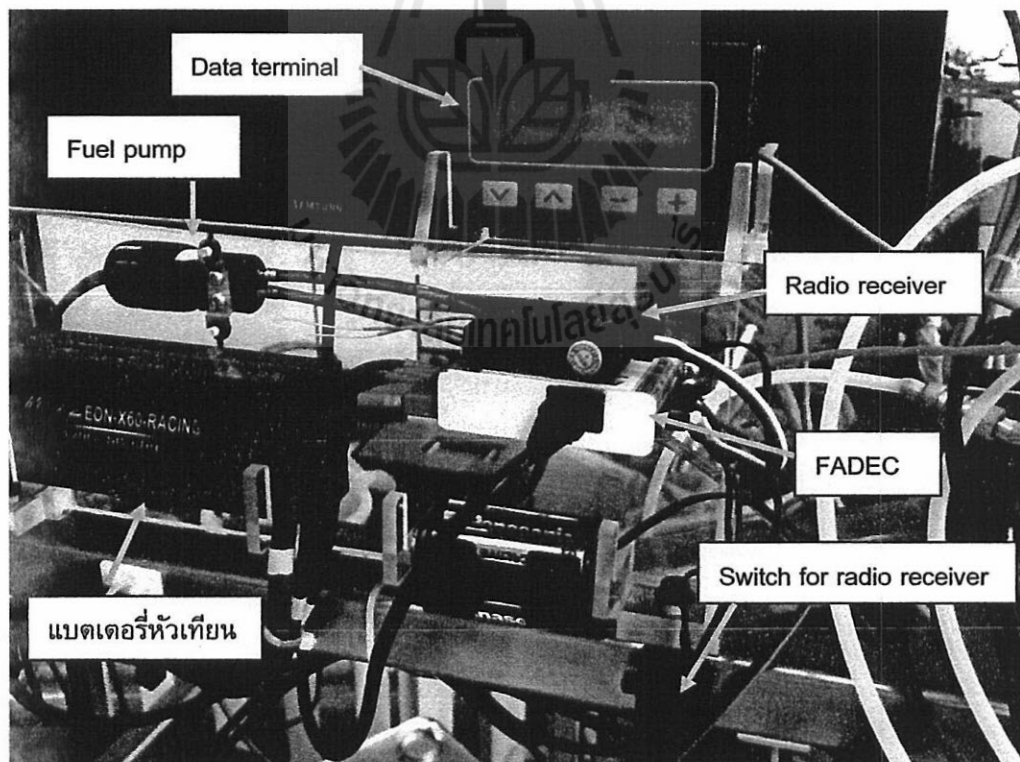
ไฟฟ้าสำหรับปั๊มเชื้อเพลิง ตัวสตาร์ทเริ่มต้น วาล์วโซลินอยด์ เปิดปิดก๊าซ หัวเทียน แบตเตอรี่ และช่องต่อสัญญาณชนิด RS232 สำหรับการอ่านและบันทึก ข้อมูลผ่านคอมพิวเตอร์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

- ความเร็วรอบ: ใช้ระบบหัวอ่านแม่เหล็กได้สูงสุด 250,000 รอบต่อนาที (rpm)
- อุณหภูมิ: สามารถอ่านได้ถึง 1000 °C โดยใช้ thermocouple ชนิด K
- ความดัน (pressure): อ่านได้สูงสุด 10 บรรยากาศ โดยเป็นแบบชนิด pressure transducer
- แรงขับเคลื่อน (Thrust): เป็นชนิด load cell 15 กิโลกรัม
- แบตเตอรี่สำหรับหัวหัวเทียนเป็นชนิด 2 เซลล์ ให้กำลังไฟ 4400 มิลลิแอมป์
- ระบบสตาร์ทเครื่อง: ใช้ก๊าซบิวเทน (butane) มีลักษณะเป็นกระป๋อง หาซื้อได้ตามร้านค้าทั่วไป

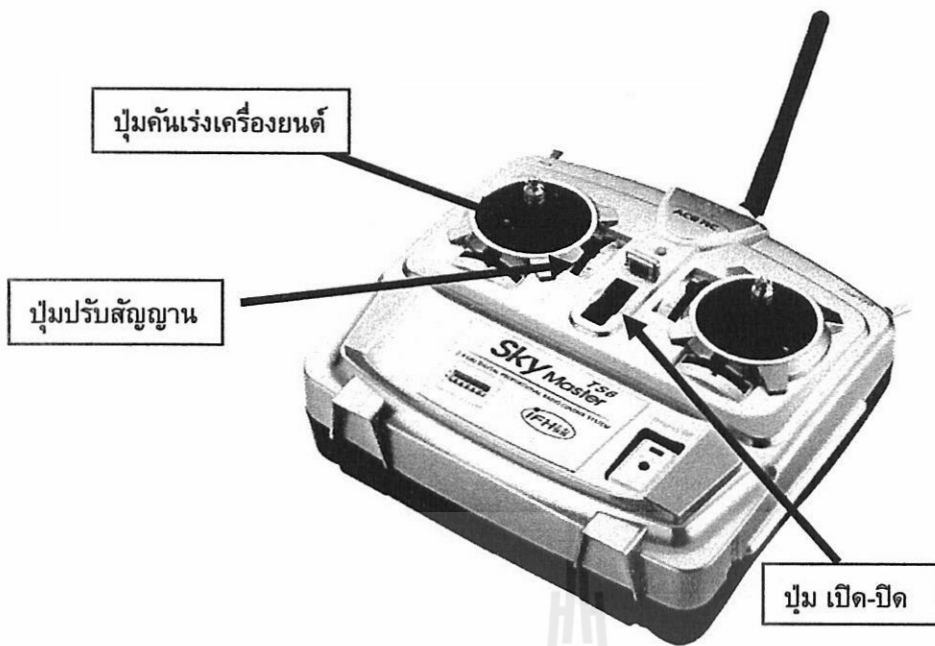
กล่อง FADEC ประกอบไปด้วยข้อต่อ 3 ชนิดด้วยกันคือ 1. สายส่งกำลัง (Power connection) 2. สายส่งข้อมูล (Data connection) และ สายส่งสัญญาณ (Signal connection) ซึ่งสายส่งกำลังนั้น จะใช้กับข้อต่อชนิด multiplex (MPX) จำนวน 2 ตัว โดยตัวที่อยู่ด้านบนจะทำหน้าที่จ่ายกระแส ไฟฟ้าไปที่หัวหัวเทียน และมอเตอร์สตาร์ทสำหรับติดเครื่องยนต์ในตอนเริ่มต้น ส่วนข้อต่อ MPX ที่อยู่ด้านล่าง จะทำหน้าที่ในการเชื่อมต่อระหว่างปั๊มกับแบตเตอรี่ ข้อควรระวังก็คือห้ามต่อสลับขั้วเด็ดขาด เพราะอาจจะ ทำให้ตัว FADEC ใหม้เสียหายได้ ส่วนสายส่งข้อมูลนั้น จะเป็นข้อต่อแบบ 8 เข็ม โดยจะอยู่ตำแหน่ง ด้านบนสุดของตัว FADEC โดยข้อต่อชนิดนี้จะทำหน้าที่ในการเชื่อมต่อกันระหว่างข้อมูลต่าง ๆ ที่ได้บันทึก จากเครื่องไปยังหน่วยแสดงผล (data terminal) นอกจากนี้สายส่งสัญญาณ ซึ่งเป็นปลั๊กตัวเมียชนิด 8 JR จะทำการสื่อสารไปยังโซลินอยด์วาล์วของท่อนำก๊าซ (Gas valve) ตัววัดความเร็วรอบ (RPM sensor) อุณหภูมิของ EGT (ThermoC) และสัญญาณวิทยุสำหรับเร่งเครื่อง (Throttle in) เป็นต้น



รูปภาพ 30 การเชื่อมต่อระหว่างสายส่งสัญญาณและสายคำสั่งเข้าสู่ FADEC



รูปภาพ 31 การเชื่อมต่อระหว่าง FADEC และอุปกรณ์ต่าง ๆ ของเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์ไบน์



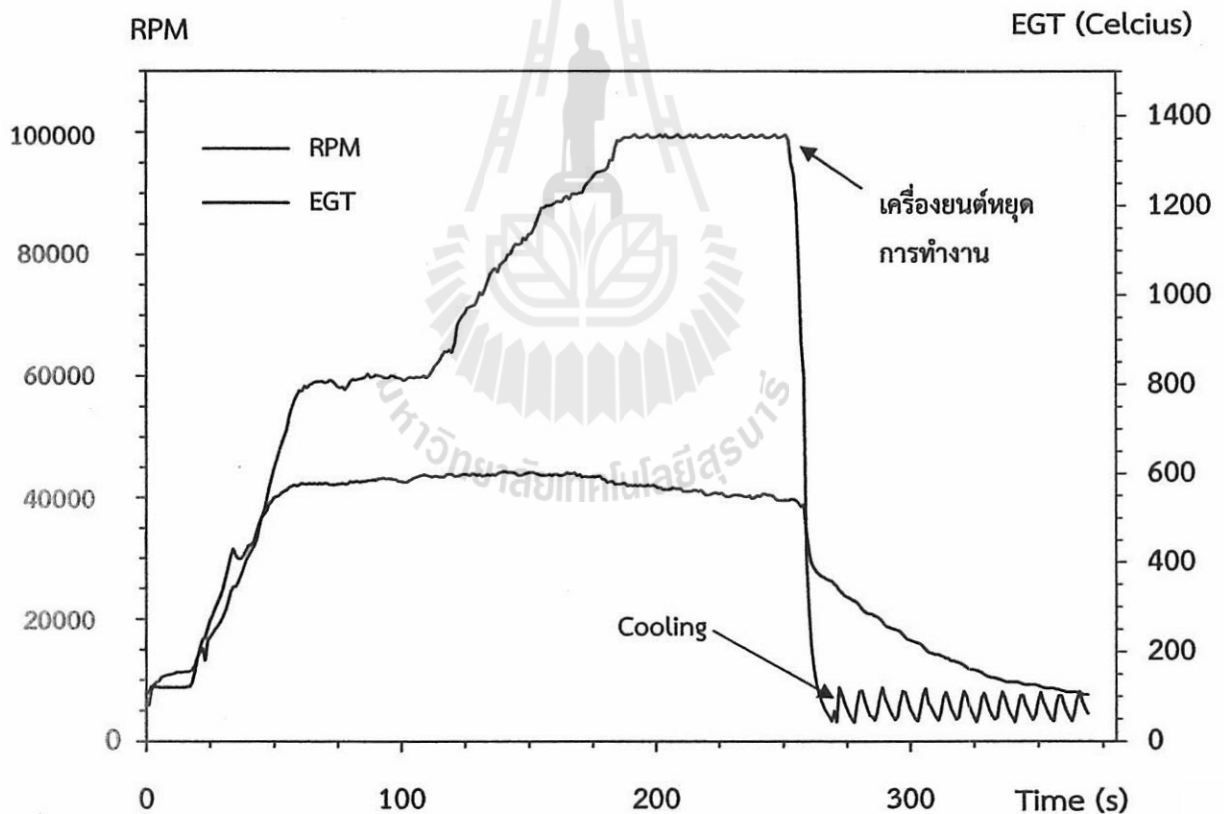
รูปภาพ 32 การควบคุมการทำงานของเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์ไบน์ผ่านเครื่องบังคับวิทยุ

สำหรับ data terminal นั้น ประกอบไปด้วยหน้าจอแสดงผลแบบ 16 ตัวอักษรและมีปุ่มเลื่อนจำนวน 4 ปุ่ม โดยสองปุ่มแรกทางด้านซ้ายจะใช้สำหรับเลื่อนเมนูขึ้น-ลง เพื่อเลื่อนดูข้อมูลต่าง ๆ (หน้าจอสามารถแสดงข้อมูลได้ทีละ 2 บรรทัด) ส่วนปุ่มที่เหลือทางด้านขวามือใช้สำหรับปรับค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่แสดงใน data terminal (ดังแสดงในรูปภาพ 30) เมื่อเริ่มต้นเปิดเครื่อง ในสถานะของ FADEC จะแสดงการเช็ค ค่าตัวแปรต่าง ๆ เช่นชื่อบริษัท (Xicoy electronics) รุ่นของเครื่อง (FADEC Autostart Terminal V1.3) จากนั้นจะเข้าสู่การแสดงผลของเครื่องยนต์ โดยบรรทัดบนซ้ายจะเป็นตำแหน่งของคันเร่ง (Trim Low) ด้านบนขวาจะเป็นอุณหภูมิ EGT ด้านล่างซ้ายแสดงผลของความเร็วรอบเครื่องยนต์ (RPM) และด้านล่างขวา จะเป็นการแสดงกระแสของแบตเตอรี่ (Pm) ตามลำดับ

3.5 การสตาร์ทและการปิดเครื่องยนต์

เมื่อทำการสตาร์ทเครื่องยนต์ ระบบ FADEC จะทำหน้าที่อัตโนมัติสำหรับขั้นตอนต่าง ๆ ในการจุดระเบิดเครื่องยนต์ เริ่มตั้งแต่การควบคุมมอเตอร์สตาร์ท หัวเทียน ปัมเชื้อเพลิงและวาล์วต่าง ๆ รวมถึงการใช้ก๊าซเป็นเชื้อเพลิงช่วยจุดระเบิด (auxiliary start gas) ซึ่งเป็นก๊าซชีวเทนแบบกระป๋องทั่วไป เปิดสัญญาณของเครื่องส่งและเครื่องรับวิทยุ จากนั้นรอให้สัญญาณของ data terminal พร้อม โดยปรับปุ่มสัญญาณให้อยู่ในตำแหน่งต่ำสุดโดยดึงลงมาด้านล่าง บรรทัดบนซ้ายจะเป็นขึ้นตัวอักษร Trim Low จากนั้นเลื่อน ตัวปรับปุ่มสัญญาณให้อยู่ตำแหน่งกึ่งกลาง ซึ่งหน้าจอด้านซ้ายบนของหน่วยแสดงผลจะมีคำว่า “ready” ขึ้นมา จากนั้นทำการโยกปุ่มคันเร่งเครื่องยนต์ให้ไปอยู่ตำแหน่งบนสุดประมาณ 3 วินาที จากนั้นโยกปุ่มคันเร่ง ดังกล่าวให้ลงมาอยู่ตำแหน่งเกือบล่างสุด จากนั้น FADEC จะทำการสั่งงานไปที่โซลินอยด์วาล์วของก๊าซชีวเทน (gas

canister) ให้เปิดออกเพื่อนำก๊าซเข้าสู่การจุดระเบิดเบื้องต้น ในขณะที่เดียวกันมอเตอร์สตาร์ท จะทำงานโดยทำการหมุนแกนเพลลาเป็นระยะๆ พร้อมกับการจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรงไปที่ขั้วหัวเทียน เมื่อเครื่องยนต์เริ่มทำงานแล้ว โวลิตินอยด์วาล์วของก๊าซชีวเทนจะปิดลง ในขณะที่เดียวกับที่ปั๊ม (fuel pump) จะทำหน้าที่ปั๊มเชื้อเพลิงหลัก (น้ำมัน) เข้าไปสู่ห้องเผาไหม้ โดยสามารถควบคุมความเร็วรอบของเครื่องยนต์ ด้วยการปรับปุ่มคันเร่งของเครื่องยนต์บนเครื่องส่งสัญญาณวิทยุให้ไปด้านหน้า ในระหว่างนี้ระบบบันทึกข้อมูล จะทำการบันทึกค่าต่างๆ ไปด้วย และเมื่อต้องการหยุดการทำงาน ให้ทำการปรับปุ่มคันเร่งของเครื่องยนต์ บนเครื่องส่งสัญญาณวิทยุให้ลงด้านล่าง จากนั้นทำการเลื่อนตัวปรับปุ่มสัญญาณให้อยู่ตำแหน่งล่างสุด ระบบจะสั่งให้ปั๊มเชื้อเพลิงหยุดการทำงานและเครื่องยนต์หยุดการทำงาน แต่อย่างไรก็ตามภายในเครื่องยนต์ ยังมีการสะสมความร้อนอยู่มาก ดังนั้น FADEC จึงมีฟังก์ชันในการทำให้ภายในของเครื่องยนต์เย็นลง (cooling) โดยมอเตอร์สตาร์ทจะทำการหมุนเพลลาเป็นระยะๆ และจะหยุดหมุนเมื่ออุณหภูมิด้านท้าย ของเครื่องยนต์ (Exhaust Gas Temperature, EGT) ลดลงต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส รูปภาพ 33 แสดงตัวอย่างการบันทึกข้อมูลและพล็อตกราฟระหว่างเวลากับความเร็วรอบ (RPM) และอุณหภูมิด้านท้าย ของเครื่องยนต์ (EGT)



รูปภาพ 33 กราฟแสดงความเร็วรอบของการหมุนและอุณหภูมิ EGT ในระหว่างการทดสอบเครื่องยนต์

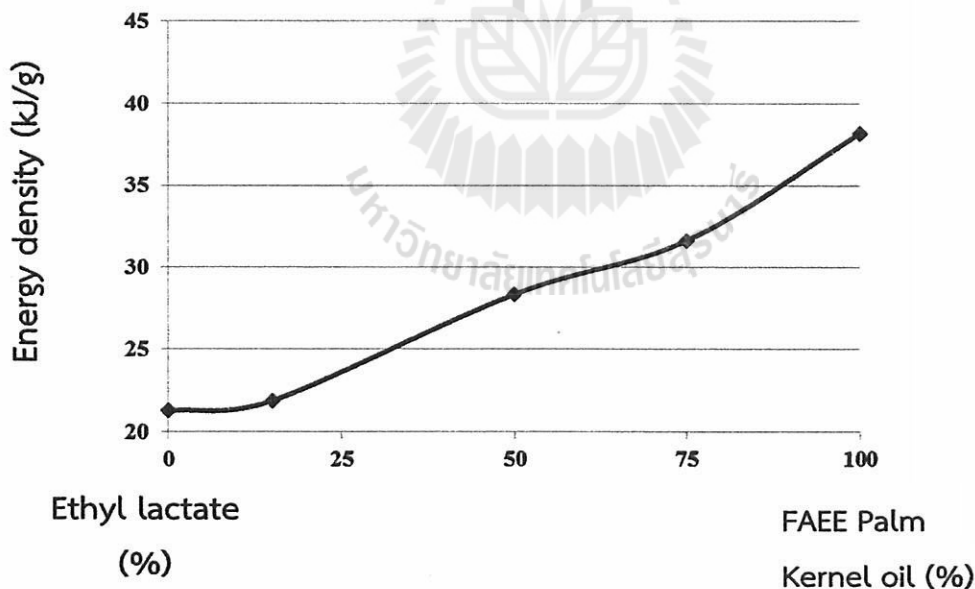
เมนูสำหรับการทดสอบค่าต่าง ๆ เพื่อเป็นการเตรียมพร้อมว่าอุปกรณ์ต่างๆ อยู่ในสภาพที่พร้อม ใช้งาน ระบบ FADEC จึงได้ติดตั้งระบบในการทดสอบมอเตอร์สตาร์ท หัวเทียน (glow plug) ป้อนเชื้อเพลิง และ โซลินอยด์วาล์ว ซึ่งการที่จะสามารถทดสอบระบบต่าง ๆ ได้นั้น หน้าจอของ data terminal จะต้องขึ้น คำว่า “Trim Low” ก่อนเสมอ โดยสามารถกดปุ่ม (-) ตรงตำแหน่งด้านล่างของหน้าจอ data terminal และสามารถหยุดการทดสอบเมื่อกด (+) ข้อควรระวังในการทดสอบปั๊มน้ำมันคืออาจจะมีน้ำมันถูกปั๊มเข้าไป ในเครื่องยนต์ได้ ซึ่งอาจจะส่งผลทำให้น้ำมันท่วมเครื่องยนต์ทำให้สตาร์ทติดยากอีกด้วย

สถานะของ FADEC บนหน้าจอของ data terminal

TrimLow	แสดงให้เห็นว่าสัญญาณที่ได้รับจากเครื่องส่งสัญญาณวิทยุอยู่ในตำแหน่งของตัวปรับแต่ง (Trim) ที่ต่ำ ทำให้เครื่องยนต์ยังไม่ทำงาน
Ready	แสดงให้เห็นว่าเครื่องยนต์อยู่ในสภาพที่พร้อมในการสตาร์ทเครื่อง
StickLo!	แสดงให้เห็นว่าคันโยกอยู่ในตำแหน่งที่สูงกว่าค่าที่ตั้งไว้สำหรับการเดินเครื่องเบา (Idle) ซึ่งเครื่องยนต์จะไม่สามารถทำงานได้เมื่อคันโยกอยู่ในตำแหน่งนี้
GlowTest	ระบบกำลังทำการตรวจสอบหัวเทียนอยู่
StartOn	ระบบกำลังทดสอบการสตาร์ทของเครื่องยนต์
Ignition	ระบบกำลังอยู่ในช่วงของการจุดระเบิด
Preheat	สถานะที่อุ่นห้องเผาไหม้หลังจากที่ตรวจสอบการจุดระเบิดของก๊าซ
FuelRamp	สถานะของการเร่งเครื่องจนกระทั่งถึงรอบเดินเบาของเครื่อง
Running	เครื่องยนต์ทำงานปกติ อยู่ภายใต้สถานะที่ควบคุมได้
Stop	เครื่องยนต์หยุดการทำงาน
Cooling	มอเตอร์สตาร์ททำงานเพื่อให้เครื่องยนต์คลายความร้อนลง
GlowBad	หัวเทียนบอดหรือสายหัวเทียนไม่ได้ต่อไว้
StartBad	มอเตอร์สตาร์ทมีปัญหา หรือความเร็วรอบเริ่มต้นไม่เพียงพอกับการสตาร์ทเครื่องยนต์
Low RPM	ความเร็วรอบต่ำกว่าค่าความเร็วรอบต่ำสุดที่ได้ตั้งไว้
HighTemp	อุณหภูมิสูงเกินกว่าค่าสูงสุดที่ได้กำหนดไว้
FlameOut	อุณหภูมิของ EGT ต่ำกว่าค่าต่ำสุดที่ได้กำหนดไว้
RC SIGNAL LOST/INCORRECT	สัญญาณที่ได้จากเครื่องรับสัญญาณวิทยุไม่ถูกต้องหรือขาดหายไป
PUMP LIMIT REACHED:	ปั๊มได้ทำงานเกินกว่าค่าที่ได้ตั้งไว้ แต่เครื่องยนต์ก็ยังไม่ทำงานอย่างเต็มที่ ซึ่งสาเหตุอาจจะมาจากแบตเตอรี่เสื่อม ทำให้อัตราการไหลของเชื้อเพลิงไม่สม่ำเสมอ

xxxx OVERLOAD	กระแสของอุปกรณ์ตัวใดตัวหนึ่งเกิน
User Off	เครื่องยนต์หยุดการทำงานเนื่องจากได้รับคำสั่งให้หยุดการทำงานจากเครื่องส่งสัญญาณวิทยุ
Fail Safe	เครื่องยนต์หยุดการทำงานเนื่องจากการขาดหายไปของสัญญาณควบคุมจากเครื่องส่งสัญญาณวิทยุ เมื่อ FADEC พบว่าสัญญาณวิทยุขาดหายไป เป็นเวลา 0.5 วินาที ระบบจะสั่งงานให้เครื่องยนต์ลดความเร็วรอบลงให้เป็นเดินเบา และหากสัญญาณยังขาดหายไปอีก 1.5 วินาที ระบบจะสั่งให้เครื่องยนต์หยุดการทำงาน
Low RPM	เครื่องยนต์หยุดการทำงานเนื่องจากเนื่องจากความเร็วรอบของเครื่องยนต์ต่ำกว่าระบบที่ได้ตั้งไว้ ปัญหาอาจเกิดเนื่องจากเชื้อเพลิงเดินไม่สม่ำเสมอ มีอากาศภายในท่อแบดเตอร์หรือแม้แต่ตัววัดความเร็วรอบมีปัญหา
Flame Out:	เครื่องยนต์หยุดการทำงานเนื่องจากอุณหภูมิ EGT ต่ำกว่าค่าต่ำสุดที่ได้ตั้งไว้ (ประมาณ 100 องศาเซลเซียส) ซึ่งอาจเกิดจากปัญหาของตัววัดอุณหภูมิ (thermocouple)

3.8 การทดสอบค่าพลังงานของเชื้อเพลิงชีวภาพ

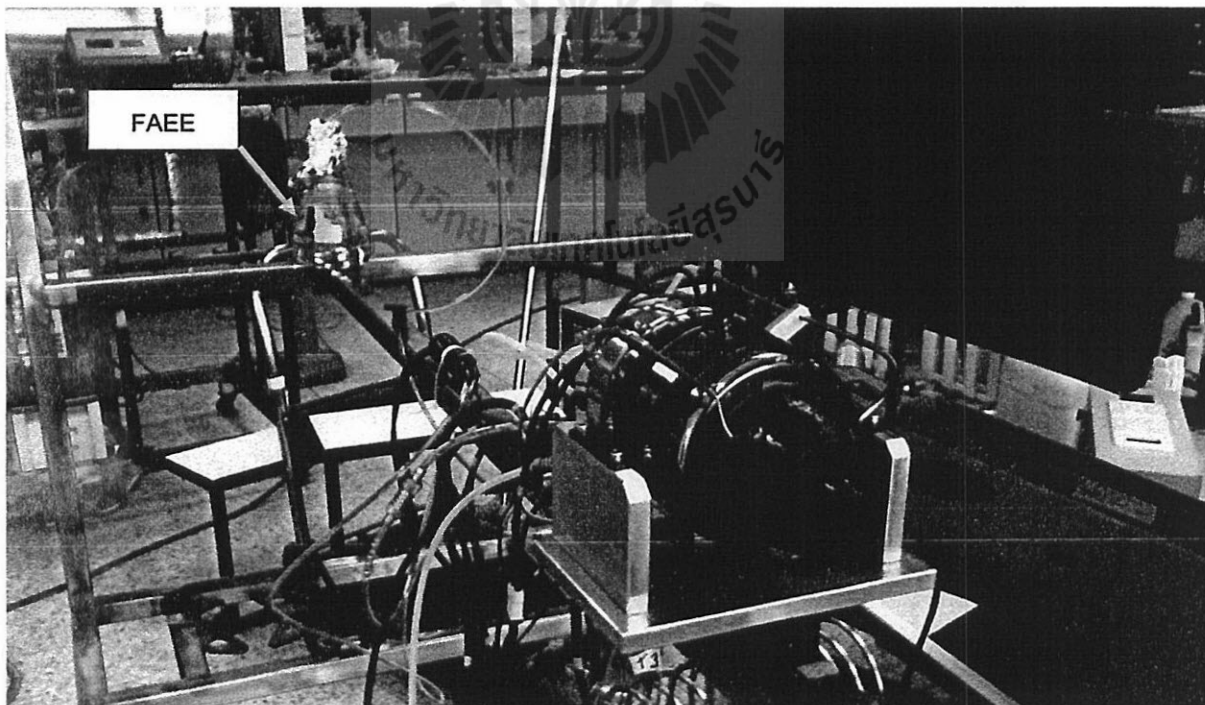


รูปภาพ 34 ค่าพลังงานความร้อนจากการสันดาปของผสมระหว่างเอทิลแล็กเตทกับส่วนกลั่นของ FAEE ที่ได้จากน้ำมันเนื้อเมล็ดปาล์ม

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพขึ้นมาเพื่อทำการทดสอบ 2 ชนิดคือเอทิลแล็กเตทและส่วนกลั่นของ FAEE ที่ได้จากน้ำมันเนื้อเมล็ดปาล์ม ซึ่งจุดประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือการทดสอบคุณสมบัติของ

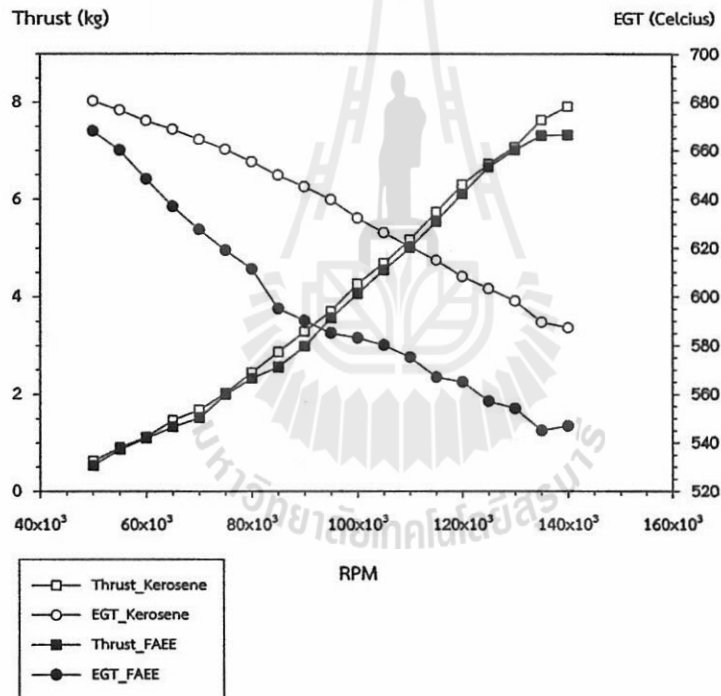
เชื้อเพลิงชีวภาพที่ผลิตได้กับเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์โบขนาดเล็ก ซึ่งในขั้นแรกนี้นักวิจัยได้ทำการวัดค่าพลังงานของการเผาไหม้ โดยใช้เครื่อง Bomb calorimeter (C5000) ภายในศูนย์เครื่องมือ 10 มหาวิทยาลัยสุรนารี โดยได้ทำการผสมเอทิลแอลกอฮอล์และส่วนกลั่น FAEE ที่ได้จากน้ำมันเนื้อเมล็ดปาล์มในอัตราส่วนต่าง ๆ ก่อนที่จะนำไปวัดค่าพลังงานความร้อนที่ได้จากการสันดาป โดยรูปภาพ 34 แสดงถึงค่าพลังงานความร้อนที่ได้จากการสันดาปของของผสมระหว่างเอทิลแอลกอฮอล์และส่วนกลั่นของ FAEE ที่ได้จากน้ำมันเนื้อเมล็ดปาล์มในอัตราส่วนตั้งแต่ 0-100% ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเอทิลแอลกอฮอล์บริสุทธิ์ซึ่งมีจุดเดือดที่ 155 องศาเซลเซียส จะให้ค่าพลังงานของการสันดาปที่ประมาณ 21.3 กิโลจูลต่อกรัม ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันเคโรซีนทางการค้าแล้ว จะพบว่ามีค่าพลังงานของการสันดาปอยู่เพียง 49.8% ของน้ำมันเคโรซีน (43.5 กิโลจูลต่อกรัม) ทำให้สามารถสรุปได้ว่า การใช้เอทิลแอลกอฮอล์แต่เพียงอย่างเดียวสำหรับการประยุกต์ใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์โบนั้น มีความไม่เหมาะสมเนื่องจากจุดเดือดและค่าพลังงานความร้อนที่ต่ำกว่าน้ำมันเคโรซีน และเมื่อทำการผสมสารเอทิลแอลกอฮอล์เข้ากับส่วนกลั่น FAEE ที่ได้จากน้ำมันเนื้อเมล็ดปาล์มในอัตราส่วนที่เพิ่มมากขึ้น จะเห็นได้ว่าค่าพลังงานของการสันดาปมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 21.8, 28.3, 31.6, และ 38.2 กิโลจูลต่อกรัม เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของส่วนกลั่น FAEE ที่ได้จากน้ำมันเนื้อเมล็ดปาล์มเป็น 15%, 50%, 75%, และ 100% ตามลำดับ โดยค่าพลังงานของการสันดาปของส่วนกลั่น FAEE ที่ได้จากน้ำมันเนื้อเมล็ดปาล์ม 100% มีค่าเท่ากับ 87.8% ของค่าพลังงานของการสันดาปน้ำมันเคโรซีน

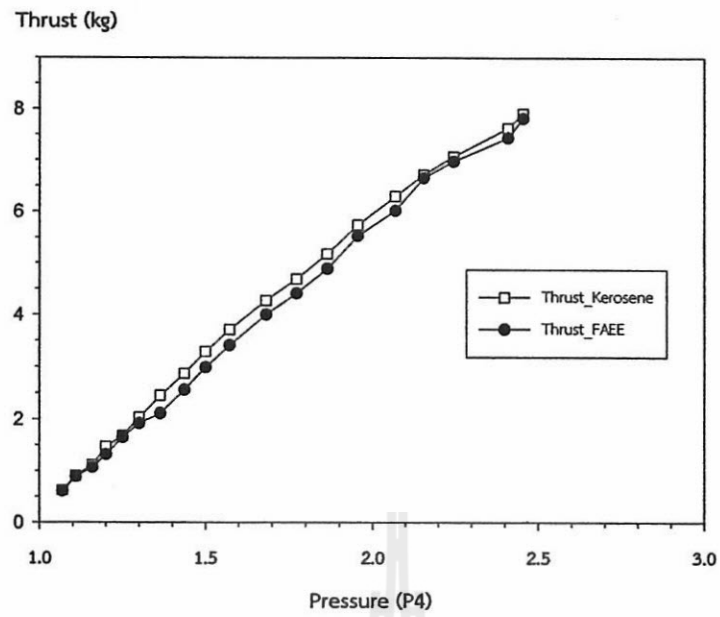
3.9 การทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์



รูปภาพ 35 การทดสอบการสันดาปของเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์โบด้วย FAEE ที่ผลิตได้

รูปที่ 35 แสดงการทดสอบการสันดาปของเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์โบไบนด้วย FAEE ที่ผลิตได้ โดยก่อนที่จะทำการทดสอบกระบวนการสันดาปนั้น FAEE ดังกล่าวจะถูกผสมด้วยน้ำมันเครื่องยนต์ (turbo oil) เพื่อทำหน้าที่ในการบำรุงรักษาเครื่องยนต์โดยเฉพาะส่วนที่เกี่ยวข้องกับการหมุนต่าง ๆ โดยหลังจากผสม FAEE เข้ากับน้ำมันเครื่องยนต์แล้ว จะทำให้สีของสารละลายเปลี่ยนเป็นสีเหลือง (ดังรูป) ซึ่งอัตราส่วนที่เหมาะสมของการผสม turbo oil ต่อน้ำมันเคโรซีนจะอยู่ที่อัตราส่วน 5 ใน 100 โดยหากผสมในอัตราที่เจือจางมากเกินไป จะทำให้อายุการใช้งานของตลับลูกปืนสั้นลงเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงเกินไป และหากผสมในอัตราที่เข้มข้นมากเกินไป ก็จะส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการเผาไหม้ลดลง รูปภาพ 36 แสดงการทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์โบไบนโดยทำการเปรียบเทียบระหว่างน้ำมันเคโรซีนและ FAEE ที่ผลิตได้ ซึ่งแรงขับของเครื่องยนต์นั้นจะขึ้นอยู่กับอัตราการป้อนเชื้อเพลิง โดยการป้อนเชื้อเพลิง ในอัตราที่สูงขึ้น ก็จะส่งผลทำให้เครื่องยนต์ทำงานในรอบที่สูงมากขึ้นเกิดแรงขับมากขึ้น โดยจะแสดงในรูป ของ thrust ที่เพิ่มขึ้น





รูปภาพ 36 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของเครื่องยนต์กับแรงขับ (thrust) ที่ได้ (บน) และ ความสัมพันธ์ระหว่างความดัน (P4) กับแรงขับของเครื่องยนต์ (ล่าง)

4. สรุปผลการทดลอง

โครงการวิจัยนี้มุ่งเน้นการศึกษาน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพโดยทำการผลิตเอทิลเอสเทอร์ของกรดอินทรีย์ (กรดแล็กติก) และเอทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน ที่ได้จากน้ำมันจากเนื้อเมล็ดปาล์ม อีกทั้งยังใช้เอทานอลไร้น้ำ ซึ่งจะทำการผลิตขึ้นใช้เองในท้องปฏิบัติการ จากนั้นจะทำการศึกษารกลั่นลำดับส่วนเพื่อแยกเอทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันสายกลาง (Biojet) ออกจาก เอทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันสายยาว (Biodiesel) ก่อนที่จะนำ Biojet ไปทำการผสมกับสารเติมแต่ง บางชนิดเพื่อปรับแต่งคุณสมบัติทางกายภาพให้ใกล้เคียงกับน้ำมัน Jet A-1 ที่ใช้กันอยู่ในเชิงพาณิชย์ นอกจากนี้ผลลัพธ์ที่ได้จากโครงการวิจัยนี้ยังสามารถพัฒนาเชื้อเพลิง สำหรับอากาศยานที่ได้จากวัตถุดิบ ทางเกษตรเป็นการเพิ่มมูลค่า อีกทั้งได้ข้อมูลพื้นฐานชุดทดสอบเครื่องยนต์เจ็ท ที่สามารถต่อยอด ในการขยายระดับที่ใหญ่ขึ้นได้ในอนาคต

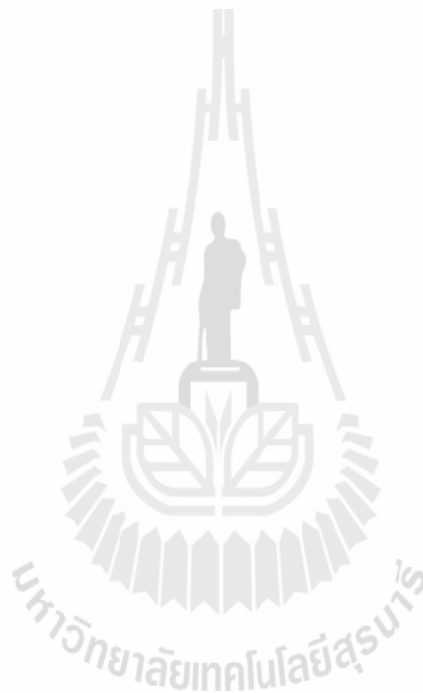


Reference

J.D. Mattingly, Elements of Propulsion: Gas Turbines and Rockets, American Institute of Aeronautics and Astronautics, USA.

T. Kamps, Model Jet Engines, 3rd Edi., Traplet publications, United Kingdom.

Wright. H. J., J. B. Segur, H. V. Clark, S. K. Coburn, E. E. Langdon, and R. N. DuPuis. 1944.A report on ester interchange. *Oil & Soap* 2 (1): 145-148.



ประวัตินักวิจัย

1. ชื่อ : นาย อภิชาติ บุญหาวัน
2. ตำแหน่งปัจจุบัน : รองศาสตราจารย์ประจำสาขาเทคโนโลยีชีวภาพ
3. ที่อยู่
 สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ 111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี
 สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โทรศัพท์: (044)-224578
 โทรสาร: (044)-224154
 อีเมลล์ : apichat@sut.ac.th

4. ประวัติการศึกษา

ปี	ระดับ	สาขา	สถานศึกษา	ประเทศ
2548	ป. เอก	วิศวกรรมเคมี	Imperial college London	อังกฤษ
2543	ป. โท	วิศวกรรมชีวเคมี	The University of Birmingham	อังกฤษ
2537	ป. ตรี	วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี การอาหาร (เกียรตินิยม)	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	ไทย
1990	มัธยมศึกษาตอนปลาย	-	โรงเรียนปริญชรอยัล วิทยาลัย เชียงใหม่	ไทย

5. ประสบการณ์การทำงาน

- งานวิจัยหลังปริญญาเอก ASEA-UNINET Post-doc, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีเวียนนา, ประเทศออสเตรเลีย (พ.ค. 2550- เม.ย. 2551).

- อาจารย์/ผู้ช่วยศาสตราจารย์ประจำสาขาเทคโนโลยีชีวภาพ สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (ม.ค. 2548 – กพ 2557)
- อาจารย์/รองศาสตราจารย์ประจำสาขาเทคโนโลยีชีวภาพ สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (กพ 2557 – ปัจจุบัน)

6. สถานะภาพงานวิจัย

หัวหน้าโครงการ

- การศึกษาการพัฒนาการผลิตเอทานอลแบบต่อเนื่องจากกากน้ำตาลอ้อยโดยใช้เชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* ในถังหมักแบบใช้เยื่อแผ่น
แหล่งเงินทุน: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 100,000. บาท
สถานะภาพ เสร็จสิ้นโครงการ (ก.ย. 2548- ส.ค. 2549)
 - การเก็บเกี่ยวกรด L-แล็คติคจากน้ำหมักด้วยระบบอิเล็กทรอนิกส์ออนไลน์ในเซชัน
แหล่งเงินทุน: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ/มทส สัญญาเลขที่ มทส -3-304-51-12-09
240,000. บาท (ธ.ค. 2550- พ.ย. 2551) โครงการเสร็จสมบูรณ์
- การสังเคราะห์เมทานอลแบบต่อเนื่องด้วยเชื้อ *Methylosinus trichosporium* OB3b ในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบเบรนโดยใช้เทคนิคเพอร์แวนเปอเรชั่น
แหล่งเงินทุน: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
305,000.- บาท (ต.ค. 2549- พ.ย. 2551) อยู่ในระหว่างการตีพิมพ์
- การคัดเลือกจุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายกรดไขมันจากสบู่ดำ ในสภาวะ ไร้ออกซิเจน
แหล่งเงินทุน: สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ
200,000. บาท (ก.ย. 2549- ส.ค. 2550) อยู่ในระหว่างการตีพิมพ์
 - การพัฒนาท่อโยกวงเชิงประกอบสำหรับใช้ในกระบวนการผลิตอะซีโตน-บิวทานอล-เอทานอลจากมันสำปะหลัง
แหล่งเงินทุน: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
351,000. บาท (ธ.ค. 2552- พ.ย. 2553) อยู่ในระหว่างการตีพิมพ์
- การประยุกต์ใช้สเปกโตรสโคปีของรังสีใกล้คลื่นใต้แดงในการควบคุมการผลิตเอทานอล บริสุทธิ์โดยใช้ระบบการแยกไอน้ำผ่านเยื่อแผ่นและการดูดซับ
แหล่งเงินทุน: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
301,000. บาท (ธ.ค. 2552- พ.ย. 2553) อยู่ในระหว่างการตีพิมพ์
- การประยุกต์ใช้ระบบอิเล็กทรอนิกส์ออนไลน์ในเซชันในการแยกโปรตีนเอ็นเทอโรโคเนสจากน้ำ หมัก
แหล่งเงินทุน: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
271,000. บาท (ธ.ค. 2552- พ.ย. 2553) อยู่ในระหว่างการตีพิมพ์

- Process optimization for motor fuel grade ethanol production using hybrid vapor permeation and pressure swing adsorption technique
แหล่งเงินทุน: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
200,000. บาท (30 พ.ย. 2551- 29 พ.ย. 2552) อยู่ในระหว่างการตีพิมพ์
- การวิเคราะห์สมดุลมวลและพลังงานของการผลิตเอทานอลบริสุทธิ์จากน้ำหมักในระดับโรงงานต้นแบบด้วยเทคนิคผสมระหว่างการกลั่น การแยกไอผ่านเยื่อแผ่น และการดูดซับ
แหล่งเงินทุน: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
2,500,000. บาท (ส.ค. 2552- ส.ค. 2555) อยู่ในระหว่างการดำเนินการ
- การสร้างโรงงานต้นแบบการผลิตเอทานอลสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงจากมันสำปะหลังโดยใช้ เทคนิคผสมระหว่างการแยกไอผ่านเยื่อแผ่นและการดูดซับ
แหล่งเงินทุน: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
2, 143, 000. บาท (มี.ค. 2553- มี.ค. 2554) อยู่ในระหว่างการดำเนินการ
- การทำบริสุทธิ์กรดซัคซินิคจากน้ำหมักด้วยวิธีตกตะกอน เอสเทอร์รีฟิเคชันและการกลั่น
แหล่งเงินทุน: สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ
537,200. บาท อยู่ในระหว่างการดำเนินการ
- การทำบริสุทธิ์กรด D- และ L-แล็คติกด้วยวิธีเอสเทอร์รีฟิเคชันและการกลั่นจากน้ำหมัก
แหล่งเงินทุน: สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ (B10-52)
3,272,440. บาท (ธ.ค. 2552- พ.ย. 2553) อยู่ในระหว่างการดำเนินการ
- การออกแบบถังปฏิกรณ์แบบท่อไหลสำหรับการทำบริสุทธิ์กรด D-แล็คติก
แหล่งเงินทุน: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
683,290. บาท (ม.ค. 2554- ธ.ค. 2554) อยู่ในระหว่างการดำเนินการ
- การพัฒนาท่อใยกลวงเซรามิคเชิงประกอบสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลด้วยระบบการแยกไอผ่านเยื่อแผ่น
แหล่งเงินทุน: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
385,290. บาท (ม.ค. 2554- ธ.ค. 2554) อยู่ในระหว่างการดำเนินการ
- ถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนสำหรับเซลล์เชื้อเพลิงเอทานอล
แหล่งเงินทุน: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
350,290. บาท (ม.ค. 2554- ธ.ค. 2554) อยู่ในระหว่างการดำเนินการ
 - การพัฒนาเมมเบรนเซรามิกชนิดท่อกลวงสำหรับการกำจัดน้ำออกจากสารละลายเอทานอลและการประยุกต์ใช้ในปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันของกรดซัคซินิกที่ได้จากน้ำหมัก
แหล่งเงินทุน: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
1,200,000 บาท (มิ.ย. 2557- มิ.ย. 2560) อยู่ในระหว่างการดำเนินการ

- การพัฒนากระบวนการผลิตเอทานอลจากเซลลูโลสโดย *Pichia Stipitis*

แหล่งเงินทุน: มูลนิธิโทเร

250,000 บาท (ก.พ. 2558- ม.ค 2559) อยู่ในระหว่างการดำเนินการ

- โครงการปรับปรุงโรงงานต้นแบบสำหรับการผลิตไบโอเอทานอลควบคู่กับกระบวนการหมักด้วยเทคนิคการกลั่นลำดับส่วนแบบสุญญากาศ

แหล่งเงินทุน: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

531,800 บาท (ม.ค. 2558- ธ.ค 2558) อยู่ในระหว่างการดำเนินการ

- การผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับเครื่องยนต์ก๊าซเทอร์โบไนด์ด้วยเทคนิคทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันระหว่างเอทานอลและน้ำมันจากเนื้อเมล็ดปาล์ม

แหล่งเงินทุน: สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (สวก)

786,859 บาท (ก.พ. 2558- ม.ค 2559) อยู่ในระหว่างการดำเนินการ

- การแยกกรดซัคซินิกควบคู่กับกระบวนการหมักโดยแป้งมันสำปะหลังด้วยเทคนิคอิเล็กโตรไดอะไลซิส

แหล่งเงินทุน: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ/มทส

420,000 บาท (ต.ค 2557 – ต.ค. 2558) อยู่ในระหว่างการดำเนินการ

- การพัฒนาการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับอากาศยานจากแป้งมันสำปะหลัง

แหล่งเงินทุน: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (กองทุนนวัตกรรมสมเด็จพระเทพฯ)

410,000 บาท (ม.ค. 2558- ธ.ค 2558) อยู่ในระหว่างการดำเนินการ

ผู้ร่วมโครงการ

- การทดสอบประสิทธิภาพกระบวนการทำบริสุทธิ์กรดดีเล็กติกโดยอิงเทคโนโลยีการกลั่นพร้อมการทำเอสเทอร์ฟิเคชัน (สัญญา สนช-มก-มทส เลขที่ B10-52) จากน้ำหมักของบริษัท มิตรผลวิจัยพัฒนาอ้อยและน้ำตาล จำกัด

แหล่งเงินทุน: บริษัท มิตรผลวิจัย พัฒนาอ้อยและน้ำตาล จำกัด

หัวหน้าโครงการ: ผศ.ดร. วีระศักดิ์ เลิศศิริโยธิน

1,187,220. บาท (1 พ.ย 2553- เม.ย 2554) อยู่ในระหว่างการดำเนินการ

- การพัฒนาเยื่อแผ่นเชิงประกอบจากยางธรรมชาติสำหรับการแยกเอทิลแอลกอฮอล์จากปฏิกิริยา เอสเทอร์ฟิเคชันด้วยระบบเพอร์แวกซ์

แหล่งเงินทุน: สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

หัวหน้าโครงการ: อ.ดร. วีรัช ทวีปรีดา

665,000. บาท (23 ต.ค 2553- 22 ต.ค 2554) อยู่ในระหว่างการดำเนินการ

7. งานวิจัยตีพิมพ์:

1. Boontawan, A., Stuckey D.C. (2005), Mass Transfer of Terpenes through a Silicone Rubber Membrane in a Liquid-Liquid Contacting System, *Biotechnol Prog*, 21:1680-1687.
2. Boontawan, A., Stuckey D.C. (2005), A Membrane Bioreactor for the Biotransformation of α -Pinene Oxide to Isonovalal by Resting Cells of *Pseudomonas fluorescens* NCIMB 11671, *Appl Microbiol biotechnol*, 69:643-649.
3. Boontawan, A., Schausberger, P., Bösch, P., and Friedl, A. (2008) Dehydration of Ethanol/Water Mixture using Pervaporation and Vapor Permeation Technique, *J Appl Membr Sci Technol*, 5:1-7
4. Boontawan, P., Kanchanatawee, S., and Boontawan A. (2011) Extractive Fermentation of L-(+)-lactic acid by *Pediococcus pentosaceus* using Electrodeionization (EDI) Technique, *Biochem Eng J*, 54:192-199
5. Boontawan, P., and Boontawan A. (2011) Isolation and characterization of *Jatropha* oil-degrading *Enterococcus faecalis* and *Burkholderia cenocepacia* W-1 under anaerobic condition, *Afr J Biotechnol*, 10(63): 13841-13851
6. Khunnonkwao, P., Boontawan, P., Haltrich, D., Maischberger, T., and Boontawan, A. (2012) Purification of L-(+)-Lactic Acid from Pre-treated Fermentation Broth using Vapor Permeation-Assisted Esterification, *Process Biochem*, 47(12): 1948-1956
7. Pimkaew, S., and Boontawan, A. (2011) Process Optimization for Motor Fuel Grade Ethanol Production using Hybrid Vapor Permeation and Pressure Swing Adsorption Technique, *Euro J of Sci Res*, 64(4): 644-657
8. Lubsungneon, J., Srisuno, S., Rodtong, S., and Boontawan, A., (2014) Nanofiltration coupled with Vapor Permeation-Assisted Esterification as an Effective Purification Step for Fermentation-Derived Succinic Acid, *J Membr Sci*, 459: 132-142

8. งานนำเสนอในงานประชุมทางวิชาการระดับนานาชาติ:

1. Boontawan, A., Schausberger, P., Bösch, P., Brinkmann, T., and Friedl, A. Dehydration of Ethanol/Water Mixture using Pervaporation and Vapor Permeation Technique. *The 6th Regional Symposium on Membrane Science and Technology 2008*, 13rd-15th August 2008, Phuket, Thailand (นำเสนอด้วยวาจา)
2. Boontawan, A., Schausberger, P., Bösch P., Brinkmann, T., and Friedl, A. Dehydration of Ethanol/Water Mixture using Vapor Permeation Technique. *2008 International Congress on Membranes and Membrane Processes*, 12nd-18th July 2008, Hawaii, United State of America. (นำเสนอแบบโปสเตอร์)
3. Bösch, P., Schausberger, P., Boontawan, A., and Friedl, A. Modelling and Process Integration of Membranes for Ethanol Dehydration. *2008 International Congress on Membranes and Membrane Processes*, 12nd-18th July 2008, Hawaii, United State of America. (นำเสนอด้วยวาจา)
4. Panvichit, P., Boontawan, A., and Kanchanatawee, S. Selection of Lactic Acid Bacteria for L-Lactic Acid Fermentation from Cassava Starch. *The 3rd International Conference on Renewable Resources and Biorefineries 2007*, 4th-6th June 2007, Ghent University, Belgium. (นำเสนอแบบโปสเตอร์)
5. Panvichit, P., Kanchanatawee, S. and Boontawan, A. Mass transfer characteristic of ethanol from diluted aqueous solution through silicone membranes in a liquid-liquid contacting system. *Membrane Science & Technology 2006*, 26th-29th April 2006, Nanyang Technological University, Singapore. (นำเสนอแบบโปสเตอร์)
6. Boontawan, A. and Stuckey, D.C. A Membrane Bioreactor for Biotransformation of Monoterpene. *3rd Regional Symposium on Membrane Science & Technology 2005*, 27th-28th April 2005, Institut Teknologi Bandung, Indonesia. (นำเสนอด้วยวาจา)
7. Boontawan, A. Molecular Diffusion in PVA Membrane for Separation Dehydration of EtOH/H₂O Mixtures using Vapor Permeation Technique. *Nanotech Insight Conference 2009*, 29th March-2nd April 2009, Barcelona, Spain. (นำเสนอแบบโปสเตอร์)
8. Boontawan, A. and Pimkaew, S. Anhydrous ethanol production from fermentation broth using distillation, vapor permeation, and pressure swing adsorption technique. *The 8th International Conference on Membrane Science and Technology 2010*, 29th November-2nd December 2010, Institute Teknologi Bandung, Indonesia. (นำเสนอด้วยวาจา)

9. Molina, S., Lertsiriyothin, W., and Boontawan, A. Production and Purification of D(-)-Lactic Acid from Concentrated Fermentation Broth using Esterification, Distillation and Hydrolysis Technique. The 4th International Conference on Fermentation Technology for Value Added Agricultural Products (FerVAAP) Conference, 29th -31st August 2011, Khon Kaen, Thailand. (นำเสนอด้วยวาจา)
10. Samnaknit, W., Kongkaew, A., and Boontawan, A., Extractive Fermentation of Bio-Ethanol from Concentrated Sweet Sorghum Juice using Vacuum Fractionation Technique, ISSCT co-product workshop: successful utilization of co-product in the sugar industry, 19th-22nd March 2012, Bangkok, Thailand (นำเสนอด้วยวาจา)



หนังสือเป็นสมบัติของท่าน
โปรดช่วยกันรักษา

ศูนย์บรรณสารและสื่อการศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
โทรศัพท์ 0 4422 3073 โทรสาร 0 4422 3060