

การสังเคราะห์เชื้อเพลิงจากน้ำยางธรรมชาติผสมกับแป้งมันสำปะหลัง



นางสาวสุพิณ ท้าวพุดมณี

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค


คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-2483-7

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

FUEL SYNTHESIS FROM NATURAL RUBBER LATEX MIXED WITH TAPIOCA STARCH



Miss Supin Taoputshong

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Chemical Technology

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2002

ISBN 974-17-2483-7

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสังเคราะห์เชื้อเพลิงจากน้ำยางธรรมชาติผสมกับแป้งมันสำปะหลัง
โดย	นางสาวสุพิณ ท้าวพุดผดุงค์
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร. เพ็ญพรพรค ทัศคร

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. วันชัย โพธิ์พิจิตร)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิจิตรานต์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร. เพ็ญพรพรค ทัศคร)

..... กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรพรณ ประศาสน์สารกิจ)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สุพิน ท้าวพูนวงศ์ : การสังเคราะห์เชื้อเพลิงจากน้ำยางธรรมชาติผสมกับแป้งมันสำปะหลัง.
(Fuel Synthesis from Natural Rubber Latex Mixed with Tapioca Starch)
อ. ที่ปรึกษา : ดร. เพียรพรรค ทศคร, 114 หน้า. ISBN 974-17-2483-7.

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาการสังเคราะห์เชื้อเพลิงจากน้ำยางธรรมชาติผสมกับแป้งมันสำปะหลัง ในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะขนาด 250 มิลลิลิตร ที่อัตราส่วนยางต่อแป้ง 8:2 ถึง 10:0 อุณหภูมิ 325-400 องศาเซลเซียส ความดันคาร์บอนไดออกไซด์ 0-20 บาร์ และเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 30-60 นาที ตัวแปรกระบวนการที่ศึกษา คือ อัตราส่วนยางต่อแป้ง อุณหภูมิ ความดันคาร์บอนไดออกไซด์ และเวลาในการเกิดปฏิกิริยา ทำการทดลองแบบแฟกทอเรียลสองระดับ พบว่าอัตราส่วนยางต่อแป้งและอุณหภูมิส่งผลกระทบต่อร้อยละผลได้ของแก๊ส ของแข็ง และของเหลวอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งที่อัตราส่วนยางต่อแป้ง 9:1 อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส คาร์บอนไดออกไซด์ 0 บาร์ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 30 นาที ได้ร้อยละของของเหลวสูงสุดถึง 86.86 และพบว่าการใช้แป้งผสมน้ำยางเป็นสารป้อนช่วยเสริมให้ได้ปริมาณของเหลวเพิ่มขึ้น

การวิเคราะห์สมบัติของของเหลว พบว่าองค์ประกอบหลักเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว นอกจากนี้ยังพบว่าการเติมแป้งในสารป้อนจะได้ผลิตภัณฑ์ที่มีหมู่ออกซิเจนในโครงสร้างโมเลกุลของส่วนสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัวและสารประกอบแอมติกขณะที่ใช้ยางเป็นสารป้อนไม่พบหมู่ออกซิเจนนี้ และของเหลวที่สังเคราะห์ได้มีค่าความร้อนสูงใกล้เคียงน้ำมันดิบ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา...เคมีเทคนิค..... ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา..เคมีเทคนิค..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา...2545.....

4472464923 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD: NATURAL RUBBER / FUEL / TAPIOCA STARCH

SUPIN TAOPUTSHONG : FUEL SYNTHESIS FROM NATURAL RUBBER LATEX MIXED WITH TAPIOCA STARCH. THESIS ADVISOR : PEINPAK TASAKORN, Ph.D., pp 114. ISBN 974-17-2483-7.

Fuel synthesis from natural rubber mixed with tapioca starch has been studied in a batch reactor of 250 ml capacity at a rubber:starch ratio range 8:2–10:0, temperature 325–400 °C, carbondioxide pressure 0–20 bar and reaction time 30–60 min. The process variables were rubber:starch ratio, temperature, carbondioxide pressure and reaction time. The process was carried out by two–level factorial experimental design method. The result indicated that rubber:starch ratio and temperature have a significant effect on gas, solid and liquid yield. The liquid yield reached 86.86% at optimum condition of rubber:starch ratio 9:1, temperature 350 °C, carbondioxide 0 bar and reaction time 30 min. In term of oil yield, it showed that there was a synergism between rubber and starch.

Analysis of liquid properties was found that the main composition of oil was saturated hydrocarbon. The addition of starch in reactant, it also found oxygen group in structure of saturated and aromatic hydrocarbon molecule. Synthesis liquid had heating value as high as petroleum crude oil.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department...Chemical Technology..... Student's signature.....

Field of study...Chemical Technology..... Advisor's signature.....

Academic year....2002.....

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.เพียรพรรค ทศคร อาจารย์ที่ปรึกษานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำการทำวิจัย ตลอดจนให้ความเห็นเพื่อปรับปรุงแก้ไขการทำวิจัยให้มีความสมบูรณ์ด้วยดียิ่ง

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิจิตตานต์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์ และศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ความเห็นและคำแนะนำในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัยและโครงการ ADB ที่ให้การสนับสนุนทุนการวิจัย รวมถึงค่าใช้จ่ายในการศึกษา

ขอกราบขอบพระคุณบริษัท ไทยรับเบอร์แอนดาคัทเชซ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์น้ำยาง และบริษัท บางกอกอินดัสเทรียลแก๊ส จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในโตรเจนเหลวสำหรับใช้ในงานวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านและเพื่อนนิสิตที่ช่วยเหลือให้คำแนะนำ ตั้งแต่เริ่มดำเนินการวิจัยจนกระทั่งการวิจัยเสร็จสิ้น

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ได้ให้กำเนิด เลี้ยงดูอบรมสั่งสอน ให้การสนับสนุนและให้กำลังใจตลอดมา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญภาพ	ญ

บทที่

1	
	บทนำ.....
1	
	1.1 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....2
	1.2 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....2
	1.3 ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย.....2
2	
	2.1 ยางธรรมชาติ.....4
	2.2 แป้งมันสำปะหลัง.....11
	2.3 การแตกตัวของพอลิเมอร์ด้วยความร้อน.....14
	2.4 ของไหลภาวะเหนือวิกฤต.....17
	2.5 การกลั่นน้ำมันดิบ.....21
	2.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....24
	2.7 สมมติฐาน.....25
3	
	3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....27
	3.2 ตัวอย่างและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....28
	3.3 การดำเนินงานวิจัย.....29
	2.4 ขั้นตอนการวิจัย.....30
4	
	4.1 การเตรียมสารป้อน.....36
	4.2 การศึกษาผลการเติมแป้งเบื้องต้น.....37
	4.3 ผลของตัวแปรต่อร้อยละการเปลี่ยนยางธรรมชาติและแป้งมันสำปะหลัง.....38

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4.4 ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊ส.....	53
4.5 ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของแข็ง.....	56
4.6 ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของเหลว.....	57
5 5.1 สรุปผลการวิจัย.....	70
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	71
รายการอ้างอิง.....	72
ภาคผนวก.....	77
ภาคผนวก ก.....	78
ภาคผนวก ข.....	79
ภาคผนวก ค.....	84
ภาคผนวก ง.....	99
ภาคผนวก จ.....	106
ภาคผนวก ฉ.....	111
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	114

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบของน้ำยางสด.....	5
2.2 จำแนกปฏิกิริยาการเกิดเป็นวงแหวนโดยการถ่ายโอนอิเล็กตรอนของสารไอเลฟิน.....	10
2.3 สมบัติของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน	12
2.4 สมบัติกายภาพและอุณหภูมิกการเกิดเจลของแป้ง	13
2.5 พลังงานการแตกตัว (E_D) ของพันธะพอลิเมอริที่ 25 องศาเซลเซียส	15
2.6 สมบัติวิกฤตของสารชนิดต่าง ๆ.....	18
2.7 การเปรียบเทียบสมบัติของแก๊ส ของเหลว และของไหลเหนือวิกฤต.....	19
3.1 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษา.....	29
3.2 ภาวะการทดลองทั้งหมดที่ต้องทำการทดลอง	30
3.3 ประเภทและช่วงจุดเดือดของน้ำมัน	34
4.1 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊ส ของแข็ง และของเหลว	38
4.2 ความแปรปรวนของตัวแปรหลักที่มีต่อร้อยละผลได้ของแก๊ส.....	41
4.3 ความแปรปรวนของตัวแปรหลักที่มีต่อร้อยละผลได้ของของแข็ง	42
4.4 ความแปรปรวนของตัวแปรหลักที่มีต่อร้อยละผลได้ของของเหลว.....	43
4.5 ภาวะกึ่งกลางของตัวแปร.....	44
4.6 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ภาวะกึ่งกลางของตัวแปร	44
4.7 ความแปรปรวนและค่า Pure quadratic ของแก๊ส.....	46
4.8 ความแปรปรวนและค่า Pure quadratic ของของแข็ง.....	47
4.9 ความแปรปรวนและค่า Pure quadratic ของของเหลว	48
4.10 ตำแหน่งพีคแก๊สโดยประมาณ.....	53
4.11 ขนาดอนุภาคของแข็งที่ปริมาตรอนุภาคสูงสุด.....	56
4.12 ตำแหน่งพีคสเปคตรัม FT-IR ที่สำคัญ	68
4.13 ค่าความร้อนของน้ำยางธรรมชาติ แป้งมันสำปะหลัง และของเหลว	68
ก สมบัติของน้ำยางธรรมชาติชั้นชนิดแอมโมเนียต่ำ.....	78
ข1 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์จากน้ำยางและน้ำแป้ง	81
ข2 ประเภทและช่วงจุดเดือดของน้ำมัน	83
ค1 ข้อมูลและผลการทดลองเปรียบเทียบรูปแบบแป้งที่ใช้เป็นสารบ่อน	84
ค2 ข้อมูลและการเปรียบเทียบผลการทดลองกับการคำนวณเชิงอัตราส่วนของเติมแป้ง	84
ค3 ข้อมูลและผลการทดลองร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ (2^4 factorial 2 replicates).....	85
ค4 ข้อมูลและผลการทดลองร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ภาวะกึ่งกลางของตัวแปร	87

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ค5	ข้อมูลและผลการทดลองเปรียบเทียบบรรยากาศเริ่มต้นที่มีต่อร้อยละ ผลได้ของผลิตภัณฑ์..... 87
ค6	ข้อมูลและผลการทดลองอิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างยางกับแป้งที่มีต่อ ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์..... 88
ค7	ข้อมูลและผลการคำนวณเชิงอัตราส่วนของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ อัตราส่วนระหว่างยางกับแป้งต่างๆ..... 89
ค8	ข้อมูลและผลการทดลองอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์..... 90
ค9	ข้อมูลและผลการทดลองการวิเคราะห์น้ำมันด้วยวิธี SARA..... 91
ค10	ข้อมูลและผลการทดลองอิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างยางกับแป้งที่มีต่อ การกระจายตัวของหมู่ไฮโดรคาร์บอน..... 92
ค11	ข้อมูลและผลการทดลองอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อการกระจายตัวของ หมู่ไฮโดรคาร์บอน..... 92
ค12	ข้อมูลและผลการทดลองอิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างยางกับแป้งที่มีต่อ ช่วงจุดเดือดของน้ำมัน..... 93
ค13	ข้อมูลและผลการทดลองอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อช่วงจุดเดือดของของเหลว..... 93
ค14	ข้อมูลและผลการทดลองอิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างยางกับแป้งที่มีต่อ ความหนืดของของเหลว..... 94
ค15	ข้อมูลและผลการทดลองอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อความหนืดของของเหลว..... 94
ง1	สัญลักษณ์และระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษา..... 99
ง2	ภาวะของตัวแปรและร้อยละผลได้ของของเหลว..... 101
ง3	การคำนวณ Contrast, Effect Estimate และ Sum of Squares ของร้อยละผลได้ ของของเหลว..... 102
ง4	การคำนวณ %Normal Probability ของตัวแปรที่มีต่อร้อยละผลได้ของของเหลว..... 103
ง5	ความแปรปรวนของตัวแปรหลักที่มีต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของเหลว..... 104
จ1	ภาวะกึ่งกลางของตัวแปรและร้อยละผลได้ของของเหลว..... 107
จ2	การคำนวณ Contrast, Effect Estimate และ Sum of Squares ของร้อยละผลได้ ของของเหลว..... 108
จ3	ความแปรปรวนและค่า Pure quadratic ของของเหลว..... 109
ฉ	โครงสร้างและสมบัติของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัวและเอโรแมติก..... 111

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1	5
2.2	6
2.3	7
2.4	8
2.5	8
2.6	9
2.7ก	11
2.7ข	11
2.8ก	13
2.8ข	13
2.9ก	14
2.9ข	14
2.10	14
2.11ก	16
2.11ค	16
2.12	17
2.13	18
2.14	23
2.15	26
3	27
4.1	36
4.2	37
4.3	40
4.4	41
4.5	43
4.6	49

(อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส คาร์บอนไดออกไซด์ 0 บาร์ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 30 นาที)

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 ผลของอัตราส่วนระหว่างยางกับแป้งมันสำปะหลังต่อร้อยละผลได้ของ ผลิตภัณฑ์ของเหลว	50
4.8 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ (อัตราส่วนระหว่างยางกับแป้ง 9:1 คาร์บอนไดออกไซด์ 0 บาร์ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 30 นาที).....	50
4.9 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของของเหลว	51
4.10 ผลบรรยากาศเริ่มต้นต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์	52
4.11ก องค์ประกอบแก๊สที่อัตราส่วนระหว่างยางกับแป้ง 8:2.....	53
4.11ข องค์ประกอบแก๊สที่อัตราส่วนระหว่างยางกับแป้ง 9:1	53
4.12ก องค์ประกอบแก๊สที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 350 องศาเซลเซียส	54
4.12ข องค์ประกอบแก๊สที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 400 องศาเซลเซียส	54
4.13ก องค์ประกอบแก๊สที่เวลาเกิดปฏิกิริยา 30 นาที	55
4.13ข องค์ประกอบแก๊สที่เวลาเกิดปฏิกิริยา 60 นาที	55
4.14 ผลของอัตราส่วนระหว่างยางกับแป้งที่มีต่อหมู่ไฮโดรคาร์บอนของของเหลว.....	57
4.15 ผลของอัตราส่วนระหว่างยางกับแป้งที่มีต่อสารประกอบอิมิตัวและแอโรแมติก.....	58
4.16 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อหมู่ไฮโดรคาร์บอนของของเหลว	59
4.17 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อสารประกอบอิมิตัวและแอโรแมติก.....	59
4.18 โคโรมาโตแกรม GC-MS ของไฮโดรคาร์บอนอิมิตัวและแอโรแมติก ยางต่อแป้ง 8:2 350 องศาเซลเซียส 0 บาร์ 30 นาที	60
4.19 โคโรมาโตแกรม GC-MS ของไฮโดรคาร์บอนอิมิตัวและแอโรแมติก ยางต่อแป้ง 9:1 350 องศาเซลเซียส 0 บาร์ 30 นาที	61
4.20 โคโรมาโตแกรม GC-MS ของไฮโดรคาร์บอนอิมิตัวและแอโรแมติก ยางต่อแป้ง 10:0 350 องศาเซลเซียส 0 บาร์ 30 นาที	61
4.21 โคโรมาโตแกรม GC-MS ของไฮโดรคาร์บอนอิมิตัวและแอโรแมติก ยางต่อแป้ง 9:1 400 องศาเซลเซียส 0 บาร์ 30 นาที	62
4.22 ผลของอัตราส่วนระหว่างยางกับแป้งที่มีต่อช่วงจุดเดือดของของเหลว	63
4.23 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อช่วงจุดเดือดของของเหลว	64
4.24 ผลของอัตราส่วนระหว่างยางกับแป้งมันสำปะหลังที่มีต่อความหนืดของของเหลว	65
4.25 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อความหนืดของของเหลว	66

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.26	สเปกตรัม FT-IR ของยางธรรมชาติ ของเหลวจากยางต่อแข็ง 9:1 350 องศาเซลเซียส 0 บาร์ 30 นาที และของเหลวจากยางต่อแข็ง 10:0 350 องศาเซลเซียส 0 บาร์ 30 นาที 67
ค1	จุดเดือดของของเหลวที่ ยางต่อแข็ง 8:2 350 องศาเซลเซียส 0 บาร์ 30 นาที 95
ค2	จุดเดือดของของเหลวที่ ยางต่อแข็ง 8.5:1.5 350 องศาเซลเซียส 0 บาร์ 30 นาที 95
ค3	จุดเดือดของของเหลวที่ ยางต่อแข็ง 9:1 350 องศาเซลเซียส 0 บาร์ 30 นาที 96
ค4	จุดเดือดของของเหลวที่ ยางต่อแข็ง 9.5:0.5 350 องศาเซลเซียส 0 บาร์ 30 นาที 96
ค5	จุดเดือดของของเหลวที่ ยางต่อแข็ง 10:0 350 องศาเซลเซียส 0 บาร์ 30 นาที 97
ค6	จุดเดือดของของเหลวที่ ยางต่อแข็ง 9:1 325 องศาเซลเซียส 0 บาร์ 30 นาที 97
ค7	จุดเดือดของของเหลวที่ ยางต่อแข็ง 9:1 375 องศาเซลเซียส 0 บาร์ 30 นาที 98
ค8	จุดเดือดของของเหลวที่ ยางต่อแข็ง 9:1 400 องศาเซลเซียส 0 บาร์ 30 นาที 98
ง	Normal Probability Plot ของตัวแปรที่มีต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์น้ำมัน 104

บทที่ 1

บทนำ

ปัจจุบันมีการวิจัยและพัฒนาเกี่ยวกับการนำของเสียจำพวก ยางรถยนต์ พลาสติก เศษไม้ ขี้เลื่อย มาผลิตเป็นเชื้อเพลิงเหลว บางกรณีมีการทำปฏิกิริยาร่วมกับถ่านหิน เช่น ปฏิกิริยาร่วมระหว่างถ่านหินกับยางรถยนต์ใช้แล้ว[1, 2] ถ่านหินกับเซลลูโลส[3] เป็นต้น ทั้งนี้อาจมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา[4] เพื่อให้ได้ปริมาณของเหลวเพิ่มขึ้น จากการศึกษาการแตกตัวของยางร่วมกับถ่านหิน[5] พบว่าเมื่อยางธรรมชาติถูกทำให้แตกตัวด้วยความร้อนจะมีลักษณะโครงสร้างโมเลกุลคล้ายกับถ่านหินและให้ปริมาณของเหลวมาก ขณะที่โครงสร้างโมเลกุลของแป้งคล้ายกับเซลลูโลส[6] ดังนั้นจึงเป็นเหตุจูงใจที่จะนำยางธรรมชาติกับแป้งมันสำปะหลังมาแปรรูปเป็น เชื้อเพลิงอีกทั้งผลผลิตยางธรรมชาติและแป้งมันสำปะหลังของประเทศไทยมีปริมาณมาก ราคาถูก จึงเป็นการแปรรูปผลิตผลในประเทศให้มีประโยชน์มากขึ้น นอกจากนี้การใช้น้ำยางธรรมชาติและแป้งมันสำปะหลังเป็นสารป้อนในเครื่องปฏิกรณ์ยังมีความบริสุทธิ์มากกว่าการใช้ถ่านหิน เพราะในถ่านหินมีปริมาณของกำมะถันปนเปื้อน ทำให้เชื้อเพลิงที่ได้จากการแปรรูปมีคุณภาพต่ำ

น้ำยางสดและน้ำยางเข้มข้นประกอบด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอน น้ำ และของแข็งที่ไม่ใช่ยาง(โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต และเกลืออินทรีย์)ปริมาณเล็กน้อย โดยที่ปริมาณไฮโดรคาร์บอนขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของน้ำยาง โครงสร้างหลักของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในยางเป็น *cis* - 1,4 - polyisoprene สำหรับแป้งเป็นพอลิเมอร์ประเภทพอลิแซ็กคาไรด์ เมื่อให้ความร้อนกับสายโซ่พอลิไอโซพรีนและพอลิแซ็กคาไรด์ในปริมาณมากพอสายโซ่ทั้งสองจะแตกออก เมื่อปรับอัตราส่วนของสารป้อน ความดัน อุณหภูมิและเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสมอนุผลิตภัณฑ์ของสายโซ่พอลิแซ็กคาไรด์และพอลิไอโซพรีนจะเข้าทำปฏิกิริยากัน ทั้งนี้ต้องทำการศึกษาผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาโดยวิเคราะห์ชนิดของสาร ลักษณะทางกายภาพ และค่าความร้อน หากผลการสังเคราะห์เป็นดังที่คาดว่ามัน่าจะเกิดจะทำให้ได้เทคนิคการสังเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการผลิตเชื้อเพลิง

1.1. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.1.1. ศึกษาผลของการแปรสภาพของน้ำยางธรรมชาติผสมกับแป้งมันสำปะหลังที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ
- 1.1.2. ตรวจสอบหาค่าองค์ประกอบ สมบัติทางกายภาพ และค่าความร้อน ของผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการสลายของน้ำยางธรรมชาติผสมกับแป้งมันสำปะหลังที่อุณหภูมิและความดันต่างๆ

1.2. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.2.1. ได้ผลิตภัณฑ์จากการทำปฏิกิริยาของยางธรรมชาติกับแป้งมันสำปะหลัง โดยอาจจะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง
- 1.2.2. ได้ทราบถึงผลของการเกิดปฏิกิริยาของยางธรรมชาติกับแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งอาจเป็นแนวทางในการพัฒนาการผลิตเชื้อเพลิงเชิงอุตสาหกรรม

1.3. ลำดับขั้นตอนในการเสนอผลการวิจัย

- 1.3.1. ค้นคว้าทฤษฎีและการทดลองต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง
 - 1.3.2. ออกแบบการทดลอง จัดเตรียมอุปกรณ์และสารเคมี
 - 1.3.3. ศึกษาภาวะและอัตราส่วนระหว่างน้ำยางชั้นกับแป้งมันสำปะหลังที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาแตกตัวด้วยความร้อน
- ตัวแปรที่ต้องการศึกษา
- อัตราส่วนระหว่างยางธรรมชาติกับแป้งมันสำปะหลัง 8:2–10:0
 - อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา 325–400 องศาเซลเซียส
 - ความดันคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น 0–20 บาร์
 - เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 30–60 นาที

- 1.3.4. วิเคราะห์องค์ประกอบ สมบัติทางกายภาพ และค่าความร้อน ของผลิตภัณฑ์ ด้วย
SARA Method (Gel Chromatograph)
Simulated Distillation Gas Chromatograph
Bomb Calorimeter
Viscometer
Fourier Transform–Infrared Spectrometer
Gas Chromatograph–Mass Spectrometer
Gas Chromatograph
Solid Particle Size Distribution Laser
- 1.3.5. วิเคราะห์ข้อมูล
- 1.3.6. สรุปผลการทดลอง
- 1.3.7. เขียนวิทยานิพนธ์



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1. ยางธรรมชาติ

ยางธรรมชาติที่นิยมใช้ในเชิงพาณิชย์ คือ ยางพารา มีชื่อทางพฤกษศาสตร์ว่า *Heavea brasiliensis* ยางพารา[7] เป็นพืชที่มีประวัติความเป็นมาอันยาวนาน เริ่มจากการเดินทางไปพบทวีปอเมริกาของโคลัมบัส ในราวปี พ.ศ.2036 หลังจากนั้นก็มีคณะสำรวจหลายคนเดินทางไปและพบเห็นชาวอินเดียแดงซึ่งเป็นชนพื้นเมืองในอเมริกาใต้ นำลูกบอลยางเล็กๆ มาเล่นเกมส์และเห็นเป็นของแปลกที่มีวัตถุประสงค์อื่นลงได้ ชาวอินเดียแดงเรียกต้นยางว่า คาอูท์ชูด (Caoutchouc) แปลว่า ต้นไม้ที่ร้องไห้ เพราะเมื่อต้นยางถูกขูดจะมีน้ำยางหยดไหลคล้ายหลังน้ำตา ชาวอินเดียแดงนำยางมาทำของใช้ต่างๆ เช่น ขวดหรือภาชนะที่ทำจากยาง และรองเท้ายางที่ทำโดยใช้เท้าจุ่มลงในน้ำยางแล้วยกออก ปล่อยให้แห้ง ทำหลายๆ ครั้งจะได้รองเท้ายางที่แบบสนิทเหมือนสวมถุงเท้า คณะนักสำรวจจากยุโรปเดินทางกลับได้มีผู้นำยางจากเมืองพารา (PARA) ซึ่งเป็นเมืองท่าแถบลุ่มน้ำอะเมซอนอเมริกาใต้ และเมื่อถึงยุโรปแล้วได้พบโดยบังเอิญว่าถ้านำยาง (Rubber) มาถูรอยดินสอจะลบรอยดินสอได้ ชื่อ ยางพารา หรือ PARA RUBBER จึงเป็นชื่อที่ติดปากคนทั่วโลกตั้งแต่นั้นมา ยางพาราเข้าสู่ไทยประมาณปี พ.ศ.2442 โดยพระยารัษฎานุประดิษฐ์ หรือ คอซิมบี้ ณ ระนอง ซึ่งขณะนั้นดำรงตำแหน่งเจ้าเมืองตรัง ได้นำยางพาราจากจากรัฐเปร์ค ประเทศมาเลเซียเข้ามาปลูกที่อำเภอกันตัง จังหวัดตรังเป็นแห่งแรก

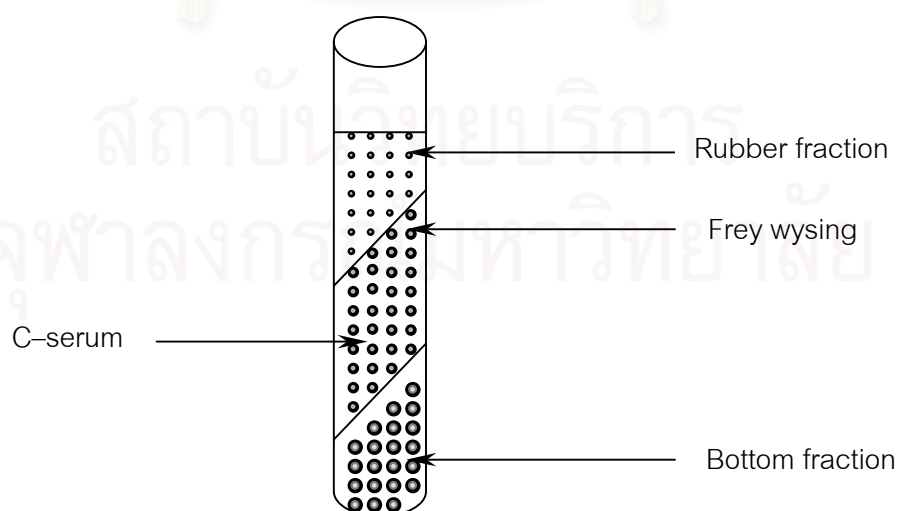
การค้นคว้าพัฒนาทางอุตสาหกรรมในยุโรปขยายตัวอย่างรวดเร็ว เริ่มจากนำน้ำยางสดไปเคลือบผ้าทำผ้ายางกันฝนได้ นำไปผลิตเป็นที่กันสะเทือนของเครื่องยนต์ ใช้ทางการแพทย์ ทำอุปกรณ์กีฬาและของเล่นต่างๆ แต่ที่สำคัญแล้วใช้เป็นปริมาณมากที่สุด คือ ใช้ในอุตสาหกรรมทำยางรถยนต์ และใช้ในเทคโนโลยีสูงสุด ได้แก่ การทำล้อเครื่องบิน นอกจากนี้ยังใช้ทำเฟอร์นิเจอร์ พวงโซฟา ที่นอนฟองน้ำ เป็นต้น

2.1.1. สมบัติและองค์ประกอบของยางธรรมชาติ[8, 9]

เมื่อต้นยางอายุประมาณ 7 ปี ชาวสวนจะกรีดยางเพื่อนำน้ำยางไปใช้ประโยชน์ น้ำยางที่ได้เป็นสารคอลลอยด์มีลักษณะขาวขุ่นคล้ายน้ำนมเรียกว่า น้ำยางสด มีความหนาแน่น 0.975–0.980 กรัมต่อมิลลิลิตร ความเป็นกรด-ด่าง(pH) 6.5–7.0 ซึ่งสมบัติของน้ำยางขึ้นอยู่กับความอุดมสมบูรณ์ของต้นยาง วิธีการกรีด สภาพของดิน ฤดูกาล องค์ประกอบของน้ำยางธรรมชาติแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของน้ำยางสด

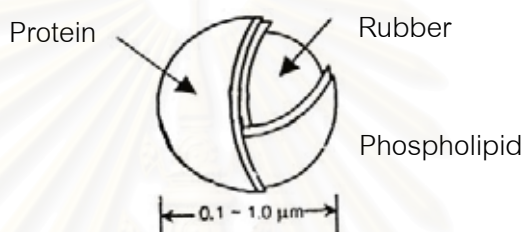
องค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ของแข็งทั้งหมด (Total Solid Content, TSC)	36
เนื้อยางแห้ง (Dry Rubber Content, DRC)	33
โปรตีน	1–1.5
เรซิน	1–1.25
เถ้า	1
น้ำตาล	1
น้ำ ในปริมาณที่รวมแล้วเป็น	100



รูปที่ 2.1 สภาพของน้ำยางสดเมื่อผ่านเครื่อง Centrifuge ความเร็วสูง[10]

หากนำน้ำยางสดมาผ่านเครื่อง Centrifuge ความเร็วสูง จะได้น้ำยางแยกเป็นส่วนต่างๆ ดังรูปที่ 2.1 ดังนั้นจึงอาจแบ่งน้ำยางเป็น 2 ส่วน คือ

2.1.1.1. ส่วนที่เป็นยาง (Rubber Phase) มีองค์ประกอบหลักเป็นสารไฮโดรคาร์บอนอันเป็นหน่วยของไอโซพรีน เชื่อมต่อกันประมาณ 2000–5000 หน่วยต่อโมเลกุล มีความหนาแน่นประมาณ 0.92 กรัมต่อมิลลิลิตร อนุภาคของยางมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.02–0.03 ไมครอน ซึ่งถูกห่อหุ้มด้วยชั้นของโปรตีนและไขมันดังแสดงในรูปที่ 2.2 และองค์ประกอบของเนื้อยางแสดงดังตารางที่ 2.2



รูปที่ 2.2 อนุภาคของยางธรรมชาติ

2.1.1.2. ส่วนที่ไม่ใช่ยาง (Non Rubber Phase)

. ส่วนที่เป็นน้ำหรือ serum มีความหนาแน่นประมาณ 1.02 กรัมต่อลูกบาศก์มิลลิลิตร ประกอบด้วยสารประเภทคาร์โบไฮเดรต โปรตีน และกรดอะมิโน

. ส่วนของลูทอยด์และสารอื่นๆ ซึ่งลูทอยด์หรือวิสคอยด์ คือ ส่วนล่าง (Bottom Fraction) ของที่ผ่านการ centrifuge มีลักษณะสีเหลือง ขนาดอนุภาคประมาณ 2–3 ไมครอน นอกจากชั้นของลูทอยด์แล้ว ยังมีสารอีกพวกเรียกว่า อนุภาคฟรี-วีสลิง (Frey wying) มีสีเหลืองขนาดอนุภาคและความหนาแน่นมากกว่ายางเล็กน้อย

2.1.2. การรักษาคุณภาพของน้ำยางธรรมชาติ

เนื่องจากน้ำยางธรรมชาติมีสารประกอบคาร์โบไฮเดรตประเภทน้ำตาลซึ่งเป็นอาหารของแบคทีเรียและยีสต์ ดังนั้นแบคทีเรียและยีสต์ที่ปะปนอยู่ในอากาศจะเปลี่ยนน้ำตาลในน้ำยางให้เป็นกรดทำให้ยางเกิดการจับตัวเป็นก้อน จึงต้องมีการเติมสารเคมีเพื่อรักษาคุณภาพของน้ำยางโดยทำหน้าที่ยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียและยีสต์ ประเภทของสารเคมีที่ใช้รักษาคุณภาพน้ำยาง คือ

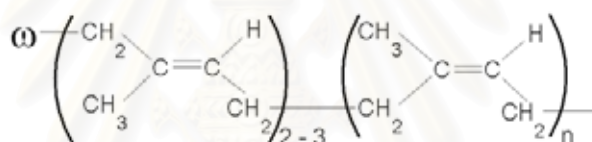
2.1.2.1. แอมโมเนีย มีฤทธิ์เป็นด่าง มีประสิทธิภาพในการทำละลายแบคทีเรียได้ดีมาก และสามารถหยุดอนุมูลอิสระโลหะบางชนิดได้

2.1.2.2. แอมโมเนียร่วมกับสารอื่น เช่น โซเดียมเพนตะคลอโรไทโอไฟีนอล ซิงค์ไดเอทิลไดไทโอคาร์บาเมต อะมิโนฟีนอล-อีดีทีเอ กรดบอริก

2.1.2.3. สารเคมีอื่นๆ เช่น โซเดียมซัลไฟด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์

2.1.3. โครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติ

การศึกษาโครงสร้างโมเลกุลของยางธรรมชาติด้วย ^{13}C -NMR ไม่บ่งชี้ว่าส่วนปลายสุดของโมเลกุลเป็นหมู่ไฮดรอกซิล เอสเทอร์ หรือเมทิลแอลิล แต่ทราบแน่ชัดว่าโครงสร้างหลักของยางธรรมชาติประกอบด้วยหมู่ทรานไอโซพรีน (*trans*-1,4-polyisoprene) 2-3 หมู่ ส่วนที่เหลือเป็นหมู่ซิสไอโซพรีน (*cis*-1,4-polyisoprene) ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 โครงสร้างโมเลกุลของยางที่ได้จากยางธรรมชาติ

ให้ ω หรือ λ เป็นหมู่ฟังก์ชันที่ปลายโมเลกุล สมมุติฐานว่าเป็นโปรตีนและกรดไขมัน ตามลำดับ

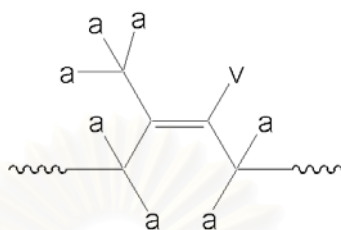
2.1.4. การเกิดปฏิกิริยาเคมีของยางธรรมชาติ[11]

ยางธรรมชาติเป็นพอลิเมอร์ที่ว่องไวในการเกิดปฏิกิริยามากชนิดหนึ่ง การเกิดปฏิกิริยามักเกิดที่บริเวณพันธะคู่ เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลของไอโซพรีนมีไฮโดรเจนแอลิลซึ่งว่องไว (active) ต่อการเกิดปฏิกิริยาถึง 7 อะตอม ขณะที่ไฮโดรเจนไวนิลซึ่งไม่ว่องไว (nonactive) ต่อการเกิดปฏิกิริยาเพียงอะตอมเดียว ดังแสดงในรูปที่ 2.4 การเกิดปฏิกิริยาของสายโซ่พอลิไอโซพรีนจำแนกเป็น 3 ปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยาการเติม ปฏิกิริยาการแทนที่ และปฏิกิริยาการเกิดเป็นวงแหวนโดยการถ่ายโอนอิเล็กตรอน

กำหนดให้

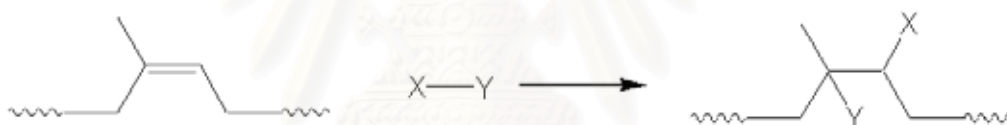
a คือ ไฮโดรเจนแอลิล

b คือ ไฮโดรเจนไวนิล



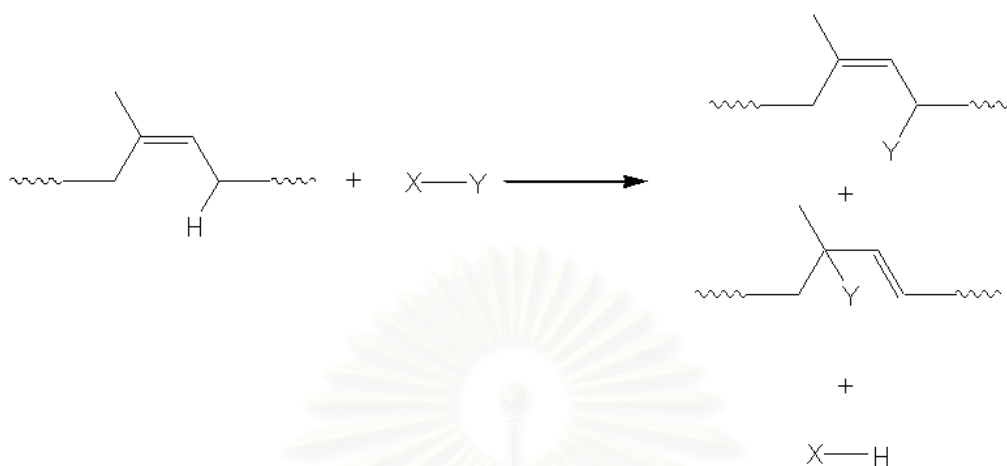
รูปที่ 2.4 ตำแหน่งไฮโดรเจนของยางธรรมชาติ

2.1.4.1. ปฏิกิริยาการเติม (Addition Reaction) ของตำแหน่งพันธะคู่ รูปแบบของปฏิกิริยาแสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ปฏิกิริยาการเติมของยางธรรมชาติ

2.1.4.2. ปฏิกิริยาการแทนที่ (Substitution Reaction) รูปแบบของปฏิกิริยาแสดงดังรูปที่ 2.6 เนื่องจากอนุมูลอิสระที่ตำแหน่งไฮโดรแอลิลมีความว่องไวในการทำปฏิกิริยามากเป็นเหตุให้ปฏิกิริยาชนิดนี้จึงมักเกิดปฏิกิริยาข้างเคียง คือ การเชื่อมขวาง (crosslinking) การเกิดกิ่งก้าน (branching) การเกิดวงแหวน (cyclization) การขาดของสายโซ่หลัก (main-chain scission) การเกิดพันธะคู่หรือพันธะสาม (diene, triene formation) การเคลื่อนที่ของพันธะคู่ (double bond movement) และการแทนที่เนื่องจากโมเลกุลต่างชนิด (substitution by foreign group)

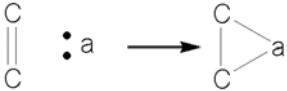

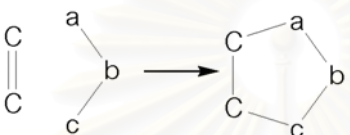
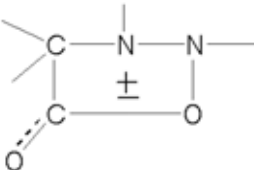
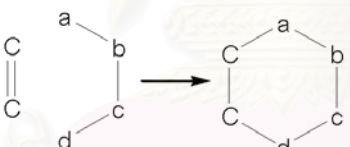
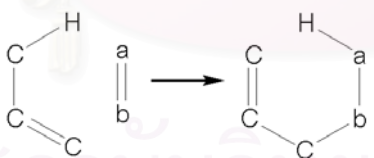


รูปที่ 2.6 ปฏิกิริยาการแทนที่ของยางธรรมชาติ

2.1.4.3. ปฏิกิริยาการเกิดเป็นวงแหวนโดยการถ่ายโอนอิเล็กตรอน (Electrocyclic Reaction) ปฏิกิริยานี้เกิดจากการถ่ายโอนอิเล็กตรอน แบ่งเป็น 2 รูปแบบ คือ ปฏิกิริยาการเติมเป็นวงแหวน (cycloaddition) และปฏิกิริยาเกิดพันธะไม่อิ่มตัว (ene reaction) การเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับ กระบวนการและปริมาณอิเล็กตรอนที่ใช้ในปฏิกิริยา รูปแบบปฏิกิริยาแสดงดังตารางที่ 2.3

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

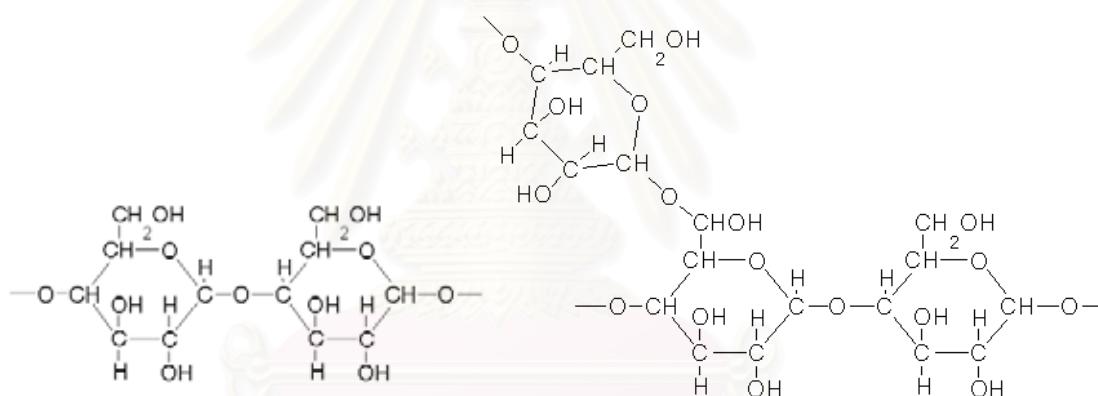
ตารางที่ 2.2 จำแนกปฏิกิริยาการเกิดเป็นวงแหวนโดยการถ่ายโอนอิเล็กตรอนของสารโอเลฟิน

Reaction	Formation	Examples
cycloaddition		Carbene addition, nitrene addition
cycloaddition		Photochemical addition of aldehydes and ketone, isocyanate additions
cycloaddition		Reaction with : <ul style="list-style-type: none"> • Ozone $O^- - O - O^+$ • Nitrile oxides $O^- - N^+ \equiv C -$ • Nitrones $O^- - N^+ = C \langle$ • Sydnone  • Sulphonyl azides $N^- = N^+ = N -$
cycloaddition		Diels-Alder addition
Ene Reaction		Reaction with : <ul style="list-style-type: none"> • Singlet oxygen $O - O$ • Electron-deficient carbonyl compounds $O = C \langle$ • Electron-deficient thiocarbonyl compound $\rangle C = S$ • Electron-deficient alkenes and alkynes $\rangle C = C \langle$ • Electron-deficient isocyanates $O = C = N -$ • C-nitroso compounds $O = N -$ • Azo compounds $-N = N -$

2.2. แป้งมันสำปะหลัง

แป้ง[12, 13] เป็นสารประกอบคาร์โบไฮเดรต ซึ่งพืชสังเคราะห์และเก็บในส่วนต่างๆ ที่บริเวณ ราก เมล็ด และผลของพืชในรูปเม็ดแป้ง โมเลกุลของแป้งประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ในอัตราส่วน 6 : 10 : 5 มีสูตรโมเลกุลเป็น $(C_6H_{10}O_5)_n$ โครงสร้างโมเลกุลเกิดจากการต่อพันธะของกลูโคส แป้งประกอบด้วย 2 องค์ประกอบหลัก คือ อะไมโลส และอะไมโลเพคติน ในอัตราส่วนที่ต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง โดยส่วนมากเป็น อะไมโลเพคติน

แป้งมันสำปะหลัง (tapioca starch)[14, 15] ประกอบด้วยอะไมโลสเฉลี่ยร้อยละ 17 โดยน้ำหนัก สำหรับน้ำหนักโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินมีค่าประมาณ 2.10×10^5 และ 3.0×10^6 ตามลำดับ เม็ดแป้งมีลักษณะกลมค่อนข้างรี ขนาดเฉลี่ยประมาณ 20 ไมครอน



รูปที่ 2.7ก โครงสร้างอะไมโลส[12]

รูปที่ 2.7ข โครงสร้างอะไมโลเพคติน[12]

2.2.1. อะไมโลส

อะไมโลสเป็นพอลิแซคคาไรด์แบบโซ่สายตรง ประกอบด้วยกลูโคสที่เชื่อมกันที่ตำแหน่ง 1, 4 - glucosidic linkage แสดงดังรูปที่ 27.ก อะไมโลสสามารถดูดความชื้นและกระจายตัวในน้ำได้ดี การจัดเรียงโมเลกุลเป็นระเบียบและไม่ค่อยทำปฏิกิริยากับสารอื่น เมื่อให้ความร้อนกับสารละลายแป้งจนเม็ดแป้งพองตัวเต็มที่ โมเลกุลของอะไมโลสจะละลายออกจากเม็ดแป้งและเมื่อเย็นตัวลงโมเลกุลของอะไมโลสจะรวมตัวกัน กรณีที่สารละลายแป้งมีความเข้มข้นของแป้งต่ำอะไมโลสจะตกตะกอน (precipitation) แต่ถ้าความเข้มข้นของแป้งสูงโมเลกุลอะไมโลสจะรวมตัวกันทำให้เกิดเจล (gelling)

2.2.2. อะไมโลเพคติน

อะไมโลเพคตินเป็นพอลิแซคคาไรด์แบบโซ่กิ่ง ประกอบด้วยกลูโคสที่เชื่อมกันที่ตำแหน่ง 1, 4 - glucosidic linkage และมีจุดแยกที่ 1, 6 - glucosidic linkage แสดงดังรูปที่ 2.7x อะไมโลเพคตินมีการจัดเรียงโมเลกุลไม่เป็นระเบียบและว่องไวต่อการทำปฏิกิริยากับสารอื่น เมื่อให้ความร้อนกับสารละลายแป้งที่มีอะไมโลเพคตินปริมาณสูง แป้งสุกจะมีลักษณะใส เนื่องจากโมเลกุลของอะไมโลเพคตินมีลักษณะใหญ่และกิ่งก้านมาก ทำให้การจับกันของโมเลกุลอะไมโลเพคตินมีโอกาสน้อย

ตารางที่ 2.3 สมบัติของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน[16]

อะไมโลส	อะไมโลเพคติน
1. ประกอบด้วยโมเลกุลกลูโคสต่อกันเป็นเส้นตรงประกอบด้วยกลูโคส 200 – 1200 หน่วย	1. ประกอบด้วยโมเลกุลกลูโคสต่อกันและมีกิ่งก้านสาขาแต่ละกิ่งมีกลูโคส 20 – 25 หน่วย
2. ละลายน้ำได้ดี	2. ละลายน้ำได้น้อย
3. เมื่อต้มในน้ำจะข้นหนืดน้อยและขุ่น	3. เมื่อต้มในน้ำจะข้นหนืดมากและใส
4. ให้สีน้ำเงินกับสารละลายไอโอดีน	4. ให้สีม่วงแดงกับสารละลายไอโอดีน
5. ต้มแล้วทิ้งไว้จับตัวเป็นก้อน	5. ต้มแล้วทิ้งไว้ไม่จับตัวเป็นก้อน
6. จัดเรียงตัวเป็นผลึก	6. จัดเรียงตัวเป็นอสัณฐาน

2.2.3. การเกิดเจลของแป้ง[17, 18]

เมื่อต้มสารละลายแป้งในน้ำที่ช่วงอุณหภูมิการเกิดเจล เม็ดแป้งจะดูดน้ำและเกิดการพองตัวมีขนาดใหญ่ขึ้นเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การสุกของแป้ง (gelatinization) ความหนืดของน้ำแป้งจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงความหนืดสูงสุด (peak viscosity) แสดงดังรูปที่ 2.10 และถ้าให้ความร้อนและเวลาต่อไปการพองตัวจะมากขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของแป้งแยกห่างออกจากกัน แสดงดังรูปที่ 2.8ก และ 2.8ข การพองตัวเกิดจากการแยกพันธะไฮโดรเจนที่มีอยู่เดิมและเกิดการแทนที่พันธะไฮโดรเจนด้วยน้ำ หลังจากนั้นเม็ดแป้งจะสลายตัวและบริเวณพันธะโมเลกุลที่อ่อนแอจะแตกออกทำให้ความหนืดลง แสดงดังรูปที่ 2.9ก และ 2.9ข และเมื่อทิ้งไว้ให้เย็นความหนืดจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากแป้งบางส่วนเกิดการคืนตัว

ตารางที่ 2.4 สมบัติกายภาพและคุณหมุมิการเกิดเจลของแป้ง[19]

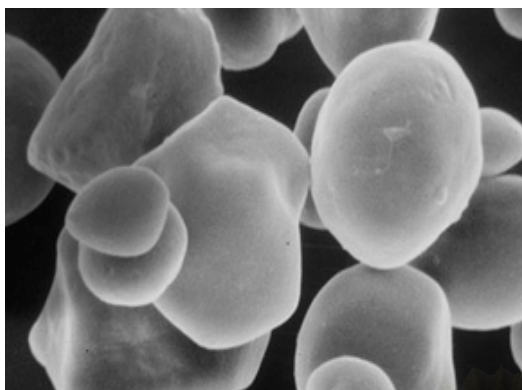
ชนิดแป้ง	ขนาดอนุภาค (ไมครอน)		ร้อยละของ อะไมโลส	ร้อยละ การละลายน้ำ ที่ 95 องศาเซลเซียส	ช่วงอุณหภูมิ การเกิดเจล (องศาเซลเซียส)
	ช่วง	เฉลี่ย			
ข้าวบาร์เลย์	2-35	20	22	-	59-64
ข้าวโพด					
ชนิดธรรมดา	5-25	15	26	25	62-72
ชนิดไฮ	5-25	15	ประมาณ 1	23	63-72
ชนิดอะไมโลสสูง	-	15	สูงถึง 80	12	85-87
มันฝรั่ง	15-100	33	24	82	56-69
ข้าวเจ้า	3-8	5	17	-	61-78
ข้าวไรย์	2-35	-	23	-	57-70
ข้าวฟ่าง	5-25	15	26	22	68-75
มันสำปะหลัง	5-35	20	17	48	52-64
ข้าวสาลี	2-35	-	25	41	62-75
ข้าวโอต	-	25	27	-	-



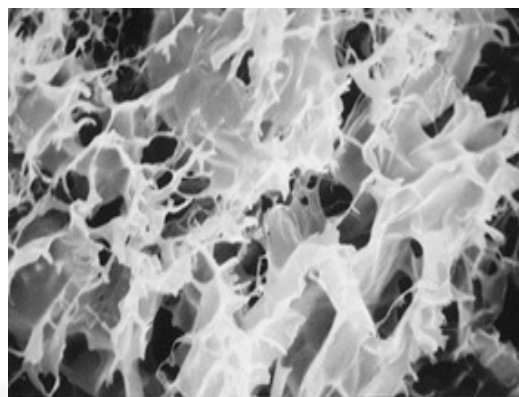
รูปที่ 2.8ก โมเลกุลแป้งก่อนการพองตัว[20]



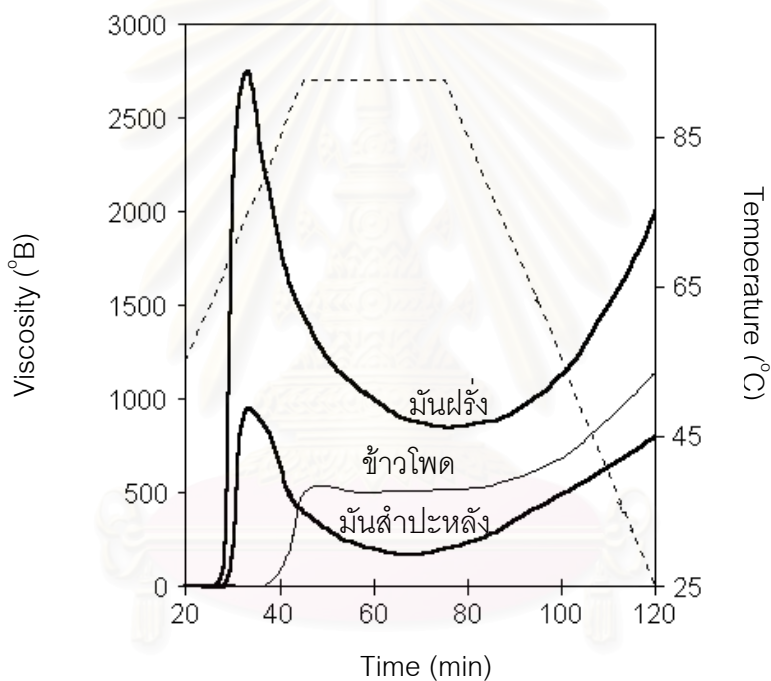
รูปที่ 2.8ข โมเลกุลแป้งหลังการพองตัว[20]



รูปที่ 2.9ก เม็ดแป้ง[21]



รูปที่ 2.9ข เม็ดแป้งที่ 90 องศาเซลเซียส[21]



รูปที่ 2.10 กราฟ Barbender ของแป้ง[22]

2.3. การแตกตัวของพอลิเมอร์ด้วยความร้อน[23, 24, 25]

การแตกตัวของพอลิเมอร์หมายถึงการเปลี่ยนสมบัติกายภาพ (Physical Properties) เนื่องจากปฏิกิริยาเคมีทำให้พันธะที่อ่อนแอของโมเลกุลขาดออกเป็นผลให้น้ำหนักโมเลกุลของสายโซ่ลดลง การแตกตัวของพอลิเมอร์สามารถเกิดได้หลายวิธี ประกอบด้วย พลังงานจากความร้อน พลังงานกล พลังงานแสง พลังงานรังสี พลังงานรังสีเคมี สิ่งมีชีวิต และสารเคมี

การแตกตัวด้วยความร้อนของพอลิเมอร์แบ่งเป็น 2 รูปแบบ คือ

. การแตกตัวแบบสุ่ม (Random) ตำแหน่งการแตกตัวเป็นแบบไม่แน่นอนและไม่เป็นระเบียบ โอกาสเกิดการแตกตัวที่ตำแหน่งต่างๆ เท่ากัน พอลิเมอร์ส่วนใหญ่มักเกิดการแตกตัวแบบสุ่ม

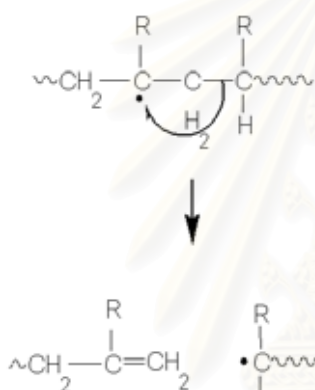
. ดีพอลิเมอร์ไรเซชัน (Depolymerization) หรือ unzipping การแตกตัวของพอลิเมอร์จะหลุดออกมาทีละ 1 หน่วย การแตกตัวแบบดีพอลิเมอร์ไรเซชันนี้จะเกิดเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิเพดาน (Ceiling temperature, T_c) ของพอลิเมอร์ อุณหภูมิเพดานคืออุณหภูมิที่เกิดสมดุลระหว่างพอลิเมอร์ไรเซชันและดีพอลิเมอร์ไรเซชัน

ตารางที่ 2.5 พลังงานการแตกตัว (E_D) ของพันธะพอลิเมอร์ที่ 25 องศาเซลเซียส[26]

พันธะ	E_D (kJ/mol)	โมเลกุล
C = O	729	สารประกอบคีโตน
C - O	331	$\text{H}_5\text{C}_2 \downarrow \text{O} - \text{C}_2\text{H}_5$
C \equiv C	838	$\text{H} - \text{C} \equiv \text{C} - \text{H}$
C = C	524	$\text{H}_2\text{C} = \text{CH}_2$
C - C	406	$\text{F}_3\text{C} \downarrow \text{CF}_3$
C - C	373	$\text{C}_6\text{H}_5 \downarrow \text{CH}_3$
C - C	335	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{H}_3\text{C} - \text{C} \downarrow \text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}_3 \end{array}$
C - H	507	$\text{H} \downarrow \text{C} \equiv \text{C} - \text{H}$
C - H	432	$\text{H} \downarrow \text{CF}_3$
C - H	411-427	สารประกอบอะลิฟาติกปฐมภูมิ
C - H	394	สารประกอบอะลิฟาติกทุติยภูมิ
C - H	373	สารประกอบอะลิฟาติกตติยภูมิ
C - H	325	$\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_2 \downarrow \text{H}$

2.3.1. การแปรสภาพด้วยความร้อนของยาง[27]

เมื่อยางได้รับความร้อนในบรรยากาศเฉื่อย (Inert Atmosphere) สายโซ่พอลิไอโซพรีนจะเกิดดีพอลิเมอไรเซชัน ที่อุณหภูมิต่ำสายโซ่ของยางจะเกิดการเชื่อมขวาง แต่ถ้าอุณหภูมิสูงจะเกิดคาร์บอนในเซชันเนื่องจากการหลุดของสายโซ่ (Stripping chain) การแตกตัวของสายโซ่ยางจะเกิดในส่วนพันธะที่อ่อนแอและเกิดเป็นอนุมูลอิสระ (free radical) ของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน แสดงดังรูปที่ 2.11ก และ 2.11ข การแตกตัวด้วยความร้อนของยางธรรมชาติมักเกิดแบบการขาดของสายโซ่ (Chain scission) มากกว่าการถ่ายโอนของสายโซ่ (Chain transfer)



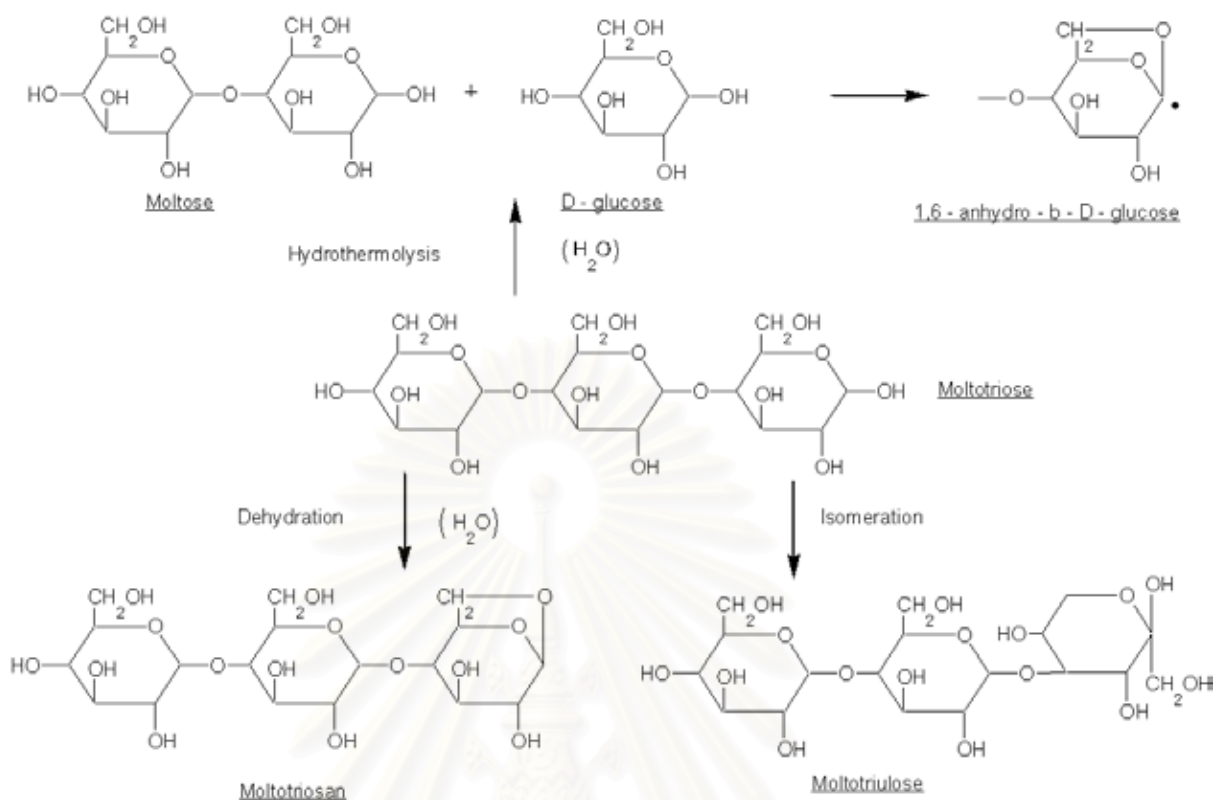
รูปที่ 2.11ก การขาดของสายโซ่ยาง



รูปที่ 2.11ข การถ่ายโอนของสายโซ่ยาง

2.3.2. การแปรสภาพด้วยความร้อนของแป้ง[28]

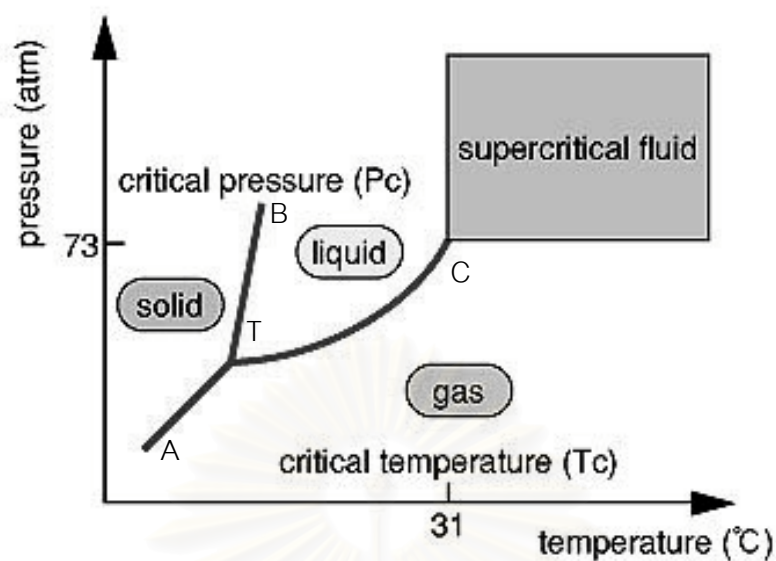
กรณีที่แป้งสลายตัวด้วยความร้อนในภาวะปราศจากออกซิเจน เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นสายโซ่ของแป้งจะแตกออกและเกิดการเติมน้ำได้แป้งโมเลกุลสั้นลง หากให้ความร้อนต่อไปสายโซ่ของแป้งจะเกิดปฏิกิริยาควบนั่น (condensation) อย่างรวดเร็ว พันธะระหว่างคาร์บอนอะตอมจะแตกออกเกิดเป็น คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ สารประกอบฟูแรน สารประกอบคีโตน สารประกอบแอลกอฮอล์ และสารประกอบแอลดีไฮด์ แต่ถ้าให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงกว่า 300 องศาเซลเซียส โมเลกุลของแป้งส่วนที่แตกเป็นน้ำตาลจะเกิดปฏิกิริยาคาร์บอนในเซชัน การแปรสภาพด้วยความร้อนของแป้งแสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การแปรสภาพด้วยความร้อนของแป้ง[29]

2.4. ของไหลภาวะเหนือวิกฤต

ของไหลเหนือวิกฤต (Supercritical fluid)[30] คือ ของไหลที่อยู่เหนืออุณหภูมิวิกฤต (Critical temperature, T_c) และความดันวิกฤต (Critical pressure, P_c) ซึ่งอุณหภูมิวิกฤต หมายถึง อุณหภูมิที่เฟสของเหลวและเฟสไอสามารถอยู่รวมกันที่สมดุล ความดันไอที่จุดนี้เรียกว่า ความดันวิกฤตและปริมาตรต่อหน่วยมวลเรียกว่าปริมาตรวิกฤต (Critical volume, V_c) พิจารณา แผนภาพความดัน-อุณหภูมิสำหรับสารบริสุทธิ์ ยกตัวอย่างคาร์บอนไดออกไซด์แสดงดังรูปที่ 2.13 เส้นโค้ง ความดันไอเริ่มต้นจากจุดร่วมสาม (triple point, T) ซึ่งเป็นเฟสไอ ของเหลว และของแข็ง สมดุลกัน เส้นโค้ง AT เป็นเส้นโค้งการระเหิด (sublimation curve) เส้นโค้ง TB เป็นเส้นโค้ง หลอมเหลว จุด C เป็นจุดอุณหภูมิและความดันสุดท้ายบนเส้นโค้งซึ่งเป็นจุดวิกฤต สมบัติเฟส ของเหลวและไอเหมือนกันและเกิดเป็นเฟสเดียว (single homogeneous phase) ที่จุดวิกฤตนี้ไอ และของเหลวรวมเป็นของไหล ซึ่งไม่สามารถบอกความแตกต่างลักษณะไอและของเหลว



รูปที่ 2.13 แผนภาพความดัน-อุณหภูมิของคาร์บอนไดออกไซด์[31]

ตารางที่ 2.6 สมบัติวิกฤตของสารชนิดต่าง ๆ[30]

สาร	MW	T_c (K) *	P_c (kPa) **	V_c (m ³ /kmol)
Carbon monoxide	28.01	132.9	3499	0.0931
Carbon dioxide	44.01	304.2	7382	0.0940
Hydrogen sulfide	34.08	373.5	8937	0.0985
Carbon disulfide	76.13	552.0	7903	0.1600
Water	18.015	647.3	22090	0.0568
Ammonia	17.03	405.7	11280	0.0725
Hydrogen	2.016	33.25	1279	0.0650
Oxygen	32.00	154.6	5043	0.0734
Nitrogen	28	126.1	3394	0.0901
Toluene	92.14	591.8	4109	0.3158
Tetralin	132.2	720.2	3300	0.4410
Methanol	32.04	512.6	8096	0.1178
Ethanol	46.07	516.3	6383	0.1667

* K = °C + 273.15

** 1 bar = 10⁵ Pa

เนื่องจากของไหลเหนือวิกฤตมีสมบัติร่วมระหว่างของเหลวและแก๊ส[32] เมื่อเปรียบเทียบสมบัติของแก๊ส ของเหลว และของไหลเหนือวิกฤต ดังตารางที่ 2.8 พบว่าของไหลเหนือวิกฤตมีความหนาแน่นใกล้เคียงของเหลวจึงมีสมบัติเป็นตัวทำละลายที่ดี เพราะโมเลกุลของของไหลเหนือวิกฤตจะล้อมรอบโมเลกุลของสารที่ต้องการละลายและลดพลังงานเอนทาลปี ขณะที่ของไหลเหนือวิกฤตมีความหนืดและการแพร่ใกล้เคียงกับแก๊สทำให้สามารถแพร่กระจายเข้าไปในโครงสร้างของตัวถูกละลายได้ดี ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีการนำของไหลเหนือวิกฤตไปใช้ประโยชน์หลายด้าน เช่น

- . อุตสาหกรรมเคมี ใช้ในกระบวนการแยกสารเคมีเชิงการค้า
- . อุตสาหกรรมอาหารและการปรุงแต่งรส เป็นตัวทำละลายสำหรับการสกัดสาร เช่น การสกัดสารคาร์เฟนีนออกจากชาและกาแฟ การสกัดน้ำมันและน้ำมันหอมจากเครื่องเทศ การสกัดฮอป (hop) ในอุตสาหกรรมเครื่องดื่ม
- . อุตสาหกรรมปิโตรเคมี ใช้สกัดน้ำมันต่างๆ และน้ำมันหล่อลื่นจากส่วนที่เหลือจากการกลั่นลำดับส่วนของน้ำมันดิบ วิธีนี้เรียกว่า ROSE หรือ Residum Oil Supercritical Extraction
- . อุตสาหกรรมยา ใช้ในการแยกตัวทำละลายจากสารที่ได้จากการสกัดพืชสมุนไพร เนื่องจากสารที่สกัดได้นี้มีความไวต่อการสลายด้วยความร้อนและสารเคมี
- . การสกัดพืชอื่นๆ เช่น การสกัดนิโคตินออกจากยาสูบ
- . การรักษาสีแวดล้อม เช่น การแยกตัวทำละลายออกจากของเสีย การแยกสารปนเปื้อนออกจากดิน

ตารางที่ 2.7 การเปรียบเทียบสมบัติของแก๊ส ของเหลว และของไหลเหนือวิกฤต

Property	Density (kg/m ³)	Viscosity (cP)	Diffusivity (mm ² /s)
Gas	1	0.01	1-10
Supercritical fluid	100-800	0.05-0.1	0.01-0.1
Liquid	1000	0.5-1.0	0.001

สมบัติของของไหลเหนือวิกฤตที่เหมาะสมเป็นตัวทำละลาย

1. มีความสามารถในการทำละลายสูง
2. ไม่ทำปฏิกิริยากับผลิตภัณฑ์
3. สามารถแยกจากผลิตภัณฑ์ได้ง่าย
4. ราคาถูก
5. ความดันวิกฤตต่ำเพื่อลดค่าใช้จ่ายด้านอุปกรณ์

แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์[33] ถูกค้นพบครั้งแรกในปี พ.ศ. 2173 โดย Jean Baptista van Helmont จากการหมักเบียร์ และตั้งชื่อว่า แก๊สซิลเวสเตอร์ (Sylvestre gas) หมายถึงแก๊สที่ได้จากต้นไม้ อีก 124 ปี ต่อมา Joseph Black ได้ศึกษาทดลองใหม่และเตรียมแก๊สนี้ขึ้นมาได้ และตั้งชื่อว่า ฟิกซ์แอร์ (Fixed air) ซึ่งได้จากการผสมระหว่างซอร์คกับกรดเจือจางหรือถ่านกับออกซิเจน โดยทั่วไปคาร์บอนไดออกไซด์ได้จากการเผาไหม้ต่างๆ การสันดาปเครื่องยนต์ การหายใจของพืชและสัตว์ คาร์บอนไดออกไซด์นิยมใช้ในการสกัดสารต่างๆ เนื่องจากเป็นสารไม่ไวไฟ ไม่เป็นพิษ ภาวะวิกฤตไม่สูง ราคาถูก เป็นตัวทำละลายที่ดีสำหรับสารอินทรีย์ การระเหยสัมพัทธ์สูงเมื่อเปรียบเทียบกับสารอินทรีย์ที่สกัดได้ ดังนั้นจึงสามารถแยกจากสารอินทรีย์ได้ง่ายและนำกลับมาใช้ใหม่ได้

ข้อดีของของไหลเหนือวิกฤต

1. การควบคุมสมบัติการละลายของของไหลเหนือวิกฤตทำได้ง่าย โดยการควบคุมอุณหภูมิและ / หรือความดัน
2. สามารถนำของไหลเหนือวิกฤตที่ใช้ในการสกัดกลับมาใช้ได้ง่าย เนื่องจากมีความสามารถในการระเหยสูง
3. ไม่เป็นพิษ
4. สามารถใช้สกัดสารที่มีจุดเดือดสูงที่อุณหภูมิต่ำ
5. สามารถใช้สกัดสารที่ไวต่อการสลายด้วยความร้อน

ข้อเสียของของไหลเหนือวิกฤต

1. ใช้ความดันสูง
2. ขั้นตอนในการควบคุมความดันซับซ้อนและต้องควบคุมอย่างละเอียด
3. ใช้เครื่องมือราคาแพง

2.5. การกลั่นน้ำมันดิบ

ปิโตรเลียม[34] คือซากพืชซากสัตว์ที่ทับถมกันในชั้นหิน เป็นเวลายาวนานนับล้านๆ ปี ความกดดันและความร้อนจากใต้ผิวโลก รวมทั้งการย่อยสลายของอินทรีย์สารตามธรรมชาติทำให้กลายเป็นน้ำมันดิบและแก๊สธรรมชาติ คำว่า ปิโตรเลียม มีรากศัพท์มาจากภาษาละตินว่า เพทรา (Petra) แปลว่า หิน และคำว่า โอลิอุม (Oleum) แปลว่า น้ำมัน บุคคลแรกที่ได้ขุดพบน้ำมันคือ Samuel M. Kier โดยในปี พ.ศ. 2391 เขาได้ขุดพบน้ำมันโดยบังเอิญจากบ่อที่เขาขุดขึ้นบนฝั่งแม่น้ำอัลเลเกนี มลรัฐเพนซิลวาเนีย

น้ำมันดิบ[35] ประกอบด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีจุดเดือดใกล้เคียงกัน ดังนั้นการแยกสารประกอบออกต้องทำการกลั่นลำดับส่วน การวิเคราะห์น้ำมันดิบมักแยกน้ำมันดิบออกตามคาบจุดเดือดกว้างๆ ให้พอดีที่จะนำไปใช้ประโยชน์ในการผลิตน้ำมันสำเร็จรูป ดังนี้

1. คาบจุดเดือดตั้งแต่ต่ำๆ จนถึง 200 องศาเซลเซียส เรียกว่า แก๊สโซลีน (Gasoline Fraction) มักใช้ในการผลิตน้ำมันเบนซิน ทั้งนี้ต้องขึ้นอยู่กับสมบัติอื่นๆ
2. คาบจุดเดือดตั้งแต่ 180-250 องศาเซลเซียส เรียกว่าน้ำมันก๊าด (Kerosene Fraction) มักใช้เป็นน้ำมันก๊าดชนิดให้แสงสว่าง ถ้าจุดเดือดไม่ต่ำเกินไป สำหรับน้ำมันก๊าดที่มีคุณภาพดีและมีจุดเยือกแข็งต่ำ จะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงอากาศยานไอพ่นได้ ซึ่งต้องขึ้นอยู่กับสมบัติอื่นๆ อีกหลายประการ
3. คาบจุดเดือดระหว่าง 250-370 องศาเซลเซียส เรียกว่า ส่วนแก๊สออยล์ (Gas Oil Fraction) เหมาะในการเป็นเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ดีเซล น้ำมันก๊าดที่มีคุณภาพต่ำอาจนำมาผสมลงไปแก๊สออยล์ทำน้ำมันดีเซลได้

4. ส่วนที่เหลือซึ่งหนักกว่าหรือาก (Residue) อาจใช้ได้หลายอย่างขึ้นอยู่กับสมบัติของส่วนที่เหลือนี้ เช่น อาจนำไปใช้เป็นน้ำมันเตา ยางมะตอย น้ำมันเครื่อง หรือผลิตสารป้อน (Feedstock) อื่นๆ ตามสมควร

การแบ่งช่วงจุดเดือดตั้งที่กล่าวข้างต้นเป็นแนวในการตั้งมาตรฐานการตรวจน้ำมันดิบ โดยหาเป็นส่วนแยก (Fraction) มาตรฐาน ทำในห้องทดลองด้วยเครื่องกลั่นแยกชนิดมาตรฐาน ซึ่งมักแยกน้ำมันออกเป็นส่วนๆ ดังนี้

ส่วนที่ 1 Light Gas การวิเคราะห์หาองค์ประกอบเป็นไฮโดรคาร์บอนทำได้โดยวิธี Gas Chromatography

ส่วนที่ 2 Tops-65 องศาเซลเซียส เป็นของเหลวส่วนแรกที่กลั่นได้ ซึ่งอาจนำไปตรวจหาองค์ประกอบไฮโดรคาร์บอนต่างๆ โดยวิธี Gas Liquid Chromatography แต่ส่วนใหญ่มักหาความถ่วงจำเพาะ การกลั่นแบบ ASTM ความดันไอแบบบริดจ์ ค่าออกเทน สัดส่วนประเภทไฮโดรคาร์บอน ทั้งนี้เพื่อนำไปใช้น้ำมันเบนซิน หรือสารป้อนโรงงานปิโตรเคมี

ส่วนที่ 3 Naphtha 65-100 องศาเซลเซียส นำไปหาความถ่วงจำเพาะ การกลั่นแบบ ASTM ค่าออกเทน ปริมาณกำมะถัน ปริมาณเมอร์แคพแทน ปริมาณไนโตรเจน สัดส่วนไฮโดรคาร์บอน (พาราฟิน/แนฟทีน/แอโรแมติก) ส่วนแยกส่วนนี้มักไปใช้น้ำมันเบนซิน ถ้าค่าออกเทนสูงพอ หรือทำเป็นสารป้อนโรงงานปิโตรเคมี

ส่วนที่ 4 Naphtha 100-150 องศาเซลเซียส นำไปวิเคราะห์เช่นเดียวกับส่วนที่ 3 ส่วนใหญ่ใช้ผสมทำน้ำมันเบนซิน แต่ถ้าค่าออกเทนต่ำก็สามารถทำให้สูงขึ้นด้วยกระบวนการ Platforming หรือ Reforming

ส่วนที่ 5 Naphtha/Kerosene 150-200 องศาเซลเซียส ส่วนนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำมันดิบ บางครั้งใช้น้ำมันเบนซินเหมือนส่วนที่ 4 หรือน้ำมันก๊าด การวิเคราะห์ทำเช่นเดียวกับส่วนที่ 3 ทั้งยังตรวจหาจุดเกิดควัน วัดสีและความอยู่ตัวของสี หาสมบัติต่างๆ ในภาวะอุณหภูมิต่ำๆ (Cold Test Temperature) และหาค่าความเป็นกรด (Acid Number) เพื่อนำไปผสมเป็นน้ำมันก๊าดหรือน้ำมันเครื่องบินไอพ่นต่อไป

ส่วนที่ 6 Kerosene 200-250 องศาเซลเซียส ส่วนนี้เหมาะสำหรับทำน้ำมันก๊าดและน้ำมันเครื่องบินไอพ่น ซึ่งต้องตรวจค่าความถ่วงจำเพาะ การกลั่นแบบ ASTM ค่าความหนืด ปริมาณกำมะถัน ปริมาณเมอร์แคพแทน ปริมาณแอโรแมติก จุดเกิดควัน ค่าความเป็นกรด สมบัติต่างๆ ในภาวะอุณหภูมิต่ำ สีและความอยู่ตัวของสี เป็นต้น

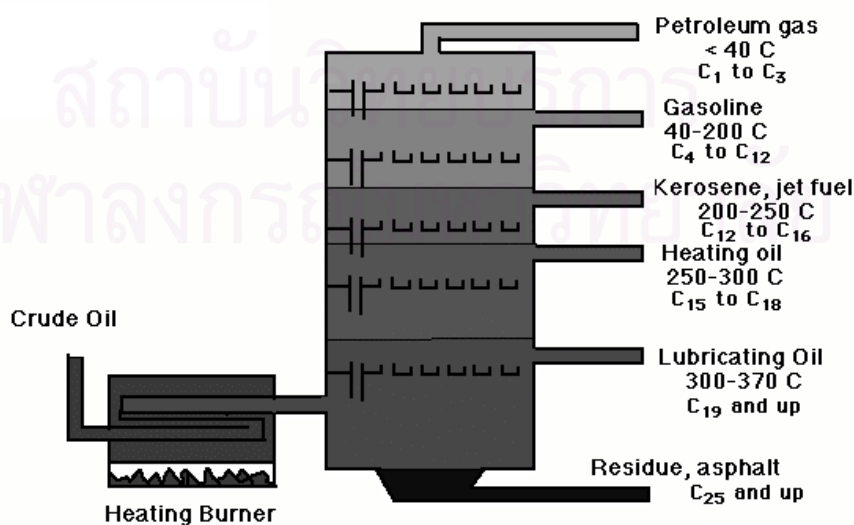
ส่วนที่ 7 Gas Oil 250–300 องศาเซลเซียส ใช้ทำน้ำมันดีเซล โดยตรวจความถ่วงจำเพาะ การกลั่นแบบ ASTM ค่าความหนืด ปริมาณกำมะถัน จุดไหลเท ค่าความเป็นกรด สี จุดหมอก ค่าซีเทนหรือดัชนีซีเทน

ส่วนที่ 8 Gas Oil 300–350 และ 350–370 องศาเซลเซียส การตรวจสอบทำเช่นเดียวกับส่วนที่ 7

ส่วนที่ 9 Residue หรือกาก มีจุดเดือดเหนือ 370 องศาเซลเซียส เรียกว่า Long Residue โดยทั่วไปมักใช้ผสมทำน้ำมันเตา โดยต้องตรวจความถ่วงจำเพาะ ความหนืด และปริมาณกำมะถัน นอกจากนี้ Long Residue ยังมีส่วนที่เป็นประโยชน์อื่นๆ รวมอยู่ด้วย หากนำไปกลั่นภายใต้สุญญากาศ ดังนั้นในการวิเคราะห์จึงนำ Long Residue ไปกลั่นในภาวะสุญญากาศที่ความดัน 30 มิลลิเมตรของปรอท

ส่วนที่ 9A คือส่วน Flash Distillate ได้แก่ ส่วนที่กลั่นออกมาได้ ซึ่งอาจนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตน้ำมันเครื่องหรือน้ำมันหล่อลื่นถ้าคุณภาพเหมาะสม หรือเป็นวัตถุดิบสำหรับกระบวนการ Catalytic Cracking หรือ Hydrocracking เพื่อผลิตน้ำมันเบนซินหรือน้ำมันดีเซลให้ได้ปริมาณมากขึ้น โดยที่สัดส่วนนี้มักมีไขหรือ Wax ปนอยู่ด้วยมาก บางครั้งเรียกว่าชื่อว่า Waxy Distillate ในบางแห่งอาจเรียกว่า Heavy Vacuum Gas oil

ส่วนที่ 9B คือส่วนกากที่เหลือจากการกลั่นภายใต้สุญญากาศ เรียกชื่อว่า Short Residue ซึ่งอาจใช้ประโยชน์ได้หลายอย่าง เช่น ผสมทำน้ำมันเตาโดยตรง หรือป้อนเข้าหน่วย Thermal Cracker เพื่อนำไปผลิตเป็นน้ำมันเบนซินหรือน้ำมันดีเซล ถ้าคุณสมบัติเหมาะสม อาจใช้เป็นสารป้อนทำน้ำมันหล่อลื่นชนิดหนักบางอย่างได้ Short Residue บางอย่างนำไปผลิตเป็นยางมะตอยได้



รูปที่ 2.14 หอกกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม[36]

2.6. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Matsumura Y. และคณะ[37] ศึกษาการสังเคราะห์เชื้อเพลิงเหลวจากถ่านหินและเซลลูโลสในภาวะน้ำเหนือวิกฤตเนื่องจากลักษณะขององค์ประกอบไฮโดรเจนทั้งสองสามารถเข้ากันได้ การทดลองทำในเครื่องปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่อง ที่ 673 องศาเซลเซียส และ 25 เมกกะพาสคัล เมื่อพิจารณาในเชิงปริมาณและองค์ประกอบของส่วนที่เหลือจากการเกิดปฏิกิริยาและผลิตภัณฑ์ที่ไม่ละลายน้ำ ไม่พบการเกิดปฏิสัมพันธ์ (interaction) ระหว่างถ่านหินกับเซลลูโลส แต่จะช่วยเพิ่มผลิตภัณฑ์ที่ละลายน้ำ อัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนต่อออกซิเจน และอัตราส่วนระหว่างออกซิเจนต่อคาร์บอนในผลิตภัณฑ์ที่ละลายน้ำ ซึ่งเกิดจากการแทนที่ของเซลลูโลสในถ่านหิน องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ไม่ละลายน้ำมีสูตรเอมพิริคัลเป็น CH_2O

Mastral A. M. และคณะ[38] ศึกษาการสังเคราะห์เชื้อเพลิงเหลวจากการแยกสลายตัวด้วยความร้อน (pyrolysis) กับยางรถยนต์เก่าในไฮโดรเจนและปราศจากไฮโดรเจน ในเครื่องปฏิกรณ์แบบ swept fixed bed ตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ อุณหภูมิ อัตราการเพิ่มความร้อน อัตราการไหลของแก๊ส เวลาในการทำปฏิกิริยา และความดันของแก๊สไฮโดรเจน ที่มีต่อปริมาณน้ำมัน แก๊ส และของแข็งที่เหลือ พบว่าอุณหภูมิมีอิทธิต่อการเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ของยาง โดยเพิ่มอุณหภูมิจึงจะเปลี่ยนเป็นน้ำมันและแก๊สมากขึ้น ความดันไฮโดรเจนมีผลต่อองค์ประกอบของน้ำมัน เมื่อเพิ่มความดันไฮโดรเจนปริมาณสารประกอบไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลเล็กจะเพิ่มขึ้น แต่ไม่มีผลต่อหมู่ฟังก์ชันขององค์ประกอบ น้ำมันมีองค์ประกอบหลักเป็นสารชนิดแอโรแมติกที่มีวงแหวน 1 วง ส่วนมากเป็น ลิโมนีน

Anderson L. L. และคณะ[39] ศึกษาการสังเคราะห์น้ำมันจากเศษยางรถยนต์กับถ่านหินศักดิ์ตำในหม้อน้ำอัดไอ (autoclave) ที่หมุนด้วยแรงแม่เหล็ก ที่ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ในภาวะความดันของแก๊สไฮโดรเจน 1 5 และ 10 เมกกะพาสคัล และที่ความดันของแก๊สไฮโดรเจน 0.1 เมกกะพาสคัล โดยใช้เหล็กเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อเพิ่มปริมาณน้ำมัน พบว่าอนุมูลอิสระ (free radical) ของถ่านหินและยางเกิดปฏิกิริยากันไม่ใช่อนุมูลอิสระของไฮโดรเจน ดังนั้นการเกิดเป็นผลิตภัณฑ์จึงสามารถเกิดได้ดีแม้ทำที่ความดันไฮโดรเจนต่ำ เมื่อทำปฏิกิริยาร่วมกันระหว่างถ่านหินกับยางทำให้ได้ปริมาณสารประกอบแอโรแมติกมากกว่าใช้ถ่านหินหรือยางเพียงอย่างเดียว

Park S. และคณะ[40] ศึกษาการสังเคราะห์น้ำมันจากยางรถยนต์ในภาวะน้ำเหนือวิกฤต โดยใช้หลักทางสถิติในการวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อพิจารณาอิทธิพลหลักที่มีต่อปริมาณของน้ำมันและประสิทธิภาพการแปรสภาพของยาง การทดลองใช้ two-level 2^4 factorial design ตัวแปรเชิงคุณภาพ คือ องค์ประกอบของแก๊ส (อากาศ ฮีเลียม) เริ่มต้น 0.1 เมกกะพาสคัล และชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยา $\text{MnO}_2\text{-Ce}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ (0-0.1 กรัม) ตัวแปรเชิงปริมาณ คือ อุณหภูมิ (400-450 องศาเซลเซียส) และเวลาในการเกิดปฏิกิริยา (15-30 นาที) พบว่าปัจจัยหลักที่มีผลต่อปริมาณน้ำมันและการเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ของยาง คือ อุณหภูมิและองค์ประกอบของแก๊สเริ่มต้น ภาวะที่ทำให้ได้ปริมาณน้ำมันสูงสุดคือ อุณหภูมิประมาณ 400 องศาเซลเซียส ในแก๊สฮีเลียม เนื่องจากภาวะที่ใช้อากาศเป็นบรรยากาศเริ่มต้นน้ำมันบางส่วนจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนกลายเป็นแก๊สจึงได้ปริมาณน้ำมันน้อยกว่าในแก๊สฮีเลียม

Fatma K. และคณะ[41] ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการสังเคราะห์เชื้อเพลิงเหลวจากถ่านหินโซมากับซีลีเนียม โดยทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 300 325 350 375 และ 400 องศาเซลเซียส ที่ความดันไฮโดรเจน 40 บรรยากาศ อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างซีลีเนียมต่อถ่านหิน 3 : 1 และอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของเตตราลินต่อน้ำหนักของซีลีเนียมรวมกับถ่านหิน 3 : 1 และวิเคราะห์ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นทั้งหมด ปริมาณน้ำมันกับแก๊ส ปริมาณแอสฟัลทีน ปริมาณพรีแอสฟัลทีน พบว่าปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นทั้งหมดเมื่อใช้ถ่านหินรวมกับซีลีเนียมน้อยกว่าใช้ซีลีเนียมอย่างเดียว แต่มากกว่าใช้ถ่านหินอย่างเดียว และเมื่อใช้ร่วมกันจะทำให้การเกิดเป็นน้ำมันมากที่สุดที่อุณหภูมิ 325 องศาเซลเซียส

2.7. สมมุติฐาน

งานวิจัยนี้มุ่งหวังให้สายโซ่ของพอลิโอไซพรีนและแป้งแตกตัวด้วยความร้อน โดยมีคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤตเป็นตัวกลาง ทำการศึกษาอัตราส่วนระหว่างยางกับแป้งที่เหมาะสม ที่อุณหภูมิ ความดัน และเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่เพียงพอให้พันธะของสายโซ่พอลิโอไซพรีนและแป้งแตกออก หลังจากนั้นเกิดการทำปฏิกิริยาระหว่างสายโซ่ทั้งสองเพื่อจะได้ผลิตภัณฑ์ใหม่ ทั้งนี้จึงตั้งสมมุติฐานกลไกของปฏิกิริยา แสดงดังที่รูป 2.15

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1. เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1. เครื่องปฏิกรณ์

ตัวเครื่องทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel) ปริมาตร 250 มิลลิลิตร ทนอุณหภูมิและความดันสูง ฝาปิดของเครื่องปฏิกรณ์มีรีลิววาล์ว (Relieve valve) ไว้ควบคุมความปลอดภัย ซึ่งวาล์วจะเปิดออกเมื่อความดันของเครื่องปฏิกรณ์สูงเกินกว่าที่ตั้งไว้ รีลิววาล์วนี้เชื่อมกับมาตรวัดความดัน (Pressure gauge) ที่ฝาเครื่องมีนีเดิลวาล์ว (Needle valve) เป็นทางเข้าและออกของแก๊ส และมีที่สำหรับใส่เทอร์โมคัปเปิลวัดอุณหภูมิ (Thermocouple) ตัวเครื่องปฏิกรณ์จะประกอบด้วยแกนเหวี่ยงที่ต่อกับมอเตอร์ ด้านข้างของฐานแกนเหวี่ยงมีแผงควบคุมระบบดิจิทัลสำหรับควบคุมอุณหภูมิและความเร็วรอบของมอเตอร์ การทำงานของเครื่องปฏิกรณ์เป็นแบบกะ (Batch) ลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 เครื่องปฏิกรณ์

3.1.2. เครื่องกวน (Stirrer) แบบใบกวน

จากบริษัท Jika สามารถปรับความเร็วรอบและระดับความสูงของใบพัดได้ แกนใบกวนทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม ใบกวนประกอบขึ้นเองโดยทำจากเทปลอน

3.1.3. เครื่องให้ความร้อน (Hot plate)

จากบริษัท Jika สามารถปรับระดับอุณหภูมิได้

3.1.4. เครื่องระเหยแบบหมุน (Rotary evaporator)

จากบริษัท BUCHI รุ่น R – 200

3.2. ตัวอย่างและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1. น้ำยางธรรมชาติเข้มข้นชนิดแอมโมเนียต่ำ มีเนื้อยาง 60% จากบริษัท ไทยรับเบอร์แอนดราเทค จำกัด (องค์ประกอบแสดงในภาคผนวก ก)

3.2.2. แป้งมันสำปะหลัง

3.2.3. แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์

3.2.4. แก๊สไนโตรเจน

3.2.5. ไตคลอโรมีเทน 99.8% (LAB – SCAN Analytical Sciences)

3.2.6. นอร์มัลเพนเทน 99.0% (LAB – SCAN Analytical Sciences)

3.2.7. เฮกเซน 99.0% (LAB – SCAN Analytical Sciences)

3.2.8. เบนซีน 99.7% (BHD Laboratory Supplies)

3.2.9. ซิลิกาเจล สำหรับโครมาโทกราฟี ขนาดอนุภาค 0.063–0.200 มิลลิเมตร (Merck)

3.2.10. โซเดียมซัลเฟตปราศจากความชื้น 99% (Univar)

3.2.11. สารเคมีที่จำเป็นในการวิเคราะห์ด้วย ASTM D 2887 และ ASTM D 240

3.3. การดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของการแตกตัวด้วยความร้อนระหว่างน้ำยางธรรมชาติกับแป้งมันสำปะหลัง ผลิตภัณฑ์ที่ได้นำไปคำนวณหาค่าร้อยละผลได้ ศึกษาสมบัติกายภาพและองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ ทั้งนี้ศึกษาตัวแปร 4 ตัว คือ อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างยางกับแป้งมันสำปะหลัง อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา ความดันเริ่มต้นของคาร์บอนไดออกไซด์ และเวลาในการเกิดปฏิกิริยา โดยเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเริ่มจับเวลาเมื่ออุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ถึงอุณหภูมิที่กำหนด ซึ่งอัตราการให้ความร้อนของเครื่องปฏิกรณ์มีค่าประมาณ 10 องศาเซลเซียสต่อ นาที วิเคราะห์ผลการทดลองด้วยสถิติ[42] โดยค่าแต่ละตัวแปรเป็น 2 ระดับ ระดับของตัวแปรแสดงดังตารางที่ 3.1 ดังนั้นต้องทำการทดลอง 2^4 ภาวะการทดลอง ณ ที่นี้ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง จึงรวมเป็น 32 การทดลอง โดยภาวะที่ต้องทำการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรและระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษา

สัญลักษณ์	ตัวแปร	ต่ำ (-)	สูง (+)
A	อัตราส่วนยาง : แป้ง (โดยน้ำหนัก)	8 : 2	9 : 1
B	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	350	400
C	ความดันคาร์บอนไดออกไซด์ (บาร์)	0	20
D	เวลาในการเกิดปฏิกิริยา (นาที)	30	60

ข้อมูลร้อยละของผลิตภัณฑ์ แก๊ส ของแข็ง และของเหลว จะถูกนำมาวิเคราะห์เชิงสถิติ เพื่อพิจารณาอิทธิพลของแต่ละตัวแปรและปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่อร้อยละของผลิตภัณฑ์ที่ได้ จากนั้นทำการวิเคราะห์สมบัติเชิงคุณภาพเพื่อหาองค์ประกอบและวิเคราะห์ผลของการทำปฏิกิริยาระหว่างยางธรรมชาติและแป้งมันสำปะหลัง

ตารางที่ 3.2 ภาวะการทดลองทั้งหมดที่ต้องทำการทดลอง

การทดลองที่	อัตราส่วนระหว่าง ยาง : แป้ง	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	คาร์บอนไดออกไซด์ (บาร์)	เวลาในการเกิด ปฏิกิริยา (นาที)
1	8 : 2	350	0	30
2	9 : 1	350	0	30
3	8 : 2	400	0	30
4	9 : 1	400	0	30
5	8 : 2	350	20	30
6	9 : 1	350	20	30
7	8 : 2	400	20	30
8	9 : 1	400	20	30
9	8 : 2	350	0	60
10	9 : 1	350	0	60
11	8 : 2	400	0	60
12	9 : 1	400	0	60
13	8 : 2	350	20	60
14	9 : 1	350	20	60
15	8 : 2	400	20	60
16	9 : 1	400	20	60

3.4. ขั้นตอนการวิจัย

3.4.1. การเตรียมแป้งผสมกับน้ำยางเป็นสารป้อน

3.4.1.1. อบแป้งมันสำปะหลังที่อุณหภูมิ 100–105 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง แล้วเก็บใส่ภาชนะปิดปราศจากความชื้น

3.4.1.2. กวนแป้งมันสำปะหลังกับน้ำกลั่น ที่อุณหภูมิ 70–80 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง

3.4.1.3. เติมน้ำยางข้นในอัตราส่วนที่ต้องการ กวนผสมกับน้ำแป้งจนเป็นเนื้อเดียวกัน

3.4.1.4. การเก็บรักษาสารป้อน เก็บที่อุณหภูมิ 5–10 องศาเซลเซียส อายุการเก็บไม่เกิน 7 วัน

3.4.2. การวิเคราะห์ค่าความร้อนของน้ำยางธรรมชาติและแป้งมันสำปะหลัง

นำน้ำยางธรรมชาติและแป้งมันสำปะหลังไปวิเคราะห์หาค่าความร้อนด้วยเครื่อง Bomb Calorimeter ของ Parr รุ่น 1341 ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D 240[43]

3.4.3. การทดลอง

3.4.3.1. ชั่งน้ำแป้งที่ผสมน้ำยางแล้ว 30 กรัม ใส่ลงในเครื่องปฏิกรณ์ (น้ำหนักสารป้อนแต่ละครั้งการทดลองแตกต่างกันไม่เกิน 1 กรัม) ปิดฝาเครื่องปฏิกรณ์ให้แน่น

3.4.3.2. เติมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เข้าในเครื่องปฏิกรณ์ทางนิตีเดิลวาล์ว ปิดวาล์วให้เรียบร้อย แล้วทดสอบการรั่วของแก๊สด้วยน้ำสบู่

3.4.3.3. ประกอบเครื่องปฏิกรณ์กับฐานของแกนเหวี่ยง สวมที่ให้ความร้อน (Heater) กับเครื่องปฏิกรณ์และยึดให้แน่น

3.4.3.4. หุ้มเครื่องปฏิกรณ์ด้วยฉนวนใยแก้ว (Asbestos)

3.4.3.5. ใส่เทอร์โมคัปเปิลที่ฝาของเครื่องปฏิกรณ์

3.4.3.6. เปิดสวิตช์เครื่องควบคุม ตั้งอุณหภูมิตามที่กำหนดที่แผงควบคุมดิจิทัล เปิดสวิตช์มอเตอร์และสวิตช์ที่ให้ความร้อน บันทึกอุณหภูมิ และความดัน เมื่อเวลาเปลี่ยนไป

3.4.3.7. เมื่อถึงอุณหภูมิที่กำหนดทำการทดลองต่อจนครบเวลาการเกิดปฏิกิริยาที่กำหนด

3.4.3.8. สิ้นสุดเวลาที่กำหนดทิ้งให้เย็นจนถึง 40 องศาเซลเซียส

3.4.3.9. เก็บผลิตภัณฑ์แก๊สในกระเปาะเก็บแก๊ส เพื่อนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบด้วยเครื่อง Gas Chromatograph คำนวณหาร้อยละผลได้ของแก๊ส

3.4.3.10. ล้างเครื่องปฏิกรณ์ด้วยไดคลอโรมีเทน กรองของแข็งด้วยกระดาษกรองใยแก้ว ล้างของแข็งด้วยไดคลอโรมีเทนจนสะอาด นำของแข็งไปอบที่อุณหภูมิ 100–105 องศาเซลเซียส คำนวณหาร้อยละผลได้ของของแข็ง

3.4.3.11. นำของเหลวมาแยกเฟสละลายน้ำกับเฟสไม่ละลายน้ำออกจากกันด้วยกรวยแยก

3.4.3.12. นำของเหลวเฟสที่ไม่ละลายน้ำมาระเหยเอาไดคลอโรมีเทนออกด้วยเครื่อง Rotary Evaporator คำนวณหาร้อยละผลได้ของของเหลว (การคำนวณร้อยละผลได้แสดงที่ ภาคผนวก ข)

3.4.4. การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊ส

วิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สด้วยเครื่อง Gas Chromatograph ของ HEWLETT – PACKARD รุ่น HP 5890 SERIES II คอลัมน์ Parapak Q ภาวะ Injector 90 องศาเซลเซียส อุณหภูมิคอลัมน์ 100 องศาเซลเซียส TCD Detector 130 องศาเซลเซียส และอัตราไหลเชิงปริมาตรของแก๊สพา 15 มิลลิลิตรต่อนาที

3.1.5. การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของแข็ง

วิเคราะห์การกระจายขนาดอนุภาคของของแข็งด้วยเครื่อง MALVERN LASER PARTICLE SIZE ANALYSIS โดยใช้เป็นตัวอย่างในการกระจายของอนุภาค

3.1.6. การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของเหลว

3.1.6.1. วิธี SARA[44, 45, 46, 47]

เพื่อแยกผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้ออกเป็น สารประกอบไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว สารประกอบแอมโรแมติก เรซิน และแอสฟัลทีน โดยมีขั้นตอนดังนี้

- ก. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างผลิตภัณฑ์ของเหลวที่ได้ประมาณ 2 กรัม แล้วเติมนอร์มัลเพนเทน ปริมาตร 25 มิลลิลิตร จากนั้นทำการกวนทิ้งไว้เป็นเวลา 30 นาที
- ข. นำตัวอย่างที่ละลายในนอร์มัลเพนเทนแล้วมาทำการกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 หนา 2 ชั้น ภายใต้สูญญากาศ ส่วนที่ผ่านไปไม่ได้จะเป็นแอสฟัลทีน
- ค. แล้วนำแอสฟัลทีนไปอบที่ 100–105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทำการชั่งน้ำหนัก คำนวณร้อยละของแอสฟัลทีนในของเหลว

- ง. นำส่วนที่ละลายในนอร์มัลเพนเทนและผ่านกระดาษกรองได้มาระเหย นอร์มัลเพนเทนออกด้วยเครื่อง Rotary evaporator ส่วนที่เหลือเรียกว่า มอลทีน (Maltene)
- จ. ทำการบรรจุซิลิกาเจล (Silica Gel) ที่อิมมัตด้วยเฮกเซนลงในคอลัมน์แก้ว ความยาว 400 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 19 มิลลิเมตร ซึ่งมี ก๊อกหยุด (Stopcock) อยู่ที่ปลาย
- ฉ. ใส่โซเดียมซัลเฟตที่ส่วนบนของคอลัมน์ให้มีความหนา 1.5 เซนติเมตร
- ช. นำมอลทีนน้ำหนัก 0.4 ถึง 0.7 กรัม หยดใส่คอลัมน์
- ซ. เติมเฮกเซนปริมาตร 100 มิลลิลิตร ไหลผ่านคอลัมน์ โดยช่วงแรกเติม ครั้งละ 10 มิลลิลิตร เพื่อไล่ส่วนมอลทีนให้ผ่านชั้นโซเดียมซัลเฟตจนหมด แล้วเติมเฮกเซนส่วนที่เหลือ เก็บส่วนที่ผ่านคอลัมน์มาแล้วไประเหย เฮกเซนออก จะได้ส่วนที่เหลือเป็นไฮโดรคาร์บอนอิมมัต
- ฅ. เติมเฮกเซนต่อเบนซีน 1:1 โดยปริมาตร 100 มิลลิลิตร ไหลผ่านคอลัมน์ และเก็บส่วนที่ผ่านคอลัมน์มาแล้วไประเหยเฮกเซนกับเบนซีนออก จะได้ ส่วนที่เหลือเป็นแโรแมติก
- ญ. ส่วนที่ค้างในคอลัมน์หลังจากแยกไฮโดรคาร์บอนอิมมัตและแโรแมติก ออกไปแล้วจะเป็นเรซิน
- ฎ. ชั่งน้ำหนักและคำนวณหาค่าร้อยละของไฮโดรคาร์บอนอิมมัต แอโรแมติก และเรซินในของเหลว (การคำนวณร้อยละของผลิตภัณฑ์แสดงที่ ภาคผนวก ข)

3.1.1.2. วิเคราะห์สารประกอบในส่วนไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัวและแอมโรแมติกจากวิธี SARA ด้วยเครื่อง Gas Chromatograph–Mass Spectrometer

นำไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัวและแอมโรแมติกมาละลายในนอร์มัลเฮกเซนให้มีความเข้มข้นไม่เกิน 1000 ppm แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gas Chromatograph–Mass Spectrometer ของ Varian โดยใช้ Gas Chromatograph รุ่น Star 3400 CX คอลัมน์ DB-5 MX ภาวะ Injector 70 องศาเซลเซียส อุณหภูมิคอลัมน์เริ่มต้น 70 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิสุดท้าย 250 องศาเซลเซียส โดยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิเป็น 5 องศาเซลเซียสต่อนาที และคงที่ที่ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14.50 นาที ใช้ Mass Spectrometer รุ่น Saturn 2000 Auto Electron–Impact Mode

3.1.1.3. การกลั่นจำลองด้วยเครื่อง Simulated Distillation Gas Chromatograph

วิเคราะห์การกระจายจุดเดือดของผลิตภัณฑ์ โดยใช้ Gas Chromatograph ของ Star Varian รุ่น CP–3800 ใช้ Capillary Column CP–Sil 5 CB ภาวะ Injector 298 องศาเซลเซียส อุณหภูมิคอลัมน์เริ่มต้น 30 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิสุดท้าย 320 องศาเซลเซียส โดยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิเป็น 20 องศาเซลเซียสต่อนาที และคงที่ที่ 320 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8.50 นาที อุณหภูมิ FID Detector 298 องศาเซลเซียส อัตราการไหลเชิงปริมาตรของแก๊สพา 1.5 มิลลิลิตรต่อนาที วิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน ASTM D 2887[48] และการแบ่งช่วงจุดเดือดของผลิตภัณฑ์พิจารณา ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ประเภทและช่วงจุดเดือดของน้ำมัน[35]

ผลิตภัณฑ์	ช่วงจุดเดือด (องศาเซลเซียส)
Gasoline	ตั้งแต่ต่ำๆ จนถึง 200
Kerosene	200–250
Light Gas Oil	250–350
Gas Oil	350–370
Long Residue	มากกว่า 370

3.1.1.4. วิเคราะห์ค่าความหนืด

วิเคราะห์ด้วย Capillary viscometer ชนิด KPG Cannon–Fenske ของ SCHOTT GERATE รุ่น 101 PT923 ที่ 40 องศาเซลเซียส โดยใช้วิธีมาตรฐาน ASTM D 445[49]

3.1.1.5. วิเคราะห์ค่าความร้อน

วิเคราะห์ด้วยเครื่อง Bomb Calorimeter ของ Parr รุ่น 1341 ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D 240

3.1.1.6. วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

ด้วยเครื่อง Fourier Transform–Infrared Spectrophotometer ของ Nicolet รุ่น Impact 410



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

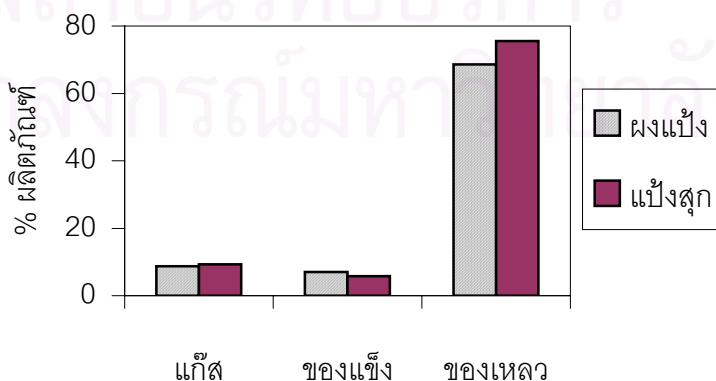
บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสังเคราะห์เชื้อเพลิงจากน้ำยางธรรมชาติผสมแป้งมันสำปะหลัง โดยศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างยางกับแป้งมันสำปะหลัง คุณหมุมิในการเกิดปฏิกิริยา ความดันคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น และเวลาในการเกิดปฏิกิริยา ที่มีต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ วางรูปแบบการทดลองเป็น 2^k factorial n replicates เมื่อ k คือ จำนวนตัวแปร และ n คือ จำนวนครั้งที่ทำการทดลองภาวะนั้น การทดลองนี้ค่า k เท่ากับ 4 และ n เท่ากับ 2 วิเคราะห์อิทธิพลของตัวแปรด้วย F -test ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบและสมบัติกายภาพของผลิตภัณฑ์แก๊ส ของแข็ง และของเหลว โดยมุ่งเน้นศึกษาผลิตภัณฑ์ส่วนที่เป็นของเหลวและศึกษาผลของการทำปฏิกิริยาระหว่างสายโซ่ของพอลิไอโซพรีนและสายโซ่ของแป้งมันสำปะหลัง

4.1. การเตรียมสารป้อน

ศึกษาผลของรูปแบบแป้งที่ผสมกับน้ำยางธรรมชาติเพื่อใช้เป็นสารป้อน เปรียบเทียบระหว่างน้ำแป้งสุกกับผงแป้ง ที่มีต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ ทำการทดลองที่อัตราส่วนระหว่างยางกับแป้งมันสำปะหลัง 8:2 คุณหมุมิในการเกิดปฏิกิริยา 350 องศาเซลเซียส ความดันคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น 0 บาร์ และเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 30 นาที ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.1

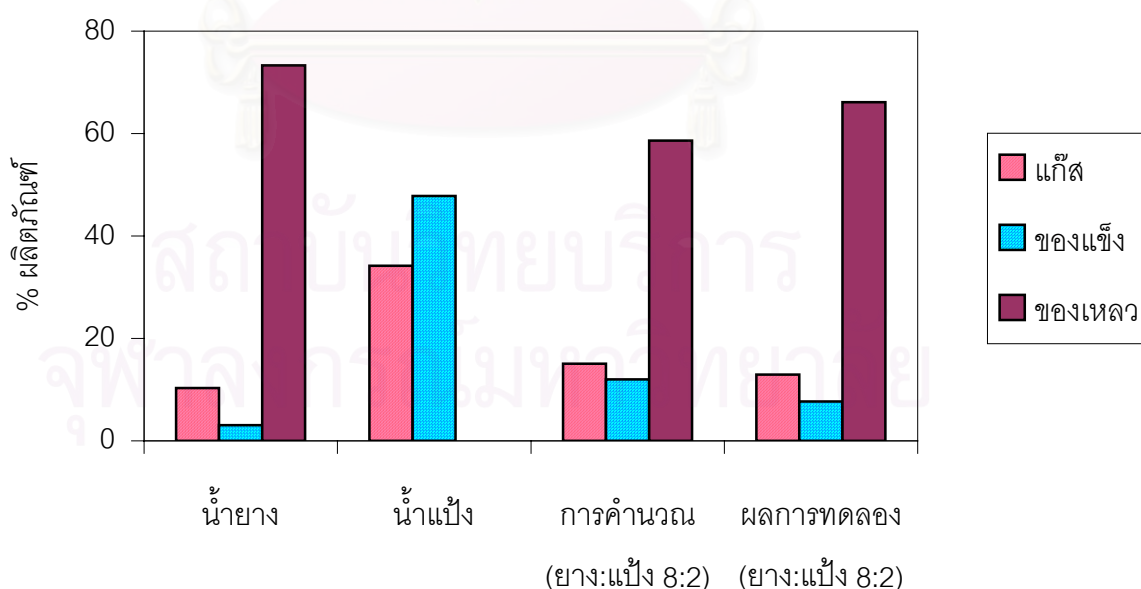


รูปที่ 4.1 ผลของรูปแบบแป้งที่มีต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

เมื่อพิจารณารูปแบบแป้งที่มีต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ (รูปที่ 4.1) พบว่าการใช้น้ำแป้งสูงผสมกับน้ำยางสำหรับเป็นสารป้อนจะได้ปริมาณของเหลวมากกว่าการใช้น้ำแป้งกับน้ำยาง เนื่องจากการต้มแป้งทำให้เม็ดแป้งเกิดการพองตัวและแตกออก สายโซ่ของแป้งบางส่วนขาดออกเนื่องจากเกิดการเติมน้ำและการใช้น้ำแป้งสูงทำให้การกระจายตัวของแป้งในน้ำยางเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น เพราะเม็ดแป้งขณะเป็นผงมีความหนาแน่นมากกว่าน้ำยางจึงตกอยู่ส่วนล่างของเครื่องปฏิกรณ์ทำให้การกระจายของอนุภาคขณะเกิดปฏิกิริยาไม่ดีเท่าการใช้น้ำแป้งสูง ดังนั้นการเตรียมสารป้อนควรใช้น้ำแป้งสูงผสมกับน้ำยาง

4.2. การศึกษาผลการเติมแป้งเบื้องต้น

ศึกษาผลของการเติมแป้งผสมกับน้ำยางที่มีต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ เปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองกับผลจากการคำนวณเชิงอัตราส่วน ทำการทดลองที่อัตราส่วนระหว่างยางกับแป้ง 8:2 อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา 400 องศาเซลเซียส ความดันคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น 0 บาร์ และเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 30 นาที โดยเปรียบเทียบร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เมื่อผสมน้ำยางกับน้ำแป้งกับการทำการทดลองแยกน้ำยางและน้ำแป้ง แล้วนำมาคำนวณเป็นอัตราส่วนร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ (การคำนวณแสดงที่ ภาคผนวก ข)



รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบผลของเติมแป้งที่มีต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

จากการเปรียบเทียบผลของการเติมแอมโมเนียมที่มีต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ (รูปที่ 4.2) พบว่าในภาวะที่ทำการทดลองเดียวกันน้ำยางจะให้ร้อยละของเหลวในปริมาณมาก แต่ร้อยละของแก๊สและของแข็งปริมาณน้อย ในขณะที่น้ำแอมโมเนียมไม่ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวแต่จะได้ผลิตภัณฑ์แก๊สและของแข็งปริมาณมาก เมื่อเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองและการคำนวณ ที่อัตราส่วนระหว่างยางกับแอมโมเนียม 8:2 พบว่าการทดลองได้ปริมาณร้อยละของแก๊สและของแข็งน้อยกว่าการคำนวณเล็กน้อย ขณะที่การทดลองได้ปริมาณร้อยละของเหลวมากกว่าการคำนวณอย่างเห็นได้ชัด ดังนั้นการเติมแอมโมเนียมในน้ำยางจะช่วยเสริมให้ได้ปริมาณของเหลวมากขึ้น จึงเป็นผลดีที่จะนำไปศึกษาในการผลิตเชื้อเพลิงเพราะแอมโมเนียมเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณมาก และเก็บรักษาง่าย

4.3. ผลของตัวแปรต่อร้อยละการเปลี่ยนยางธรรมชาติและแป้งมันสำปะหลัง

ทำการทดลองในรูปแบบที่วางไว้ คือ 2^4 factorial 2 replicates และคำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊ส ของแข็ง และของเหลว ได้ผลการทดลองดังนี้

ตารางที่ 4.1 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊ส ของแข็ง และของเหลว

ยาง : แป้ง	อุณหภูมิ	คาร์บอนไดออกไซด์ (บาร)	เวลาในการเกิดปฏิกิริยา (นาที)	% แก๊ส	% ของแข็ง	% ของเหลว
8 : 2	350	0	30	7.97	4.25	72.68
				9.27	5.84	75.55
9 : 1	350	0	30	7.77	1.30	88.87
				6.65	2.87	84.84
8 : 2	400	0	30	12.94	7.68	66.13
				13.89	8.41	72.22
9 : 1	400	0	30	9.19	3.89	66.08
				8.93	4.36	70.01
8 : 2	350	20	30	11.44	5.41	77.98
				11.69	5.49	79.02

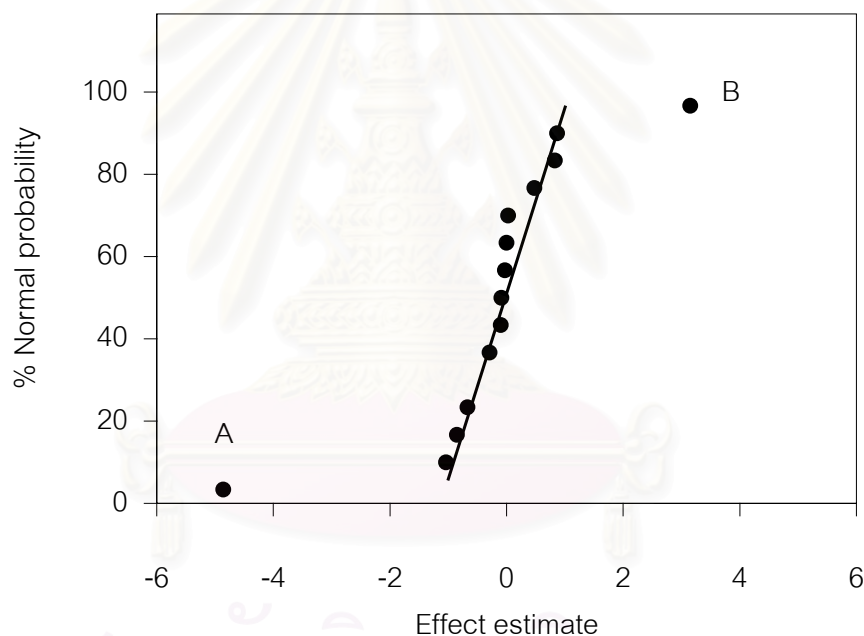
ตารางที่ 4.1 (ต่อ) ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊ส ของแข็ง และของเหลว

ยาง : แป้ง	อุณหภูมิ	คาร์บอนไดออกไซด์	เวลาในการ	% แก๊ส	% ของแข็ง	% ของเหลว
	(องศาเซลเซียส)	ออกไซด์ (บาร์)	เกิดปฏิกิริยา (นาที)			
9 : 1	350	20	30	6.20	1.76	77.44
				6.81	1.21	82.44
8 : 2	400	20	30	16.10	6.70	67.25
				13.50	6.61	67.34
9 : 1	400	20	30	11.90	2.44	78.07
				7.29	3.12	73.69
8 : 2	350	0	60	11.50	6.10	76.54
				15.40	6.68	71.45
9 : 1	350	0	60	6.96	1.78	77.01
				5.74	1.61	72.38
8 : 2	400	0	60	16.30	7.36	65.21
				15.30	8.59	60.06
9 : 1	400	0	60	11.10	4.65	71.28
				9.68	3.60	68.96
8 : 2	350	20	60	13.00	4.77	79.04
				9.72	6.05	84.07
9 : 1	350	20	60	7.84	2.14	86.24
				5.42	1.91	88.68
8 : 2	400	20	60	14.00	7.13	56.76
				15.40	6.29	62.59
9 : 1	400	20	60	7.34	3.50	84.25
				10.90	2.61	78.41

ทำการวิเคราะห์ผลของตัวแปรที่มีต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ด้วยการสร้างกราฟ Normal Probability และวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วย F -test (การคำนวณแสดงที่ ภาคผนวก ง) กำหนดสัญลักษณ์ตัวแปร ดังนี้

- A คือ อัตราส่วนระหว่างยางกับแป้งมันสำปะหลัง
- B คือ อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา
- C คือ ความดันคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น
- D คือ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา

4.3.1. ตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของแก๊ส



รูปที่ 4.3 Normal Probability Plot ของตัวแปรที่มีต่อร้อยละผลได้ของแก๊ส

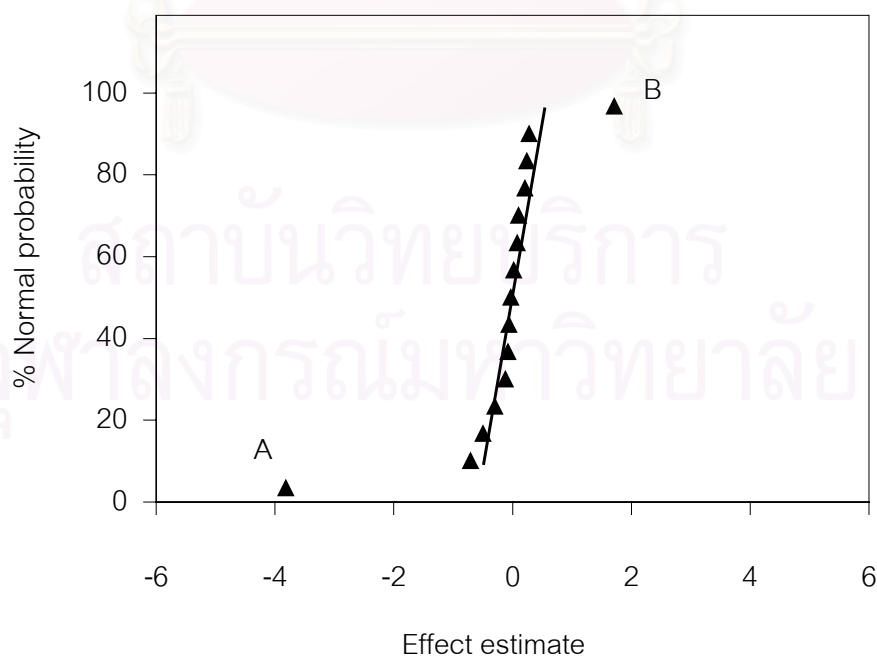
เมื่อพิจารณา Normal Probability Plot ของตัวแปรที่มีต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แก๊ส (รูปที่ 4.3) พบว่าตัวแปรหลักที่คาดว่าจะมีผลต่อร้อยละผลได้ของแก๊ส คือ อัตราส่วนระหว่างยางกับแป้งมันสำปะหลังและอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา เนื่องจากค่า Effect Estimate ของตัวแปร เบี่ยงเบนจากแนวเส้นตรงมากที่สุด จากนั้นทำการวิเคราะห์ตัวแปรที่เป็นอิทธิพลหลักด้วย F -test ได้ผลแสดงดัง ตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ความแปรปรวนของตัวแปรหลักที่มีต่อร้อยละผลได้ของแก๊ส

Source of Variation	Sum of Squares	Degrees of Freedom	Mean Square	F _o
A	188.71	1	188.71	74.30
B	79.54	1	79.54	31.31
Error	33.02	13	2.54	
Total	301.27	15		

ค่า F วิกฤต ที่ช่วงความเชื่อมั่น 95% [42] มีค่าเท่ากับ 4.67 จากความแปรปรวนของตัวแปรหลักที่มีต่อร้อยละผลได้ของแก๊ส พบว่าค่า F_o ของอัตราส่วนระหว่างยางกับแป้งมันสำปะหลังและอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยามีค่ามากกว่า F วิกฤต จึงกล่าวได้ว่าอัตราส่วนระหว่างยางกับแป้งมันสำปะหลังและอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาเป็นตัวแปรหลักที่มีอิทธิพลต่อร้อยละผลได้ของแก๊ส

4.3.2. ตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของของแข็ง



รูปที่ 4.4 Normal Probability Plot ของตัวแปรที่มีต่อร้อยละผลได้ของของแข็ง

เมื่อพิจารณา Normal Probability Plot ของตัวแปรที่มีต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของแข็ง (รูปที่ 4.4) พบว่าตัวแปรหลักที่คาดว่าจะมีผลต่อร้อยละผลได้ของของแข็ง คือ อัตราส่วนระหว่างยางกับแป้งมันสำปะหลังและอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา เช่นเดียวกับในกรณีของแก๊ส จากนั้นทำการวิเคราะห์ตัวแปรที่เป็นอิทธิพลหลักด้วย F -test ได้ผลแสดงดัง ตารางที่ 4.3

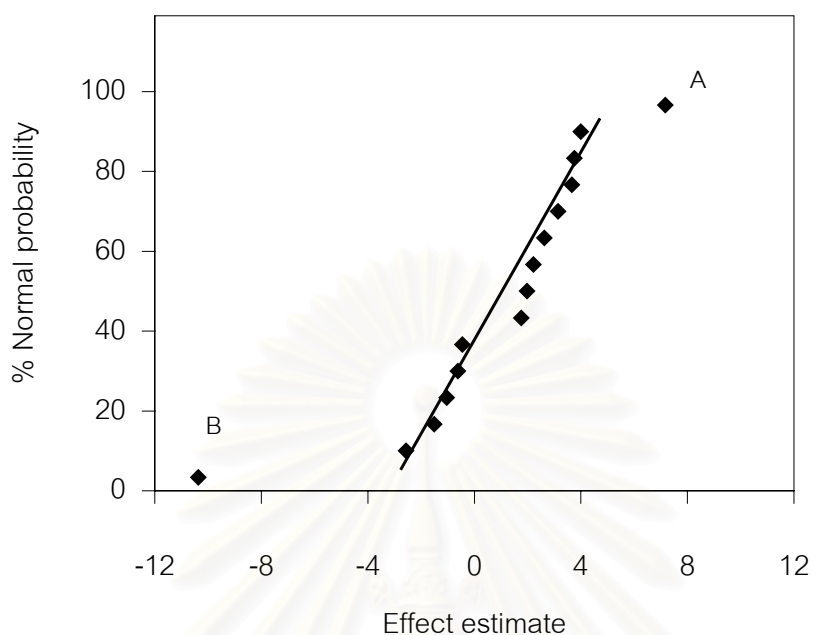
ตารางที่ 4.3 ความแปรปรวนของตัวแปรหลักที่มีต่อร้อยละผลได้ของของแข็ง

Source of Variation	Sum of Squares	Degrees of Freedom	Mean Square	F_0
A	116.48	1	116.48	176.90
B	23.35	1	23.35	35.46
Error	8.56	13	0.66	
Total	148.38	15		

ค่า F วิฤต ที่ช่วงความเชื่อมั่น 95% มีค่าเท่ากับ 4.67 จากความแปรปรวนของตัวแปรหลักที่มีต่อร้อยละผลได้ของของแข็ง พบว่าค่า F_0 ของอัตราส่วนระหว่างยางกับแป้งมันสำปะหลังและอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยามีค่ามากกว่า F วิฤต จึงกล่าวได้ว่าอัตราส่วนระหว่างยางกับแป้งมันสำปะหลังและอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาเป็นตัวแปรหลักที่มีอิทธิพลต่อร้อยละผลได้ของของแข็ง

4.3.3. ตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของของเหลว

เมื่อพิจารณา Normal Probability Plot ของตัวแปรที่มีต่อร้อยละผลได้ของของเหลว (รูปที่ 4.5) พบว่าตัวแปรหลักที่คาดว่าจะมีผลต่อร้อยละผลได้ของของเหลว คือ อัตราส่วนระหว่างยางกับแป้งมันสำปะหลังและอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา เช่นเดียวกับในกรณีของแก๊สและของแข็ง จากนั้นทำการวิเคราะห์ตัวแปรที่เป็นอิทธิพลหลักด้วย F -test ได้ผลแสดงดัง ตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.5 Normal Probability Plot ของตัวแปรที่มีต่อร้อยละผลได้ของของเหลว

ตารางที่ 4.4 ความแปรปรวนของตัวแปรหลักที่มีต่อร้อยละผลได้ของของเหลว

Source of Variation	Sum of Squares	Degrees of Freedom	Mean Square	F_0
A	411.62	1	411.62	8.09
B	860.25	1	860.25	16.91
Error	661.30	13	50.87	
Total	1933.18	15		

ค่า F วิฤต ที่ช่วงความเชื่อมั่น 95% มีค่าเท่ากับ 4.67 จากความแปรปรวนของตัวแปรหลักที่มีต่อร้อยละผลได้ของของเหลว พบว่าค่า F_0 ของอัตราส่วนระหว่างยางกับแป้งมันสำปะหลังและอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยามีค่ามากกว่า F วิฤต จึงกล่าวได้ว่าอัตราส่วนระหว่างยางกับแป้งมันสำปะหลังและอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาเป็นตัวแปรหลักที่มีอิทธิต่อร้อยละผลได้ของของเหลว

4.3.4. อิทธิพลของตัวแปรหลักที่มีต่อร้อยละผลได้ของแก๊ส ของแข็ง และของเหลว

จากการพิจารณาตัวแปรที่มีผลต่อร้อยละผลได้ของแก๊ส ของแข็ง และของเหลว พบว่าตัวแปรหลักคือ อัตราส่วนระหว่างยางกับแป้งมันสำปะหลังและอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา และไม่พบว่าความดันคาร์บอนไดออกไซด์และเวลาในการเกิดปฏิกิริยามีผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ อย่างไรก็ตามคาร์บอนไดออกไซด์[50] จะเข้าไปแทรกตัวทำให้เม็ดยางพองตัว เมื่อยางได้รับความร้อนโมเลกุลของยางจะขาดออกได้ง่ายขึ้น และกรณีของเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่เวลาในการเกิดปฏิกิริยามากขึ้นสายโซ่ของยางจะแตกตัวมากขึ้น และเข้าสู่สมดุลทำให้สัดส่วนของผลิตภัณฑ์คงที่

ทำการศึกษาแนวโน้มของอิทธิพลตัวแปรหลักที่มีต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ โดยทำการทดลองที่ภาวะกึ่งกลางของตัวแปร (Center Point Analysis) แสดงดังตารางที่ 4.5 จากนั้นนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วย *F-test* (การคำนวณแสดงที่ ภาคผนวก จ) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรกับร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ว่าเป็นเส้นตรงหรือไม่ เนื่องจากการวิเคราะห์ด้วย 2^k factorial ตั้งสมมุติฐานว่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรกับค่าผลได้มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง

ตารางที่ 4.5 ภาวะกึ่งกลางของตัวแปร

ตัวแปร	ค่าของตัวแปร
A อัตราส่วนยาง : แป้ง (โดยน้ำหนัก)	8.5 : 1.5
B อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	375
C ความดันคาร์บอนไดออกไซด์ (บาร์)	10
D เวลาในการเกิดปฏิกิริยา (นาที)	45

ตารางที่ 4.6 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ภาวะกึ่งกลางของตัวแปร

การทดลองที่	% แก๊ส	% ของแข็ง	% ของเหลว
1	12.79	5.04	74.26
2	9.48	4.82	69.11
3	8.56	4.74	75.26
4	10.25	5.87	68.49

ทำการทดลองที่ภาวะกึ่งกลางของตัวแปร โดยทำการทดลองซ้ำ 4 ครั้ง ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.6 จากนั้นวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์แสดงดังตารางที่ 4.7 4.8 และ 4.9 ได้ค่า F ของ Pure quadratic ของแก๊สเท่ากับ 0.20 สำหรับ Pure quadratic ของของแข็งเท่ากับ 5.20 และ Pure quadratic ของของเหลวเท่ากับ 1.86 วิเคราะห์ด้วย *F-test* ที่ช่วงความเชื่อมั่น 95% ซึ่งมีค่า Fวิกฤตเท่ากับ 10.13 พบว่าค่า F Pure quadratic ของแก๊ส ของแข็ง และของเหลว มีค่าน้อยกว่า ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรกับค่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เป็นเส้นตรง จากนั้นทำการวิเคราะห์แนวโน้มของอัตราส่วนระหว่างยางกับแป้งมันสำปะหลังและอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาที่มีต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ โดยทำการทดลองที่ความดันคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น 0 บาร์ และเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 30 นาที เนื่องจากตัวแปรทั้งสองไม่ใช่ตัวแปรหลักจึงกำหนดที่ภาวะต่ำ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.7 ความแปรปรวนและค่า Pure quadratic ของแก๊ส

Source of Variation	Sum of Squares	Degrees of Freedom	Mean Square	F _o
A	94.36	1	94.36	28.60
B	39.77	1	39.77	12.05
AB	0.34	1	0.34	0.10
C	0.00	1	0.00	0.00
AC	0.33	1	0.33	0.10
BC	0.04	1	0.04	0.01
ABC	0.00	1	0.00	0.00
D	3.02	1	3.02	0.92
AD	2.90	1	2.90	0.88
BD	0.04	1	0.04	0.01
ABD	0.92	1	0.92	0.28
CD	4.33	1	4.33	1.31
ACD	2.78	1	2.78	0.84
BCD	0.00	1	0.00	0.00
ABCD	1.80	1	1.80	0.55
Pure quadratic	0.65	1	0.65	0.20
Error	9.90	3	3.30	
Total	161.19	19		

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.8 ความแปรปรวนและค่า Pure quadratic ของของแข็ง

Source of Variation	Sum of Squares	Degrees of Freedom	Mean Square	F _o
A	58.24	1	58.24	217.50
B	11.67	1	11.67	43.60
AB	0.02	1	0.02	0.06
C	2.03	1	2.03	7.57
AC	0.04	1	0.04	0.14
BC	1.00	1	1.00	3.74
ABC	0.00	1	0.00	0.01
D	0.23	1	0.23	0.88
AD	0.03	1	0.03	0.10
BD	0.06	1	0.06	0.22
ABD	0.17	1	0.17	0.65
CD	0.00	1	0.00	0.02
ACD	0.32	1	0.32	1.18
BCD	0.03	1	0.03	0.09
ABCD	0.36	1	0.36	1.33
Pure quadratic	1.39	1	1.39	5.20
Error	0.80	3	0.27	
Total	76.39	19		

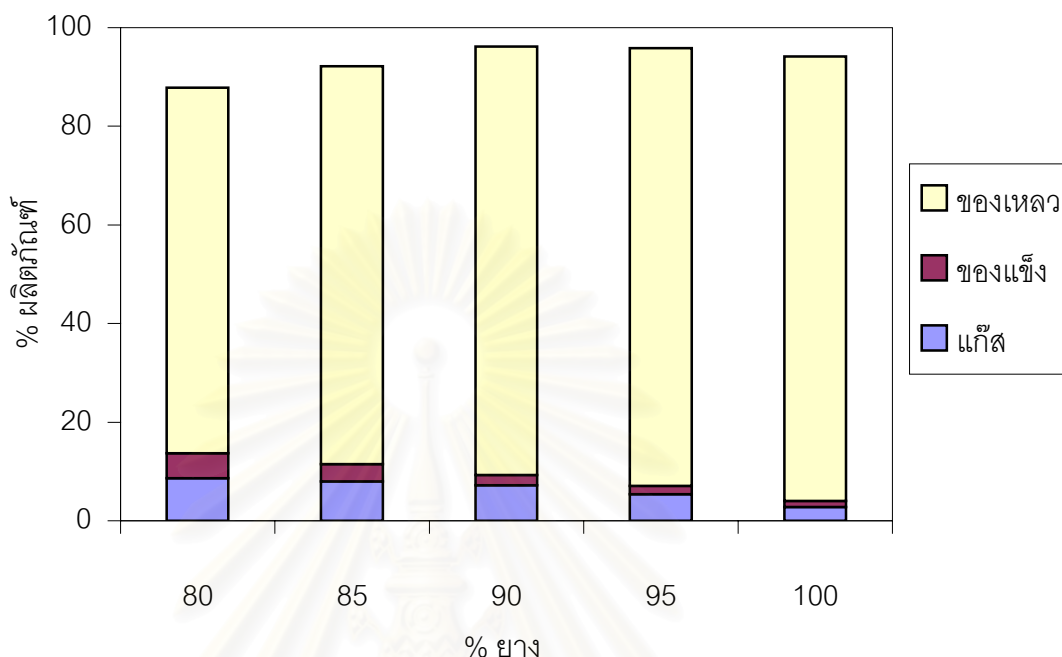
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.9 ความแปรปรวนและค่า Pure quadratic ของของเหลว

Source of Variation	Sum of Squares	Degrees of Freedom	Mean Square	F _o
A	205.81	1	205.81	17.05
B	430.13	1	430.13	35.63
AB	15.62	1	15.62	1.29
C	63.97	1	63.97	5.30
AC	19.76	1	19.76	1.64
BC	0.81	1	0.81	0.07
ABC	56.18	1	56.18	4.65
D	4.35	1	4.35	0.36
AD	12.44	1	12.44	1.03
BD	1.52	1	1.52	0.13
ABD	53.53	1	53.53	4.43
CD	39.49	1	39.49	3.27
ACD	27.46	1	27.46	2.28
BCD	26.43	1	26.43	2.19
ABCD	9.09	1	9.09	0.75
Pure quadratic	22.40	1	22.40	1.86
Error	36.21	3	12.07	
Total	1025.20	19		

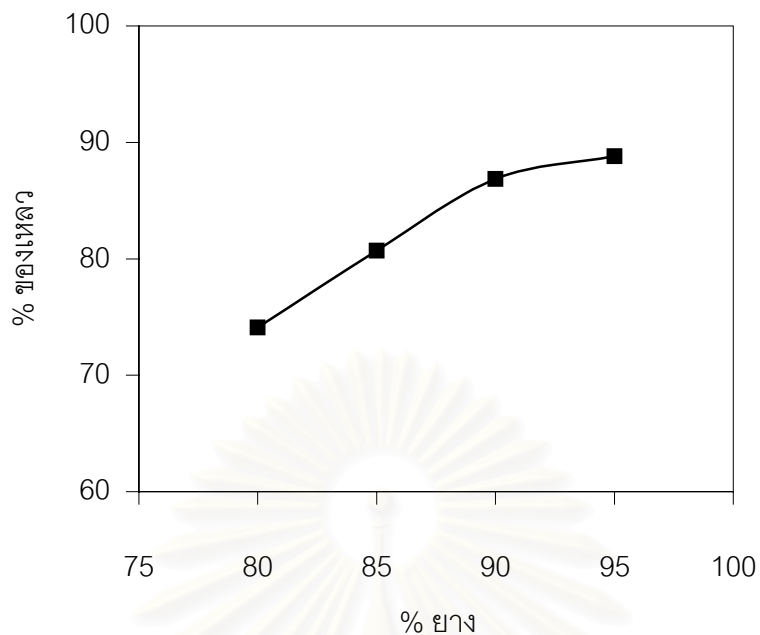
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3.4.1. อิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างยางกับแป้งมันสำปะหลัง



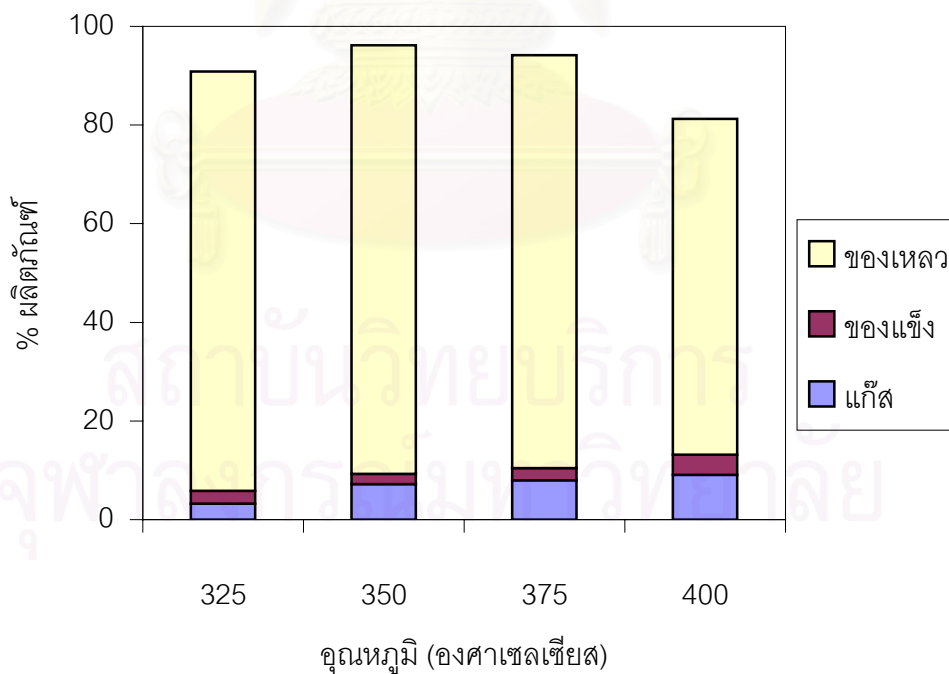
รูปที่ 4.6 ผลของอัตราส่วนระหว่างยางกับแป้งมันสำปะหลังต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ (อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส คาร์บอนไดออกไซด์ 0 บาร์ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 30 นาที)

พิจารณารูปที่ 4.6 พบว่าเมื่อร้อยละของยางเพิ่มขึ้น ปริมาณแก๊สและของแข็งลดลงขณะที่ปริมาณของเหลวเพิ่มขึ้น เนื่องจากยางแตกตัวให้แก๊สและของแข็งปริมาณน้อยและให้ของเหลวปริมาณมาก แต่แป้งแตกตัวให้ผลิตภัณฑ์หลักเป็นแก๊สและของแข็ง เนื่องจากงานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาผลิตภัณฑ์ของเหลว เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.7 กับผลการคำนวณเชิงอัตราส่วนแสดงดังตารางที่ ๑๗ พบว่าที่อัตราส่วนระหว่างยางกับแป้งมันสำปะหลัง 9:1 ได้ปริมาณของเหลวมากกว่าค่าคำนวณเชิงอัตราส่วนมากที่สุด ดังนั้นอัตราส่วนระหว่างยางกับแป้งมันสำปะหลังที่เหมาะสมที่สุดในช่วงการศึกษานี้คือ 9:1



รูปที่ 4.7 ผลของอัตราส่วนระหว่างยางกับแป้งมันสำปะหลังต่อร้อยละผลได้ของของเหลว

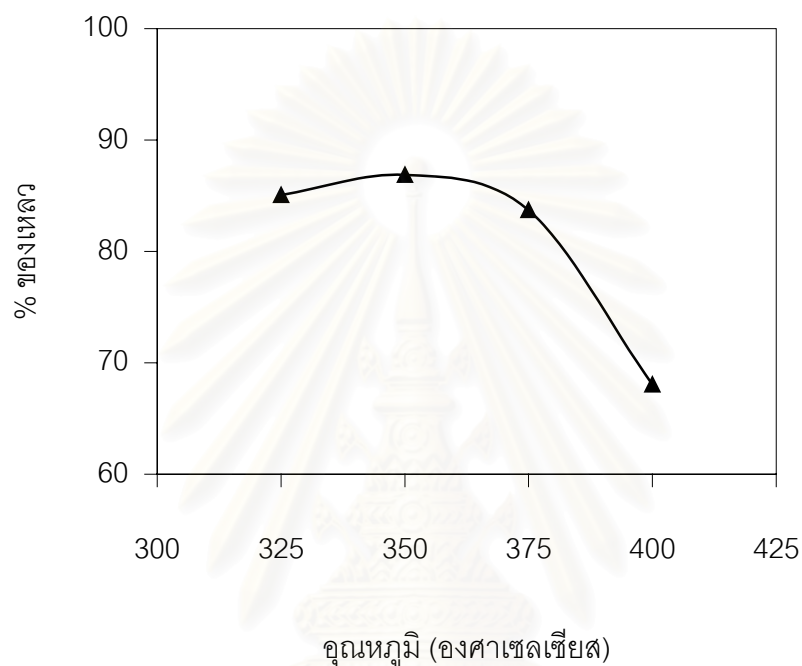
4.3.4.2. อิทธิพลของอุณหภูมิ



รูปที่ 4.8 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

(อัตราส่วนระหว่างยางกับแป้ง 9:1 คาร์บอนไดออกไซด์ 0 บาร์ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 30 นาที)

พิจารณารูปที่ 4.8 พบว่าเมื่ออุณหภูมิปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นปริมาณแก๊สและของแข็งเพิ่มขึ้นขณะที่ปริมาณของเหลวลดลง เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิปฏิกิริยาสูงขึ้นสายโซ่ของของเหลวจะแตกตัวได้โมเลกุลขนาดเล็กลงมากขึ้นกลายเป็นแก๊สส่งผลให้ปริมาณของเหลวลดลง และโมเลกุลบางส่วนเกิดคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) กลายเป็นของแข็ง

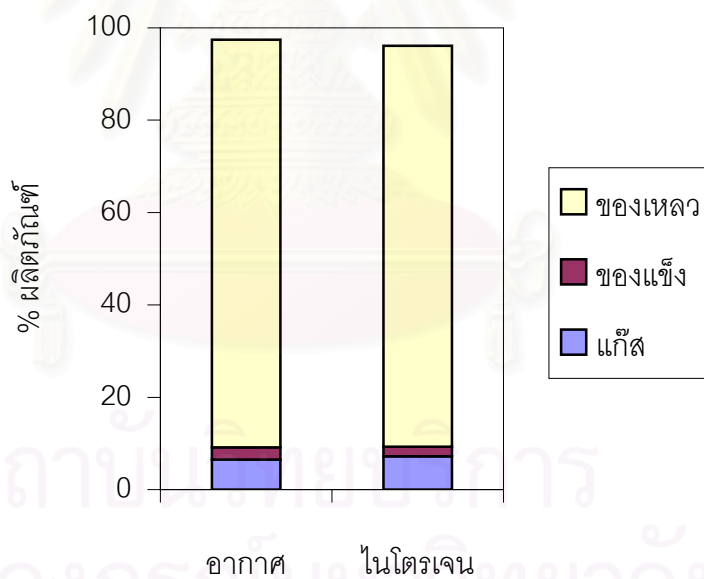


รูปที่ 4.9 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของของเหลว

จากช่วงอุณหภูมิที่ศึกษาพบว่าอุณหภูมิปฏิกิริยาต่ำได้ปริมาณของเหลวมากและงานวิจัยนี้มุ่งเน้นผลิตภัณฑ์ของเหลวจึงศึกษาอุณหภูมิเหมาะสมที่ได้ปริมาณของเหลวมากที่สุด พิจารณาผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของของเหลว (รูปที่ 4.9) พบว่าที่อุณหภูมิ 325 และ 350 องศาเซลเซียส ได้ปริมาณของเหลวใกล้เคียงกัน โดยที่ 350 องศาเซลเซียส ได้ปริมาณของเหลวมากกว่าเล็กน้อย ดังนั้นอุณหภูมิที่ทำให้ปริมาณของเหลวมากที่สุด คือ 350 องศาเซลเซียส จากการพิจารณาผลของตัวแปรในช่วงที่ศึกษา พบว่าภาวะที่ทำให้ปริมาณของเหลวมากที่สุดคือ อัตราส่วนระหว่างยางกับแป้งมันสำปะหลัง 9:1 อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา 350 องศาเซลเซียส ความดันคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น 0 บาร์ และเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 30 นาที

4.3.5. การเปรียบเทียบบรรยากาศเริ่มต้น

เนื่องจากทดลองบรรยากาศเริ่มต้นกรณีความดันคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น 0 บาร์ ไม่ได้ไล่อากาศออกก่อนและในอากาศมีแก๊สออกซิเจนซึ่งอาจทำปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วนกับสารป้อนทำให้ร้อยละผลได้ของของเหลวลดลง ดังนั้นจึงทำการทดลองเปรียบเทียบระหว่างบรรยากาศเริ่มต้นเป็นอากาศกับแก๊สไนโตรเจน เมื่อพิจารณาโครงสร้างของเครื่องปฏิกรณ์พบว่าทางเข้า-ออก ของแก๊สในภาวะปกติมีเพียงทางเดียวคือ นีเดิลวาล์ว การไล่อากาศออกหมดเป็นไปได้ยากจึงใช้การอัดแก๊สไนโตรเจนและระบายออกหลายๆ ครั้ง จากนั้นทำการทดลองที่อัตราส่วนระหว่างยางกับแป้งมันสำปะหลัง 9:1 อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา 350 องศาเซลเซียส ความดันคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น 0 บาร์ และเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 30 นาที การทดลองได้ผลดังรูปที่ 4.10 พบว่าได้รับร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ใกล้เคียงกันมาก เนื่องจากในอากาศมีแก๊สออกซิเจนประมาณ 21% ซึ่งน้อยมากและสารป้อนบางส่วนเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนที่มีปริมาณน้อยนี้ จึงทำให้ร้อยละของผลิตภัณฑ์ไม่แตกต่างกันมากนัก



รูปที่ 4.10 ผลบรรยากาศเริ่มต้นต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

4.4. ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์แก๊ส

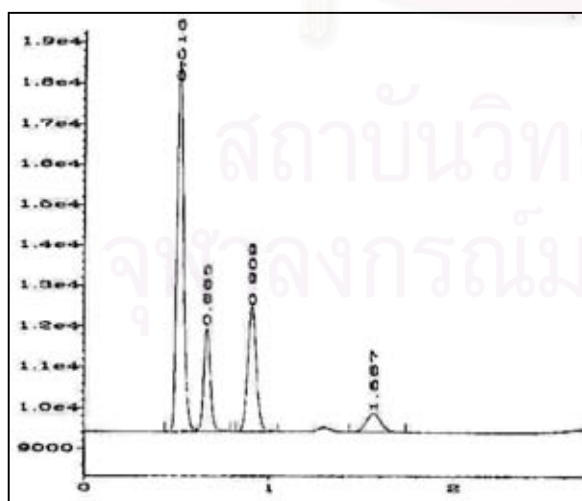
ศึกษาผลของตัวแปรที่มีต่อองค์ประกอบของแก๊ส โดยเปรียบเทียบกับแก๊สไฮโดรคาร์บอนมาตรฐาน มีตำแหน่งของพีคโดยประมาณดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ตำแหน่งพีคแก๊สโดยประมาณ

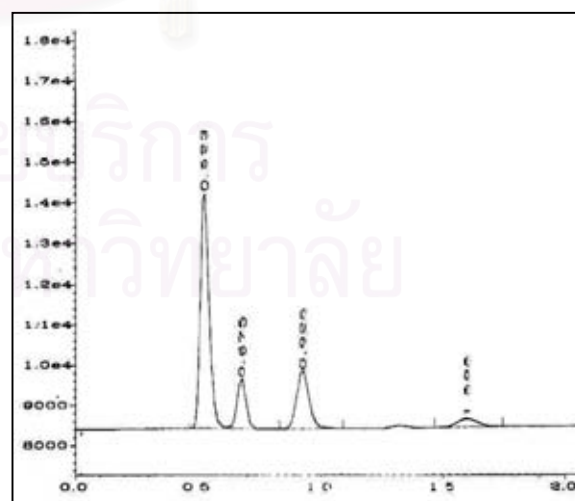
ชนิดแก๊ส	เวลา (นาที)
อากาศ	0.50
มีเทน	0.65
คาร์บอนไดออกไซด์	0.90
อีเทน	1.59

4.4.1. ผลของอัตราส่วนระหว่างยางกับแป้งมันสำปะหลังที่มีต่อองค์ประกอบของแก๊ส

พิจารณาแก๊สที่อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา 400 องศาเซลเซียส ความดันคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น 0 บาร์ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 30 นาที เปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างยางกับแป้ง 8:2 และ 9:1 (รูปที่ 4.11ก และ 4.11ข) พบว่าที่อัตราส่วนระหว่างยางกับแป้งมันสำปะหลังต่างกันชนิดของแก๊สเหมือนกัน



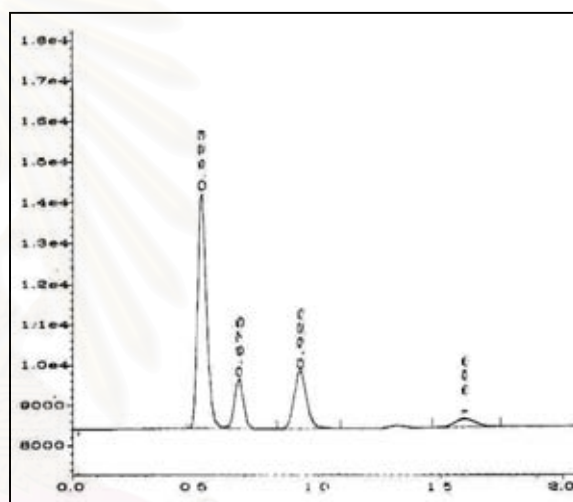
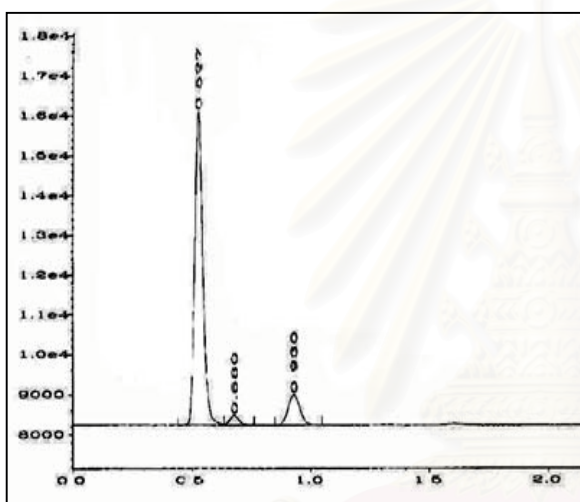
รูปที่ 4.11ก องค์ประกอบแก๊สที่อัตราส่วนระหว่างยางกับแป้ง 8:2



รูปที่ 4.11ข องค์ประกอบแก๊สที่อัตราส่วนระหว่างยางกับแป้ง 9:1

4.4.2. ผลของอุณหภูมิที่มีต่อองค์ประกอบของแก๊ส

พิจารณาแก๊สที่อัตราส่วนระหว่างยางกับแป้งมันสำปะหลัง 9:1 ความดันคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น 0 บาร์ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 30 นาที เปรียบเทียบอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา 350 และ 400 องศาเซลเซียส (รูปที่ 4.12ก และ 4.12ข) พบว่าอุณหภูมิการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นได้ชนิดของแก๊สเพิ่มขึ้น ดังที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 400 องศาเซลเซียส พบแก๊สอีเทน เนื่องจากอุณหภูมิปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นสายโซ่ของพอลิเมอร์แตกตัวมากขึ้น ทำให้น้ำมันแตกตัวให้แก๊สไฮโดรคาร์บอนมากขึ้น

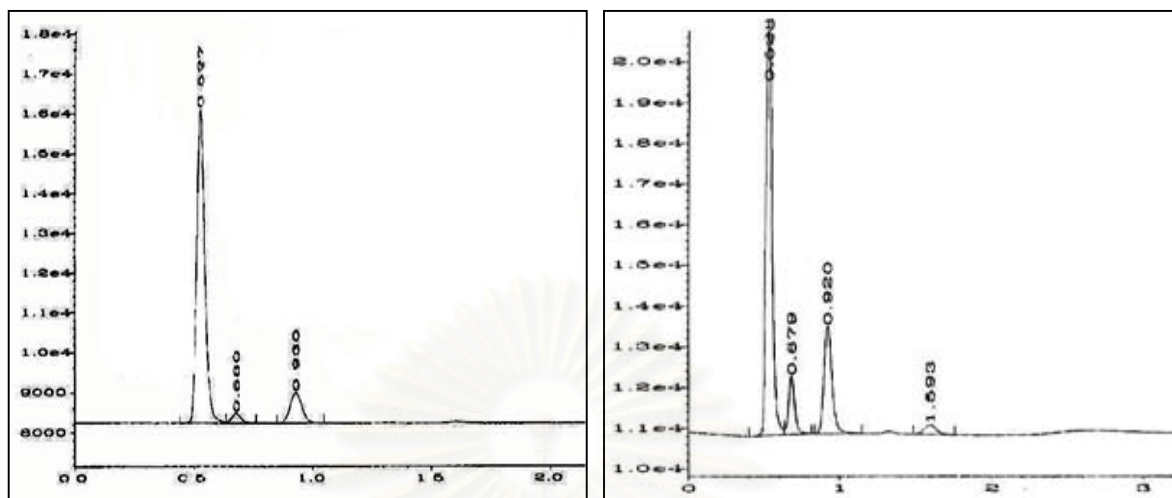


รูปที่ 4.12ก องค์ประกอบแก๊สที่อุณหภูมิ
ปฏิกิริยา 350 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.12ข องค์ประกอบแก๊สที่อุณหภูมิ
ปฏิกิริยา 400 องศาเซลเซียส

4.4.3. ผลของเวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่มีต่อองค์ประกอบของแก๊ส

พิจารณาแก๊สที่อัตราส่วนระหว่างยางกับแป้งมันสำปะหลัง 9:1 อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา 350 องศาเซลเซียส ความดันคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น 0 บาร์ เปรียบเทียบเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 30 และ 60 นาที (รูปที่ 4.13ก และ 4.13ข) พบว่าเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นได้ชนิดของแก๊สเพิ่มขึ้น ดังที่เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 60 นาที พบแก๊สอีเทน เนื่องจากเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นสายโซ่ของพอลิเมอร์แตกตัวมากขึ้นเช่นเดียวกับกรณีอุณหภูมิแต่อิทธิพลของการเกิดปฏิกิริยาน้อยกว่าอุณหภูมิ จึงพบว่าเวลาในการเกิดปฏิกิริยาไม่เป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลหลักต่อปริมาณแก๊ส



รูปที่ 4.13ก องค์ประกอบแก๊สที่เวลา
เกิดปฏิกิริยา 30 นาที

รูปที่ 4.13ข องค์ประกอบแก๊สที่เวลา
เกิดปฏิกิริยา 60 นาที

4.4.4. ผลของความดันคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อองค์ประกอบของแก๊ส

พิจารณาแก๊สที่อัตราส่วนระหว่างยางกับแป้ง 8:2 อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา 400 องศาเซลเซียส ความดันคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น 0 บาร์ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 30 นาที (รูปที่ 4.11ก) พบแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เนื่องจากในเครื่องปฏิกรณ์มีอากาศทำให้สารป้อนเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วนและแป้งมีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบในโมเลกุลจึงแตกตัวให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์บางส่วน จึงไม่สามารถวิเคราะห์ผลของความดันคาร์บอนไดออกไซด์ที่มีต่อองค์ประกอบของแก๊สไฮโดรคาร์บอนได้ เนื่องจากแก๊สผลิตภัณฑ์มีปริมาณน้อยความดันสุดท้ายหลังจากทิ้งให้เย็นเป็น 40 องศาเซลเซียส ไม่เกิน 2 บาร์ การอัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ใช้ความดัน 20 บาร์ เพื่อเป็นตัวกลางและเป็นของไหลเหนือวิกฤต ทำให้ความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรคาร์บอนเจือจางมาก การวิเคราะห์ชนิดของสารที่มีปริมาณน้อยนี้จึงทำได้ยาก

4.5. ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของแข็ง

ศึกษาการกระจายขนาดอนุภาคของของแข็ง ที่อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา 350 องศาเซลเซียส ความดันคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น 0 บาร์ และเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 30 นาที โดยเปรียบเทียบที่อัตราส่วนระหว่างยางกับแป้ง 9:1 และยาง 100% ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ขนาดอนุภาคของแข็งที่ปริมาตรอนุภาคสูงสุด

	เส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาค(μm) ที่ปริมาตรอนุภาคสูงสุด			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
ยาง:แป้ง 9:1	511.85	587.65	540.45	546.65
ยาง	300.62	315.50	298.58	304.90

เมื่อพิจารณาเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคของแข็งที่ปริมาตรอนุภาคสูงสุด สำหรับยางมีขนาดเฉลี่ย 304.90 ไมครอน ขณะที่อัตราส่วนระหว่างยางกับแป้ง 9:1 มีขนาดเฉลี่ย 546.65 ไมครอน ดังนั้นเมื่อปริมาณยางเพิ่มขึ้นจะได้ขนาดอนุภาคเล็กลง

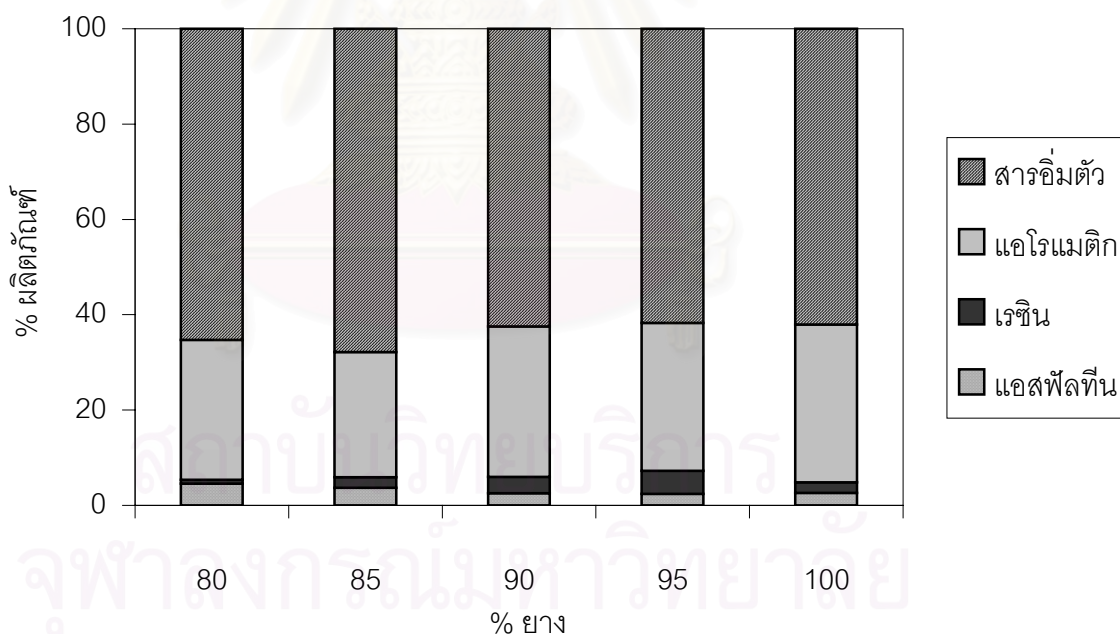
4.6. ผลการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ของเหลว

4.6.1. การกระจายตัวของหมู่ไฮโดรคาร์บอน

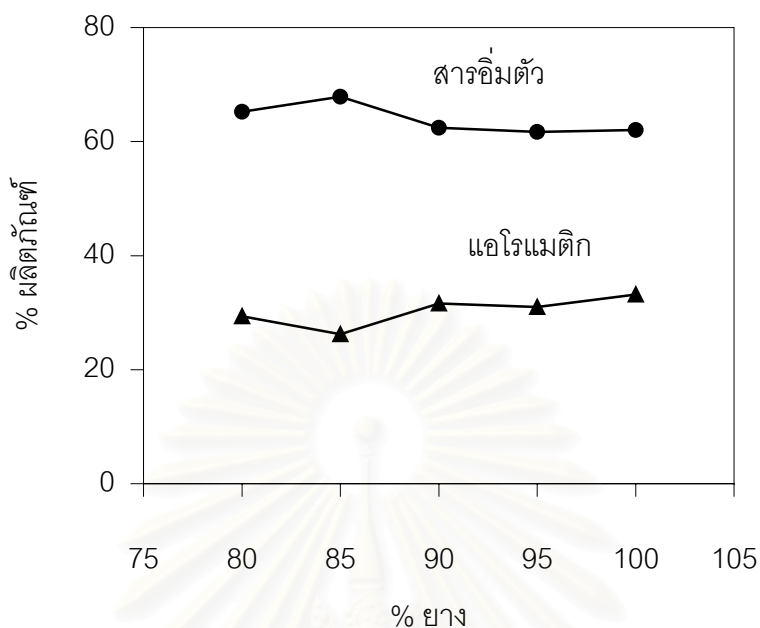
ศึกษาผลของตัวแปรหลักที่มีต่อหมู่ไฮโดรคาร์บอนด้วยวิธี SARA คือ การแยกน้ำมันออกเป็น สารประกอบอิ่มตัว (Saturated) สารประกอบแโรแมติก (Aromatics) เรซิน (Resin) และแอสฟัลทีน (Asphaltene) ได้ผลดังนี้

4.6.1.1. ผลของอัตราส่วนระหว่างยางกับแป้งมันสำปะหลังที่มีต่อหมู่ไฮโดรคาร์บอน

ศึกษาหมู่ไฮโดรคาร์บอนของของเหลวจากภาวะ อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา 350 องศาเซลเซียส ความดันคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น 0 บาร์ และเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 30 นาที ที่อัตราส่วนระหว่างยางกับแป้ง 8:2 8.5:1.5 9:1 9.5:0.5 10:0 ได้ผลแสดงดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ผลของอัตราส่วนระหว่างยางกับแป้งที่มีต่อหมู่ไฮโดรคาร์บอนของของเหลว

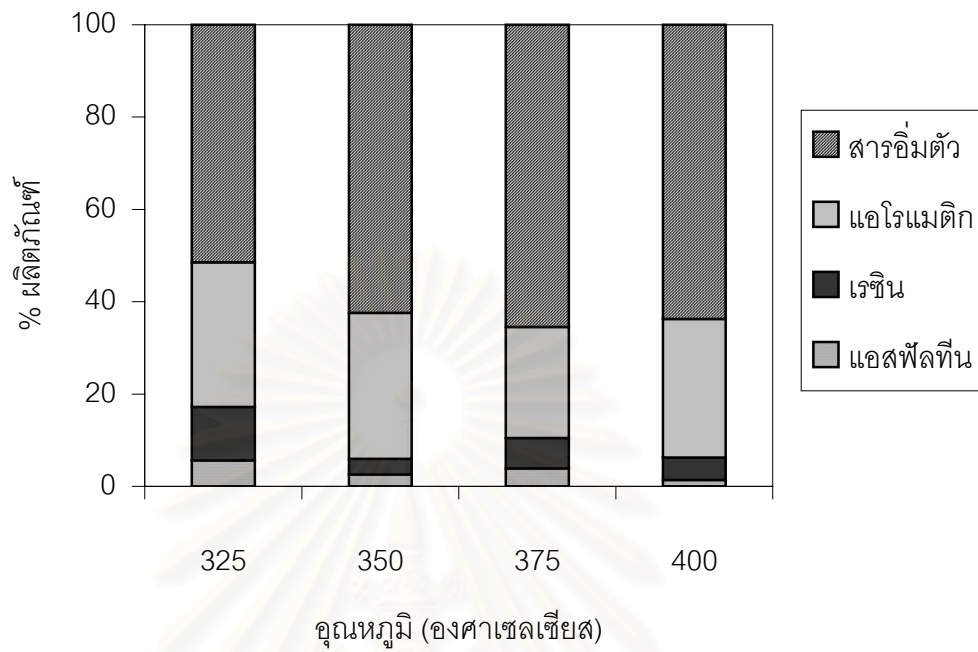


รูปที่ 4.15 ผลของอัตราส่วนระหว่างยางกับแป้งที่มีต่อสารประกอบอิมตัวและแอโรแมติก

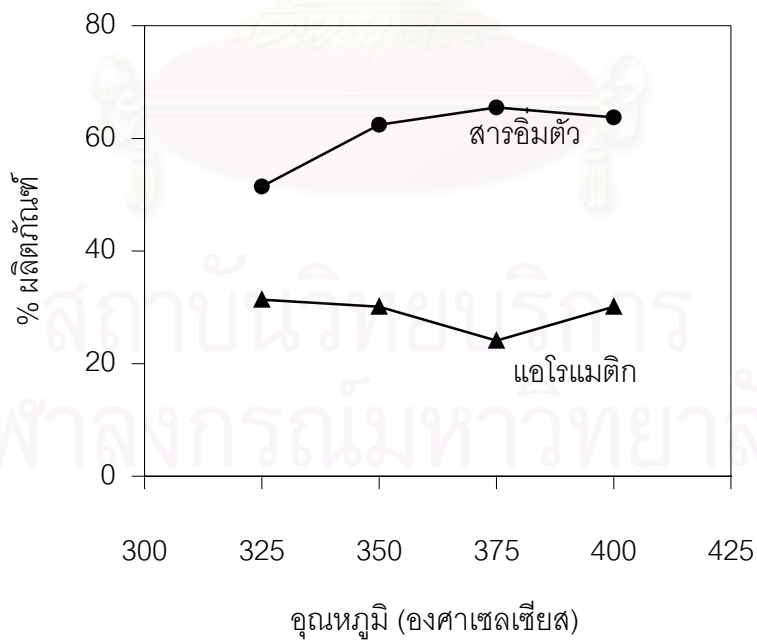
พิจารณาผลของอัตราส่วนระหว่างยางกับแป้งมันสำปะหลังที่มีต่อหมู่ไฮโดรคาร์บอนของของเหลว (รูปที่ 4.14 และ 4.15) พบว่าร้อยละของสารประกอบอิมตัว สารประกอบแอโรแมติก เรซิน และแอสฟัลทีน ที่อัตราส่วนระหว่างยางกับแป้งมันสำปะหลังต่างๆ ได้ผลไม่แตกต่างกันนัก โดยที่สัดส่วนยางเพิ่มขึ้นปริมาณสารประกอบอิมตัวลดลงขณะที่ สารประกอบแอโรแมติกเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากองค์ประกอบหลักของการแปรสภาพยางด้วยความร้อนเป็นสารประเภทแอโรแมติก[38]

4.6.1.2. ผลของอุณหภูมิที่มีต่อหมู่ไฮโดรคาร์บอน

ศึกษาหมู่ไฮโดรคาร์บอนของของเหลวจากภาวะ อัตราส่วนระหว่างยางกับแป้ง 9:1 ความดันคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น 0 บาร์ และเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 30 นาที อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา 325 350 375 400 องศาเซลเซียส ได้ผลแสดงดังรูปที่ 14.6



รูปที่ 4.16 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อหุ้มไฮโดรคาร์บอนของของเหลว

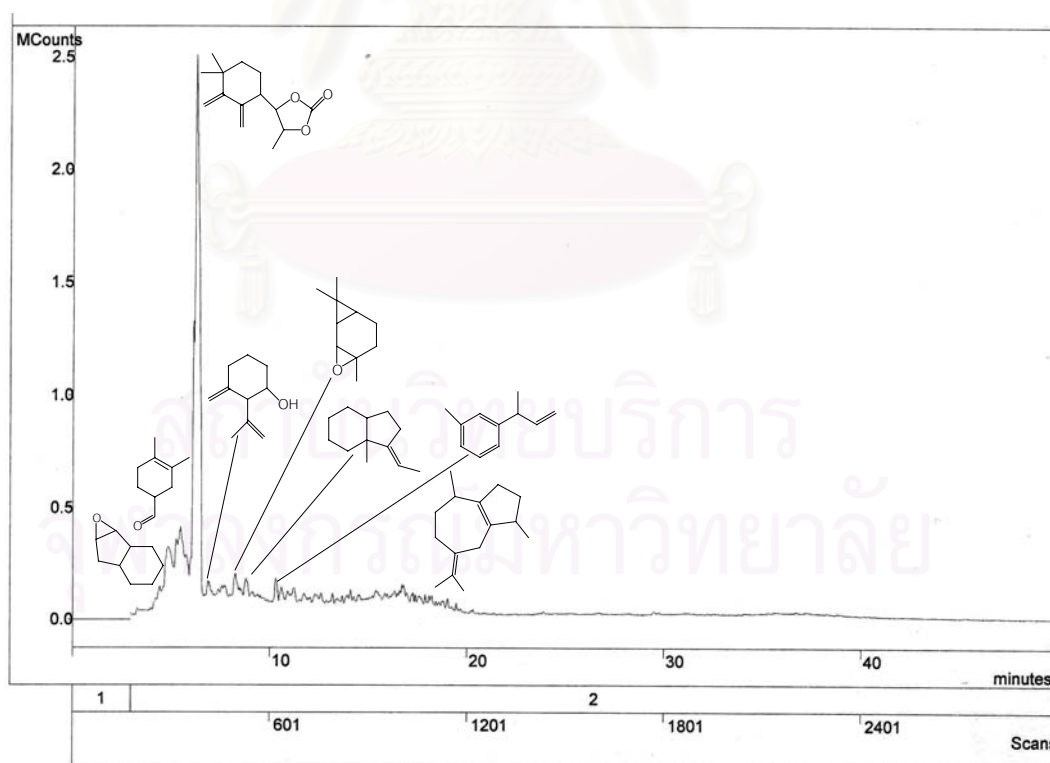


รูปที่ 4.17 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อสารประกอบอิมตัวและแอโรแมติก

พิจารณาผลของอุณหภูมิที่มีต่อหมู่ไฮโดรคาร์บอนของของเหลว (รูปที่ 14.7 และ 14.8) พบว่าร้อยละของสารประกอบอิมิตัว สารประกอบแอโรแมติก เรซิน และแอสฟัลทีน ที่อุณหภูมิ 350 375 400 องศาเซลเซียส มีค่าใกล้เคียงกัน แต่ที่อุณหภูมิ 325 องศาเซลเซียส ของเหลวที่ได้มีองค์ประกอบที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่มากกว่าที่อุณหภูมิอื่นๆ โดยพบว่าร้อยละของเรซินและแอสฟัลทีนเพิ่มขึ้นขณะที่ร้อยละของสารประกอบอิมิตัวลดลง เนื่องจากที่อุณหภูมิปฏิกิริยาต่ำการแตกตัวของพอลิเมอร์เกิดน้อยกว่าที่อุณหภูมิสูงและอุณหภูมิเพดาน (Ceiling Temperature) ของยางประมาณ 340–375 องศาเซลเซียส[50]

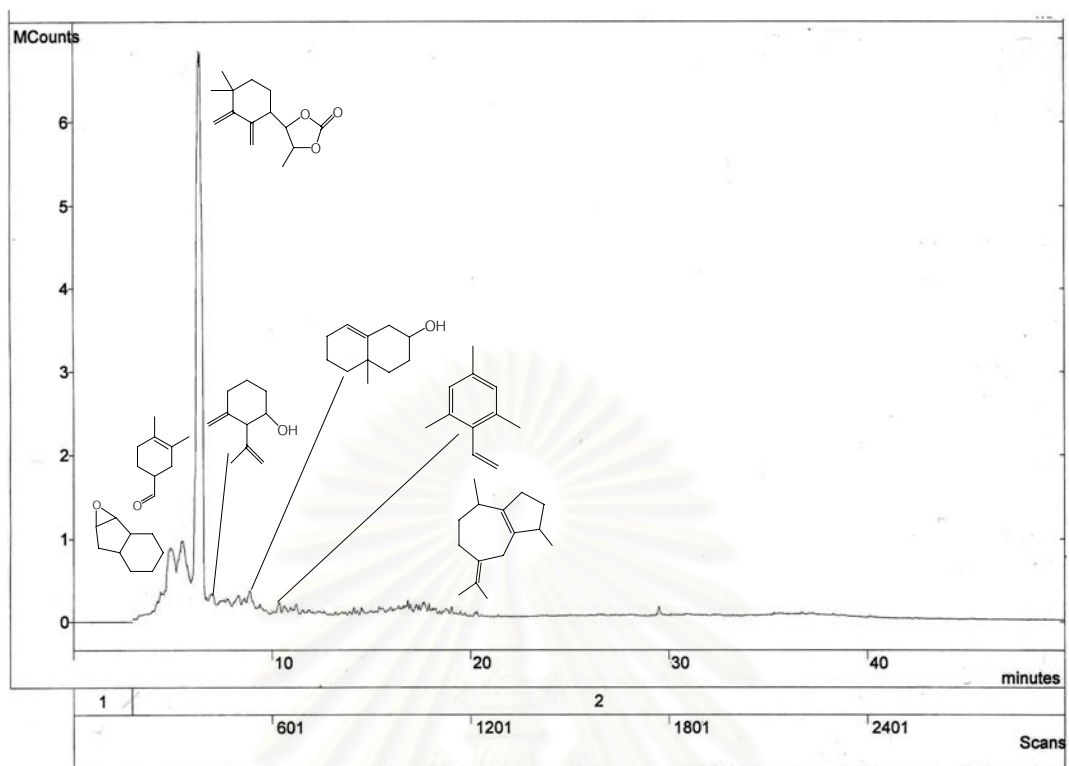
4.6.2. ชนิดสารประกอบในส่วนไฮโดรคาร์บอนอิมิตัวและแอโรแมติก

ศึกษาผลของตัวแปรที่เป็นอิทธิพลหลักต่อสารประกอบในส่วนของเหลวเบา โดยแยกส่วนไฮโดรคาร์บอนอิมิตัวและแอโรแมติกออกจากของเหลวด้วยวิธี SARA แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วย Gas Chromatograph–Mass Spectrometer สมบัติของสารประกอบที่พบแสดงที่ภาคผนวก ข

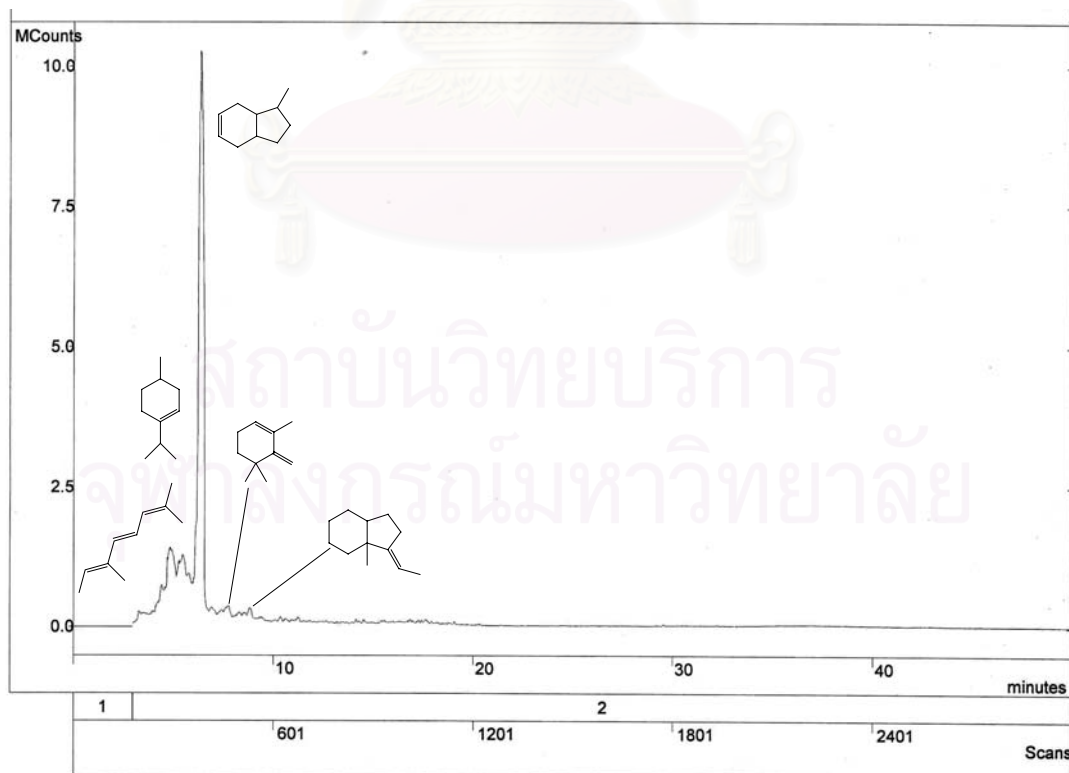


รูปที่ 4.18 โครมาโทแกรม GC-MS ของไฮโดรคาร์บอนอิมิตัวและแอโรแมติก

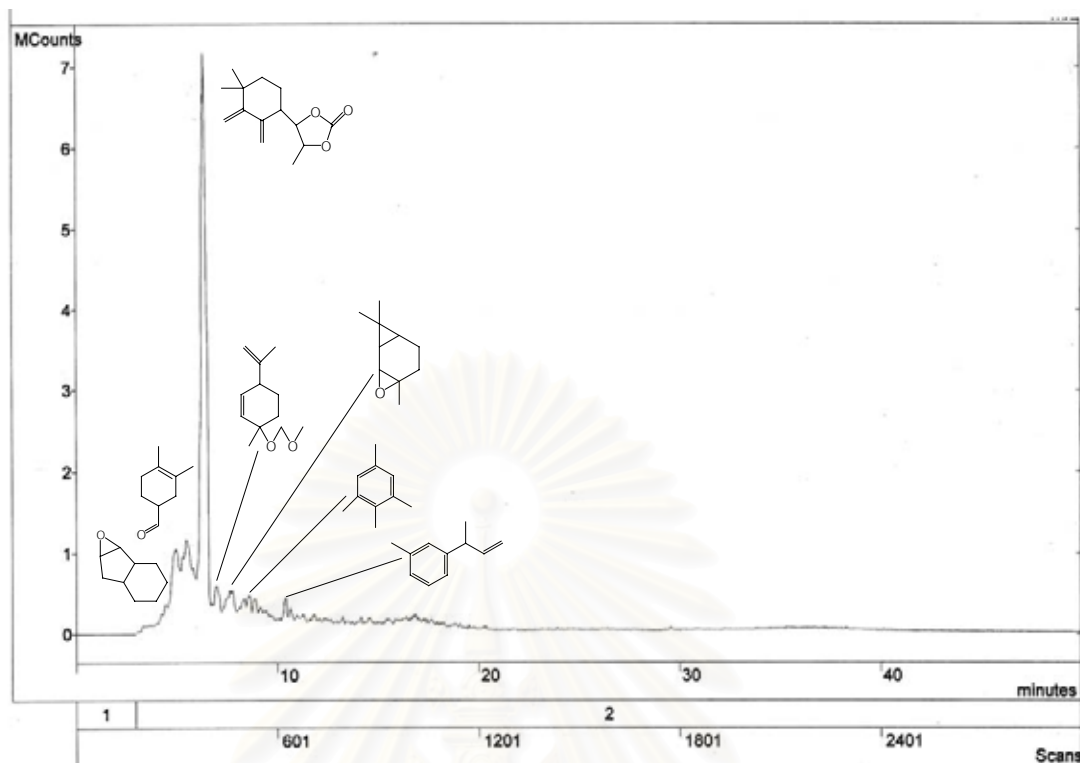
ยางต่อแป้ง 8:2 350 องศาเซลเซียส 0 บาร์ 30 นาที



รูปที่ 4.19 โคโรมาโทแกรม GC-MS ของไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัวและแอโรแมติก
 ยางต่อแบ่ง 9:1 350 องศาเซลเซียส 0 บาร์ 30 นาที



รูปที่ 4.20 โคโรมาโทแกรม GC-MS ของไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัวและแอโรแมติก
 ยางต่อแบ่ง 10:0 350 องศาเซลเซียส 0 บาร์ 30 นาที



รูปที่ 4.21 โครมาโทแกรม GC-MS ของไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัวและแอโรแมติก
 ยางต่อแบ่ง 9:1 400 องศาเซลเซียส 0 บาร์ 30 นาที

4.6.1.1. ผลของอัตราส่วนระหว่างยางกับแบ่งมันสำปะหลังที่มีต่อชนิดสารประกอบในส่วนไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัวและแอโรแมติก

พิจารณาสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัวและแอโรแมติกที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 350 องศาเซลเซียส คาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น 0 บาร์ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 30 นาที (รูปที่ 14.18 14.19 14.20) พบว่ายาง 100% ได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เป็นเส้นตรงและวงแหวน องค์ประกอบไม่หลากหลายพิจารณาจากโครมาโทแกรมที่มีปริมาณพีกน้อย ผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณมากที่สุดคือ 3-Methyl-cis-3a,4,7,7a-tetrahydroindan ขณะที่อัตราส่วนระหว่างยางกับแบ่ง 8:2 และ 9:1 ได้ผลิตภัณฑ์เป็นสารประกอบประเภทวงแหวนที่มีหมู่เอพอกซี แอลดีไฮด์และไฮดรอกซิลรวมถึงสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เป็นวงแหวน ผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณมากที่สุดคือ 1,3-Dioxolan-2-one,5-methyl-4-(4,4-dimethylenecyclohexyl) เช่นเดียวกัน การพบหมู่เอพอกซี แอลดีไฮด์และไฮดรอกซิล ในผลิตภัณฑ์เป็นการยืนยันว่าสายไซของแบ่งทำปฏิกิริยากับยางได้ผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างจากใช้สารตั้งต้นเป็นยางอย่างเดียว เนื่องจากแบ่งมีโครงสร้างที่มีหมู่เอเทอร์และไฮดรอกซิล เมื่อสายไซของแบ่งได้รับความร้อนพันธะ glucosidic จะแตกออกขณะที่สายไซของยางแตกออกเป็นอนุมูลอิสระเช่นกัน หลังจากนั้นสายไซทั้งสองจะเข้าทำปฏิกิริยากัน

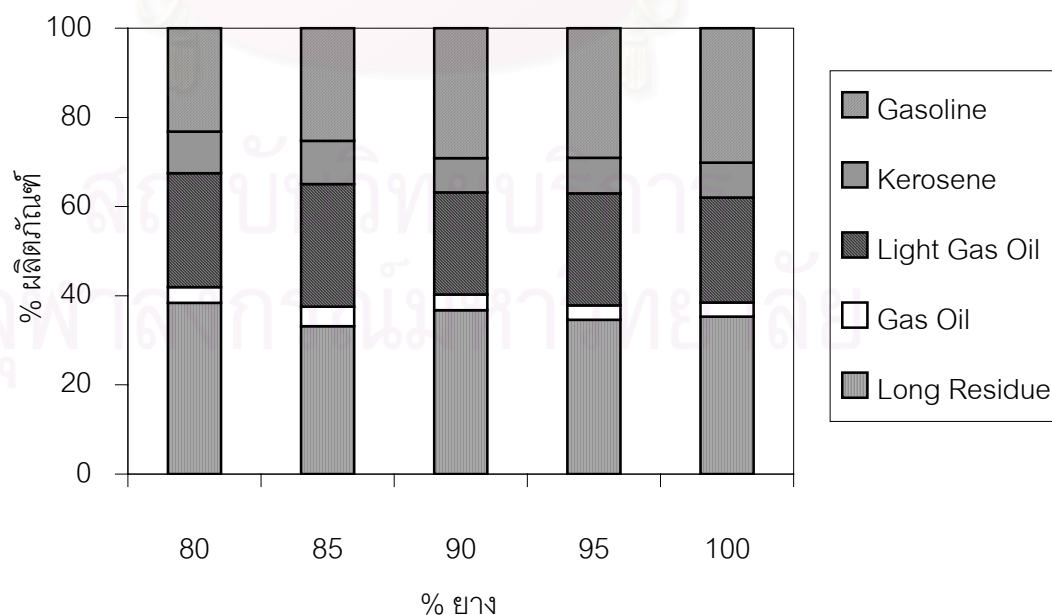
4.6.1.2. ผลของอุณหภูมิที่มีต่อชนิดสารประกอบในส่วนไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัวและแอโรแมติก

พิจารณาสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัวและแอโรแมติกที่อัตราส่วนระหว่างยางกับแป้ง 9:1 คาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น 0 บาร์ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 30 นาที (รูปที่ 14.19 และ 14.21) พบว่าอุณหภูมิปฏิกิริยา 350 และ 400 องศาเซลเซียส ได้ผลิตภัณฑ์ส่วนไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลเล็กคล้ายกัน แต่แตกต่างกันในส่วนไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลใหญ่ โดยที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 400 องศาเซลเซียส พบปริมาณสารประกอบแอโรแมติกชนิดเดียวกันเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามทั้งสองภาวะได้ผลิตภัณฑ์หลักเป็นสารประกอบชนิดวงแหวนเช่นเดียวกัน คือ 1,3-Dioxolan-2-one,5-methyl-4-(4,4-dimethylenecyclohexyl)

4.6.2. ช่วงจุดเดือดของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน

จำแนกชนิดของของเหลวเป็นกลุ่มเช่นเดียวกับการแบ่งกลุ่มช่วงจุดเดือดการกลั่นลำดับส่วนของน้ำมันดิบจากแหล่งปิโตรเลียม ช่วงจุดเดือดแสดงที่ตาราง ข2 และศึกษาผลของตัวแปรที่เป็นอิทธิพลหลักต่อช่วงจุดเดือดของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน

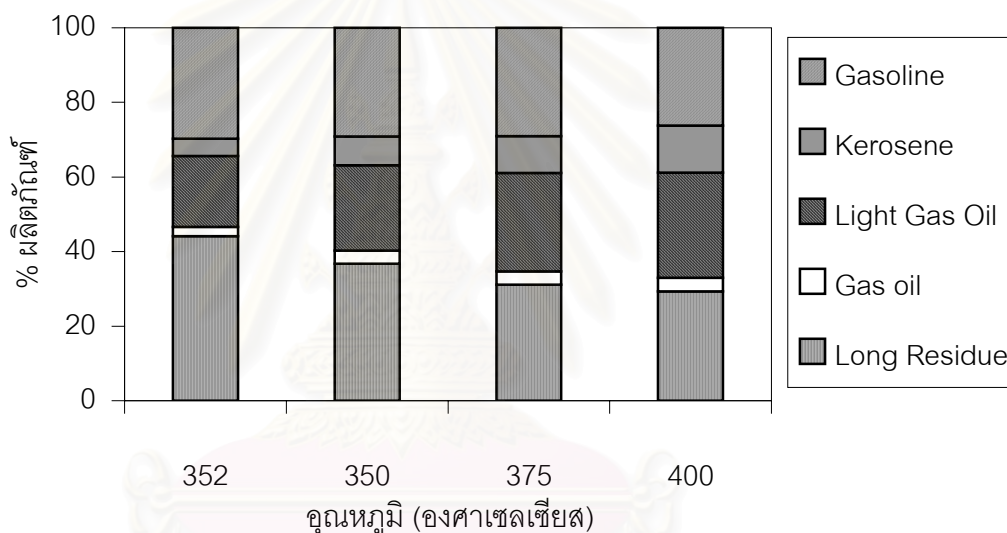
4.6.2.1. ผลของอัตราส่วนระหว่างยางกับแป้งหลังที่มีต่อช่วงจุดเดือดของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน



รูปที่ 14.22 ผลของอัตราส่วนระหว่างยางกับแป้งที่มีต่อช่วงจุดเดือดของของเหลว

พิจารณาผลของอัตราส่วนระหว่างยางกับแป้งที่มีต่อช่วงจุดเดือดของของเหลวที่อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา 350 องศาเซลเซียส คาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น 0 บาร์ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 30 นาที (รูปที่ 14.22) พบว่าที่ร้อยละของยางเพิ่มขึ้นจะได้อัตราส่วนของ Gasoline เพิ่มขึ้นและยังพบว่าที่ร้อยละของยาง 90 95 และ 100 มีการกระจายของจุดเดือดของของเหลวใกล้เคียงกัน สำหรับที่ร้อยละของยาง 80 ได้ส่วนของเหลวที่มีจุดเดือดในช่วง Long Residue ปริมาณมากกว่าร้อยละของยางอื่นๆ เนื่องจากอนุโมลอิสระของยางถูกทำให้เสถียรด้วยการจับกับสายโซ่ของแป้งได้สารโมเลกุลใหญ่ขึ้นและการเติมแป้งผสมกับยางที่ร้อยละของยาง 80 ทำให้การจับกันของสายโซ่ยางและแป้งเกิดได้มากกว่าร้อยละของยาง 85 90 95 และ 100

4.6.2.2. ผลของอุณหภูมิที่มีต่อช่วงจุดเดือดของสารประกอบไฮโดรคาร์บอน

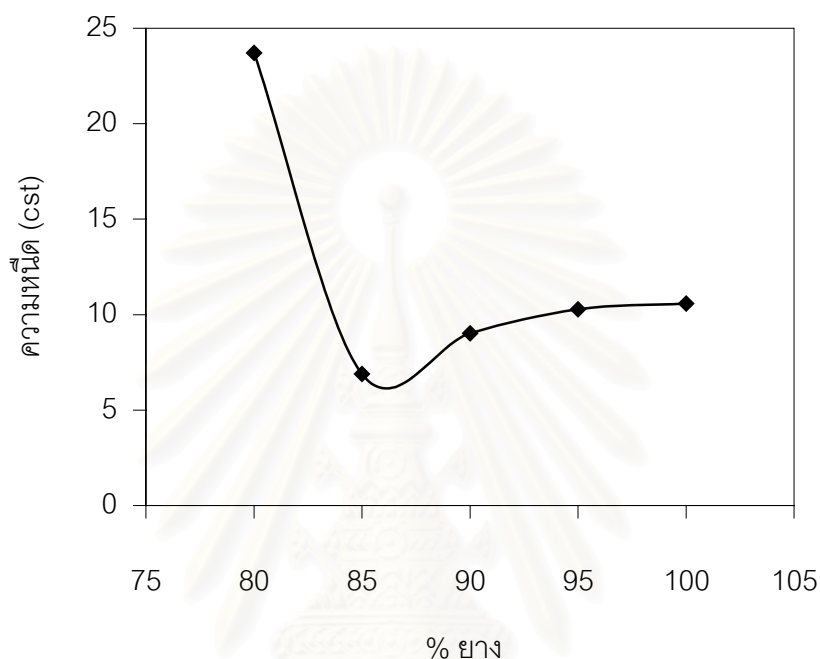


รูปที่ 14.23 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อช่วงจุดเดือดของของเหลว

พิจารณาผลของอุณหภูมิที่มีต่อช่วงจุดเดือดของของเหลว ที่อัตราส่วนระหว่างยางกับแป้ง 9:1 คาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น 0 บาร์ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 30 นาที (รูปที่ 14.23) พบว่าอุณหภูมิปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นร้อยละของ Gasoline และ Long Residue ลดลง ขณะที่ร้อยละของ Kerosene, Light Gas Oil และ Gas oil เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด และเมื่อพิจารณากาฟความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละผลิตภัณฑ์สะสมกับจุดเดือดที่อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา 325 350 375 และ 400 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ ค1 ค2 ค3 และ ค4 ตามลำดับ พบว่าเมื่ออุณหภูมิปฏิกิริยาต่ำจะได้ชนิดของสารไม่หลากหลายการกระจายของน้ำหนักโมเลกุลเป็นช่วงกว้าง[24] สังเกตจากลักษณะกราฟเป็น ขั้นบันไดหมายถึง มีสารจุดเดือดเดียวกันมีปริมาณมากเป็นช่วงๆ ขณะที่อุณหภูมิปฏิกิริยาสูงขึ้นกราฟจะมีลักษณะเป็นเส้นตรงมากขึ้น เนื่องจากของเหลวจะแตกตัวได้โมเลกุลเล็กลงและบางส่วนของ Gasoline แตกตัวเป็นแก๊ส

4.6.3. ความหนืด

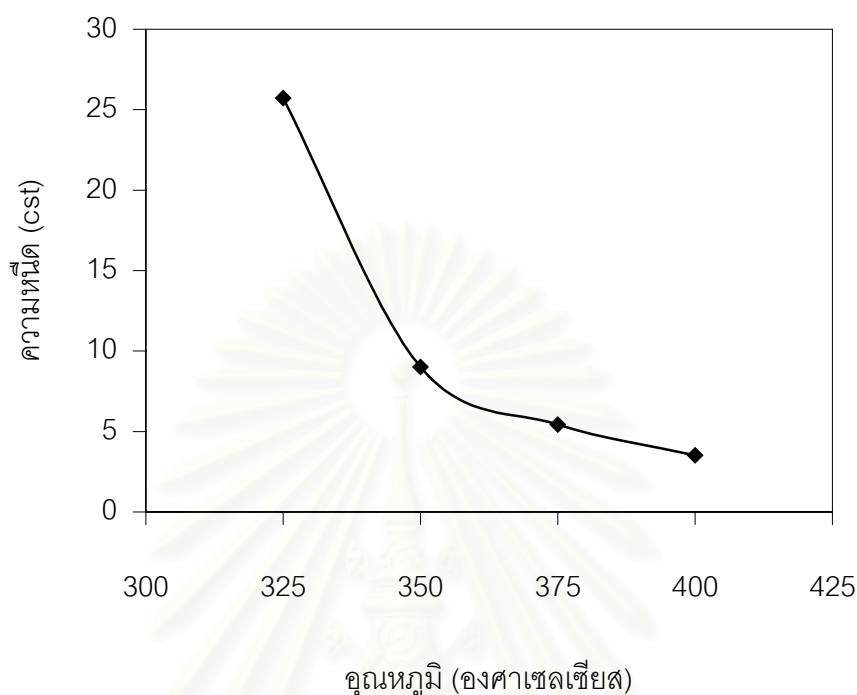
4.6.3.1. ผลของอัตราส่วนระหว่างยางกับแป้งมันสำปะหลังที่มีต่อความหนืดของของเหลว



รูปที่ 14.24 ผลของอัตราส่วนระหว่างยางกับแป้งมันสำปะหลังที่มีต่อความหนืดของของเหลว

พิจารณาผลของอัตราส่วนระหว่างยางกับแป้งมันสำปะหลังที่มีต่อความหนืดของของเหลว ที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 350 องศาเซลเซียส คาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น 0 บาร์ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 30 นาที (รูปที่ 14.32) พบว่าของเหลวมีความหนืดมากที่สุดที่อัตราส่วนระหว่างยางกับแป้ง 8:2 และมีความหนืดน้อยที่สุดที่อัตราส่วนระหว่างยางกับแป้ง 8.5:1.5 ขณะที่อัตราส่วนระหว่างยางกับแป้ง 9:1 9.5:0.5 และ 10:0 มีความหนืดใกล้เคียงกัน เนื่องจากของเหลวที่อัตราส่วนระหว่างยางกับแป้ง 8:2 มีปริมาณสารที่มีจุดเดือดในช่วง Residue มากและยางทำปฏิกิริยากับแป้งได้สารโมเลกุลใหญ่มากกว่าของเหลวที่อัตราส่วนระหว่างยางกับแป้งอื่นๆ เป็นผลให้น้ำหนักโมเลกุลของของเหลวมากจึงมีความหนืดมาก[24]

4.6.3.2. ผลของอุณหภูมิที่มีต่อความหนืดของของเหลว

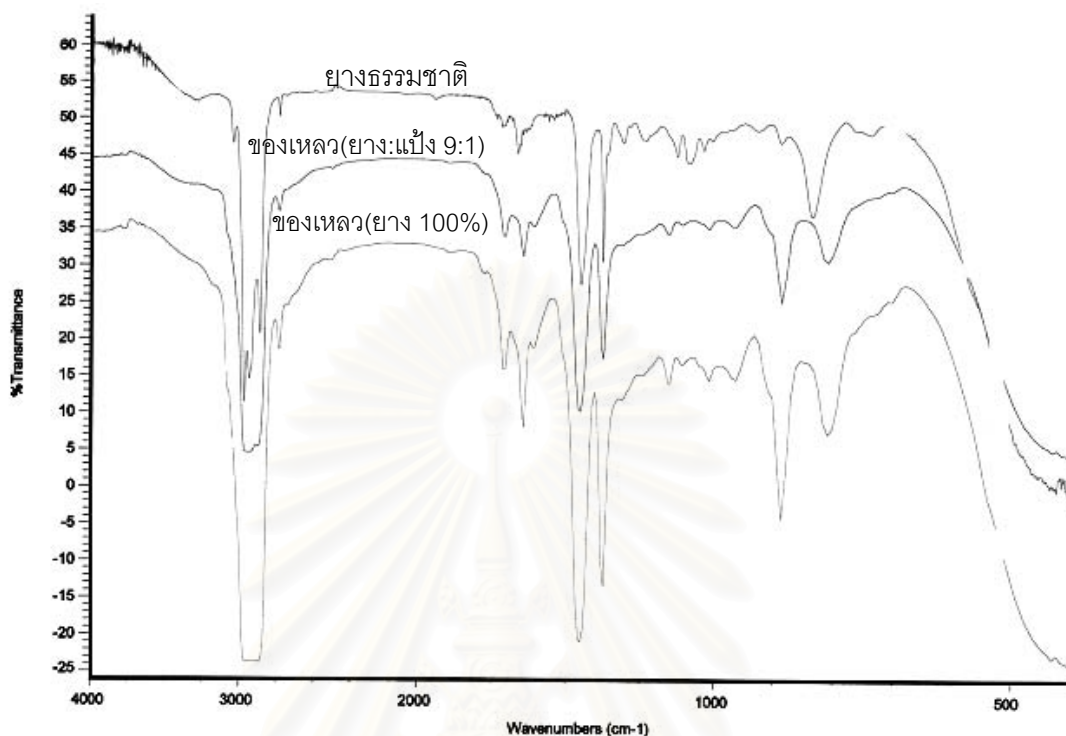


รูปที่ 14.25 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อความหนืดของของเหลว

พิจารณาผลของอุณหภูมิปฏิกิริยาที่มีต่อความหนืดของของเหลว ที่อัตราส่วนระหว่างยางกับแป้ง 9:1 คาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น 0 บาร์ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 30 นาที (รูปที่ 14.33) พบว่าของเหลวมีความหนืดมากที่สุดที่อุณหภูมิปฏิกิริยา 325 องศาเซลเซียส และมีความหนืดลดลงเมื่ออุณหภูมิปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นสายโซ่ของของเหลวจะแตกตัวทำให้โมเลกุลมีขนาดเล็กลง ซึ่งปริมาณพลังงานความร้อนที่ให้แปรผกผันกับน้ำหนักโมเลกุล เป็นผลให้ที่อุณหภูมิปฏิกิริยาต่ำได้ของเหลวที่มีขนาดใหญ่จึงมีความหนืดสูง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.6.4. หมู่ฟังก์ชัน



รูปที่ 14.26 สเปกตรัม FT-IR ของยางธรรมชาติ ของเหลวจากยางต่อแป้ง 9:1 350 องศาเซลเซียส 0 บาร์ 30 นาที และของเหลวจากยางต่อแป้ง 10:0 350 องศาเซลเซียส 0 บาร์ 30 นาที

พิจารณาสเปกตรัม FT-IR พบว่าของเหลวที่ได้จากอุณหภูมิปฏิกิริยา 350 องศาเซลเซียส คาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น 0 บาร์ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 30 นาที ที่อัตราส่วนระหว่างยางกับแป้ง 9:1 และยางอย่างเดียวมีหมู่ฟังก์ชันคล้ายกันมาก แตกต่างที่ของเหลวที่ได้จากอัตราส่วนระหว่างยางกับแป้ง 9:1 พบหมู่ไฮดรอกซิลที่ 3403 cm^{-1} ขณะที่ยางอย่างเดียวไม่พบ และเมื่อเปรียบเทียบสเปกตรัม FT-IR ของของเหลวกับยางธรรมชาติ พบว่าที่ตำแหน่งพันธะคู่ของยางจะแตกออก คือตำแหน่งพีก 888 cm^{-1} หายไปเมื่อถูกนำไปแปรสภาพด้วยความร้อน ตำแหน่งของสเปกตรัมที่สำคัญแสดงดังตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ตำแหน่งพีกสเปคตรัม FT – IR ที่สำคัญ[51]

ความยาวคลื่น (cm^{-1})	ชนิดของพีก
3403	OH stretching
2926	C–H stretching ของ CH_2, CH_3
1707	C=O stretching ของ ester
1637	C=C stretching
1448, 1378	CH_2, CH_3
1154	-C–O–C-
958	$\text{CH}=\text{CH}_2$
888	C–H จากการเปลี่ยนรูปของ C=C–H
836	C=C–H ของยางธรรมชาติ
808	$\text{CH}=\text{C}$ (out of plane)

4.6.5. ค่าความร้อน

ตารางที่ 4.13 ค่าความร้อนของน้ำยางธรรมชาติ แป้งมันสำปะหลัง และของเหลว

ชนิดของสาร	ค่าความร้อนเฉลี่ย (kJ/g)
น้ำยางธรรมชาติ	14.62
แป้งมันสำปะหลัง	23.94
ของเหลว จากยางต่อแป้ง 9:1 (350 องศาเซลเซียส 0 บาร์ 30 นาที)	40.87
น้ำมันปิโตรเลียม*	42 – 45
ไบโอดีเซล*	40
ถ่านหินศักดิ์ต่ำ*	15 – 19
ถ่านหินศักดิ์สูง*	27 – 30

* = อ้างอิงจากสมบัติทั่วไป[52]

งานวิจัยนี้พบว่าภาวะที่ให้ปริมาณของเหลวมากที่สุด คือ อัตราส่วนระหว่างยางกับแป้ง 9:1 อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา 350 องศาเซลเซียส คาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น 0 บาร์ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 30 นาที พิจารณาค่าความร้อนของของเหลวจากตารางที่ 4.13 พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับน้ำมันปิโตรเลียม ดังนั้นของเหลวที่ได้จึงเหมาะสมที่จะนำไปผลิตเป็นน้ำมันเชื้อเพลิง ทั้งนี้ต้องปรับปรุงคุณสมบัติให้เป็นไปตามมาตรฐาน



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1. สรุปผลการวิจัย

5.1.1. การใช้น้ำแบ่งสุกผสมกับน้ำยางธรรมชาติเป็นสารป้อน ทำให้ได้ปริมาณของเหลวมากกว่าใช้ผงแบ่ง

5.1.2. การเติมแป้งมันสำปะหลังผสมกับน้ำยางธรรมชาติช่วยเสริมให้ได้ปริมาณของเหลวเพิ่มขึ้น

5.1.3. ตัวแปรที่เป็นอิทธิพลหลักต่อปริมาณผลิตภัณฑ์จากการสังเคราะห์เชื้อเพลิงจากน้ำยางธรรมชาติผสมกับแป้งมันสำปะหลัง คือ อัตราส่วนระหว่างยางกับแป้งมันสำปะหลังและอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา

5.1.4. เมื่ออัตราส่วนระหว่างยางกับแป้งมันสำปะหลังเพิ่มขึ้นปริมาณแก๊สและของแข็งลดลง ขณะที่ปริมาณของเหลวเพิ่มขึ้น

5.1.5. เมื่ออุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นปริมาณแก๊สและของแข็งเพิ่มขึ้น ขณะที่ปริมาณของเหลวลดลง

5.1.6. ภาวะการทดลองที่ทำให้ปริมาณของเหลวมากที่สุดคือ อัตราส่วนระหว่างยางกับแป้ง 9:1 อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา 350 องศาเซลเซียส ความดันคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น 0 บาร์ และเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 30 นาที ซึ่งได้ร้อยละของเหลวเฉลี่ย 86.86

5.1.7. อัตราส่วนระหว่างยางกับแป้งมันสำปะหลังไม่มีผลต่อองค์ประกอบของแก๊ส ขณะที่อุณหภูมิและเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นจะได้ประเภทของแก๊สไฮโดรคาร์บอนเพิ่มขึ้น

5.1.8. อัตราส่วนระหว่างยางกับแป้งมันสำปะหลังเพิ่มขึ้นขนาดอนุภาคเฉลี่ยของของแข็งลดลง

5.1.9. อัตราส่วนระหว่างยางกับแป้งมันสำปะหลังเพิ่มขึ้นจะได้ส่วนประกอบของของเหลวที่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัวลดลงขณะที่สารประกอบแอมโรแมติกเพิ่มขึ้น

5.1.10. อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นส่วนประกอบของของเหลวที่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัวเพิ่มขึ้นขณะที่สารประกอบแอมโรแมติกลดลง

5.1.11. แป้งมันสำปะหลังสามารถทำปฏิกิริยากับยางธรรมชาติ ทำให้ได้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัวและสารประกอบแอโรแมติกที่มีออกซิเจนในโครงสร้างโมเลกุล

5.1.12. อิทธิพลของอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาไม่เด่นชัดต่อชนิดของสารประกอบในส่วนของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัวและสารประกอบแอโรแมติก

5.1.13. อัตราส่วนระหว่างยางกับแป้งมันสำปะหลังเพิ่มขึ้นปริมาณสารที่จุดเดือดสูงลดลง

5.1.14. อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นของเหลวแตกตัวเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณ Gasoline ลดลง

5.1.15. ความหนืดของของเหลวลดลงเมื่ออัตราส่วนระหว่างยางกับแป้งมันสำปะหลังและอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น

5.1.16. หมู่ฟังก์ชันของของเหลวที่ได้จากการแตกตัวของน้ำยางและน้ำยางผสมกับแป้งมีลักษณะคล้ายกัน

5.1.17. ค่าความร้อนของของเหลวที่อัตราส่วนระหว่างยางกับแป้ง 9:1 อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา 350 องศาเซลเซียส ความดันคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น 0 บาร์ และเวลาในการเกิดปฏิกิริยา 30 นาที มีค่าใกล้เคียงกับน้ำมันดิบที่ใช้ในอุตสาหกรรม

5.2. ข้อเสนอแนะ

5.2.1. การทำปฏิกิริยาในบรรยากาศเฉื่อย เช่น ไนโตรเจน ฮีเลียม จะทำให้ได้ปริมาณของเหลวเพิ่มขึ้น

5.2.2. อาจนำยางรถยนต์ที่ทิ้งแล้วมาทำปฏิกิริยากับแป้งมันสำปะหลังเพื่อศึกษาปฏิกิริยาและปริมาณน้ำมันที่ได้

5.2.3. ศึกษาแป้งชนิดอื่นมาเป็นสารป้อนร่วมกับยาง

เอกสารอ้างอิง

1. Orr, E. C., Burghard, J. A., Tuntawiroon, W., Anderson, L. L., and Eyring, E. M. Coprocessing waste rubber tire material and coal. Fuel Processing Technology 47 (1996): 245–259.
2. Mastral, A. M., Murillo, R., Callen, M. S., and Garcia, T. Application of coal conversion technology to tire processing. Fuel Processing Technology 60 (1999): 231–242.
3. Kara, F., and Bolat, E. Coprocessing of a Turkish lignite with a cellulose waste material 1. The effect of coprocessing on liquefaction yields at different reaction temperatures. Fuel Processing Technology 64 (2000): 47–55.
4. ธนากร วัชรหิรัญ. การแปรรูปถ่านหินลิกไนต์และยางรถยนต์ใช้แล้วให้เป็นของเหลวด้วยไฮโดรเจนบนตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็กบนถ่านกัมมันต์ นิกเกิลโมลิบดีนัมบนอะลูมินา และโคบอลต์โมลิบดีนัมบนอะลูมินา. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
5. Mastral, A. M., Callen, M. S., Garcia, T., and Navarro, M. V. Improvement of liquid from coal–tire co–thermolysis. Characterization of the obtain oils. Fuel Processing Technology 64 (2000): 135– 140.
6. Malcolm, P. S. Polymer Chemistry an Introduction. 3rd ed. New york: Oxford University Press, 1999.
7. Thai Junior Encyclopedia Project by Royal Command of H.M. King Network Webmaster. Para Rubber[Online]. Available from: <http://kanchanapisek.or.th/kp6/BOOK3/chapter4/t3-4-11.htm#sect1>[2003, March 10]
8. วราภรณ์ ขจรไชยกูล. ยางพารา. ฉบับที่ 1. กรุงเทพฯ: สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร, 2524.
9. วราภรณ์ ขจรไชยกูล. เทคโนโลยียาง. กรุงเทพฯ: สถาบันวิจัยยาง กรมวิชาการเกษตร, 2536.
10. Sunserasan, E., and Yeang, H. Y. Allergy studies:B–serum from the Latex Bottom Fraction as a Major Source of Immunaogenic Glove Protein. J. Nat. Rubb. Res. 8 No.4 (1993): 293–298.

11. Roberts, A. D. Natural Rubber Science and Technology. Oxford: Oxford University Press, 1988.
12. Seymour, R. B. Introduction to Polymer Chemistry. New York: McGraw-Hill Kogakusha, 1971.
13. Priestley, R. J. Effect of Heating on Foodstuffs. London: Applied Science, 1979.
14. Whistler, R. L. BeMillor, J. N., and Paschall, E. F. Starch Chemistry and Technology. 2nd ed. Orlando: Academic Press, 1984.
15. Brinkley, A. D. Modern Carbohydrate Chemistry. New York: Marcel Dekker, 1988.
16. Kerr, R. W. Chemistry and Industrial of Starch. 2nd ed. New York: Academic Press, 1950.
17. Charly, H. Food Science. New York: John Willey & Sons, 1971.
18. Challa, G. Food Chemistry an Introduction. Great Britain: Ellis Harwood, 1993.
19. Pomeranz, Y. Functional Properties of Food Components. New York: Academic Press, 1985.
20. Leach, H. W. McCowen, L. D., and Schoch, T. J. Structure of Starch Granule : Swelling and Solubility Pattern of Varia Starch. Cereal Chemistry 36 No.4 (1959): 534–544.
21. College of Health and Human Sciences, Oregon State University. Gelatinization of Starch[Online]. Available..from: <http://food.oregonstate.edu/starch/gelatinization.html>[2003, March 18]
22. Lewandowicz, G., Fornal J., Mietana, M. S., and Walkowski, A. Microwave Modified Starch–Structure, Properties and Resistant Starch Formation [Online]. Available from: http://www.man.poznan.pl/~lewal/wide97/reo_prop.html[2003, March 12]
23. Kelen, T. Polymer Degradation. New York: Van Nostrand, 1983.
24. วาฑิต ศาสตรระวาฑิต. การแตกตัวด้วยความร้อนของยางธรรมชาติโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเหล็ก-คาร์บอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
25. สุเสวี อ่อนดำ. ดีเกรเดชันยางธรรมชาติโดยออกซิเจน. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.

26. Schnable, W. Polymer Degradation. Wien: Munich, 1981.
27. Indian Rubber Institute. Rubber Engineering. New Delhi: Tata McGraw-Hill, 1998.
28. Tomasik, P., and Jane, J. Reaction of Starch and Cellulose with Products of Thermal Decomposition of Mono- and Disaccharides. Starch 47(1995): 24-29.
29. Kroh, L. W., Jolyschko, W., and Haseler, J. Non-volatile Reaction Products by Heat-induced Degradation of α -Glucans. Part I : Analysis of Oligomeric Maltodextrins and Anhydrosugars. Starch 48 (1996): 426-433.
30. ภัทรพรณ ประศาสน์สารกิจ. เทอร์โมไดนามิกส์วิศวกรรมเคมี. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.
31. Japan Atomic Energy Research Institution. Extraction of Uranium using Supercritical CO₂ Fluid[Online]. Available from: <http://inisjp.tokai.jaeri.go.jp/ACT96E/01/0102.html>[2003, March, 20]
32. Szekely, E. Supercritical Fluid Extraction[Online]. Available from: <http://sunny.vemt.bme.hu/sfe/angol/supercritical.html>[2003, March 15]
33. Science In Rural-Schools. Carbon Dioxide[Online]. Available from: http://sirs.biotech.or.th/cont_detail_n.asp?conid=358[2003, March 20]
34. Thai Junior Encyclopedia Project by Royal Command of H.M. King Network Webmaster. Petroleum and Production[Online]. Available from: <http://kanchanapisek.or.th/kp6/BOOK24/chapter7/t24-7-11.htm>[2003, March 25]
35. ปราโมทย์ ไชยเวช. ปิโตรเลียมเทคโนโลยี. กรุงเทพฯ: ศูนย์หออาชีพเซท, 2537.
36. Ophardt, C. E. Fractional Distillation of Crude Oil[Online]. Available from: <http://elmhcx9.elmhurst.edu/~chm/onlcourse/chm110/outlines/distill.html>[2003, March 20]
37. Matsumura, Y., Nonaka, H., Yokura, H., Tsutsumi, A., and Yoshida, K., Co-liquefaction of coal and cellulose in supercritical water, Fuel 78 (1999): 1049-1056.
38. Mastral, A. M., Murillo, R., Callen, M. S., and Garcia, T., and Snape, C. E. Influent of Process Variables on Oils from Tire Pyrolysis and Hydrolysis in a swept fixed Bed Reactor. Energy & Fuels 14 No. 4 (2000): 739-744.

39. Anderson, L. L., Callen, M., Ding, W., Liang, J., Mastral, A. M., Mayoral, M. C., and Murillo, R. Hydrocprocessing of Scrap Automotive Tire and Coal. Analysis of Oils from Autoclave Coprocessing. Ind. Eng. Chem. Res. 36 (1997): 4763–4767.
40. Park, S., and Gloyna, E. F. Statistical study of the liquefaction of used rubber tyre in supercritical water. Fuel 76 No. 11 (1997): 999–1003.
41. Fatma, K., and Esen, B. Coprocessing of Turkish lignite with a cellulosic waste material 1. The effect of coprocessing on liquefaction yields at different reaction temperatures. Fuel Processing Technology 64 (2000): 47–55.
42. Douglas, C. M. Design and Analysis of Experiments. 5th ed. New York: John Willey & Sons, 1997.
43. ASTM Standard, D 240. Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuels by Bomb Calorimeter. U.S.A., 2000.
44. Jokuty, P. Oil Properties[Online]. Available from: http://www.etcentre.org/databases/spills/oilproperties_e.html[2002, August 15]
45. สถิตย์ดี แสงอ่อน. การแปรรูปถ่านหินให้เป็นของเหลวด้วยตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
46. อภิชาติ ศิริพจนาวรรณ. การแปรรูปร่วมของถ่านหินและพอลิพรอพิลีนให้เป็นของเหลวด้วยตัวทำละลายภาวะเหนือวิกฤต. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
47. Gandhi, K. Characterization of Crude Oils and Heavies[Online]. Available from: <http://www.perc.utah.edu/pdf%20files/meeting.pdf>[2003, March 21]
48. ASTM Standard, D 2887. Boiling Range Distribution of Petroleum Fractions by Gas Chromatography. U.S.A., 1993.
49. ASTM Standard, D 445. Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids. U.S.A., 1997.
50. วรณนิภา อมาตยกุล. การแปรรูปยางธรรมชาติผสมลิกไนต์ให้เป็นของเหลวในคาร์บอนไดออกไซด์ภาวะเหนือวิกฤต. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.

51. แม้น อมรสิทธิ์ และ อมร เพชรสม. หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ. กรุงเทพฯ: ชวนพิมพ์, 2534.
52. Scurlock, J. Bioenergy Feedstock Characteristics[Online]. Available from: http://bioenergy.ornl.gov/papers/misc/biochar_factsheet.html[2003, March 22]



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

สมบัติของน้ำยางธรรมชาติชั้นชนิดแอมโมเนียต่ำ

น้ำยางธรรมชาติชั้นชนิดแอมโมเนียต่ำที่ใช้ในการทดลองได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท ไทยรับเบอร์เอนด์เลเทคซ จำกัด มีสมบัติดังนี้

ตารางที่ ก สมบัติของน้ำยางธรรมชาติชั้นชนิดแอมโมเนียต่ำ

Properties	Test Results
Total Solids Content, %	61.53
Dry Rubber Content, %	60.01
Non Rubber Solids, %	1.52
Ammonia Content (on Total Weight), %	0.29
Ammonia Content (on Water Phase), %	0.75
pH Value	10.29
KOH Number	0.6650
Volatile Fatty Acid Number (V.F.A.)	0.0463
Mechanical Stability Time @ 55% TS, sec	1,020
Specific Gravity at 25 °C	0.946
Magnesium Content (on Solids), ppm	37
Chemical Stability Test (CST), ml	2.0
Viscosity (55% TS, Spindle no.1, 60 rpm), cps	74.8

REMARK : Free from pentachlorophenol

ภาคผนวก ข

การคำนวณ

1. การคำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

การคำนวณทั้งหมดนี้อ้างอิงเป็นปราศจากน้ำ

สูตรการคำนวณ

$$\text{น้ำหนักยาง} = \text{น้ำหนักน้ำยางข้น} \times \% \text{DRC}$$

$$\% \text{การเปลี่ยนแปลงทั้งหมด} = \frac{\text{น้ำหนัก(ยาง + แป้ง)}_{\text{ปราศจากความชื้น}} - \text{น้ำหนักของแข็ง}}{\text{น้ำหนัก(ยาง + แป้ง)}_{\text{ปราศจากความชื้น}}} \times 100$$

$$\% \text{ของเหลว} = \frac{\text{น้ำหนักของเหลว}}{\text{น้ำหนัก(ยาง + แป้ง)}_{\text{ปราศจากความชื้น}}} \times 100$$

ละลายในไดคลอโรมีเทน

$$\% \text{แก๊ส} = \frac{\text{น้ำหนักแก๊ส}}{\text{น้ำหนัก(ยาง + แป้ง)}_{\text{ปราศจากความชื้น}}} \times 100$$

$$\% \text{ของแข็ง} = \frac{\text{น้ำหนักของแข็ง}}{\text{น้ำหนัก(ยาง + แป้ง)}_{\text{ปราศจากความชื้น}}} \times 100$$

$$\% \text{ส่วนที่ละลายน้ำ} = 100 - (\% \text{ของเหลว} + \% \text{แก๊ส} + \% \text{ของแข็ง})$$

ตัวอย่างการคำนวณ ที่อัตราส่วนระหว่างยางกับแป้ง 9:1 อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา 350 องศาเซลเซียส ความดันคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น 0 บาร์ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 60 นาที

- สารป้อน

น้ำแป้ง 87.99 กรัม ประกอบด้วย แป้ง 11.005 กรัม และ น้ำ 76.985 กรัม

น้ำยาง 165.09 กรัม ประกอบด้วย ยาง $165.09 \times 0.6001 = 99.07$ กรัม

และ น้ำ 66.02 กรัม

ดังนั้นสารป้อน 253.08 กรัม ประกอบด้วย ยาง:แป้ง:น้ำ = 99.07:11.005:143.005

- ก่อนทำปฏิกิริยา

น้ำหนักสารป้อน	30.05	กรัม
ประกอบด้วย อัตราส่วนของ ยาง:แป้ง:น้ำ	= 11.76:1.31:16.98	
น้ำหนักชุดเครื่องปฏิกรณ์	4627.07	กรัม
- สิ้นสุดปฏิกิริยา

น้ำหนักเครื่องปฏิกรณ์ + ผลิตภัณฑ์ - น้ำหนักแก๊ส	4656.37	กรัม
ดังนั้นน้ำหนักแก๊ส = (4627.07 + 30.05) - 4656.37 =	0.75	กรัม
น้ำหนักกระดาษกรอง + ปีกเกอร์	106.28	กรัม
น้ำหนักกระดาษกรอง + ปีกเกอร์ + ของแข็ง	106.49	กรัม
ดังนั้นน้ำหนักของแข็ง = 106.49 - 106.28 =	0.21	กรัม
น้ำหนักขวดก้นกลม	280.55	กรัม
น้ำหนักขวดก้นกลม + ของเหลว หลังระเหยตัวทำละลายออก	290.76	กรัม
ดังนั้นน้ำหนักของเหลว = 290.01 - 280.55 =	9.46	กรัม
- ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

$$\% \text{การเปลี่ยนทั้งหมด} = \frac{(11.76 + 1.31) - 0.21}{(11.76 + 1.31)} \times 100 = 98.39$$

$$\% \text{ของเหลว} = \frac{9.46}{(11.76 + 1.31)} \times 100 = 72.38$$

$$\% \text{แก๊ส} = \frac{0.75}{(11.76 + 1.31)} \times 100 = 5.74$$

$$\% \text{ของแข็ง} = \frac{0.21}{(11.76 + 1.31)} \times 100 = 1.61$$

$$\% \text{ส่วนที่ละลายน้ำ} = 100 - (72.38 + 5.74 + 1.61) = 20.38$$

2. การคำนวณเชิงอัตราส่วนร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

สูตรการคำนวณ

$$\% \text{การเปลี่ยนแปลงทั้งหมด} = (\% \text{การเปลี่ยนแปลงทั้งหมดของยาง} \times \text{อัตราส่วนยาง}) + (\% \text{การเปลี่ยนแปลงทั้งหมดของแป้ง} \times \text{อัตราส่วนแป้ง})$$

$$\% \text{ของเหลว} = (\% \text{ของเหลวจากยาง} \times \text{อัตราส่วนยาง}) + (\% \text{ของเหลวจากแป้ง} \times \text{อัตราส่วนแป้ง})$$

$$\% \text{แก๊ส} = (\% \text{แก๊สจากยาง} \times \text{อัตราส่วนยาง}) + (\% \text{แก๊สจากแป้ง} \times \text{อัตราส่วนแป้ง})$$

$$\% \text{ของแข็ง} = (\% \text{ของแข็งจากยาง} \times \text{อัตราส่วนยาง}) + (\% \text{ของแข็งจากแป้ง} \times \text{อัตราส่วนแป้ง})$$

$$\% \text{ส่วนที่ละลายน้ำ} = (\% \text{ส่วนที่ละลายน้ำจากยาง} \times \text{อัตราส่วนยาง}) + (\% \text{ส่วนที่ละลายน้ำจากแป้ง} \times \text{อัตราส่วนแป้ง})$$

ตัวอย่างการคำนวณ คุณหมูมิในการเกิดปฏิกิริยา 400 องศาเซลเซียส ความดันคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น 0 บาร์ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 30 นาที มีข้อมูลดังนี้

ตารางที่ ข1 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์จากน้ำยางและน้ำแป้ง

สารป้อน	% แก๊ส	% ของแข็ง	% ของเหลว	% ส่วนที่ละลายน้ำ	% การเปลี่ยนแปลงทั้งหมด
น้ำยาง	10.32	3.06	73.32	13.30	96.94
น้ำแป้ง	34.16	47.79	0	18.05	52.21

นำข้อมูลข้างต้นมาคำนวณเชิงอัตราส่วนเป็นอัตราส่วนระหว่างยางกับแป้ง 8:2 ได้ผลดังนี้

$$\begin{aligned} \% \text{การเปลี่ยนแปลงทั้งหมด} &= (96.94 \times 0.8) + (52.21 \times 0.2) &= & 87.99 \\ \% \text{ของเหลว} &= (73.32 \times 0.8) + (0 \times 0.2) &= & 58.66 \\ \% \text{แก๊ส} &= (10.32 \times 0.8) + (34.16 \times 0.2) &= & 15.09 \\ \% \text{ของแข็ง} &= (3.06 \times 0.8) + (47.79 \times 0.2) &= & 12.01 \\ \% \text{ส่วนที่ละลายน้ำ} &= (13.30 \times 0.8) + (18.05 \times 0.2) &= & 14.25 \end{aligned}$$

3. การคำนวณร้อยละผลได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี SARA

สูตรการคำนวณ

$$\% \text{สารประกอบไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว} = \frac{\text{น้ำหนักสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว}}{\text{น้ำหนักของเหลว}} \times 100$$

$$\% \text{สารประกอบแโรแมติก} = \frac{\text{น้ำหนักสารประกอบแโรแมติก}}{\text{น้ำหนักของเหลว}} \times 100$$

$$\% \text{แอสฟัลทีน} = \frac{\text{น้ำหนักแอสฟัลทีน}}{\text{น้ำหนักของเหลว}} \times 100$$

$$\% \text{เรซิน} = 100 - (\% \text{สารประกอบไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว} + \% \text{สารประกอบแโรแมติก} + \% \text{แอสฟัลทีน})$$

ตัวอย่างการคำนวณ ที่อัตราส่วนระหว่างยางกับแป้ง 9:1 อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา 400 องศาเซลเซียส ความดันคาร์บอนไดออกไซด์เริ่มต้น 0 บาร์ เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 30 นาที

- การเตรียมมอลทีน

น้ำหนักของเหลว	2.3295	กรัม
ประกอบด้วย		
น้ำหนักแอสฟัลทีน	0.0435	กรัม
มอลทีน = 2.3295 - 0.0435 =	2.2860	กรัม
- การแยกด้วยคอลัมน์โครมาโทกราฟี

ใช้มอลทีน	0.7487	กรัม
ได้ สารประกอบไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว	0.4673	กรัม
สารประกอบแโรแมติก	0.2171	กรัม
เรซิน = 0.7487 - (0.4673 + 0.2171) =	0.0643	กรัม

- ร้อยละของผลิตภัณฑ์

$$\% \text{แอสฟัลทีน} = \frac{0.0435}{2.3295} \times 100 = 1.87$$

อ้างอิงที่ ปริมาณของเหลว 1 กรัม ประกอบด้วย

$$\text{มอลทีน} = 2.2860 / 2.3295 = 0.9813 \text{ กรัม}$$

$$\text{สารประกอบไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว} = (0.4673 \times 0.9813) / 0.7487 = 0.6125 \text{ กรัม}$$

$$\text{สารประกอบแอโรแมติก} = (0.2171 \times 0.9813) / 0.7487 = 0.2846 \text{ กรัม}$$

$$\text{เรซิน} = 0.9813 - (0.6125 + 0.2846) = 0.0842 \text{ กรัม}$$

ดังนั้น

$$\% \text{สารประกอบไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว} = \frac{0.6125}{1} \times 100 = 61.25$$

$$\% \text{สารประกอบแอโรแมติก} = \frac{0.2846}{1} \times 100 = 28.46$$

$$\% \text{เรซิน} = 100 - (61.25 + 28.46 + 1.87) = 8.42$$

4. การคำนวณร้อยละผลิตภัณฑ์จากการช่วงจุดเดือดของน้ำมันจากการวิเคราะห์ด้วย Simulated Distillation Gas Chromatograph

ตารางที่ ข2 ประเภทและช่วงจุดเดือดของน้ำมัน

ผลิตภัณฑ์	ช่วงจุดเดือด (องศาเซลเซียส)
Gasoline	ตั้งแต่ต่ำๆ จนถึง 200
Kerosene	200-250
Light Gas Oil	250-350
Gas Oil	350-370
Long Residue	มากกว่า 370

ภาคผนวก ค

ข้อมูลการทดลอง

ตารางที่ ค1 ข้อมูลและผลการทดลองเปรียบเทียบรูปแบบแ่งที่ใช้เป็นสารป้อน

รูปแบบแ่ง	ยาง:แ่ง	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	คาร์บอนไดออกไซด์ (บาร์)	เวลา (นาที)	% แก๊ส	% ของแข็ง	% ของเหลว	% ส่วนที่ ละลายน้ำ	% การเปลี่ยน ทั้งหมด	ความดันสุดท้าย (บาร์)
ผงแ่ง	8:2	350	0	30	8.73	7.01	68.59	15.67	92.99	120
น้ำแ่งสุก	8:2	350	0	30	9.27	5.84	75.55	9.34	94.16	110

ตารางที่ ค2 ข้อมูลและการเปรียบเทียบผลการทดลองกับการคำนวณเชิงอัตราส่วนของเดิมแ่ง

สารป้อน	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	คาร์บอนไดออกไซด์ (บาร์)	เวลา (นาที)	% แก๊ส	% ของแข็ง	% ของเหลว	% ส่วนที่ ละลายน้ำ	% การเปลี่ยน ทั้งหมด	ความดันสุดท้าย (บาร์)
น้ำยาง	400	0	30	10.32	3.06	73.32	13.30	96.94	90
น้ำแ่ง	400	0	30	34.16	47.79	0	18.05	52.21	160
การคำนวณ ยาง:แ่ง 8:2	400	0	30	15.09	12.01	58.66	14.25	87.99	104
การทดลอง ยาง:แ่ง 8:2	400	0	30	12.94	7.68	66.13	13.25	92.32	140

ตารางที่ ค3 ข้อมูลและผลการทดลองร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ (2^4 factorial 2 replicates)

การทดลองที่	ยาง:แป้ง	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	คาร์บอนไดออกไซด์ (บาร์)	เวลา (นาที)	% แก๊ส	% ของแข็ง	% ของเหลว	% ส่วนที่ ละลายน้ำ	% การเปลี่ยน ทั้งหมด	ความดันสุดท้าย (บาร์)
1	8:2	350	0	30	7.97	4.25	72.68	15.10	95.75	112
2					9.27	5.84	75.55	9.34	94.16	110
3	9:1	350	0	30	7.77	1.30	88.87	2.06	98.70	110
4					6.65	2.87	84.84	5.64	97.13	105
5	8:2	400	0	30	12.94	7.68	66.13	13.25	92.32	140
6					13.89	8.41	72.22	5.48	91.59	132
7	9:1	400	0	30	9.19	3.89	66.08	20.84	96.11	128
8					8.93	4.36	70.01	16.70	95.64	131
9	8:2	350	20	30	11.44	5.41	77.98	5.17	94.59	150
10					11.69	5.49	79.02	3.80	94.51	148
11	9:1	350	20	30	6.20	1.76	77.44	14.60	98.24	130
12					6.81	1.21	82.44	9.54	98.79	142
13	8:2	400	20	30	16.08	6.70	67.25	9.97	93.30	185
14					13.53	6.61	67.34	12.52	93.39	170
15	9:1	400	20	30	11.93	2.44	78.07	7.56	97.56	170
16					7.29	3.12	73.69	15.90	96.88	170

ตารางที่ ค3 (ต่อ) ข้อมูลและผลการทดลองร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ (2⁴ factorial 2 replicates)

การทดลองที่	ยาง:แป้ง	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	คาร์บอนไดออกไซด์ (บาร์)	เวลา (นาที)	% แก๊ส	% ของแข็ง	% ของเหลว	% ส่วนที่ ละลายน้ำ	% การเปลี่ยน ทั้งหมด	ความดันสุดท้าย (บาร์)
17	8:2	350	0	60	11.49	6.1	76.54	5.87	93.9	118
18					15.37	6.68	71.45	6.50	93.32	130
19	9:1	350	0	60	6.96	1.78	77.01	14.25	98.22	100
20					5.74	1.61	72.38	20.27	98.39	100
21	8:2	400	0	60	16.34	7.36	65.21	11.09	92.64	140
22					15.25	8.59	60.06	16.10	91.41	135
23	9:1	400	0	60	11.06	4.65	71.28	13.01	95.35	111
24					9.68	3.60	68.96	17.76	96.40	140
25	8:2	350	20	60	12.97	4.77	79.04	3.22	95.23	150
26					9.72	6.05	84.07	0.16	93.95	155
27	9:1	350	20	60	7.84	2.14	86.24	3.78	97.86	140
28					5.42	1.91	88.68	3.99	98.09	149
29	8:2	400	20	60	14.01	7.13	56.76	22.10	92.87	185
30					15.43	6.29	62.59	15.69	93.71	185
31	9:1	400	20	60	7.34	3.50	84.25	4.91	96.5	170
32					10.87	2.61	78.41	8.11	97.39	180

ตารางที่ ค4 ข้อมูลและผลการทดลองร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ภาวะกึ่งกลางของตัวแปร

การทดลองที่	ยาง:แป้ง	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	คาร์บอนไดออกไซด์ (บาร์)	เวลา (นาที)	% แก๊ส	% ของแข็ง	% ของเหลว	% ส่วนที่ ละลายน้ำ	% การเปลี่ยน ทั้งหมด	ความดันสุดท้าย (บาร์)
1	8.5:1.5	375	10	45	12.79	5.04	74.26	7.91	94.96	145
2	8.5:1.5	375	10	45	9.48	4.82	69.11	16.59	95.18	150
3	8.5:1.5	375	10	45	8.56	4.74	75.26	11.44	95.26	135
4	8.5:1.5	375	10	45	10.25	5.87	68.49	15.39	94.13	133

ตารางที่ ค5 ข้อมูลและผลการทดลองเปรียบเทียบบรรยากาศเริ่มต้นที่มีต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

บรรยากาศเริ่มต้น	ยาง:แป้ง	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	คาร์บอนไดออกไซด์ (บาร์)	เวลา (นาที)	% แก๊ส	% ของแข็ง	% ของเหลว	% ส่วนที่ ละลายน้ำ	% การเปลี่ยน ทั้งหมด	ความดันสุดท้าย (บาร์)
อากาศ	9:1	350	0	30	7.77	1.30	88.87	2.06	98.70	110
					6.65	2.87	84.84	5.64	97.13	105
ไนโตรเจน	9:1	350	0	30	6.42	2.61	88.80	2.17	97.39	115
					6.58	2.74	87.73	2.95	97.26	114

ตารางที่ ค6 ข้อมูลและผลการทดลองอิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างยางกับแป้งที่มีต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

การทดลองที่	ยาง:แป้ง	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	คาร์บอนไดออกไซด์ (บาร์)	เวลา (นาที)	% แก๊ส	% ของแข็ง	% ของเหลว	% ส่วนที่ ละลายน้ำ	% การเปลี่ยน ทั้งหมด	ความดันสุดท้าย (บาร์)
1	8:2	350	0	30	7.97	4.25	72.68	15.10	95.75	112
2					9.27	5.84	75.55	9.34	94.16	110
3	8.5:1.5	350	0	30	7.56	3.66	78.90	9.88	96.34	121
4					8.45	3.31	82.48	5.76	96.69	124
5	9:1	350	0	30	7.77	1.30	88.87	2.06	98.70	110
6					6.65	2.87	84.84	5.64	97.13	105
7	9.5:0.5	350	0	30	4.92	1.69	88.15	5.24	98.31	106
8					5.85	1.64	89.47	3.04	98.36	105
9	10:0	350	0	30	3.18	1.47	90.40	4.95	98.53	92
10					2.44	1.00	89.89	6.67	99.00	94
11	0:10	350	0	30	19.43	35.43	0.00	45.14	64.57	160
12					24.80	38.41	0.00	36.79	61.59	165

สถาบันวิจัยและพัฒนา
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค7 ข้อมูลและผลการคำนวณเชิงอัตราส่วนของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่อัตราส่วนระหว่างยางกับแป้งต่างๆ
 การคำนวณนำข้อมูลร้อยละผลได้เฉลี่ยของผลิตภัณฑ์จากสารป้อนที่เป็น ยาง 100% และ แป้ง 100% จากตารางที่ ค6 มาคำนวณเชิงอัตราส่วน

ยาง:แป้ง	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	คาร์บอนไดออกไซด์ (บาร์)	เวลา (นาที)	% แก๊ส	% ของแข็ง	% ของเหลว	% ส่วนที่ละลายน้ำ	% การเปลี่ยนทั้งหมด
8:2	350	0	30	6.67	8.37	72.12	12.84	91.63
8.5:1.5	350	0	30	5.71	6.59	76.62	11.08	93.41
9:1	350	0	30	4.74	4.80	81.13	9.33	95.20
9.5:0.5	350	0	30	3.78	3.02	85.64	7.57	96.98

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค8 ข้อมูลและผลการทดลองอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

การทดลองที่	ยาง:แป้ง	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	คาร์บอนไดออกไซด์ (บาร์)	เวลา (นาที)	% แก๊ส	% ของแข็ง	% ของเหลว	% ส่วนที่ ละลายน้ำ	% การเปลี่ยน ทั้งหมด	ความดันสุดท้าย (บาร์)
1	9:1	325	0	30	3.18	2.46	84.98	9.38	97.54	92
2					3.34	2.66	85.12	8.88	97.34	94
3	9:1	350	0	30	7.77	1.30	88.87	2.06	98.70	110
4					6.65	2.87	84.84	5.64	97.13	105
5	9:1	375	0	30	8.21	2.23	81.90	7.66	97.77	120
6					7.81	2.61	85.50	4.08	97.39	123
7	9:1	400	0	30	9.19	3.89	66.08	20.84	96.11	128
8					8.93	4.36	70.01	16.70	95.64	131

ตารางที่ ๑๙ ข้อมูลและผลการทดลองการวิเคราะห์ของเหลวด้วยวิธี SARA

การทดลองที่	ยาง:แป้ง	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	คาร์บอนไดออกไซด์ (บาร์)	เวลา (นาที)	% สารประกอบอิ่มตัว	% สารประกอบแอมโรแมติก	% เรซิน	% แอสฟัลทีน
1	8:2	350	0	30	62.76	32.47	1.03	3.74
2	9:1	350	0	30	57.31	31.33	9.20	2.16
3	8:2	400	0	30	65.79	22.68	10.29	1.24
4	9:1	400	0	30	61.25	28.46	8.42	1.87
5	8:2	350	20	30	57.47	32.46	7.27	2.80
6	9:1	350	20	30	55.19	34.96	4.62	5.23
7	8:2	400	20	30	68.33	28.17	0.69	2.81
8	9:1	400	20	30	57.92	36.87	2.58	2.63
9	8:2	400	0	60	68.33	28.17	0.76	2.74
10	9:1	400	0	60	58.86	36.39	1.07	3.68
11	8:2	350	0	60	68.17	28.07	1.02	2.74
12	9:1	350	0	60	63.25	31.99	1.28	3.48
13	8:2	400	20	60	54.74	31.74	8.65	4.87
14	9:1	400	20	60	58.11	33.38	3.16	5.35
15	8:2	350	20	60	67.93	28.15	1.87	2.05
16	9:1	350	20	60	61.65	32.05	2.71	3.59

ตารางที่ ค10 ข้อมูลและผลการทดลองอิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างยางกับแป้งที่มีต่อการกระจายตัวของหมู่ไฮโดรคาร์บอน

ยาง:แป้ง	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	คาร์บอนไดออกไซด์ (บาร์)	เวลา (นาที)	% สารประกอบอิ่มตัว	% สารประกอบแอมโรแมติก	% เรซิน	% แอสฟัลทีน
8:2	350	0	30	65.25	29.38	0.81	4.56
8.5:1.5	350	0	30	67.86	26.22	2.21	3.72
9:1	350	0	30	62.43	31.61	3.40	2.56
9.5:0.5	350	0	30	61.73	31.02	4.86	2.40
10:0	350	0	30	62.04	33.16	2.15	2.65

ตารางที่ ค11 ข้อมูลและผลการทดลองอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อการกระจายตัวของหมู่ไฮโดรคาร์บอน

ยาง:แป้ง	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	คาร์บอนไดออกไซด์ (บาร์)	เวลา (นาที)	% สารประกอบอิ่มตัว	% สารประกอบแอมโรแมติก	% เรซิน	% แอสฟัลทีน
9:1	325	0	30	51.45	31.35	11.60	5.61
9:1	350	0	30	62.43	31.61	3.40	2.56
9:1	375	0	30	65.48	24.06	6.58	3.88
9:1	400	0	30	63.71	30.08	4.82	1.40

ตารางที่ ค12 ข้อมูลและผลการทดลองอิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างยางกับแป้งที่มีต่อช่วงจุดเดือดของของเหลว

ยาง:แป้ง	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	คาร์บอนไดออกไซด์ (บาร์)	เวลา (นาที)	Gasoline	Kerosene	Light Gas Oil	Gas Oil	Long Residue
8:2	350	0	30	23.21	9.34	25.53	3.49	38.43
8.5:1.5	350	0	30	25.28	9.65	27.49	4.38	33.20
9:1	350	0	30	29.13	7.73	22.90	3.52	36.72
9.5:0.5	350	0	30	29.06	8.01	25.09	3.26	34.58
10:0	350	0	30	30.13	7.82	23.57	3.14	35.34

ตารางที่ ค13 ข้อมูลและผลการทดลองอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อช่วงจุดเดือดของของเหลว

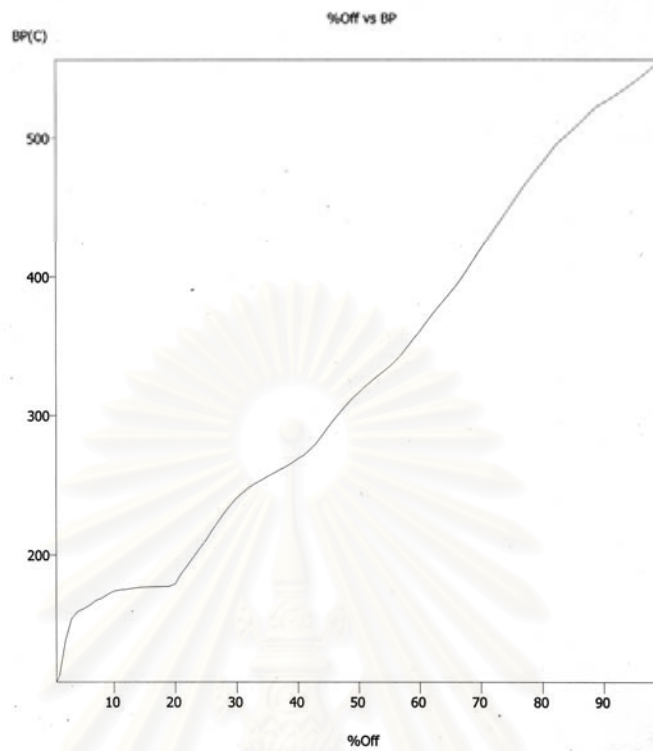
ยาง:แป้ง	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	คาร์บอนไดออกไซด์ (บาร์)	เวลา (นาที)	Gasoline	Kerosene	Light Gas Oil	Gas Oil	Long Residue
9:1	325	0	30	29.72	4.62	19.02	2.51	44.13
9:1	350	0	30	29.13	7.73	22.9	3.52	36.72
9:1	375	0	30	29.04	9.89	26.36	3.6	31.11
9:1	400	0	30	26.19	12.6	28.25	3.66	29.3

ตารางที่ ค14 ข้อมูลและผลการทดลองอิทธิพลของอัตราส่วนระหว่างยางกับแป้งที่มีต่อความหนืดของของเหลว

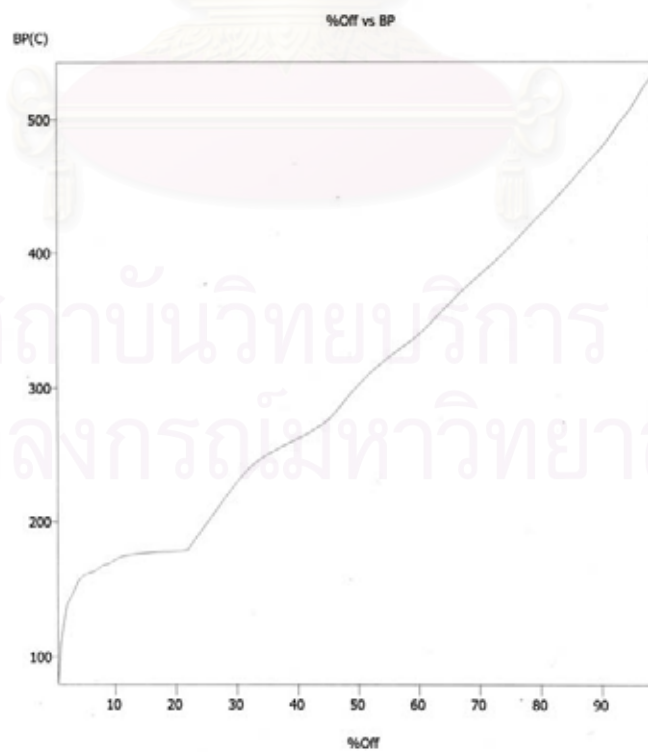
ยาง:แป้ง	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	คาร์บอนไดออกไซด์ (บาร์)	เวลา (นาที)	ความหนืด (cst)		
				1	2	เฉลี่ย
8:2	350	0	30	23.77	23.66	23.71
8.5:1.5	350	0	30	6.95	6.85	6.90
9:1	350	0	30	9.06	8.96	9.01
9.5:0.5	350	0	30	10.27	10.27	10.27
10:0	350	0	30	10.57	10.57	10.57

ตารางที่ ค15 ข้อมูลและผลการทดลองอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อความหนืดของของเหลว

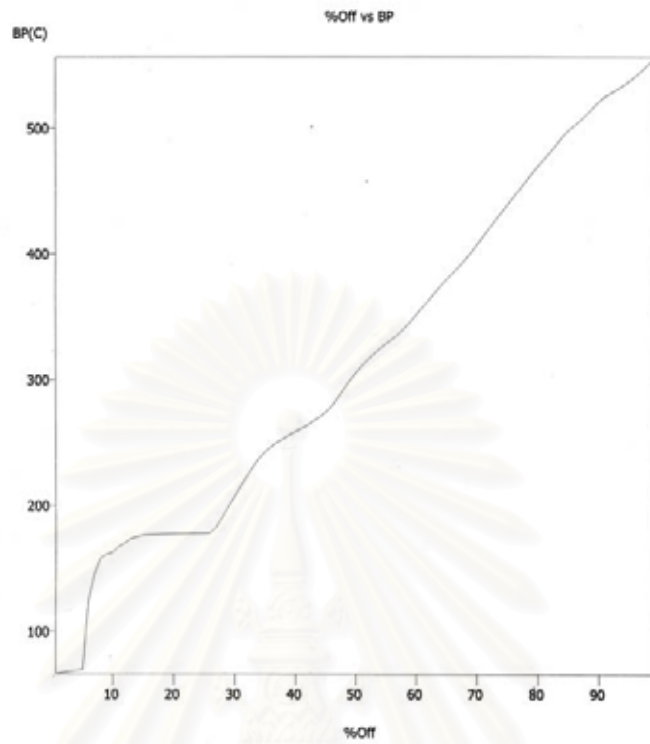
ยาง:แป้ง	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	คาร์บอนไดออกไซด์ (บาร์)	เวลา (นาที)	ความหนืด (cst)		
				1	2	เฉลี่ย
9:1	325	0	30	25.78	25.68	25.73
9:1	350	0	30	9.06	8.96	9.01
9:1	375	0	30	5.44	5.44	5.44
9:1	400	0	30	3.52	3.52	3.52



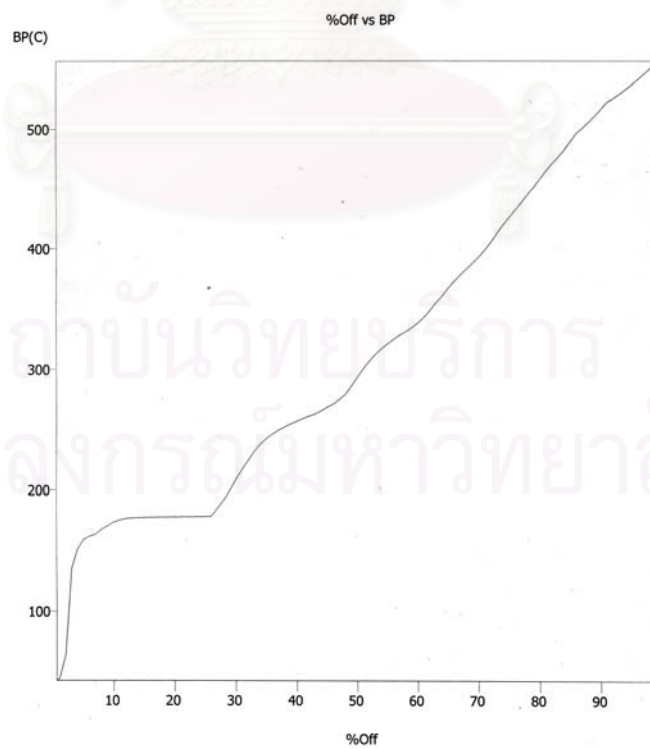
รูปที่ ค1 จุดเดือดของของเหลวที่ ยางต่อแบ่ง 8:2 350 องศาเซลเซียส 0 บาร์ 30 นาที



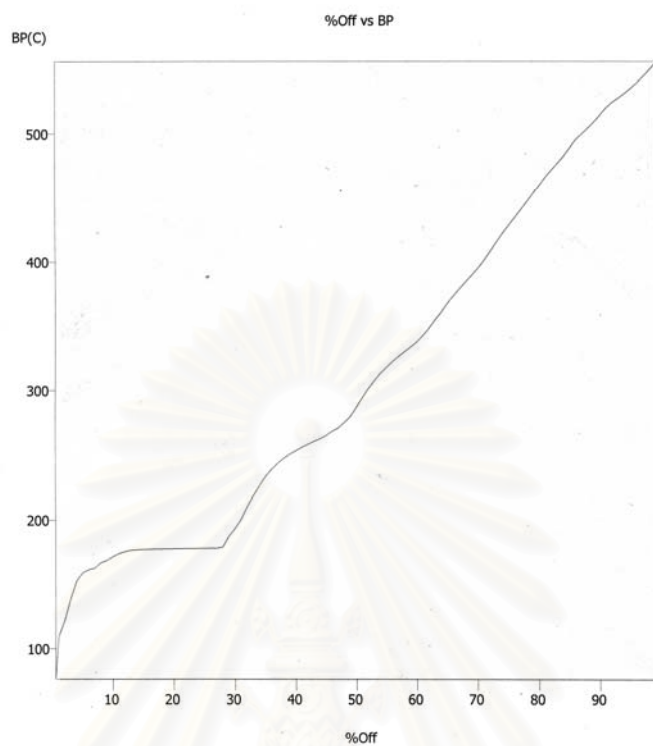
รูปที่ ค2 จุดเดือดของของเหลวที่ ยางต่อแบ่ง 8.5:1.5 350 องศาเซลเซียส 0 บาร์ 30 นาที



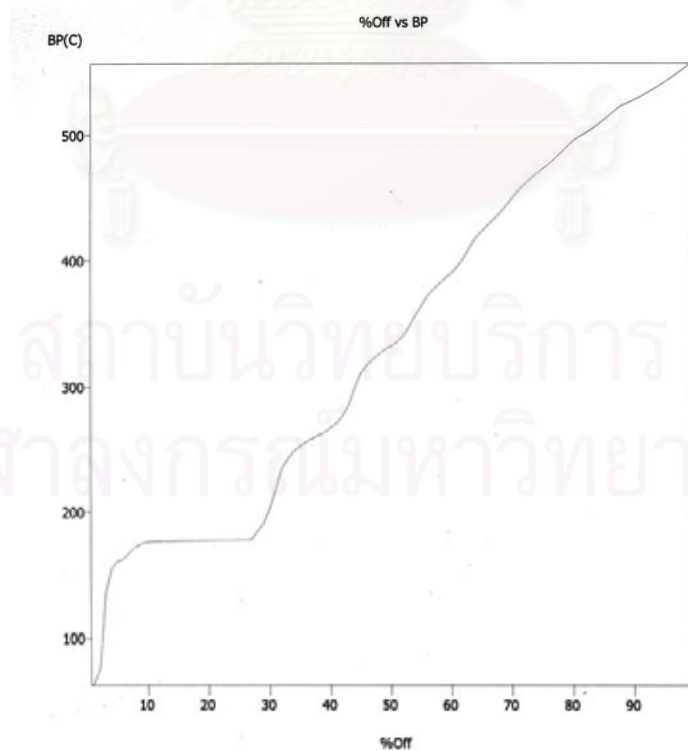
รูปที่ ค3 จุดเดือดของของเหลวที่ ยางต่อแบ่ง 9:1 350 องศาเซลเซียส 0 บาร์ 30 นาที



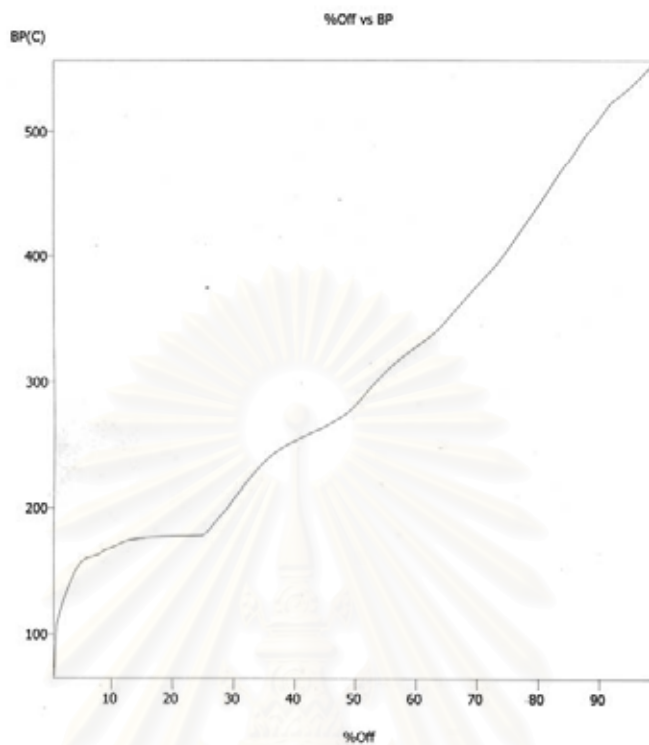
รูปที่ ค4 จุดเดือดของของเหลวที่ ยางต่อแบ่ง 9.5:0.5 350 องศาเซลเซียส 0 บาร์ 30 นาที



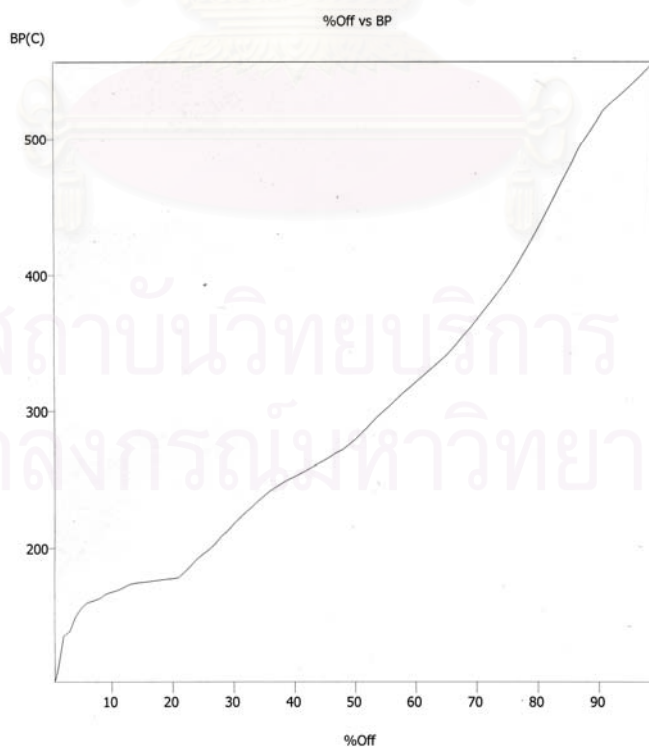
รูปที่ ค5 จุดเดือดของของเหลวที่ ยางต่อแบ่ง 10:0 350 องศาเซลเซียส 0 บาร์ 30 นาที



รูปที่ ค6 จุดเดือดของของเหลวที่ ยางต่อแบ่ง 9:1 325 องศาเซลเซียส 0 บาร์ 30 นาที



รูปที่ ค7 จุดเดือดของของเหลวที่ ยางต่อแบ่ง 9:1 375 องศาเซลเซียส 0 บาร์ 30 นาที



รูปที่ ค8 จุดเดือดของของเหลวที่ ยางต่อแบ่ง 9:1 400 องศาเซลเซียส 0 บาร์ 30 นาที

ภาคผนวก ง

การวิเคราะห์เชิงสถิติและความแปรปรวน

การวิเคราะห์เชิงสถิตินี้วางรูปแบบการทดลองเป็น 2^k factorial n replicates ค่าของตัวแปรแต่ละตัวเป็น 2 ระดับ และอยู่ภายใต้สมมุติฐานว่าตัวแปรและค่าที่ทำการวิเคราะห์มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง ซึ่งค่าที่นำมาวิเคราะห์อาจเป็นข้อมูลเชิงปริมาณหรือคุณภาพก็ได้

1. สัญลักษณ์

- . k หมายถึง จำนวนตัวแปรที่ทำการศึกษา
- . n หมายถึง จำนวนครั้งที่ทำการทดลองภาวะเดียวกัน
- . อักษรภาษาอังกฤษตัวใหญ่ เช่น A, B, C หมายถึง ตัวแปรที่ทำการศึกษา
- . อักษรภาษาอังกฤษตัวใหญ่ที่เขียนร่วมกัน เช่น AB, BC, ABD หมายถึง ปฏิสัมพันธ์ (interaction) ระหว่างตัวแปร
- . อักษรภาษาอังกฤษตัวเล็ก เช่น a, ac, abc หมายถึง ภาวะการทดลองที่ระดับต่างๆ ของตัวแปร เรียกว่า Treatment Combination
- . (1) ในกรณี Treatment Combination หมายถึง ภาวะการทดลองที่ระดับของทุกตัวแปรเป็นระดับต่ำ

งานวิจัยนี้ศึกษาอิทธิพลของตัวแปร 4 ตัว และทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง โดยกำหนดสัญลักษณ์และระดับของตัวแปรดังนี้

ตารางที่ ง1 สัญลักษณ์และระดับของตัวแปรที่ทำการศึกษา

สัญลักษณ์	ตัวแปร	ต่ำ (-)	สูง (+)
A	อัตราส่วนยาง : แป้ง (โดยน้ำหนัก)	8 : 2	9 : 1
B	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	350	400
C	ความดันคาร์บอนไดออกไซด์ (บาร์)	0	20
D	เวลาในการเกิดปฏิกิริยา (นาที)	30	60

2. สูตรการคำนวณ

- Contrast เท่ากับ ผลรวมของค่าการทดลองแต่ละ Treatment คูณกับสัมประสิทธิ์ (-1 หรือ +1) ของตัวแปรหรือปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร
- Effect Estimate $_{AB\dots K} = \frac{2}{n2^k} (\text{Contrast}_{AB\dots K})$
- Sum of Squares $_{AB\dots K} : SS_{AB\dots K} = \frac{1}{n2^k} (\text{Contrast}_{AB\dots K})^2$
- %Normal Probability = $\frac{(\text{Cumulative frequency} - 0.5) \times 100}{(\text{Total Cumulative frequency})}$
- Total of Sum Squares : SS_T เท่ากับ ผลรวมทั้งหมดของ Sum of Squares
- Sum Squares of Error : $SS_E = SS_T - \text{Sum Squares of Main Effect}$
- Mean Square = Sum of Squares / Degree of Freedom
- $F_o = \text{Mean Square of Effect} / \text{Mean Square of Error}$

3. ตัวอย่างการคำนวณ

ยกตัวอย่างการวิเคราะห์ผลของตัวแปรที่มีต่อร้อยละผลได้ของของเหลว โดยวางรูปแบบการทดลองเป็น 2^4 factorial 2 replicates ดังนั้นต้องทำการทดลองทั้งหมด 16 ภาวะการทดลอง ทำซ้ำภาวะละ 2 ครั้ง รวมเป็น 32 การทดลอง แสดงผลดังตารางที่ ง2 หลังจากนั้นนำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณค่า Contrast, Effect Estimate และ Sum of Squares แสดงผลการคำนวณดังตารางที่ ง3

ตารางที่ ง2 ภาวะของตัวแปรและร้อยละผลได้ของของเหลว

การทดลองที่	Treatment Combination	ยาง:แป้ง	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	คาร์บอนไดออกไซด์ (บาร์)	เวลา (นาที)	% ของเหลว
1	(1)	8:2	350	0	30	72.68
2						75.55
3	a	9:1	350	0	30	88.87
4						84.84
5	b	8:2	400	0	30	66.13
6						72.22
7	ab	9:1	400	0	30	66.08
8						70.01
9	c	8:2	350	20	30	77.98
10						79.02
11	ac	9:1	350	20	30	77.44
12						82.44
13	bc	8:2	400	20	30	67.25
14						67.34
15	abc	9:1	400	20	30	78.07
16						73.69
17	d	8:2	350	0	60	76.54
18						71.45
19	ad	9:1	350	0	60	77.01
20						72.38
21	bd	8:2	400	0	60	65.21
22						60.06
23	abd	9:1	400	0	60	71.28
24						68.96
25	cd	8:2	350	20	60	79.04
26						84.07
27	acd	9:1	350	20	60	86.24
28						88.68
29	bcd	8:2	400	20	60	56.76
30						62.59
31	abcd	9:1	400	20	60	84.25
32						78.41

ตารางที่ 33 การคำนวณ Contrast, Effect Estimate และ Sum of Squares ของร้อยละผลได้ของของเหลว

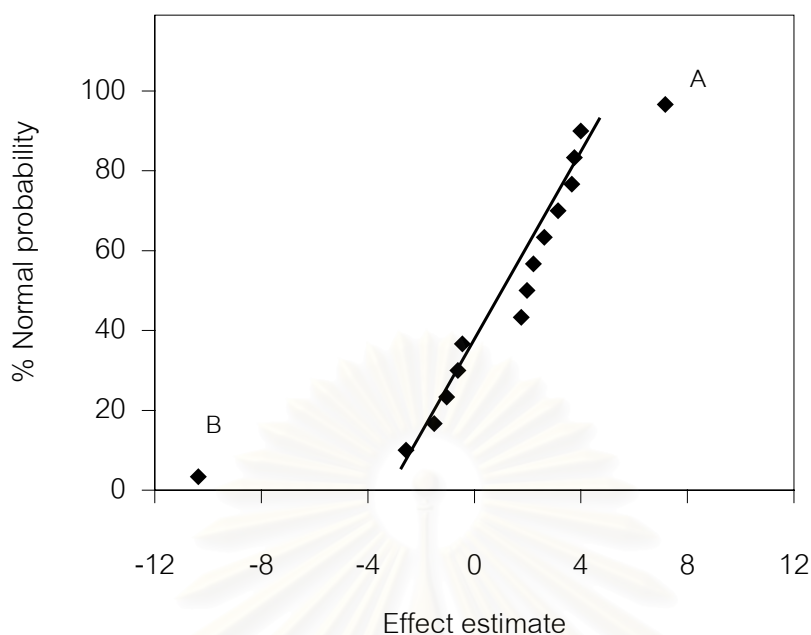
Treatment	A	B	AB	C	AC	BC	ABC	D	AD	BD	ABD	CD	ACD	BCD	ABCD	Liquid Yield	
(1)	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	72.68	75.55
a	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	88.87	84.84
b	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	66.13	72.22
ab	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	66.08	70.01
c	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	77.98	79.02
ac	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	77.44	82.44
bc	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	67.25	67.34
abc	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	78.07	73.69
d	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	76.54	71.45
ad	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	77.01	72.38
bd	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	65.21	60.06
abd	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	71.28	68.96
cd	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	79.04	84.07
acd	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	86.24	88.68
bcd	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	56.76	62.59
abcd	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	84.25	78.41
Contrast	114.77	-165.92	31.62	63.98	35.56	-7.18	59.96	-16.68	28.22	-9.86	58.53	50.28	41.92	-41.13	-24.11		
Effect estimate	7.17	-10.37	1.98	4.00	2.22	-0.45	3.75	-1.04	1.76	-0.62	3.66	3.14	2.62	-2.57	-1.51		
Sum of squares	411.62	860.25	31.25	127.93	39.52	1.61	112.36	8.70	24.89	3.04	107.05	78.99	54.93	52.86	18.17		

นำค่า Effect estimate จากคำนวณผลดังตารางที่ 3 มาเรียงจากน้อยไปมากและหาความถี่ของ Effect estimate แล้วนำไปคำนวณ %Normal Probability ได้ผลดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 การคำนวณ %Normal Probability ของตัวแปรที่มีต่อร้อยละผลได้ของของเหลว

Effect estimate	Frequency	Cumulative Frequency	%Normal Probability
-10.37	1	1	3.33
-2.57	1	2	10.00
-1.51	1	3	16.67
-1.04	1	4	23.33
-0.62	1	5	30.00
-0.45	1	6	36.67
1.76	1	7	43.33
1.98	1	8	50.00
2.22	1	9	56.67
2.62	1	10	63.33
3.14	1	11	70.00
3.66	1	12	76.67
3.75	1	13	83.33
4.00	1	14	90.00
7.17	1	15	96.67

นำค่า Effect estimate และ %Normal Probability จากตารางที่ 4 มาเขียนกราฟ ดังกราฟที่ 5 เพื่อวิเคราะห์ความเบี่ยงเบนของตัวแปร



รูปที่ ๕ Normal Probability Plot ของตัวแปรที่มีต่อร้อยละผลได้ของของเหลว

จาก Normal Probability Plot ของตัวแปรที่มีต่อร้อยละผลได้ของของเหลว พบว่าตัวแปรที่เบี่ยงเบนจากเส้นตรงคือ A และ B ซึ่งหมายถึง อัตราส่วนระหว่างยางกับแป้งมันสำปะหลังและอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาตามลำดับ จากนั้นทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรดังกล่าวด้วย *F-test* ที่ช่วงความเชื่อมั่น 95% เพื่อตรวจสอบตัวแปรที่เบี่ยงเบนจากเส้นตรงนี้ ก่อนที่จะสรุปตัวแปรที่เป็นอิทธิพลหลักเพราะบางกรณีตัวแปรเบี่ยงเบนจากเส้นตรงเล็กน้อยไม่สามารถบอกได้ชัดเจนว่าเป็นอิทธิพลหลัก ดังนั้นจึงต้องการตรวจสอบซ้ำด้วย *F-test* แสดงผลดังตารางที่ ๕

ตารางที่ ๕ ความแปรปรวนของตัวแปรหลักที่มีต่อร้อยละผลได้ของของเหลว

Source of Variation	Sum of Squares	Degrees of Freedom	Mean Square	F_0
A	411.62	1	411.62	8.09
B	860.25	1	860.25	16.91
Error	661.30	13	50.87	
Total	1933.18	15		

ค่า F วิกฤต ที่ช่วงความเชื่อมั่น 95% คือ $F_{0.05,1,13}$ มีค่าเท่ากับ 4.67 จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรหลักที่มีต่อร้อยละผลได้ของของเหลว (ตารางที่ ง5) พบว่าค่า F_0 ของอัตราส่วนระหว่างยางกับแป้งมันสำปะหลังและอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยามีค่ามากกว่า F วิกฤต จึงกล่าวได้ว่าอัตราส่วนระหว่างยางกับแป้งมันสำปะหลังและอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาเป็นตัวแปรหลักที่มีอิทธิต่อร้อยละของเหลว



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ

การวิเคราะห์เชิงสถิติและความแปรปรวนที่ภาวะกึ่งกลางของตัวแปร

เนื่องจากการวิเคราะห์เชิงสถิติด้วยรูปแบบการทดลองเป็น 2^k factorial n replicates มีสมมุติฐานว่าตัวแปรและค่าที่ทำการวิเคราะห์มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง ดังนั้นต้องทำการตรวจสอบว่าตัวแปรและค่าที่ทำการวิเคราะห์มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงตามที่ตั้งสมมุติฐานหรือไม่ ด้วยการทำการทดลองที่ภาวะกึ่งกลางของตัวแปรแล้วนำค่าที่ได้ไปวิเคราะห์เชิงสถิติและความแปรปรวน

1. สัญลักษณ์

กำหนดเช่นเดียวกับภาคผนวก ง และเพิ่มเติมสัญลักษณ์ดังนี้

- ก. n_C หมายถึง จำนวนครั้งที่ทำการทดลองภาวะกึ่งกลางของตัวแปร
- ข. n_F หมายถึง จำนวนครั้งที่ทำการทดลองภาวะ 2^k factorial n replicates
- ค. y_C หมายถึง ผลการทดลองที่ภาวะกึ่งกลางของตัวแปร
- ง. y_F หมายถึง ผลการทดลองที่ภาวะ 2^k factorial n replicates
- จ. \overline{y}_C หมายถึง ผลการทดลองเฉลี่ยที่ภาวะกึ่งกลางของตัวแปร
- ฉ. \overline{y}_F หมายถึง ผลการทดลองเฉลี่ยที่ภาวะ 2^k factorial n replicates
- ช. 0 ในกรณีของ Treatment Combination หมายถึง สัมประสิทธิ์ของภาวะกึ่งกลางของตัวแปร

2. สูตรการคำนวณ

- ก. Contrast เท่ากับ ผลรวมของค่าการทดลองแต่ละ Treatment คูณกับสัมประสิทธิ์ (-1 หรือ 0 หรือ +1) ของตัวแปรหรือปฏิสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร

$$\text{ข. } \text{Effe}_{AB\dots K} = \frac{2}{n2^k} (\text{Contrast}_{AB\dots K})$$

$$\text{ค. } \text{Sum of Squares}_{AB\dots AB\dots K} = \frac{1}{n2^k} (\text{Contrast}_{AB\dots K})^2$$

$$ง. \text{ Sum Squares of Pure quadratic } SS_{\text{Pure_quadratic}} = \frac{n_F n_C (\bar{y}_F - \bar{y}_C)^2}{n_F + n_C}$$

จ. Mean Square of Effect = Sum Squares of Effect / Degree of Freedom

$$ฉ. \text{ Mean Square of Error } MS_E = \frac{SS_E}{n_C - 1} = \frac{\sum (y_C - \bar{y}_C)^2}{n_C - 1}$$

ช. $F_0 = \text{Mean Square of Effect} / \text{Mean Square of Error}$

3. ตัวอย่างการคำนวณ

ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรกับร้อยละผลได้ของของเหลวที่ภาวะกึ่งกลางของตัวแปร ได้ผลการทดลองดังนี้

ตารางที่ ๑1 ภาวะกึ่งกลางของตัวแปรและร้อยละผลได้ของของเหลว

การทดลองที่	ยาง:แป้ง	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	คาร์บอนไดออกไซด์ (บาร์)	เวลา (นาที)	% ของเหลว
1	8.5:1.5	375	10	45	74.26
2	8.5:1.5	375	10	45	69.11
3	8.5:1.5	375	10	45	75.26
4	8.5:1.5	375	10	45	68.49

นำร้อยละผลได้ของของเหลวที่ภาวะกึ่งกลางจากตารางที่ ๑1 และร้อยละผลได้เฉลี่ยของของเหลวที่ 2^k factorial n replicates จากตารางที่ ๑2 ไปคำนวณ Contrast, Effect Estimate และ Sum of Squares ได้ผลแสดงดังตารางที่ ๑2

ตารางที่ ๑2 การคำนวณ Contrast, Effect Estimate และ Sum of Squares ของร้อยละผลได้ของของเหลว

Treatment	A	B	AB	C	AC	BC	ABC	D	AD	BD	ABD	CD	ACD	BCD	ABCD	Liquid Yield
(1)	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	74.11
a	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	86.86
b	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	69.17
ab	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	68.04
c	-1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	78.50
ac	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	79.94
bc	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	67.30
abc	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	75.88
d	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	74.00
ad	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	74.70
bd	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	62.63
abd	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	70.12
cd	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	81.55
acd	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	87.46
bcd	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	59.67
abcd	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	81.33
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	74.26
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	69.11
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	75.26
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	68.49
Contrast	57.38	-82.96	15.81	31.99	17.78	-3.59	29.98	-8.34	14.11	-4.93	29.26	25.14	20.96	-20.56	-12.06	
Effect estimate	7.17	-10.37	1.98	4.00	2.22	-0.45	3.75	-1.04	1.76	-0.62	3.66	3.14	2.62	-2.57	-1.51	
Sum of squares	205.81	430.13	15.62	63.97	19.76	0.81	56.18	4.35	12.44	1.52	53.53	39.49	27.46	26.43	9.09	

นำค่า Sum of squares ของตัวแปรจากตารางที่ ๑2 มาคำนวณความแปรปรวน แสดงดัง
ตารางที่ ๑3

ตารางที่ ๑3 ความแปรปรวนและค่า Pure quadratic ของของเหลว

Source of Variation	Sum of Squares	Degrees of Freedom	Mean Square	F _o
A	205.81	1	205.81	17.05
B	430.13	1	430.13	35.63
AB	15.62	1	15.62	1.29
C	63.97	1	63.97	5.30
AC	19.76	1	19.76	1.64
BC	0.81	1	0.81	0.07
ABC	56.18	1	56.18	4.65
D	4.35	1	4.35	0.36
AD	12.44	1	12.44	1.03
BD	1.52	1	1.52	0.13
ABD	53.53	1	53.53	4.43
CD	39.49	1	39.49	3.27
ACD	27.46	1	27.46	2.28
BCD	26.43	1	26.43	2.19
ABCD	9.09	1	9.09	0.75
Pure quadratic	22.40	1	22.40	1.86
Error	36.21	3	12.07	
Total	1025.20	19		

ค่า F วิกฤต ที่ช่วงความเชื่อมั่น 95% คือ $F_{0.05,1,3}$ มีค่าเท่ากับ 10.13 จากตารางที่ ๑3 พบว่าค่า F_0 ของ Pure quadratic มีค่าน้อยกว่า ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรกับค่าร้อยละผลได้ของของเหลวเป็นเส้นตรง และค่า F_0 ของตัวแปร A และ B ซึ่งหมายถึง อัตราส่วนระหว่างยางกับแป้งมันสำปะหลังและอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา มีค่ามากกว่าค่า F วิกฤต ดังนั้นตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อร้อยละผลได้ของของเหลว คือ อัตราส่วนระหว่างยางกับแป้งมันสำปะหลังและอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา การวิเคราะห์ความแปรปรวนด้วยวิธีนี้ได้ผลของตัวแปรที่เป็นอิทธิพลหลัก เช่นเดียวกับการวิเคราะห์จากข้อมูล 2^k factorial n replicates ดังแสดงในภาคผนวก ง



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

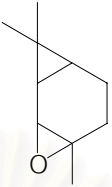
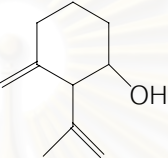
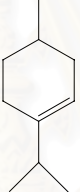
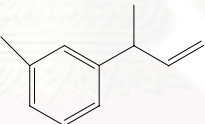
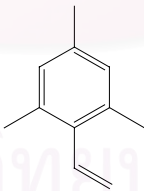
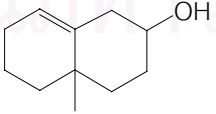
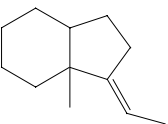
ภาคผนวก จ

โครงสร้างของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัวและเอโรแมติก

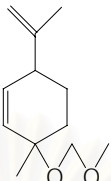
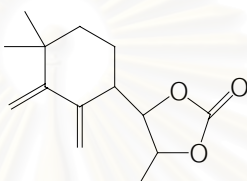
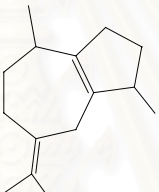
ตารางที่ จ โครงสร้างและสมบัติของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัวและเอโรแมติก

Hydrocarbon Compound	Structure	Formula	MW	CAS No.
2H-Indeno[1,2-b]oxirene, octahydro-, (1a.alpha., 1b.beta. 5a.alpha., 6a.alpha.)-		$C_9H_{14}O$	138	55402-31-8
3-Cyclohexen- 1carboxaldehyde, 3-4- dimethyl-		$C_9H_{14}O$	138	-
Benzene, 1,2,3,5-tetramethyl-		$C_{10}H_{14}$	134	527-53-7
Ocimene		$C_{10}H_{16}$	136	29714-87-2
1,5,5-Trimethyl-6-methylene- cyclohexene		$C_{10}H_{16}$	136	514-95-4
3-Methyl-trans-3a,4,7,7a- tetrahydroindan		$C_{10}H_{16}$	136	-

ตารางที่ ๑ (ต่อ) โครงสร้างและสมบัติของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัวและแอลกอฮอล์

Hydrocarbon Compound	Structure	Formula	MW	CAS No.
2,3-Epoxy-carane, (E)-		$C_{10}H_{16}O$	152	20053-58-1
o-Mentha-1(7),8-diene-3-ol		$C_{10}H_{16}O$	152	15358-81-3
Cyclohexene, 4-methyl-1-(1-methylethyl)-		$C_{10}H_{18}$	138	500-00-5
Benzene, 1-methyl-3-(1-methyl-2-propenyl)-		$C_{11}H_{14}$	146	52161-57-6
Benzene, 2-ethenyl-1,3,5-trimethyl-		$C_{11}H_{14}$	146	769-25-5
2-Naphthol, 1,2,3,4,4a,5,6,7 - octahydro-4a-methyl-		$C_{11}H_{18}O$	166	91253-94-0
1H-Indene, 1-ethylideneoctahydro-7a-methyl-, cis-		$C_{12}H_{20}$	164	56362-87-9

ตารางที่ ๑ (ต่อ) โครงสร้างและสมบัติของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัวและแอโรแมติก

Hydrocarbon Compound	Structure	Formula	MW	CAS No.
6-Isopropenyl-3-methoxy-3-methyl-cyclohexene		$C_{12}H_{20}O_2$	196	-
1,3-Dioxolan-2-one, 5-methyl-4-(4,4-dimethyl-2,3-dimethylenecyclohexyl)		$C_{14}H_{20}O_3$	236	-
Azulene, 1,2,3,4,5,6,7,8-octahydro-1,4-dimethyl-7-(1-methylethylidene)-, (1S-cis)-		$C_{15}H_{24}$	204	88-84-6

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวสุพิณ ท้าวพูนมงคล เกิดเมื่อวันที่ 12 พฤษภาคม พ.ศ. 2521 ที่จังหวัดชลบุรี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาเคมีวิศวกรรม ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2543 และเข้าศึกษาต่อหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2544



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย