



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)

ปริญญา

วิศวกรรมเคมี

สาขา

วิศวกรรมเคมี

ภาควิชา

เรื่อง การแยกโทลูอินออกจากเฮปเทนด้วยวิธีการสกัดแบบของเหลว-ของเหลวโดยใช้ช่องจุลภาค

Separation of Toluene from Heptane via Liquid-liquid Extraction by Using a Microtube

نامผู้วิจัย นายศรัณย์ ทับสงฆมรา

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์อรรถศักดิ์ จารีย์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์ศุภพัชร รอดเดชา, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์อภิญญา ดวงจันทร์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การแยกโทลูอีนออกจากเฮปเทนด้วยวิธีการสกัดแบบของเหลว-ของเหลวโดยใช้ช่องจุลภาค

Separation of Toluene from Heptane via Liquid-liquid Extraction by Using a Microtube

โดย

นายศรัณย์ ทับศฤงฆรา

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)

พ.ศ. 2557

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ศรัณย์ ทับสงฆรา 2557: การแยกโกลูอินออกจากเฮปแทนด้วยวิธีการสกัดแบบ
ของเหลว-ของเหลวโดยใช้ช่องจุลภาค ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรม
เคมี) สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
ผู้ช่วยศาสตราจารย์อรรถศักดิ์ จารีย์, Ph.D. 137 หน้า

งานวิจัยนี้ศึกษาการสกัดโกลูอินออกจากเฮปแทนด้วยวิธีการสกัดแบบของเหลว-ของเหลว
โดยใช้ช่องจุลภาค ทำการพิจารณาผลกระทบของปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การสกัดโกลูอิน
ได้แก่ เวลาในการสกัดที่ 2 ถึง 10 วินาที อุณหภูมิในการสกัดที่ 30 ถึง 60 องศาเซลเซียส และ
อัตราส่วนโดยโมลของตัวทำละลายต่อสารป้อนที่ 1 ต่อ 1 ถึง 5 ต่อ 1 โดยทำการทดลองแบบเต็ม
รูป ผลการทดลองทั้งหมดถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม MINITAB ที่ระดับความเชื่อมั่น 95
เปอร์เซ็นต์ สร้างสมการถดถอยเพื่อใช้ทำนายค่าเปอร์เซ็นต์การสกัดโกลูอิน เปรียบเทียบเวลาที่ใช้
ในการเข้าสู่สมดุลของวิธีการสกัดแบบกวนผสมแบบกะ และช่องจุลภาค ศึกษาการเพิ่มกำลังการ
ผลิตและหาค่าพลังงานที่ใช้ของการสกัดโกลูอินจากเฮปแทนด้วยช่องจุลภาค จากการทดลองพบว่
การสกัดโกลูอินออกจากเฮปแทนใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุลเพียง 2 วินาที ซึ่งเร็วกว่าการใช้วิธีกวน
ผสมแบบกะที่ใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุลประมาณ 90 ถึง 120 นาที โดยเร็วกว่าประมาณ 2700 ถึง
3600 เท่า สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการสกัดโกลูอินจากเฮปแทนคือ ที่เวลาในการสกัด 2 วินาที
อุณหภูมิในการสกัด 60 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนโดยโมลของตัวทำละลายต่อสารป้อน 5 ต่อ
1 พบว่าที่สภาวะดังกล่าวมีค่าเปอร์เซ็นต์การสกัดโกลูอินเท่ากับ 60.85 เปอร์เซ็นต์

Sarun Tubslingkra 2014: Separation of Toluene from Heptane via Liquid-liquid Extraction by Using a Microtube. Master of Engineering (Chemical Engineering), Major Field: Chemical Engineering, Department of Chemical Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Attasak Jaree, Ph.D. 137 pages.

A separation of toluene from heptane via liquid-liquid extraction was studied by using microtube. Effects of contact time (2-10 s), extraction temperature (30-60 °C) and solvent to feed molar ratio (1:1-5:1) were investigated. The experimental design was performed using full factorial experiments. The results were analyzed using MINITAB with the significance level of 95%. The regression model via full quadratic model was proposed for the prediction of percentage extraction from the specified operating conditions. We compared the equilibrium time between stirred batch reactor and microtube and scale-up of toluene extraction by using microtube. The results shown that equilibrium time of the extraction by using the microtube and stirred batch reactor was 2 and 90 to 180 minutes, respectively. The equilibrium time of the extraction by using microtube approximately 2700 to 3600 times faster than using the stirred batch reactor. The optimal operating conditions provide percentage extraction of 60.85% were as follows: the contact time of 2 s, the extraction temperature of 60 °C and the solvent to feed molar ratio of 5:1.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อรรถศักดิ์ จารีย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ให้คำปรึกษาเกี่ยวกับการทำวิทยานิพนธ์และช่วยเหลือการวางแผนงานวิจัย ตลอดจนให้คำแนะนำในการแก้ไขปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นระหว่างการทำวิทยานิพนธ์และตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ ขอขอบพระคุณ ดร. ศุภพัชร รอดเดชา ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ผู้คอยให้คำแนะนำในการวิจัย ขอขอบพระคุณ ดร.อนุสรณ์ สืบสาย ประธานการสอบ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อมราภรณ์ แก้วชะภา ผู้ทรงคุณวุฒิที่เสียสละเวลา เพื่อเป็นคณะกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ รวมถึงให้คำแนะนำและแนวคิดที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อผู้วิจัย

ขอขอบพระคุณ โครงการพัฒนาบัณฑิตและวิจัยด้านวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (ADB) ศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุ (PETROMAT) และ ดร.อริสา คำมาฟู จากบริษัท เอสซีจี เคมิคอลส์ จำกัด ที่ให้ทุนสนับสนุนและส่งเสริมการทำวิทยานิพนธ์

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณครอบครัว รุ่นพี่ รุ่นน้องและเพื่อนๆทุกคน ที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา เป็นกำลังใจ และสนับสนุนจนประสบความสำเร็จในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

ศรัณย์ ทับสงฆะรา

พฤษภาคม 2557

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(7)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	62
อุปกรณ์	62
วิธีการ	63
ผลการทดลองและวิจารณ์	72
สรุปและข้อเสนอแนะ	94
สรุป	94
ข้อเสนอแนะ	97
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	98
ภาคผนวก	105
ภาคผนวก ก ผลการทดลองการสกัดแบบของเหลว-ของเหลวโทลูอิน	106
ภาคผนวก ข การคำนวณค่าต่างๆที่ใช้ในงานวิจัย	122
ภาคผนวก ค ตัวอย่างโครมาโทแกรมของผลการทดลองที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี	131
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	137

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ตัวอย่างผลิตภัณฑ์จากวัตถุดิบปิโตรเคมี	5
2	ตัวอย่างผลิตภัณฑ์จากปิโตรเคมีขั้นต้น	8
3	ตัวอย่างผลิตภัณฑ์จากปิโตรเคมีขั้นกลาง	10
4	คุณสมบัติของสารอะโรมาติกส์	15
5	องค์ประกอบของสารป้อนเนฟทาที่มีสารอะโรมาติกส์ 10 เปอร์เซ็นต์	19
6	ค่าประมาณของค่าวิกฤติสำหรับ R_p	42
7	ค่า $\chi^2_{\alpha,df}$ ที่ระดับนัยสำคัญ และ Degree of freedom ต่างกัน	43
8	การวิเคราะห์ความแปรปรวนจำแนกทางเดียว	48
9	การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง	49
10	รูปแบบข้อมูลการทดลองที่มี 2 ปัจจัยของการออกแบบการทดลองสุ่มสมบูรณ์	50
11	รูปแบบข้อมูลสำหรับการทดลองที่มี 3 ปัจจัยออกแบบการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์	51
12	การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการทดลองแฟกทอเรียลที่มี 3 ปัจจัยของการออกแบบการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์	54
13	ตารางทดสอบความเหมาะสมของสมการต้นแบบ	57
14	การออกแบบการทดลอง	64
15	เปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอินที่สภาวะต่างกันของการสกัดด้วยช่องจุลภาค	73
16	ความแปรปรวนของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง	79
17	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมเชิงปริมาตรของช่องจุลภาคในกระบวนการต่างๆ	87
18	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมเชิงปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์อื่นๆ	87
19	เปรียบเทียบความเหมาะสมของแบบจำลองในการสร้างสมการถดถอย	88
20	วิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับสมการถดถอย	89
21	เปรียบเทียบการสกัดโทลูอินด้วยวิธีกวนผสมแบบกะและช่องจุลภาคที่อุณหภูมิในการสกัด 30 °C	90
22	ความสูงของเครื่องปฏิกรณ์ช่องจุลภาค	91

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
23	การใช้พลังงานของการสกัดโทลูอินด้วยช่องจุลภาคที่อัตราส่วน TEG ต่อสารป้อน เท่ากับ 5:1	93
ตารางผนวกที่		
ก1	สถานะในการทดลองและค่าเปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอินในการสกัดด้วยวิธีกวนผสมแบบกะ	107
ก2	สถานะในการทดลองและค่าเปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอินในการสกัดด้วยช่องจุลภาค	108
ก3	พื้นที่ได้กราฟของโทลูอินและสารมาตรฐานภายในที่สถานะต่างๆของการสกัดโทลูอินจากเฮปแทนด้วยการกวนผสมแบบกะที่อุณหภูมิ 30 °C	117
ก4	พื้นที่ได้กราฟของโทลูอินและสารมาตรฐานภายในที่สถานะต่างๆของการสกัดโทลูอินจากเฮปแทนด้วยช่องจุลภาค	119
ก5	พื้นที่ได้กราฟของโทลูอินและสารมาตรฐานภายในของสารป้อนในการสกัดโทลูอินจากเฮปแทนด้วยช่องจุลภาค	121
ข1	มวลโมเลกุลและความหนาแน่นของสาร	124
ข2	อัตราการไหลของ TEG และสารป้อน ที่เวลาในการสกัดและอัตราส่วนโดยโมลของ TEG และสารป้อนที่ต่างกัน	125
ข3	ตัวอย่างการปรับให้สอดคล้องของข้อมูล	128

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	กระบวนการแตกสลายโมเลกุลของเนฟทา	18
2	เครื่องผสม-เครื่องพักแบบกะ	22
3	(a) เครื่องผสม-เครื่องพักแบบขั้นเดียว	22
	(b) เครื่องผสม-เครื่องพักแบบ 3 ขั้น	22
4	(a) หอสกัดแบบสเปรย์แบบหัวฉีดสำหรับของเหลวที่เบากว่า	23
	(b) หอสกัดแบบสเปรย์แบบหัวฉีดสำหรับของเหลวที่หนักกว่า	23
5	คอลัมน์สำหรับการสกัดด้วยของเหลว-ของเหลว	24
6	หลักการทํางานภายในคอลัมน์ของการสกัดด้วยของเหลว-ของเหลว	25
7	การสกัดแบบขั้นเดียว	26
8	แผนภาพสามเหลี่ยมของระบบสมดุลของการสกัดแบบขั้นเดียว	28
9	แผนภาพ McCabe – Thiele ของการกระบวนการสกัด	29
10	ลักษณะการไหลของสารใน Static mixer	31
11	ชนิดของ Static mixer	32
12	ตัวช่วยผสมชนิด T	34
13	ตัวช่วยผสมชนิด Y (Monomolecular Film) (Solid Particle Film)	34
14	การติดตั้งชุดการทดลองด้วยวิธีช่องจุลภาค	66
15	การดำเนินการของข้อมูล	68
16	เปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอินต่อเวลาในการสกัดที่อัตราส่วนตัวทำละลายต่อสารป้อนที่ต่างกัน	72
17	กราฟความน่าจะเป็นของการแจกแจงแบบปกติของส่วนตกค้าง	76
18	การกระจายตัวในแผนภูมิฮีโรแกรมของส่วนตกค้าง	76
19	ความสัมพันธ์ของส่วนตกค้างและค่าประมาณบนเส้นถดถอย	77
20	ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างและลำดับการทดลอง	78
21	ผลกระทบของเวลาในการสกัดต่อเปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอิน	80
22	ผลกระทบของอัตราส่วนตัวโดยโมลของ TEG ต่อสารป้อนต่อเปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอิน	81

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
23	ผลกระทบของอุณหภูมิในการสกัดต่อเปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอิน	82
24	Contour plot ผลกระทบร่วมของเวลาในการสกัดและอุณหภูมิในการสกัดที่มีต่อเปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอิน	83
25	Contour plot ผลกระทบร่วมของอุณหภูมิในการสกัดและอัตราส่วนโดยโมลของ TEG ต่อสารป้อนที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอิน	84
26	Contour plot ผลกระทบร่วมของเวลาในการสกัดและอัตราส่วนโดยโมลของ TEG ต่อสารป้อนที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอิน	85
27	ผลของความดันและขนาดของหยดวฏภาคต่อเวลาที่อุณหภูมิต่างกันที่อัตราส่วน TEG ต่อสารป้อน 3:1	86
28	ผลของความดันต่ออัตราการไหลเชิงปริมาตรในช่องจุลภาคที่อัตราส่วน TEG ต่อสารป้อน 3:1	86
29	เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอินที่ได้จากการทดลองและจากสมการถดถอย	89
ภาพผนวกที่		
ข1	ตัวอย่างโครมาโตแกรมของสารป้อน	127
ข2	ตัวอย่างโครมาโตแกรมของวฏภาคที่ถูกสกัด	127
ข3	ตัวอย่างโครมาโตแกรมของวฏภาคที่ไม่ถูกสกัด	128
ค1	โครมาโทแกรมของสารป้อนที่ได้จากการทดลองการสกัดโทลูอินด้วยช่องจุลภาค	132
ค2	โครมาโทแกรมของสารป้อนที่ได้จากการทดลองการสกัดโทลูอินด้วยวิธีกวนผสมแบบกะ	132
ค3	โครมาโทแกรมของวฏภาคที่ถูกสกัดของการสกัดโทลูอินด้วยวิธีกวนผสมแบบกะที่สภาวะการทดลองอัตราส่วน TEG ต่อสารป้อน 5:1 เวลาในการสกัด 180 นาที และอุณหภูมิในการสกัด 30 °C	133

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ค4 โครมาโทแกรมของวัฏภาคที่ไม่ถูกสกัดของการสกัดโทลูอินด้วยวิธีกวนผสมแบบกะที่สภาวะการทดลองอัตราส่วน TEG ต่อสารป้อน 5:1 เวลาในการสกัด 2 วินาที และอุณหภูมิในการสกัด 30 °C	133
ค5 โครมาโทแกรมของวัฏภาคที่ถูกสกัดของการสกัดโทลูอินด้วยช่องจุลภาคที่สภาวะการทดลองอัตราส่วน TEG ต่อสารป้อน 1:1 เวลาในการสกัด 2 วินาที และอุณหภูมิในการสกัด 30 °C	134
ค6 โครมาโทแกรมของวัฏภาคที่ไม่ถูกสกัดของการสกัดโทลูอินด้วยช่องจุลภาคที่สภาวะการทดลองอัตราส่วน TEG ต่อสารป้อน 1:1 เวลาในการสกัด 2 วินาที และอุณหภูมิในการสกัด 30 °C	134
ค7 โครมาโทแกรมของวัฏภาคที่ถูกสกัดของการสกัดโทลูอินด้วยช่องจุลภาคที่สภาวะการทดลองอัตราส่วน TEG ต่อสารป้อน 1:1 เวลาในการสกัด 10 วินาที และอุณหภูมิในการสกัด 30 °C	135
ค8 โครมาโทแกรมของวัฏภาคที่ไม่ถูกสกัดของการสกัดโทลูอินด้วยช่องจุลภาคที่สภาวะการทดลองอัตราส่วน TEG ต่อสารป้อน 1:1 เวลาในการสกัด 10 วินาที และอุณหภูมิในการสกัด 30 °C	135
ค9 โครมาโทแกรมของวัฏภาคที่ถูกสกัดของการสกัดโทลูอินด้วยช่องจุลภาคที่สภาวะการทดลองอัตราส่วน TEG ต่อสารป้อน 5:1 เวลาในการสกัด 2 วินาที และอุณหภูมิในการสกัด 45 °C	136
ค10 โครมาโทแกรมของวัฏภาคที่ไม่ถูกสกัดของการสกัดโทลูอินด้วยช่องจุลภาคที่สภาวะการทดลองอัตราส่วน TEG ต่อสารป้อน 5:1 เวลาในการสกัด 2 วินาที และอุณหภูมิในการสกัด 45 °C	136

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ABS	= Acrylonitrile butadiene styrene
[bpy][BF ₄]	= N-butylpyridinium tetrafluoroborate
BR	= Butadiene rubber
BTX	= Benzene toluene xylene
C ₂ H ₄	= Ethene
C ₂ H ₄ O	= Ethylene oxide
C ₂ H ₆	= Ethane
C ₃ H ₆	= Propene
C ₃ H ₈	= Propane
C ₄ H ₆	= Butyne
C ₆ H ₆	= Benzene
C ₇ H ₈ (C ₆ H ₅ CH ₃)	= Toluene
C ₈ H ₈	= Styrene
C ₈ H ₁₀	= Xylene
C ₃ H ₆ O	= Acetone
HDPE	= High density polyethylene
LDPE	= Low density polyethylene
LLDPE	= Linear low density polyethylene
LLE	= Liquid liquid equilibrium
PC	= Polycarbonate
PET	= Polyethylene terephthalate
PP	= Polypropylene
PS	= Polystyrene
PVC	= Polyvinylchloride
SBR	= Styrene butadiene rubber
UNIFAC	= Uniquac Function-group Activity Coefficients
UNIQUAC	= Universal Quasichemical

การแยกโทลูอินออกจากเฮปเทนด้วยวิธีการสกัดแบบของเหลว-ของเหลวโดยใช้ช่อง

จุลภาค

Separation of Toluene from Heptane via Liquid-liquid Extraction by Using a Microtube

คำนำ

สารประกอบอะโรมาติก (Aromatic hydrocarbon) ซึ่งประกอบด้วย เบนซีน (Benzene) โทลูอิน (Toluene) เอทิลเบนซีน (Ethylbenzene) และไซลีน (Xylene) เป็นผลิตภัณฑ์ที่สำคัญของอุตสาหกรรมเคมีและปิโตรเคมี สารประกอบอะโรมาติกถูกใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น เสื้อผ้า ยา เครื่องสำอาง คอมพิวเตอร์ สี อุปกรณ์ภายในรถ อุปกรณ์กีฬา และอื่นๆ ดังนั้นการเลือกกระบวนการที่เหมาะสมสำหรับการแยกสารประกอบอะโรมาติกจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก การแยกสารในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้เยื่อเลือกผ่าน (Membrane permeation) การดูดซับ (Adsorption) การคายซับ (Desorption) การกลั่นสกัด (Extractive distillation) และการสกัด (Extraction) เป็นต้น สำหรับการสกัดสารประกอบอะโรมาติกจากสารประกอบอะลิฟาติกที่มีจุดเดือดใกล้เคียงกัน และมีสารประกอบบางตัวที่มีความเป็นอะซิโตรีป (Azeotrope) กันนั้น การเลือกกระบวนการสกัดที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารประกอบอะโรมาติกที่มีอยู่ในของผสมนั้น กล่าวคือ ถ้าสารประกอบอะโรมาติกมีความเข้มข้นประมาณ 90% โดยน้ำหนัก ควรใช้การกลั่นอะซิโตรีป (Azeotropic distillation) ถ้ามีความเข้มข้นของสารประกอบอะโรมาติกประมาณ 20-65% โดยน้ำหนัก ควรใช้การกลั่นสกัด และถ้ามีความเข้มข้นของสารประกอบอะโรมาติกประมาณ 10-25% โดยน้ำหนัก ควรใช้กระบวนการสกัดของเหลว-ของเหลว (Liquid-liquid extraction) (Weissermel, 2003)

การสกัดของเหลว-ของเหลวเป็นเทคนิคการสกัดที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี รวมถึงในการสกัดสารประกอบอะโรมาติกออกจากสารประกอบอะลิฟาติก เป็นการแยกสารประกอบที่มีความแตกต่างของคุณสมบัติทางเคมี (Chemical properties) น้อยกว่าความแตกต่างของคุณสมบัติทางกายภาพ (Physical properties) การสกัดจะเกิดขึ้นเมื่อสารละลาย (ตัวทำละลายที่หนึ่งและตัวถูกละลาย) ผสมกับกับตัวทำละลายที่สองและเกิดการสัมผัสกัน จะทำให้เกิดการถ่าย

ไอonomวลของตัวถูกละลายที่อยู่ในตัวทำละลายที่หนึ่งสู่ตัวทำละลายที่สองที่ไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน (Immiscible) กับตัวทำละลายที่หนึ่งตัวทำละลายทั่วไปที่ใช้ในการสกัดสารประกอบอะโรมาติก ได้แก่ ซัลโฟเลน (Sulfolane) (Rappel *et al.*, 2002) นอร์มอลเมทิลไพร์โรลิโดน (N-methylpyrrolidone, NMP) (Alkhalidia *et al.*, 2009) นอมอลฟอมีลมอร์โฟลีน (N-formylmorpholine, NFM) (Ko *et al.*, 2002) เอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol) (Haghnazarloo *et al.*, 2013) และไตรเอทิลีนไกลคอล (Triethylene glycol) (Salem, 1993) แต่เทคโนโลยีการสกัดในปัจจุบันยังไม่เหมาะสมสำหรับการสกัดสารประกอบอะโรมาติกที่มีความเข้มข้นของอะโรมาติกต่ำ เช่น การสกัดสารประกอบอะโรมาติกในกระบวนการแตกสลายโมเลกุลของเอทิลีน (Ethylene cracker) ที่มีความเข้มข้นของสารประกอบอะโรมาติกประมาณ 10% โดยน้ำหนัก จึงมีความจำเป็นจะต้องพัฒนาเทคนิคการสกัดสารประกอบอะโรมาติกให้เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัด ปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการสกัดคือระยะเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สมดุลของการสกัด ซึ่งขึ้นอยู่กับความสามารถ หรืออุปสรรคในการถ่ายโอนมวลสารระหว่างวัฏภาคของเหลวเป็นอย่างมาก การเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างตัวทำละลายและสารป้อน เช่น การใช้ Static mixer (Ghamem *et al.*, 2014) และการใช้ช่องจุลภาค (Microtube contactor) เป็นต้น ช่วยให้ระบบเข้าสู่สมดุลของการแยกได้เร็วขึ้น

ช่องจุลภาค เป็นเทคโนโลยีแบบใหม่สำหรับการดำเนินการทางอุตสาหกรรม โดยเป็นการย่อขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ทางกระบวนการเคมีให้มีความเหมาะสมและคุ้มค่ามากที่สุด โดยการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาค จุดเด่นของช่องจุลภาคคือ มีความสามารถในการถ่ายโอนมวลและความร้อนได้อย่างดีเยี่ยม มีขนาดเล็ก ใช้ระยะทางในการแพร่สั้น และใช้เวลาในการถ่ายโอนมวลน้อย โดยช่องจุลภาคถูกนำไปประยุกต์ใช้กับงานหลายประเภท เช่น การดูดซึม (Absorption) (Chubo *et al.*, 2012) การเติมไฮโดรเจน (Hydrogenation) (Kabayashi *et al.*, 2005) และการผลิตไบโอดีเซล (Biodiesel production) (Tanawannapong *et al.*, 2013) เป็นต้น

ในงานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวิธีการสกัดของเหลว-ของเหลวโทลูอิน (ซึ่งเป็นตัวแทนของอะโรมาติก) จากเฮปเทน (ซึ่งเป็นตัวแทนของอะลิฟาติก) ด้วยช่องจุลภาคที่มีตัวช่วยผสมแบบตัวที (T-shaped junction) ใช้ตัวทำละลายคือ ไตรเอทิลีนไกลคอล (TEG) โดยศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัด (30-60°C) เวลาในการสกัด (2-10 วินาที) และอัตราส่วนตัวทำละลายต่อสารป้อน (1:1-5:1 โดยโมล) ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการสกัดโทลูอิน และเปรียบเทียบกับวิธีการสกัดแบบดั้งเดิม คือ การกวนผสมแบบกะ

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาผลกระทบของ เวลาในการสัมผัส อัตราส่วนสารป้อนต่อตัวทำละลาย และ อุณหภูมิ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการสกัดโทลูอิน
2. ศึกษาการเพิ่มกำลังการผลิตของการสกัดโทลูอินออกจากเฮปเทนด้วยช่องจุลภาค

ขอบเขตงานวิจัย

1. ตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัดโทลูอินจากเฮปเทน คือ ไตรเอทิลีนไกลคอล
2. ศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการสกัดโทลูอินด้วยช่องจุลภาค

เวลาในการสัมผัส 2 ถึง 10 วินาที

อัตราส่วนระหว่างตัวทำละลายต่อสารป้อน 1:1 ถึง 5:1 โดยโมล

อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง 30 ถึง 60 องศาเซลเซียส

3. ตัวช่วยผสมในเครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาคชนิดตัว T (T-mixer)

การตรวจเอกสาร

โครงสร้างอุตสาหกรรมปิโตรเคมี

อุตสาหกรรมปิโตรเคมีในประเทศไทยถือกำเนิดขึ้นมาตั้งแต่ปี 2532 หลังจากได้มีการขุดพบก๊าซธรรมชาติในบริเวณอ่าวไทย และได้เริ่มมีการก่อตั้งโรงงานแยกก๊าซธรรมชาติขึ้นส่งผลให้เกิดโครงการอุตสาหกรรมปิโตรเคมีระยะที่ 1 (National Petrochemical Complex 1 : NPC 1) โดยมีบริษัท ปิโตรเคมีแห่งชาติ จำกัด (มหาชน) เป็นบริษัทที่ผลิตสารเอทิลีนจากก๊าซธรรมชาติ และหลังจากนั้นเอกชนก็ได้เข้ามาลงทุนในการผลิตเพิ่มขึ้น (สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ, 2549) ซึ่งอุตสาหกรรมที่ปิโตรเคมีมีความเชื่อมโยงกับอุตสาหกรรมอื่นมากมาย และเป็นอุตสาหกรรมที่มีมูลค่ามหาศาลโดยในปี 2556 ในช่วง 10 เดือนแรก (มกราคม ถึงตุลาคม) มีมูลค่าการส่งออกถึง 246,702.47 ล้านบาท ซึ่งเพิ่มขึ้นจากช่วงเดียวกันในปี 2555 เล็กน้อย (สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม, 2557) โดยอุตสาหกรรมปิโตรเคมีนั้นมีการแข่งขันสูงทั้งในประเทศและนานาชาติ ซึ่งประเทศไทยได้มีการพัฒนาอุตสาหกรรมต้นน้ำมาเป็นระยะเวลานาน และได้เริ่มก้าวเข้าสู่การพัฒนาอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ซึ่งผลผลิตของอุตสาหกรรมดังกล่าวเกี่ยวข้องกับชีวิตประจำวันมากมาย เช่น พลาสติก กระจก เรซิน ยางสังเคราะห์ สารเคมี ตัวทำละลาย ไฮโดรคาร์บอน และเส้นใยสังเคราะห์ เป็นต้น โครงสร้างอุตสาหกรรมปิโตรเคมีแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนการผลิตดังนี้

วัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมปิโตรเคมี (Feedstocks for Petrochemical Industry)

อุตสาหกรรมปิโตรเคมีขั้นต้น (Upstream Petrochemical Industry)

อุตสาหกรรมปิโตรเคมีขั้นกลาง (Intermediate Petrochemical Industry)

อุตสาหกรรมปิโตรเคมีขั้นปลาย (Downstream Petrochemical Industry)

1. วัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมปิโตรเคมี

วัตถุดิบตั้งต้นของอุตสาหกรรมปิโตรเคมีล้วนมาจากผลิตภัณฑ์ของอุตสาหกรรมปิโตรเลียมและการใช้งานของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเลียม โดยสามารถแบ่งตามการใช้ประโยชน์หลักๆ ได้ดังต่อไปนี้

ใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับการขับเคลื่อนยานพาหนะต่างๆ เช่น ก๊าซธรรมชาติเหลว (NGL) น้ำมันเบนซิน (Gasoline) น้ำมันดีเซล (Diesel) และน้ำมันเครื่องบิน (JET A1) เป็นต้น

ใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อเป็นแหล่งให้ความร้อน รวมถึงการใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า เช่น ก๊าซธรรมชาติ (Natural Gas) ก๊าซหุงต้มหรือก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) และน้ำมันเตา (Fuel Oil) เป็นต้น

ใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้น (Feedstocks) สำหรับอุตสาหกรรมปิโตรเคมี

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์จากวัตถุดิบปิโตรเคมีแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์จากวัตถุดิบปิโตรเคมี

ชื่อสาร	คุณสมบัติทางเคมี	การใช้ประโยชน์	เทคโนโลยีการผลิต
อีเทน	มีสูตรโมเลกุล คือ C_2H_6 อยู่ในกลุ่มของสารประกอบอัลเคน ประกอบด้วยคาร์บอน 2 โมเลกุลเชื่อมต่อกันด้วยพันธะเดี่ยว ณ อุณหภูมิห้อง ($25^{\circ}C$) และความดันบรรยากาศ เอทิลีนเป็นก๊าซ ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น โดยอีเทนจะได้อะมาจากการกระบวนการแยกก๊าซธรรมชาติ หรือเป็นผลิตภัณฑ์ผลพลอยได้จากกระบวนการกลั่นน้ำมัน	ใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตเอทิลีน ซึ่งเป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตเม็ดพลาสติกชนิดต่างๆ เช่น ถุงพลาสติก หลอดยาสีฟัน ขวดแชมพู และเส้นใยพลาสติก เป็นต้น	กระบวนการกลั่นแยกก๊าซธรรมชาติ
โพรเพน	สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีสูตรโมเลกุล คือ C_3H_8 อยู่ในกลุ่มของสารประกอบอัลเคน ประกอบด้วยคาร์บอนจำนวน 3 โมเลกุลเชื่อมต่อกันด้วยพันธะเดี่ยว ณ อุณหภูมิห้อง ($25^{\circ}C$) และความดันบรรยากาศ โพรเพนเป็นก๊าซไม่มีสี ไม่มีกลิ่น โดยโพรเพนได้อะมาจากการกลั่นแยกธรรมชาติ หรือเป็นผลิตภัณฑ์ผลพลอยได้ที่ได้อะมาจากการกลั่นน้ำมัน	1.ใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตโพรพิลีน ซึ่งใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเม็ดพลาสติกโพลิโพรพิลีนที่ใช้ผลิตเป็นผลิตภัณฑ์พลาสติกชนิดต่างๆ เช่น บรรจุภัณฑ์ต่างๆ ปลอกหุ้มสายไฟ และสายเคเบิลงานเคลือบกระดาษ วัสดุอุดรอยรั่ว กาว และอุปกรณ์ภายในรถยนต์	กระบวนการกลั่นแยกก๊าซธรรมชาติ

ตารางที่ 1 (ต่อ)

ชื่อสาร	คุณสมบัติทางเคมี	การใช้ประโยชน์	เทคโนโลยีการผลิต
		2. ใช้ผสมกับก๊าซบิวเทนในสัดส่วนโพรเพน 60% และ บิวเทน 40% เพื่อผลิตเป็นก๊าซแอลพีจีสำหรับเป็นเชื้อเพลิงในภาคครัวเรือน และอุตสาหกรรม รวมถึงเป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตโอเลฟินส์ (เอทิลีน และโพรพิลีน)	
ก๊าซปิโตร-เลียมเหลว	ก๊าซไฮโดรคาร์บอนผสมระหว่างโพรเพนกับบิวเทนในสัดส่วน 60 ต่อ 40 ตามลำดับ เป็นก๊าซ หนืดหนืดหึ่งและความดันบรรยากาศ	ใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตโอเลฟินส์ (เอทิลีน และโพรพิลีน)	กระบวนการกลั่น แยก ก๊าซธรรมชาติ
แนฟทา	สารผสมของสารประกอบอัลเคนและไซโคลอัลเคน หรือแนฟทีน ที่มีคาร์บอนอะตอมตั้งแต่ 6 ถึง 10 อะตอมของผสมของไฮโดรคาร์บอนที่ได้จากการกลั่นน้ำมันดิบ มีช่วงจุดเดือด 75-200 °C แบ่งเป็น 3 ประเภทคือ	1. ใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับภาคครัวเรือน (ก๊าซหุงต้ม) ยานพาหนะ และโรงงานอุตสาหกรรม 2. ใช้ผลิตเป็นน้ำมันเบนซิน เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในรถยนต์	กระบวนการกลั่น น้ำมัน และคอนเดนเสท
	1. ฟูลเรนจ์แนฟทา (Full range naphtha) คือ แนฟทาที่มีช่วงอุณหภูมิจุดเดือดระหว่าง 30°C ถึง 200°C ประกอบด้วยสารไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนคาร์บอนจำนวน 5 ถึง 12 อะตอมเป็นองค์ประกอบ มีสัดส่วนอยู่ในน้ำมันดิบประมาณ 15 – 30 % โดยน้ำหนัก	3. ใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตสารตั้งต้นปิโตรเคมีคือ สารโอเลฟินส์ (เอทิลีน และโพรพิลีน) และสารอะโรเมติกส์ (เบนซีน โทลูอินและไซลีน)	
	2. ไลท์ แนฟทา (Light naphtha) คือ แนฟทาที่มีช่วงอุณหภูมิจุดเดือดระหว่าง 30 °C ถึง 90 °C ประกอบไปด้วยสารไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนคาร์บอนจำนวน 5 ถึง 6 อะตอม		

ตารางที่ 1 (ต่อ)

ชื่อสาร	คุณสมบัติทางเคมี	การใช้ประโยชน์	เทคโนโลยีการผลิต
	3. เฮฟวี แนฟทา (Heavy naphtha) คือ แนฟทาที่มีช่วงอุณหภูมิจุดเดือดระหว่าง 90 °C ถึง 200°C ประกอบไปด้วยสารไฮโดรคาร์บอนที่มีจำนวนคาร์บอนจำนวน 6 ถึง 12 อะตอม เป็นองค์ประกอบ		

ที่มา: สำนักนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน (2553)

2. อุตสาหกรรมปิโตรเคมีขั้นต้น

เป็นอุตสาหกรรมเพื่อการผลิตผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีลำดับแรกที่ใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีขั้นต่อเนื่องต่อไป อุตสาหกรรมกลุ่มนี้มีผลิตภัณฑ์หลักอยู่ 7 ตัว (The Seven Sisters) สามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่มตามโครงสร้างพื้นฐานของโมเลกุลที่ต่างกันดังนี้

- กลุ่มอัลเคน (Alkane Group) สารตัวสำคัญ มีเทน (Methane)
- กลุ่มโอเลฟินส์ (Olefins Group) ประกอบด้วย เอทิลีน (Ethylene) โพรพิลีน (Propylene) มิทซ์ซีลี (Mixed C4)
- กลุ่มอะโรมาติกส์ (Aromatics Group) ประกอบด้วย เบนซีน (Benzene) โทลูอิน (Toluene) และไซลีน (Xylene)

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์จากปิโตรเคมีขั้นต้นแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์จากปิโตรเคมีขั้นต้น

ชื่อสาร	คุณสมบัติทางเคมี	การใช้ประโยชน์	เทคโนโลยีการผลิต
เอทิลีน	สารไฮโดรคาร์บอนชนิดไม่อิ่มตัว มีคาร์บอนจำนวน 2 โมเลกุลเชื่อมต่อกันโดยพันธะคู่ มีสูตรโมเลกุลคือ C_2H_4 เป็นก๊าซไม่มีสี หนักกว่าอากาศ (25°C) สามารถละลายในน้ำและแอลกอฮอล์ได้เพียงเล็กน้อย มีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยากับสารอื่นๆ เช่น น้ำ และคลอรีนผลิตได้จากกระบวนการแตกตัว (Cracking) โดยใช้ไธเทน หรือสารไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ เช่น โพรเพน แอลพีจี แนฟทา เป็นวัตถุดิบ	ใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตเม็ดพลาสติก โพลีเอทิลีน แบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง ใช้ผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกต่างๆ ได้แก่ ถังพลาสติก ฟิล์มพลาสติก ห่อหุ้มสายไฟและแผ่นฟิล์มปูกันบ่อ เป็นต้น และ โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ใช้ผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกต่างๆ ได้แก่ ฟิล์มพลาสติกสำหรับห่อหุ้มอาหาร ฟิล์มหดรัด ฟิล์มท่อของ กระสอบและถังบรรจุของหนัก แผ่นบุถัง ถังใส่ของ ของเล่นพลาสติก ห่อหุ้มสายไฟฟ้า และสายเคเบิล เป็นต้น	กระบวนการแตกสลายโมเลกุลด้วยไอน้ำ (Steam cracking)
โพรพิลีน	สารไฮโดรคาร์บอนชนิดไม่อิ่มตัว มีคาร์บอนจำนวน 3 โมเลกุลเชื่อมต่อกันโดยพันธะคู่ มีสูตรโมเลกุลคือ C_3H_6 ลักษณะทางกายภาพเป็นก๊าซไม่มีสี หนักกว่าอากาศ (25°C) สามารถละลายในน้ำและแอลกอฮอล์ได้เพียงเล็กน้อย มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยากับสารต่างๆ เช่น ออกซิเจนในอากาศผลิตได้จากกระบวนการแตกตัว (Cracking) โดยใช้สารประกอบไฮโดรคาร์บอน เช่น แอลพีจี หรือ แนฟทา เป็นวัตถุดิบ	1. ผลิตเม็ดพลาสติกโพลีโพรพิลีน ใช้ผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติกต่างๆ ได้แก่ บรรจุภัณฑ์ต่างๆ ปลูกหุ้มสายไฟและสายเคเบิล งานเคลือบกระดาษ วัสดุอุดรอยรั่ว กาวและอุปกรณ์ภายในรถยนต์ เป็นต้น 2. เป็นวัตถุดิบตั้งต้นสำหรับผลิตสารเคมีภัณฑ์ประเภทต่างๆ เช่น โพรพิลีนออกไซด์ อะครีโลไนไตรล์ และคิวมิน เป็นต้น	กระบวนการแตกสลายโมเลกุลด้วยไอน้ำ และกระบวนการแตกสลายโมเลกุลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic cracking)

ตารางที่ 2 (ต่อ)

ชื่อสาร	คุณสมบัติทางเคมี	การใช้ประโยชน์	เทคโนโลยีการผลิต
มิกซ์ซีโพร	สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีองค์ประกอบหลัก ได้แก่ บิวเทน บิวทีน บิวทาไดอิน และไอโซบิวทีน รวมถึงสิ่งเจือปนอื่นๆ ได้แก่ ไพแก๊ส เทลก๊าซแครกเกอร์บอททอม (Tail gas cracker bottoms) และไฮโดรเจน เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ที่ได้จากกระบวนการผลิตเอทิลีนและโพรพิลีน	หลังจากการแยก บิวเทน บิวทีน บิวทาไดอิน และไอโซบิวทีน ออกจากกัน แล้ว สารแต่ละชนิดสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เช่น บิวเทน ใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับจุดบุหรี่ เตาย่าง เตาผิง และอื่นๆ และใช้ผสมกับโพรเพนในสัดส่วนที่เหมาะสม 30:70 หรือ 40:60 เพื่อใช้เป็นแก๊สหุงต้ม หรือแก๊สแอลพีจี เป็นต้น	กระบวนการแตกกลุ่ตลข
บิวทาไดอิน	สารไฮโดรคาร์บอนชนิดไม่อิ่มตัว มีคาร์บอนจำนวน 4 โมเลกุล เชื่อมต่อกัน โดยพันธะคู่ จำนวน 2 พันธะ มีสูตรโมเลกุลคือ C_4H_6 เป็นก๊าซไม่มีสี มีกลิ่นอ่อนๆ คล้ายน้ำมันเบนซิน หนา อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ ($25^{\circ}C$) การเก็บรักษาจะอยู่ในสถานะของเหลวโดยการลดอุณหภูมิ และเพิ่มความดัน บิวทาไดอินเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแยกสารผสมมิกซ์ซีโพร	1. วัตถุประสงค์ในการผลิตยางบียาร์ ยางสไตรีน-บิวทาไดอินสำหรับผลิตยางรถยนต์ สไตรีน-บิวทาไดอินลาเท็กซ์สำหรับผลิตแผ่นรองพรม และพลาสติกอะครีโลไนไตรล์-บิวทาไดอิน-สไตรีน 2. ใช้เป็นวัตถุประสงค์ในการผลิตสารเคมี ได้แก่ เฮกซามิไธลินไดเอมีนสำหรับผลิตไนลอน 6,6	กระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลาย

ที่มา: สำนักนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน (2553)

3. อุตสาหกรรมปิโตรเคมีขั้นกลาง (Intermediate Petrochemical Industry)

เป็นอุตสาหกรรมที่ใช้ผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีขั้นต้นเป็นวัตถุดิบในการผลิต เพื่อป้อนให้กับอุตสาหกรรมขั้นปลาย โดยแบ่งผลิตภัณฑ์ได้ตามสายของปิโตรเคมีขั้นต้น ดังนี้

ผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีขั้นกลางสายอัลเคน (Alkane Intermediates)

ผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีขั้นกลางสายโอเลฟินส์ (Olefin Intermediates)

ผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีขั้นกลางสายอะโรมาติกส์ (Aromatic Intermediates)

โดยผลิตภัณฑ์จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีขั้นกลางเหล่านี้จะถูกนำไปใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมปิโตรเคมีขั้นปลายต่อไป

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์จากปิโตรเคมีขั้นกลางแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์จากปิโตรเคมีขั้นกลาง

ชื่อสาร	คุณสมบัติทางเคมี	การใช้ประโยชน์	เทคโนโลยีการผลิต
เอทิลีน ออกไซด์	สารประกอบไฮโดรคาร์บอน ชนิดวงแหวน มีสูตรโมเลกุล คือ C_2H_4O ลักษณะโครงสร้าง เป็นวงแหวนสามเหลี่ยม ณ อุณหภูมิห้องและความดัน บรรยากาศ ($25^{\circ}C$) มีสถานะ เป็นก๊าซ ไม่มีสี ติดไฟง่าย ว่องไวต่อการเกิด ปฏิกิริยา	1. ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตสารเคมีต่างๆ ได้แก่ เอทิลีนไกลคอล เอทอกซิเลตและไกล คอลอีเทอร์ เป็นต้น 2. ใช้เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้แก่ น้ำยาฆ่าเชื้อ และน้ำยาอบฆ่าเชื้อรา	ปฏิกิริยาออกซิเด- ชันระหว่างเอธิ- ลีน และออกซิเจน ในสภาวะที่มีตัว เร่งปฏิกิริยา ได้แก่ โลหะเงินบนตัว รองรับอะลูมินา
สไตรีน	สารประกอบไฮโดรคาร์บอน ชนิดอะโรมาติกส์ มีสูตร โมเลกุลคือ C_8H_8 ณ อุณหภูมิห้องและความดัน บรรยากาศ ($25^{\circ}C$) เป็น ของเหลวใส ไม่มีสี มีกลิ่นฉุน ระเหยได้ง่าย	ใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตเม็ดพลาสติกโ ลีสไตรีน ได้แก่ โพลีสไตรีนสำหรับงาน ทั่วไป โพลีสไตรีนชนิดทนแรงกระแทกสูง และโพลีสไตรีนชนิดพองตัว รวมถึงใช้เป็น วัตถุดิบสำหรับผลิตยางสังเคราะห์สไตรีน- บิวทาไดอีน และพลาสติกอะครีโลไนไตรล์- บิวทาไดอีน-สไตรีน	ปฏิกิริยาการจัด ไฮโดรเจนออกจาก สารตั้งต้นเอทิลเบน ซีนที่ผลิตได้จาก ปฏิกิริยาระหว่าง เบนซีนและเอทิลีน
อะซิโตน	สารประกอบไฮโดรคาร์บอน มีสูตรโมเลกุลคือ C_3H_6O ณ อุณหภูมิห้องและความดัน	1. ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเมทิลเมทาคริ เลต (Methylmethacrylate) และเมทิลอะครี เลต (Methylacrylate) บิสฟีนอลเอ เป็นต้น	-

ตารางที่ 3 (ต่อ)

ชื่อสาร	คุณสมบัติทางเคมี	การใช้ประโยชน์	เทคโนโลยีการผลิต
	บรรยากาศ (25°C) เป็นของเหลวใส ไม่มีสี ติดไฟได้ง่าย	2. ใช้เป็นตัวทำละลาย ใช้ในงานทำความสะอาดและงานที่ต้องการทำให้แห้งเร็ว โดยผลิตภัณฑ์ที่มีอะซิโตนเป็นส่วนผสม ได้แก่ น้ำยาทาเล็บ ปากกามาร์กเกอร์ สีเพนต์ วาร์นิช และแล็กเกอร์ เป็นต้น	

ที่มา: สำนักนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน (2553)

4. อุตสาหกรรมปิโตรเคมีขั้นปลาย

เป็นอุตสาหกรรมที่ใช้ผลิตภัณฑ์จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมีขั้นต้น หรือขั้นกลางมาเป็นวัตถุดิบเพื่อผลิตผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้ายก่อนที่จะนำไปแปรรูปในอุตสาหกรรมต่อเนื่อง อุตสาหกรรมปิโตรเคมีขั้นปลายสามารถแบ่งเป็นกลุ่มหลักๆตามลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ได้ดังนี้

4.1 กลุ่มพลาสติก (Plastic Resins)

โดยประกอบด้วยพลาสติก 4 กลุ่มย่อย ดังนี้

4.1.1 พลาสติกที่ใช้งานทั่วไป (Commodity Plastics)

เป็นพลาสติกที่มีคุณสมบัติแปรรูปได้หลากหลาย สามารถตอบสนองความต้องการพื้นฐานของมนุษย์มากมาย มีราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับพลาสติกสำหรับงานวิศวกรรม มีปริมาณความต้องการใช้สูง พลาสติกชนิดนี้ ได้แก่ โพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE) โพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE) โพลีไวนิลคลอไรด์ (PVC) เป็นต้น

ไรรด์ (PVC) โพลีโพรพิลีน (PP) และโพลิสไตรีน (PS) เป็นต้น ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากพลาสติกที่ใช้กันทั่วไป ดังนี้

- โพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ ใช้ทำถุงเย็นหรือซองใส่อาหาร
- โพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น ใช้บรรจุอาหารแช่เย็น
- โพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง ใช้ทำถุงหิ้วทั่วไป ลัง หรือตะกร้า
- โพลีไวนิลคลอไรด์ ใช้ทำท่อสำหรับร้อยสายไฟฟ้า อ่างน้ำ ถังบรรจุโลหิต หม้อเบาะรถยนต์ และเครื่องปรับอากาศ เป็นต้น
- โพลีโพรพิลีน ใช้ทำกล่องเครื่องมือ กระเป๋า ปกแฟ้มเอกสาร ขวดใส่สารเคมี
- กระจ็องน้ำมันเครื่อง และกระจ็องสบัข้าว เป็นต้น

4.1.2 พลาสติกสำหรับงานวิศวกรรม (Engineering Plastics)

เป็นพลาสติกที่ใช้ในงานวิศวกรรมที่ต้องการคุณสมบัติพิเศษ สามารถใช้ทดแทนโลหะในงานวิศวกรรม เช่น เฟืองชิ้นส่วนรถยนต์ ชิ้นส่วนคอมพิวเตอร์ เป็นต้น ตัวอย่างพลาสติกประเภทนี้ได้แก่ ไนลอน (Nylon) โพลีคาร์บอเนต (PC) โพลีอะซีทัล (Polyacetal) อะครีโลไนไตรล-บิวทาไดอีน-สไตรีน (ABS) และโพลีเอทิลีนเทเรฟทาเลต (PET) เป็นต้น ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากพลาสติกสำหรับงานวิศวกรรม ดังนี้

- ไนลอน ใช้เป็นส่วนประกอบของเครื่องจักรและอุปกรณ์แปรรูปอาหาร
- โพลีคาร์บอเนต ใช้ทำผนัง หลังคา กันสาด และงานตกแต่งภายใน เป็นต้น
- โพลีอะซีทัล ใช้ทำชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ยานยนต์ และชิ้นส่วนในงานอุตสาหกรรมต่างๆที่มีการเคลื่อนไหว และการเสียดทาน เช่น เฟือง ชีป ลูกกลิ้ง และคานูเรเตอร์เกียร์ เป็นต้น

4.1.3 พลาสติกที่มีคุณสมบัติพิเศษ (High Performance Plastics)

เป็นพลาสติกที่มีคุณสมบัติพิเศษสำหรับใช้งานเฉพาะทางเช่น ทนความร้อน ทนกรด ทนด่าง ลื่น ไม่ติดง่าย เป็นต้น พลาสติกประเภทนี้มีราคาสูงมากตามคุณสมบัติพิเศษแต่ละชนิด ตัวอย่างพลาสติกประเภทนี้ได้แก่ โพลีเตตราฟลูออโรเอทิลีน (Polytetrafluoroethylene หรือ Teflon) โพลี-อีเทอร์ อีเทอร์ คีโตน (Poly Ether Ether Ketone - PEEK) โพลีอีเทอร์ซัลโฟน

(Polyethersulfone - PES) พลาสติกเหล่านี้ ยังมีปริมาณการใช้ไม่มากนักและต้องใช้เทคโนโลยีขั้นสูงในการผลิต

4.2 กลุ่มเส้นใยสังเคราะห์ (Synthetic Fibres)

เป็นวัสดุเส้นใยสังเคราะห์ที่ผลิตขึ้นเพื่อใช้ทดแทนการบริโภคเส้นใยธรรมชาติ เช่น ฝ้ายขนสัตว์ ป่าน ปอ เพื่อนำไปผลิตเป็นผลิตภัณฑ์สิ่งทอ ผ้า เสื้อผ้า และเครื่องนุ่งห่ม อีกทั้งยังสามารถปรับปรุงให้มีคุณสมบัติเพื่อเลียนแบบ หรือให้แตกต่างจากเส้นใยธรรมชาติก็ได้ ตัวอย่างเส้นใยสังเคราะห์ที่มีการนำมาใช้ทดแทนเส้นใยธรรมชาติ ได้แก่ เส้นใยโพลีเอสเตอร์ ใช้ทดแทนไหม เส้นใยอะคริลิกใช้ทดแทนขนสัตว์ เส้นใยสังเคราะห์สามารถนำไปใช้งานโดยลำพังหรือผสมกับเส้นใยสังเคราะห์ชนิดอื่น หรือผสมกับเส้นใยธรรมชาติ เพื่อการใช้งานที่เหมาะสมกับความต้องการที่หลากหลาย

4.3 กลุ่มยางสังเคราะห์ (Synthetic Rubbers, Elastomers)

เป็นวัสดุที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อให้มีคุณสมบัติใกล้เคียงหรือดีกว่ายางธรรมชาติ โดยให้ความยืดหยุ่นคล้ายยางธรรมชาติ แต่มีความคงทนต่อการใช้งานมากกว่า ยางสังเคราะห์มีบทบาทสำคัญต่อธุรกิจยานยนต์ โดยใช้เป็นวัสดุทดแทนยางธรรมชาติได้เป็นอย่างดี ยางสังเคราะห์มีหลายประเภท เช่น ยางบิวทาไดอิน (BR) ยางสไตรีนบิวทาไดอิน (SBR) ยางบิวทิล (Butyl Rubber) ยางไนทริล (Nitrile Rubber) และยางอีพิดีเอ็ม (Ethylene Propylene Diene Elastomer Rubber - EPDM) เป็นต้น ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกลุ่มยางสังเคราะห์ ดังนี้

- ยางบิวทาไดอิน ใช้ทำใส่ในลูกกอล์ฟ หรือลูกฟุตบอล
- ยางสไตรีนบิวทาไดอิน (SBR) ใช้ทำสายพานลำเลียง ท่อยาง พื้นรองเท้า ฉนวนหุ้มสายไฟ ผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ เป็นต้น
- ยางบิวทิล ใช้ในการผลิตยางในรถยนต์ หรือเคลือบผนังด้านในของยางเรเดียล ใช้ทำถุงยางลมสำหรับบอบยางล้อให้คงรูปในอุตสาหกรรมผลิตยางรถยนต์ เป็นต้น
- ยางไนทริล ใช้ในการบุภายในของแท็งก์และท่อ เป็นต้น
- ยางอีพิดีเอ็ม ใช้ในการผลิตยางชิ้นส่วนรถยนต์ ยางขอบประตู แก้มยางรถยนต์ และท่อของหม้อน้ำรถยนต์ เป็นต้น

4.4 กลุ่มสารเคลือบผิวและผลิตภัณฑ์ กาว (Synthetic Coating and Adhesive Materials)

เป็นผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีเพื่อการเคลือบผิววัสดุให้แข็งแรง คงทน และสวยงาม เช่น โพลียูรีเทน (PU) อีพอกซี (Epoxy Resins) เป็นต้น ส่วนผลิตภัณฑ์กาว เช่น ฟีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์ (Phenol-Formaldehyde) โพลีไวนิลอะซิเตต (Poly Vinyl Acetate - PVAc) กาวอีพอกซี (Epoxy) เป็นต้น (สำนักงานสรรพสามิตพื้นที่ระยอง 1, 2557)

อะโรมาติก

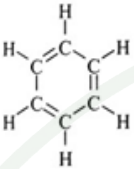
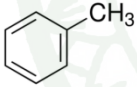
อะโรมาติกส์ เป็นชื่อเรียกโดยรวมของกลุ่มสารไฮโดรคาร์บอนหลายชนิด ที่มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นรูปวงแหวน สารประกอบที่สำคัญในกลุ่มนี้ได้แก่ เบนซีน โทลูอิน และไซลีน ซึ่งมักเรียกรวมกันว่า BTX สารประกอบอะโรมาติกส์ไฮโดรคาร์บอนเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัวประเภทหนึ่ง มีโครงสร้างหลักเป็นวงเบนซีน ภายในวงเบนซีนจะมีคาร์บอนอะตอมต่อกันเป็นวง โดยมีพันธะเดี่ยวและพันธะคู่ต่อกันเป็นวง 6 อะตอมสลับกันไป โดยคุณสมบัติของสารอะโรมาติกส์แต่ละชนิดแสดงในตารางที่ 4

1. สารประกอบอะโรมาติก

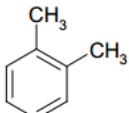
สมบัติทางกายภาพของอะโรมาติกส์

1. เป็นสารประกอบที่มีกลิ่นเฉพาะตัว
2. เป็นโมเลกุลโคเวเลนต์ไม่มีขั้ว ดังนั้นจึงไม่มีคุณสมบัติในการละลาย แต่จะละลายได้ดีในตัวทำละลายไม่มีขั้ว เช่น คาร์บอนเตตระคลอไรด์อีเทอร์ เป็นต้น
3. มีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ
4. จุดเดือดและจุดหลอมเหลวเพิ่มขึ้นตามขนาดของโมเลกุลที่ใหญ่ขึ้น
5. เป็นสารประกอบไม่อิ่มตัว มีพันธะคู่มาก เมื่อเผาไฟจึงมีเขม่ามาก

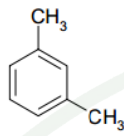
ตารางที่ 4 คุณสมบัติของสารอะโรมาติกส์

ชื่อสาร	โครงสร้าง	คุณสมบัติทางเคมี	การใช้ประโยชน์	เทคโนโลยีการผลิต
เบนซีน		สารไฮโดรคาร์บอนชนิดวงแหวนไม่อิ่มตัว ชนิดอะโรมาติกส์ ประกอบด้วยคาร์บอนอะตอมต่อกันเป็นวง 6 อะตอมเชื่อมต่อกันโดยพันธะคู่ จำนวน 3 พันธะมีสูตรโมเลกุลคือ C_6H_6 พันธะแต่ละพันธะมีความยาวเท่ากัน เนื่องจากอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปมาภายในวงเบนซีน เบนซีนจึงมีโครงสร้างเป็นเรโซแนนซ์อันอุดมภูมิห้องและความดันบรรยากาศ ($25^{\circ}C$) เป็นของเหลวใสไม่มีสี มีกลิ่นอ่อนๆ คล้ายน้ำมันเบนซิน ติดไฟได้	1. เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตสารเคมีต่างๆ เช่น สไตรีน ฟีนอล เอทิลเบนซีน และไซโครเฮกเซน 2. ใช้เป็นสารเติมแต่งเพื่อเพิ่มค่าออกเทนในน้ำมัน	กระบวนการกลั่นน้ำมัน หรือกระบวนการเคมีโดยอาศัยปฏิกิริยาต่างๆ เช่น กระบวนการเปลี่ยนรูปโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา
โทลูอิน		โทลูอิน (C_7H_8 ($C_6H_5CH_3$)) หรือที่รู้จักกันในชื่อ เมทิลเบนซีน หรือ ฟีนิลมีเทน มีคาร์บอนจำนวน 6 โมเลกุลเชื่อมต่อกันโดยพันธะคู่จำนวน 3 พันธะ โดยมีหมู่เมทิล (CH_3 group) 1 หมู่เชื่อมเข้ากับวงแหวน โดยมีสูตรโมเลกุล คือ C_7H_8 ลักษณะทางกายภาพ อันอุดมภูมิห้องและความดันบรรยากาศ ($25^{\circ}C$) เป็นของเหลวใสไม่มีสี ไม่ละลายน้ำ มีกลิ่นคล้ายทินเนอร์ มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 92.14 กรัม/โมล จุดหลอมเหลว เท่ากับ $6^{\circ}C$ จุดเดือดเท่ากับ $111^{\circ}C$ องศาเซลเซียส และมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 0.867 กรัม/มิลลิลิตร	1. ใช้ผสมกับน้ำมันเบนซีนเพื่อเพิ่มค่าออกเทน 2. ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเบนซีน ฟีนอล มิกซ์ไซลีน คาโปแลคตัม โทลูอิน ไดไอโซไซยานาต เบนโซอิกแอซิด เบนซิลคลอไรด์ และโทลูอินซัลโฟเนต	กระบวนการกลั่นน้ำมัน หรือกระบวนการแตกตัวเพื่อผลิตโอเลฟินส์

ตารางที่ 4 (ต่อ)

ชื่อสาร	โครงสร้าง	คุณสมบัติทางเคมี	การใช้ประโยชน์	เทคโนโลยีการผลิต
มิกซ์ไซลีน	-	สารผสมของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนวงแหวนไม่อิ่มตัวชนิดอะโรมาติกสลับเบนซีน มีคาร์บอนจำนวน 6 โมเลกุลเชื่อมต่อกันโดยพันธะคู่จำนวน 3 พันธะ โดยมีหมู่เมทิล	ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตสารขึ้นกลางสำหรับอุตสาหกรรมยา สี ย้อม และยาฆ่าแมลง และเป็นตัวทำละลาย	-
พาราไซลีน		สารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดไซลีน มีสูตรโมเลกุลคือ C_8H_{10} มีตำแหน่งของหมู่แอลคิลทั้ง 2 หมู่อยู่ในตำแหน่งตรงข้ามกันบนวงแหวนเบนซีน (เรียกตำแหน่งนี้ว่า พารา หรือ para) โดยที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ ($25^{\circ}C$) เป็นของเหลวใส ไม่มีสี ไม่ละลายน้ำ ติดไฟได้ง่าย	1. ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตกรดเทรฟทา ลิกบิริสุทธิ สำหรับผลิตเส้นใยโพลีเอสเตอร์เรซิน และแผ่นฟิล์ม ผลิตไดเมทิลเทรฟทาเลท 2. ใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์วิตามิน และยารวมถึงใช้เป็นตัวทำละลาย	กระบวนการแลกเปลี่ยนรูปโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา โดยมีออร์โทไซลีน เมตาไซลีน หรือเอทิลเบนซีนเป็นวัตถุดิบตั้งต้น
ออร์โทไซลีน		สารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดไซลีน มีสูตรโมเลกุลคือ C_8H_{10} มีตำแหน่งของหมู่แอลคิลทั้ง 2 หมู่อยู่ในตำแหน่งติดกันในวงแหวนเบนซีน ซึ่งที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ ($25^{\circ}C$) เป็นของเหลวใส ไม่มีสี ไม่ละลายน้ำ ติดไฟได้ง่าย	ใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตสารฟลา-ทาลิก แอนไฮไดรด์ ซึ่งเป็นวัตถุดิบตั้งต้นสำหรับผลิตสารพลาสติกไซเซอร์	กระบวนการกลั่นแยกมิกซ์ไซลีนโดยใช้ความแตกต่างของจุดเดือด

ตารางที่ 4 (ต่อ)

ชื่อสาร	โครงสร้าง	คุณสมบัติทางเคมี	การใช้ประโยชน์	เทคโนโลยีการผลิต
เมทาไซลีน		สารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดไซลีน มีสูตรโมเลกุลคือ C_8H_{10} มีตำแหน่งของหมู่แอลคิลอยู่บนวงแหวนเบนซีนในตำแหน่งที่ 1 และตำแหน่งที่ 3 (เรียกตำแหน่งนี้ว่า เมทา หรือ meta) แสดงดัชนีภาพที่ 5 โดยที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ ($25^{\circ}C$) เป็นของเหลวใส ไม่มีสี ไม่ละลายน้ำ ดัดไฟได้ง่าย	ใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตกรดไอโซฟาลิก ซึ่งใช้เป็นสารที่เติมลงไป ในโพลีเอทิลีนเทรฟทาเลท เพื่อช่วยให้มีความยืดหยุ่นมากขึ้น	กระบวนการกลั่นแยกมิกซ์ไซลีนโดยใช้ความแตกต่างของจุดเดือด

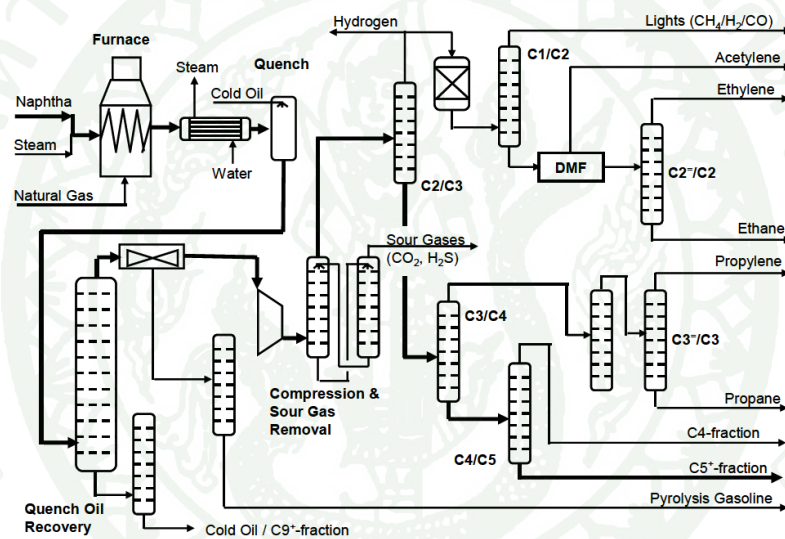
ที่มา: สำนักนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน (2553)

โดยทั่วไป วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต BTX แบ่งเป็นสองสายใหญ่ๆ คือ จากทาร์ และจากปิโตรเลียม ถ้าใช้ทาร์เป็นวัตถุดิบ จะได้เบนซีนเป็นผลพลอยได้ (By-product) จากกระบวนการผลิตถ่านโค้กด้วยคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) ส่วนถ้าใช้ปิโตรเลียมเป็นวัตถุดิบสามารถใช้วิธีการสกัด BTX ออกมาจากก๊าซไซลีนดิบ (Cracked gasoline) หรือน้ำมันปรับปรุงคุณภาพ (Reformate) แก๊สไซลีนดิบนี้ได้จากกระบวนการแตกสลายแนฟทา เพื่อเปลี่ยนการจัดเรียงโมเลกุลของไฮโดรคาร์บอนในแนฟทาไปเป็นอะโรมาติกส์

2. กระบวนการแยกสารอะโรมาติกส์ออกจากแนฟทา

โลหะหนักที่ปนเปื้อนในสารป้อนจะต้องถูกกำจัดโดยกระบวนการเติมไฮโดรเจน (Hydrogenated) และตัวคัดกรองระดับโมเลกุล (Molecular sieve) ก่อนป้อนเข้าสู่กระบวนการแตกสลายโมเลกุลของแนฟทา (Naphtha cracker) ดังแสดงในภาพที่ 1 เมื่อนำเข้าสู่เตาเผาที่อุณหภูมิประมาณ 850-900 องศาเซลเซียส จะทำให้อะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน (Aliphatic Hydrocarbon) เปลี่ยนเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กลง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เอทิลีนและโพรพิลีน หลังจากออกจาก

เตาเผา ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะถูกทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็วโดย Quench exchanger เพื่อส่งผลิตภัณฑ์ไปทำการแยกในเครื่อง Compression & Sour Gas Removal โดยจะทำการแยกสิ่งเจือปน เช่น ก๊าซธรรมชาติที่มีกำมะถันเจือปนสูง (Sour Gas) และคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากผลิตภัณฑ์ หลังจากนั้นจะป้อนเข้าสู่หอดูดซับ (Stripper) เพื่อแยกก๊าซ เช่น มีเทน ไฮโดรเจน และ คาร์บอนมอนอกไซด์ออกจากก๊าซอื่น โดยจะออกด้านบนของหอ และก๊าซอื่นและอะโรมาติกส์จะออกทางด้านล่างของหอ หลังจากนั้นจะเข้าหอดูดซับถัดไป เพื่อแยกคาร์บอน 3 และ 4 อะตอมออก โดยจะได้สารที่มีคาร์บอน 5 อะตอมขึ้นไปออกทางด้านล่างของหอรวมทั้งสารอะโรมาติกส์ด้วย (เส้นทึบในภาพที่ 1)



ภาพที่ 1 กระบวนการแตกสลายโมเลกุลของเนฟทา

ที่มา: Meindersama (2005)

สารป้อนในการผลิตเอทิลีนจะประกอบด้วยสารอะโรมาติกส์ประมาณ 10-25เปอร์เซ็นต์ ขึ้นอยู่กับที่มาของสารป้อน (เนฟทา หรือก๊าซควบแน่น (gas condensate)) ตัวอย่างองค์ประกอบของเนฟทาแสดงดังตารางที่ 5 โดยสารประกอบอะโรมาติกส์นั้นจะไม่ถูกเปลี่ยนไปเป็นโอเลฟินส์ (Olefins) แต่อาจจะมีปริมาณเล็กน้อยที่เปลี่ยนรูประหว่างกระบวนการแตกสลายในเตาเผา

ตารางที่ 5 องค์ประกอบของสารป้อนแนฟทาที่มีสารอะโรมาติกส์ 10 เปอร์เซนต์

องค์ประกอบ	wt%	องค์ประกอบ	wt%	องค์ประกอบ	wt%
N-Butane	1.5	Cyclohexane	2.8	2,6-Dimethyl-heptane	1.9
1-Pentane	4.2	2-Methyl-hexane	2.8	Ethylbenzene	2.0
N-pentane	10.3	3-Methyl-hexane	3.8	P-xylene	1.9
Cyclopentane	1.5	N-heptane	4.4	3-Methyl-octane	2.7
2,3-Dimethyl-butane	0.8	Methyl-cyclohexane	4.8	O-xylene	1.0
2-Methyl-pentane	6.0	Toluene	3.0	N-nonane	2.6
3-Methyl-pentane	4.0	2-Methyl-heptane	2.4	N-decane	3.0
		1,3-			
N-hexane	8.6	Dimecyclonhexane	7.0	1-decanes	4.0
Me-cyclopentane	4.1	N-octane	5.4		
Benzene	1.8	Ethyl-cyclohexane	2.0	รวม	100

ที่มา: Meindersama (2005)

เนื่องจากสารอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่อยู่ทั้งในสารป้อนและผลิตภัณฑ์ เป็นอะซิโ-โทรกับสารอะโรมาติกส์ ดังนั้น ในอุตสาหกรรมจึงทำการแยกสารอะโรมาติกส์ออกจากสารอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนด้วยวิธีการกลั่นสกัดแยกด้วยตัวทำละลายที่มีขั้ว เช่น ซัลโฟเลน นอมอล เมทิลไฟโรลิโคน เอทิลีนไกลคอล หรือ นอมอลฟอมิลมอฟโพลีน เป็นต้น

3. การเลือกกระบวนการที่ใช้ในการแยกสาร

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแตกสลายโมเลกุลของแนฟทา ประกอบด้วยสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีจุดเดือดใกล้เคียงกัน เช่น เบนซีน ไซโคลเฮกเซน และไซลีน เป็นต้น ซึ่งสามารถทำให้เกิดอะซิโโทรที่หลากหลาย กระบวนการดังกล่าวเป็นกระบวนการที่มีความซับซ้อนและยุ่งยากมากในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี เนื่องจากเบนซีนและไซโคลเฮกเซนมีจุดเดือดที่ใกล้เคียงกันมาก ทำให้การแยกนั้นทำได้ยากกว่ากระบวนการกลั่นทั่วไป ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธี เช่น กระบวนการสกัด กระบวนการกลั่นสกัด (Extractive distillation) กระบวนการแยกด้วยเมมเบรน

(Membrane permeation) กระบวนการดูดซับ (adsorption) และกระบวนการคายสารดูดซับ (desorption) การเลือกกระบวนการแยกสารจะต้องพิจารณาปัจจัยต่างๆ ดังนี้ (Meindersama, 2005)

1. ขนาดของถังปฏิกรณ์
2. ค่าการเลือกผ่าน (Selectivity)
3. ไม่มีตัวทำละลายในวัฏภาคที่ไม่ถูกสกัด
4. มีการนำสารอะโรมาติกส์กลับมาได้
5. มีความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์

การสกัดของเหลว-ของเหลวหรือการสกัดด้วยตัวทำละลาย

การสกัดเป็นการแยกเอาสารที่ต้องการมาอยู่ในวัฏภาคของสารสกัด โดยจะขึ้นกับสมดุลของการกระจายตัวของตัวถูกละลายระหว่าง 2 วัฏภาคที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกันซึ่งเมื่อเกิดสมดุลของการกระจายตัวของตัวถูกละลายระหว่างวัฏภาค 2 วัฏภาคที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกันเช่น วัฏภาคน้ำ (Aqueous phase) และวัฏภาคตัวทำละลายอินทรีย์ที่ไม่มีขั้ว (Organic phase)

กระบวนการสกัดด้วยวัฏภาคของเหลว-ของเหลวอาศัยความสามารถในการทำให้เกิดการถ่ายเทมวลของสารที่ต้องการสกัด (ที่ละลายอยู่ในสารป้อน) มายังตัวทำละลาย โดยสามารถทำงานได้ทั้งแบบกะและแบบต่อเนื่อง ตัวทำละลายจะรวมเป็นเนื้อเดียวกับสารผสมเดิมได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังนั้นเมื่อเติมตัวทำละลายลงในสารผสมและทำการสกัด เมื่อปล่อยทิ้งไว้จะเกิดของเหลวสองชั้นขึ้นซึ่งสามารถแยกออกจากกันได้ ชั้นที่มีตัวทำละลายอยู่เรียกว่า วัฏภาคที่ถูกสกัด (Extract) ส่วนชั้นที่มีตัวทำละลายอยู่เล็กน้อยเรียกว่า วัฏภาคที่ไม่ถูกสกัด (Raffinate)

1. การเลือกตัวทำละลายในการสกัดของเหลว-ของเหลว

ตัวทำละลายที่ดีควรละลายสารที่ต้องการสกัดได้ดี มีจุดเดือดไม่สูงนักเพื่อที่จะกำจัดออกไปจากสารที่ต้องการได้ง่ายหลังการสกัด และต้องไม่ทำปฏิกิริยากับสารหรือตัวทำละลายอื่นที่ใช้ร่วมกัน ไม่ควรติดไฟง่าย ไม่ควรมีพิษและราคาไม่แพง โดยตัวทำละลายที่ใช้ในกระบวนการสกัดสารอะโรมาติกส์มีหลายชนิด เช่น ซัลโฟเลน นอมอลเมทิลไพโรลิโดนเอทิลีนไกลคอลหรืออนอมอลฟอมิลมอฟโพลีน โดยมีค่าคงที่ซึ่งเรียกว่า สัมประสิทธิ์การแจกแจง (Distribution coefficient)

หรือสัมประสิทธิ์การแบ่งส่วน (Partition coefficient) ซึ่งมักใช้อักษรย่อว่า K เป็นค่าคงที่ซึ่งบอกให้ทราบว่า สารที่สนใจจะละลายในตัวทำละลายได้มากน้อยเพียงใด ณ สภาวะสมดุล อุณหภูมิคงที่ โดยสามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ ดังสมการที่ 1 (ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545)

$$K = \frac{C_1}{C_2} \quad (1)$$

เมื่อ C_1 เป็นความเข้มข้นของสารที่สนใจในวัฏภาคที่ถูกสกัด
 C_2 เป็นความเข้มข้นของสารที่สนใจในวัฏภาคที่ไม่ถูกสกัด

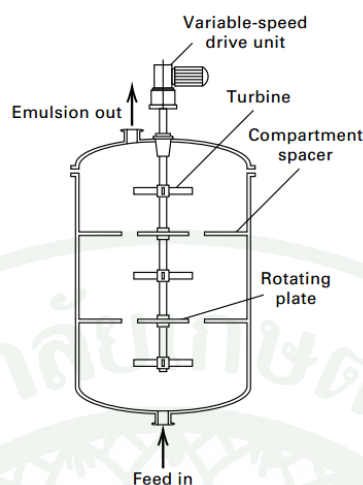
2. เครื่องสกัดของเหลว-ของเหลว (Liquid-Liquid Extractor)

ในการสกัดของเหลว-ของเหลวทั้งสองวัฏภาคต้องสัมผัสกันให้มากที่สุด เพื่อให้เกิดการถ่ายโอนมวลจากวัฏภาคของสารป้อนไปยังวัฏภาคของตัวสกัดก่อนที่จะแยกจากกัน แต่เนื่องจากของเหลวมีความหนืดและความหนาแน่นในระดับใกล้เคียงกัน ดังนั้น การผสมกันและแยกจากกันจึงเกิดขึ้นได้น้อยถ้าอาศัยการไหลด้วยแรงโน้มถ่วงเพียงอย่างเดียว ซึ่งแตกต่างจากกรณีที่วัฏภาคหนึ่งเป็นก๊าซและอีกวัฏภาคเป็นของเหลว ดังนั้น ในเครื่องสกัดบางประเภทจึงติดตั้งอุปกรณ์ช่วยในการผสมและการแยก

2.1 เครื่องผสม – เครื่องพัก (Mixer – Settlers)

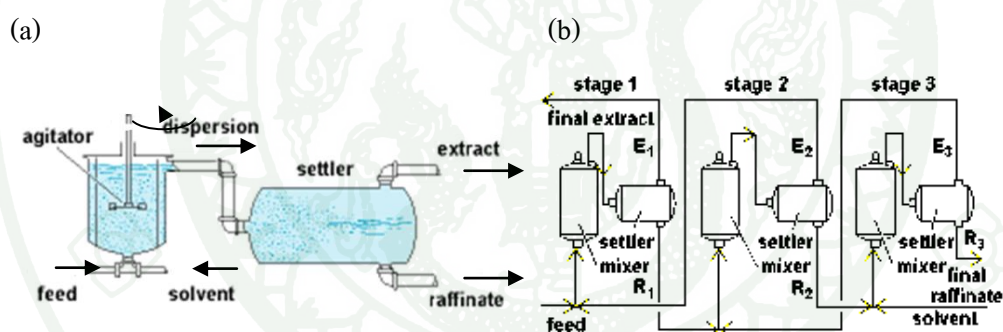
ในการสกัดโดยใช้เครื่องผสม-เครื่องพักแบบกะ ตัวเครื่องผสมและเครื่องพักอาจเป็นตัวเดียวกัน คือ เป็นถังที่มีใบกวน เมื่อมีการผสมเสร็จสิ้นจะปิดเครื่องกวนและปล่อยให้ของเหลวเกิดการแยกชั้นด้วยแรงโน้มถ่วงและถ่ายวัฏภาคที่ถูกสกัดและวัฏภาคที่ไม่ถูกสกัดออกจากถัง (ดังแสดงในภาพที่ 2) ซึ่งเวลาที่ใช้ในการผสมและพักตัวหาได้จากการทดลอง

สำหรับการสกัดแบบต่อเนื่อง เครื่องผสมและเครื่องพักจะเป็นคนละส่วนกัน โดยเครื่องผสมจะเป็นตัวถังกวนขนาดเล็กซึ่งมีท่อเข้าและออก มีแผ่นกั้น (Baffle) ที่ด้านข้างเพื่อให้เกิดการผสมกันได้ดีขึ้น หรืออาจเป็นเครื่องผสมแบบอื่นๆ ส่วนเครื่องพักจะเป็นถังเปล่าที่ปล่อยให้ของเหลวแยกชั้นด้วยแรงโน้มถ่วงโดยเครื่องผสม-เครื่องพักแบบขั้นเดียวและหลายขั้นแสดงดังภาพที่ 3 (a) และภาพที่ 3 (b) ตามลำดับ



ภาพที่ 2 เครื่องผสม-เครื่องฟักแบบกะ

ที่มา: Treybal (1980)



ภาพที่ 3 (a) เครื่องผสม-เครื่องฟักแบบขั้นเดียว (b) เครื่องผสม-เครื่องฟักแบบ 3 ขั้น

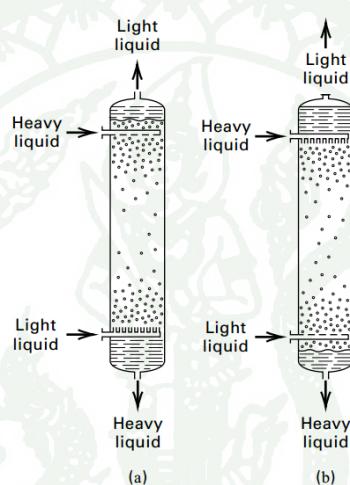
ที่มา: Treybal (1968)

2.2 หอสกัดแบบสเปรย์

หอสกัดแบบสเปรย์ใช้หลักการสัมผัสแบบคิฟเฟอเรนเชียล (ค่อยๆ เพิ่มทีละน้อย) ไม่ใช่แบบขั้น โดยจะเกิดการผสมของของเหลวและการแยกชั้นพร้อมกันอย่างต่อเนื่อง โดยหอสกัดแบบสเปรย์แสดงดังภาพที่ โดยในแบบหัวฉีดสำหรับของเหลวที่เบากว่า (ภาพที่ 4 (a)) ของเหลวที่เบากว่าจะถูกป้อนผ่านด้านล่างผ่านหัวฉีดให้เป็นหยดเล็กๆ ลอยขึ้นด้วยแรงลอยตัวผ่านของเหลวที่หนัก

กว่าซึ่งถูกป้อนเข้าด้านบน หยดของเหลวจะรวมตัวเป็นชั้นที่ด้านบนของหอสกัดหลังจากผ่านชั้นของเหลวที่หนักว่า

ส่วนหอสกัดแบบสเปรย์แบบหัวฉีดสำหรับของเหลวที่หนักว่า (ภาพที่ 4(b)) ของเหลวที่หนักว่าจะถูกป้อนผ่านด้านบนด้วยหัวฉีดให้เป็นหยดเล็กๆ ไหลลงตามแรงโน้มถ่วง และสัมผัสกับของเหลวที่เบากว่าที่ถูกป้อนจากด้านล่างซึ่งจะลอยขึ้นมาด้วยแรงลอยตัวและรวมตัวกันเป็นชั้นวัฏ-ภาคที่ด้านบนของหอสกัด

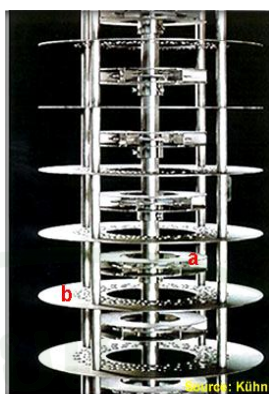


ภาพที่ 4 (a) หอสกัดแบบสเปรย์แบบหัวฉีดสำหรับของเหลวที่เบากว่า
(b) หอสกัดแบบสเปรย์แบบหัวฉีดสำหรับของเหลวที่หนักว่า

ที่มา: Seader *et al.* (2011)

2.3 หอสกัดแบบใบกวน (Agitated Tower Extractors)

หอสกัดแบบใบกวนเป็นหอสกัดที่มีใบกวนอยู่ภายในดังภาพที่ 5 โดยเป็นใบกวนแบบจานหมุน (Rotating – disk contactor) ทำการหมุนเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทมวล เพื่อทำให้สารที่ต้องการสกัดกันสามารถแพร่มายังตัวทำละลายได้ หรือเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส โดยเครื่องกวนจะทำการสร้างบริเวณที่ใช้ในการผสม (Mixing zones) (แสดงจุด a ในภาพที่ 5) สลับกับโซนสำหรับพัก (Settling zones) (แสดงจุด b ในภาพที่ 5) ทั่วหอสกัด



ภาพที่ 5 คอลัมน์สำหรับการสกัดด้วยของเหลว-ของเหลว

ที่มา: Mazzotti (2013)

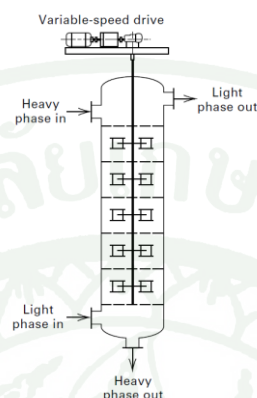
ในกรรมวิธีการสกัดของเหลวจะต้องตรวจสอบให้แน่ใจว่าตัวทำละลายจะต้องไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกันกับสารป้อน หรือละลายด้วยกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งวิธีการที่สำคัญในกระบวนการสกัดสารมีดังต่อไปนี้

1. นำของเหลวผสมที่เป็นสารป้อนมาสัมผัสกับตัวทำละลายที่เลือกให้เหมาะสมกับสารที่ต้องการ
2. หลังจากการสัมผัสกันเป็นเวลาพอสมควร วัฏภาคทั้งสองจะแยกออกจากกัน
3. แยกหรือนำเอาตัวทำละลายที่อยู่ในแต่ละวัฏภาคลับมาใช้ใหม่

ลักษณะการทำงานของคอลัมน์ คือ สารตัวทำละลายจะไหลสวนทาง (Counter-current) กับสารป้อน ซึ่งจะทำให้เกิดการถ่ายโอนมวลสาร (Mass Transfer) ระหว่างสารตัวทำละลายและสารป้อนแสดงดังภาพที่ 6 โดย เครื่องมือสกัดด้วยของเหลว-ของเหลวจะได้รับความนิยมใช้มากกว่าหอกลั่นในกรณีดังต่อไปนี้

1. เมื่อกระบวนการกลั่นต้องใช้ความร้อนจำนวนมากเกินไป เช่น เมื่อค่าการระเหยสัมพัทธ์ (Relative volatility) เข้าใกล้หนึ่ง
2. เมื่อการเกิดแอซิโอโทรปไปจำกัดระดับขึ้นของการแยกในกระบวนการกลั่น
3. เมื่อการให้ความร้อนเป็นสิ่งที่ต้องหลีกเลี่ยงเช่น สารบางชนิดจะสลายตัวที่อุณหภูมิสูง เป็นต้น

4. เมื่อสารที่ต้องการแยกมีความแตกต่างทางธรรมชาติอย่างเด่นชัดกับสารตัวอื่นเช่น มีขั้วสูงกว่าสารอื่นมาก เป็นต้น



ภาพที่ 6 หลักการทำงานภายในคอลัมน์ของการสกัดด้วยของเหลว-ของเหลว

ที่มา: Seader *et al.* (2011)

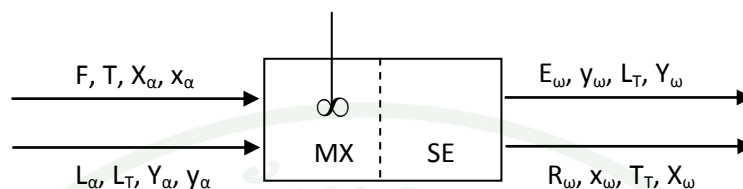
วิธีการสกัดแบบดั้งเดิมนั้นได้ค่าประสิทธิภาพในการสกัด (Extraction efficiency) ไม่สูงมากนักเนื่องจากตัวทำละลายและสารป้อนนั้นไม่สามารถสัมผัสได้อย่างดี ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส เช่น Static mixer เป็นต้น

3. หลักการของการสกัด

3.1 การสกัดแบบขั้นเดียว (Single Stage Extraction)

ในกระบวนการสกัดแบบขั้นเดียว หรือการสกัดทีละขั้นอย่างง่าย (Elementary Extraction Process and Cross-Flow Extraction Process) วิธีนี้เริ่มด้วยการผสมของเหลวที่เป็นสารป้อนเข้ากับตัวทำละลายในอัตราส่วนที่เหมาะสมลงในเครื่องกวน (Mixer, MX) ที่ออกแบบเป็นพิเศษเพื่อให้ของเหลวทั้งสองวัฏภาคสัมผัสกันได้ดีจนถึงสภาพสมดุล เมื่อผ่านเครื่องกวนออกมาแล้วจะเข้าสู่เครื่องแยกตัว (Settler, SE) เพื่อแยกของเหลวกลับเป็น 2 วัฏภาคดั้งเดิม โดยจะได้วัฏภาคที่ถูกสกัดและวัฏภาคที่ไม่ถูกสกัดไหลออกจากเครื่องแยกไปคนละด้าน แสดงดังภาพที่ 7 ถ้าวัฏภาคที่ไม่ถูกสกัดมีปริมาณสารที่ต้องการสกัดเหลืออยู่ตามที่ต้องการ ถือว่าเสร็จสิ้นกระบวนการสกัด

แต่ถ้ามีปริมาณสารที่ต้องการสกัดมากเกินไป ต้องนำวัตถุดิบที่ไม่ถูกสกัดมาทำการสกัดซ้ำอีกครั้งในเครื่องสกัดขั้นที่ 2 โดยทำเช่นเดียวกับขั้นแรกทุกประการ



ภาพที่ 7 การสกัดแบบขั้นเดียว

ที่มา: Sattler and Feindt (1995)

ถ้าระบบการสกัดมีสารเพียง 3 ตัว โดยกำหนดให้ด้านของสารป้อน (F) ประกอบด้วย สารนำพา (carrier, T) กับสารที่ต้องการสกัด (S) และด้านของตัวทำละลาย (L) จะสามารถหาความสัมพันธ์ของสมดุลมวลได้จากสมการที่ 2

$$L_\alpha + F = R_\omega + E_\omega \quad (2)$$

เมื่อ	L_α	คือ ปริมาณของตัวทำละลาย
	F	คือ ปริมาณสารป้อน
	R_ω	คือ ปริมาณสารในวัตถุดิบที่ไม่ถูกสกัด
	E_ω	คือ ปริมาณสารในวัตถุดิบที่ถูกสกัด

และสามารถหาสมดุลมวลของสารที่ต้องการสกัด (S) ได้จากสมการที่ 3

$$L_\alpha \cdot y_\alpha + F \cdot x_\alpha = R_\omega \cdot x_\omega + E_\omega \cdot y_\omega \quad (3)$$

เมื่อ	y_α	คือ สัดส่วนโดยมวลของสารที่ต้องการสกัดในตัวทำละลายก่อนสกัด
	x_α	คือ สัดส่วนโดยมวลของสารที่ต้องการสกัดในสารป้อนก่อนสกัด
	y_ω	คือ สัดส่วนโดยมวลของสารที่ต้องการสกัดในวัตถุดิบที่ถูกสกัด
	x_ω	คือ สัดส่วนโดยมวลของสารที่ต้องการสกัดในวัตถุดิบที่ไม่ถูกสกัด

ในทำนองเดียวกัน สามารถหาสมดุลมวลของสารนำพา (T) ได้จากสมการที่ 4

$$L_{\alpha} \cdot y_{T,\alpha} + T = R_{\omega} \cdot x_{T,\omega} + E_{\omega} \cdot y_{T,\omega} \quad (4)$$

เมื่อ	T	คือ ปริมาณสารนำพา
	$y_{T,\alpha}$	คือ สัดส่วนโดยมวลของสารนำพาในตัวทำละลายก่อนสกัด
	$y_{T,\omega}$	คือ สัดส่วนโดยมวลของสารนำพาในวัฏภาคที่ถูกสกัด
	$x_{T,\omega}$	คือ สัดส่วนโดยมวลของสารนำพาในวัฏภาคที่ไม่ถูกสกัด

เมื่อสารนำพาและตัวทำละลายไม่ละลายซึ่งกันและกันอย่างสมบูรณ์ ค่า x และ y สามารถแทนที่ด้วยปริมาณที่ต้องการสกัดในวัฏภาคที่ไม่ถูกสกัด (X) และวัฏภาคที่ถูกสกัด (Y) ได้สมการที่ 5

$$T \cdot X_{\alpha} + L_T \cdot Y_{\alpha} = T \cdot x_{\omega} + L_T \cdot Y_{\omega} \quad (5)$$

โดยปริมาณของสารนำพา (T) และปริมาณของตัวทำละลาย (L) หาได้จากสมการที่ 6 และ 7

$$T = \frac{F}{1+X_{\alpha}} \quad (6)$$

$$L_T = \frac{L_{\alpha}}{1+Y_{\alpha}} \quad (7)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (Distribution coefficient, K^*) หาได้จากสมการที่ 8

$$Y_{\omega} = K^* \cdot X_{\omega} \quad (8)$$

และเมื่อตัวทำละลายเริ่มต้นไม่มีสารที่ต้องการสกัด ($Y_{\alpha} = 0$) จากสมการที่ 5 และ 8 จะสามารถหาปริมาณสารที่ต้องการสกัดในวัฏภาคที่ไม่ถูกสกัดได้จากสมการที่ 9

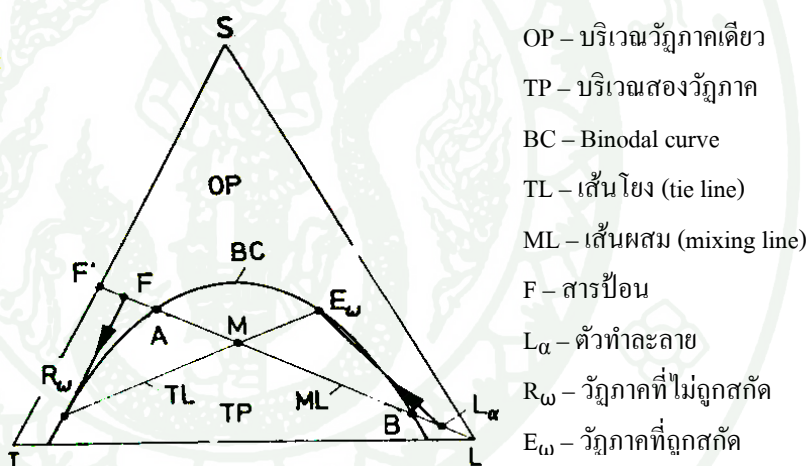
$$X_{\omega} = X_{\alpha} \cdot \frac{T}{T+K^* \cdot L_T} = X_{\alpha} \cdot \frac{1}{1+\epsilon} \quad (9)$$

เมื่อ Extraction factor (ϵ) หาได้จากสมการที่ 10

$$\varepsilon = \frac{K^* \cdot L_T}{T} = K^* \cdot v \quad (10)$$

เมื่อ v คือ อัตราส่วนระหว่างตัวทำละลายกับสารนำพา

ในการหาเส้นปฏิบัติการ (Operating line) สำหรับการสกัดแบบขั้นเดียวนั้น สามารถดูได้จากแผนภาพสามเหลี่ยม (ภาพที่ 8) (Gibbs triangle) ซึ่งในแผนภาพสามเหลี่ยมจะประกอบด้วย สารป้อน (F) ตัวทำละลาย (L_α) วัฏภาคที่ถูกสกัด (E_ω) และวัฏภาคที่ไม่ถูกสกัด (R_ω) (ถ้าสารป้อนไม่มีส่วนผสมของตัวทำละลาย จุด F จะอยู่บนส่วนของเส้นตรง $\overline{TS}$ และถ้าใช้ตัวทำละลายบริสุทธิ์ จุดจะอยู่ที่มุม L ของแผนภาพ) ซึ่งจุด R_ω และ E_ω จะเป็นการแสดงวัฏภาค บนเส้น Binodal curve และแสดงจุดปลายแต่ละด้านบนเส้นโยง (tie line)



ภาพที่ 8 แผนภาพสามเหลี่ยมของระบบสมดุลของการสกัดแบบขั้นเดียว

ที่มา: Sattler and Feindt (1995)

จุด M บนแผนภาพแสดงจุดที่มีการผสม (Mixing point) ของสารป้อนและตัวทำละลาย โดยหาได้จากสมการที่ 11

$$\frac{FM}{ML_\alpha} = \frac{L_\alpha}{F} \quad (11)$$

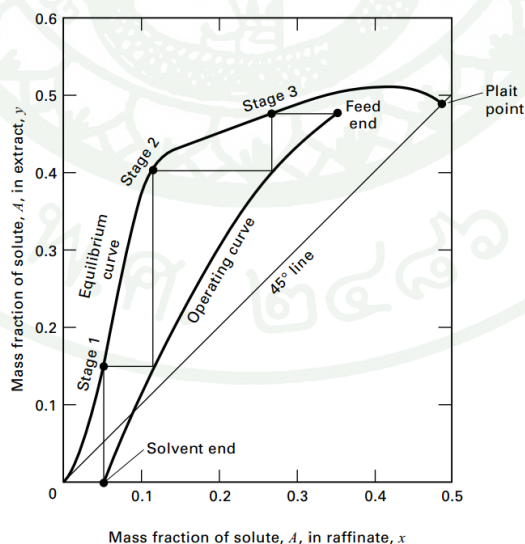
โดยในขณะที่สารที่ต้องการสกัดเกิดการถ่ายโอนมวลจากสารป้อนไปยังตัวทำละลาย จุด F และ L_α จะเปลี่ยนไปเป็นจุด R_ω และ E_ω จนกระทั่งเข้าสู่สมดุล

ในกระบวนการสกัดของเหลว-ของเหลวจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อ จุด M (mixing point) ต้องอยู่ในทั้ง 2 ภูมิภาค ดังนั้น เมื่อเราทำการกำหนดให้สารป้อนมีค่าคงที่ค่าใดค่าหนึ่ง จะสามารถหาปริมาณตัวทำละลายที่น้อยที่สุด ($v_{A,min}^*$) ได้จากสมการที่ 12

$$v_{A,min}^* = \frac{x_\alpha - x_A}{x_A - y_\alpha} = \frac{L_{\alpha,min}}{F} \quad (12)$$

3.2 การสกัดหลายชั้นแบบไหลสวนทางด้วยวิธี McCabe – Thiele

วิธี McCabe – Thiele เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้หาข้อมูลที่ต้องการสำหรับกระบวนการแยกแบบไหลสวนทางต่อเนื่อง นอกเหนือจากวิธีแผนภาพสามเหลี่ยมและเทคนิคทางกราฟ วิธี McCabe – Thiele เป็นวิธีที่ง่ายและให้คำตอบที่มีความถูกต้องในระดับที่น่าพอใจ โดยมุ่งความสนใจไปที่ความเข้มข้นของสารที่ต้องการสกัดในภูมิภาคที่ถูกสกัดและในภูมิภาคที่ไม่ถูกสกัด ดังแสดงภาพที่ 9 โดยในแผนจะไม่แสดงปริมาณของตัวทำละลาย และสารนำพาในทั้ง 2 ภูมิภาค



ภาพที่ 9 แผนภาพ McCabe – Thiele ของการกระบวนการสกัด

ที่มา: Seader (2011)

แผนภาพ McCabe – Thiele จะแสดงข้อมูลที่สภาวะสมดุลในแผนภาพสามเหลี่ยม โดยจะพล็อตสัดส่วนโดยมวลของสารที่ต้องการสกัดในวัฏภาคที่สกัดได้ (y_A) ในแกนตั้ง และพล็อตสัดส่วนโดยมวลของสารที่ต้องการสกัดในวัฏภาคที่ไม่ถูกสกัด (x_A) ในแกนนอน

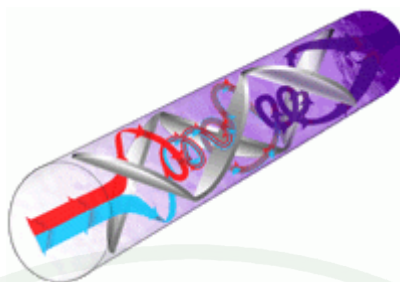
เส้นปฏิบัติการสำหรับแผนภาพสามารถหาได้จากการทำสมดุลมวลโดยรวมด้วยข้อมูลสมดุลของ 3 สาร เนื่องจากปริมาณสารที่ต้องการในวัฏภาคที่สกัดได้จะเพิ่มขึ้น และในวัฏภาคที่ถูกสกัดจะลดลงเมื่อเกิดการสกัดผ่านหอสกัด ดังนั้นเส้นปฏิบัติการจะเป็นเส้นโค้ง และเมื่อทำสมดุลมวลในบางส่วนของขั้นบันไดของการสกัด (Cascade stage) จะได้จุดเพิ่มเติมในการลากเส้นปฏิบัติการ จากนั้นสามารถหาจำนวนขั้นทางทฤษฎีของการสกัดได้ด้วยการลากขั้นบันไดระหว่างทั้งสองเส้น (ดูภาพที่ 9)

4. อุปกรณ์สำหรับเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัส

4.1 Static mixer

Static mixer เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพในการผสมสำหรับของเหลวแบบต่อเนื่อง โดยปกติจะใช้กับของเหลว แต่สามารถใช้กับก๊าซ-ของเหลวได้ โดยสามารถใช้สำหรับอุปกรณ์หลายชนิด เช่น ท่อทรงกระบอก หรือ squared housing โดยตัวผสมมีหลายขนาด ตั้งแต่ประมาณ 6 มิลลิเมตรจนถึง 6 เมตร โดยวัสดุที่ใช้ในการทำมีหลายชนิด เช่น สแตนเลส โพลีโพรพิลีน เทฟลอน PVDF PVC CPVC และ Polyacetal

ลักษณะการไหลของ Static mixer จะมีการไหลสลับไปมาเพื่อให้สารได้มีการสัมผัสกันอย่างต่อเนื่อง แสดงดังภาพที่ 10 โดยจำนวนชั้นของ Static mixer สามารถคำนวณได้จาก 2^n เมื่อ n คือ จำนวนของสารที่ใช้ในการผสม



ภาพที่ 10 ลักษณะการไหลของสารใน Static mixer

ที่มา: Ozone Solutions, Inc. (2012)

4.1.1 ชนิดของ Static mixer

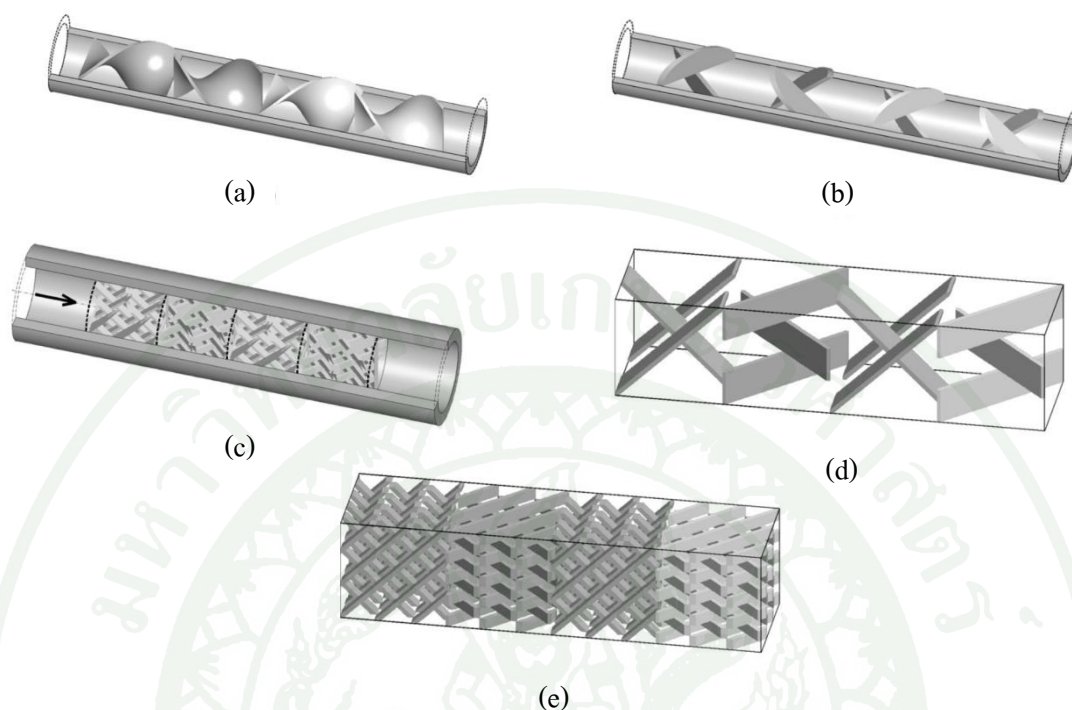
Static mixer ที่ใช้ในปัจจุบันมีหลายชนิด ซึ่งแต่ละชนิดจะมีลักษณะแตกต่างกัน โดยจะใช้ค่าความดันตกคร่อม (Pressure drop) และความยาว (Length) ในการออกแบบ แสดงใน ภาพที่ 11 โดยชนิดแรก (ภาพที่ 11 (a)) เรียกว่า Kenics โดยจะมีใบกวนหมุนไปทางขวาและทางซ้าย สลับกัน โดยมุมจะต่างกัน 180 องศา แบบ Ross LPD (ภาพที่ 11 (b)) เป็นใบกวนสองใบตัดกัน ทำ มุม 90 องศา แบบ Standard Sulzer SMX (ภาพที่ 11 (c)) โดยจะมีตัวแปรในการออกแบบ คือ n , N_p และ N_x (Singh *et al.*, 2009) เมื่อ n คือ จำนวนใบกวนที่ตัดกันตามความสูง N_p คือ จำนวนชุดใบกวน ที่ขนานกันทั้งหมด และ N_x คือ จำนวนใบกวนที่ตัดกันทั้งหมดตามแนวยาว ตัวอย่างของ SMX ที่ใช้ ทั่วไป ดังนี้ แบบ Working horse (ภาพที่ 11 (d)) มีค่า n เท่ากับ 3 และแบบ compact มีค่า n เท่ากับ 3 ดังภาพที่ 11 (e)

4.1.2 การคำนวณตัวแปรต่างๆใน Static mixer

Friction factor (f) หาได้จากสมการที่ 13

$$f = \frac{K_p}{2Re} + C \quad (13)$$

เมื่อ K_p และ C คือ ค่าคงที่ตามรูปร่างของ Static mixer
 Re คือ Reynolds number



ภาพที่ 11 ชนิดของ Static mixer

ที่มา: Laporte *et al.* (2014)

Reynolds number (Re) หาได้จากสมการที่ 14

$$Re = \frac{U_s \rho D}{\mu} \quad (14)$$

เมื่อ U_s คือ Superficial velocity หรือ อัตราเร็วเฉลี่ยในท่อเปล่า
 ρ คือ ความหนาแน่น
 μ คือ ความหนืด

ค่าความดันตกคร่อม (ΔP) หาได้จากสมการที่ 15

$$f = \frac{\Delta P}{2\rho U_s^2} \frac{D}{L} \quad (15)$$

เมื่อ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ

L คือ ความยาวทั้งหมดของ Static mixer

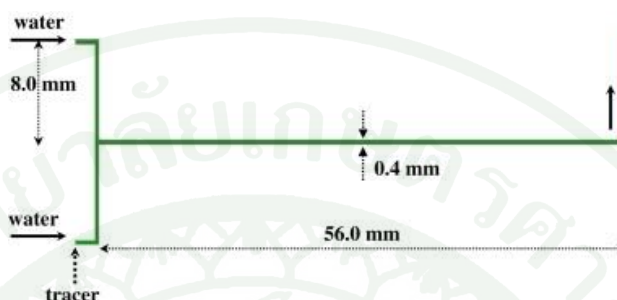
โดย Static mixer สามารถนำไปใช้งานได้หลายแบบ เช่น โรงงานกลั่นน้ำมัน โรงงานผลิตพอลิเมอร์ การบำบัดน้ำเสีย การผสมสาร (Blending) การตกตะกอนของแข็ง (Solid suspension) การแพร่ (ก๊าซ-ของเหลว หรือ ของเหลว-ของเหลว) การถ่ายเทความร้อน และการถ่ายเทมวลสาร เป็นต้น (ChemineerTM, 2013)

เครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาค

เครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาค เป็นการย่อขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ทางกระบวนการเคมี โดยเป็นเทคโนโลยีสมัยใหม่ที่สำคัญสำหรับการปรับปรุงอุปกรณ์เพื่อให้เกิดกระบวนการที่มีความเหมาะสมและคุ้มค่าที่สุด เครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาคสามารถใช้ได้กับกระบวนการผลิตหลายประเภท เช่น การผลิตเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel cells) โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการแพทย์เพื่อใช้ทดสอบและสังเคราะห์ยาชนิดต่างๆ เพราะอุตสาหกรรมการผลิตยานั้นไม่ได้ใช้กระบวนการที่ต้องใช้สารเคมีในปริมาณมากๆ การใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาคในกระบวนการผลิตเป็นสิ่งที่น่าสนใจ สะดวกในการเคลื่อนย้ายเพราะมีขนาดเล็ก ลดปริมาณการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา เกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเสียน้อย มีประสิทธิภาพสูงในการถ่ายโอนความร้อน เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาคได้ถูกออกแบบให้มีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวกับปริมาตรสูง เครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาคสามารถใช้กับปฏิกิริยาเคมีที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าไปเกี่ยวข้องกับสารเคมีที่ผสมเข้าด้วยกันไม่ได้ เช่น ปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารละลายกับของเหลวอินทรีย์ที่ผสมเข้าด้วยกันไม่ได้ (immiscible aqueous-organic liquid) ปฏิกิริยาระหว่างแก๊สกับของเหลว ปฏิกิริยาระหว่างแก๊ส ของเหลว และของแข็ง เป็นต้น ในปฏิกิริยาเหล่านี้ต้องอาศัยแรงผลักดันให้สารตั้งต้นตัวหนึ่งสามารถผสมเข้าด้วยกันได้กับสารตั้งต้นอื่นๆ โดยจะเกิดขึ้นที่รอยต่อของวัฏภาคที่ต่างชนิดกัน ในกระบวนการเกิดปฏิกิริยาระหว่างของเหลวที่ผสมกันไม่ได้ เครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาคจะสามารถช่วยให้เกิดการแพร่ที่ดีขึ้นระหว่างวัฏภาคที่ติดกัน (Doku *et al.*, 2005)

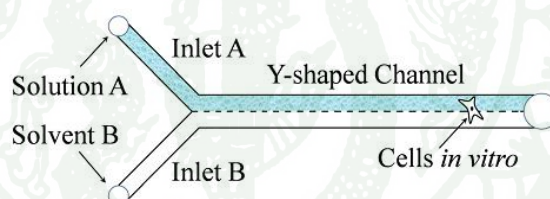
การผสมกันของสารตั้งต้นในปฏิกิริยาต่างๆ ปัจจัยหนึ่งที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยา คือ ตัวช่วยในการผสม โดยทั่วไปแบ่งได้เป็น ประเภทคือ Passive mixers กับ Active mixers ข้อแตกต่างระหว่างตัวช่วยในการผสมประเภทนี้คือ ตัวช่วยการผสมแบบ Passive mixers อาศัยการออกแบบรูปร่างทางเรขาคณิตเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผสม เช่น ตัวช่วยในการผสมชนิด Y ตัวช่วยการผสมชนิด T เป็นต้น ส่วนตัวช่วยการผสมแบบ Active mixers อาศัยแหล่ง

พลังงานจากภายนอกเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผสม เช่น การใช้การสั่นสะเทือนของคลื่นอัลตราซาวด์ เป็นต้น ตัวช่วยการผสมแบบชนิด T และชนิด Y (แสดงดังภาพที่ 12 และ 13 ตามลำดับ) เป็นแบบพื้นฐานที่มีการใช้งานโดยทั่วไปสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการผสมได้ดี



ภาพที่ 12 ตัวช่วยผสมชนิด T

ที่มา: Adeosun (2009)



ภาพที่ 13 ตัวช่วยผสมชนิด Y

ที่มา: Li (2013)

ในการคำนวณค่าประสิทธิภาพในการสกัดสาร A (Extraction efficiency, E) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 16

$$E = \frac{\text{ปริมาณสาร A ในวัฏภาคที่ถูกสกัด}}{\text{ปริมาณสาร A ทั้งหมด}} \times 100 \quad (16)$$

และในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวม (Overall volumetric mass-transfer coefficient, ka) สามารถคำนวณได้จากความเข้มข้นของสารในด้านสารป้อน โดยค่าแรงขับในการถ่ายโอนมวลจะขึ้นอยู่กับความยาวของช่องจุลภาค ดังสมการที่ 17

$$ka = \frac{Q_{or}(C_{or,i} - C_{or,o})}{V\Delta C_m} \quad (17)$$

เมื่อ Q_{or} คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารป้อน
 $C_{or,i}$ คือ ความเข้มข้นของสาร A ในสารป้อนก่อนสกัด
 $C_{or,o}$ คือ ความเข้มข้นของสาร A ในสารป้อนหลังสกัด
 V คือ ปริมาตรของช่องจุลภาค
 ΔC_m คือ logarithmic mean concentration driving force โดยหาได้จากสมการที่ 18

$$\Delta C_m = \frac{(C_{or,i} - C_{or,i}^*) - (C_{or,o} - C_{or,o}^*)}{\ln \left[\frac{(C_{or,i} - C_{or,i}^*)}{(C_{or,o} - C_{or,o}^*)} \right]} \quad (18)$$

เมื่อ $C_{or,i}^*$ คือ ความเข้มข้นที่สมดุลของสาร A ที่สารป้อนเข้า
 $C_{or,o}^*$ คือ ความเข้มข้นที่สมดุลของสาร A ที่วัฏภาคที่ถูกสกัด

การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลอง (Experimental design) เป็นการกำหนดรูปแบบที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาระบบที่สนใจ ผลการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลองจะนำมาวิเคราะห์ด้วยกระบวนการทางสถิติ การออกแบบการทดลองถูกใช้ในงานวิจัยหลายสาขา เช่น ทางเกษตร วิทยาศาสตร์ อุตสาหกรรม การแพทย์ สังคมศาสตร์ และวิศวกรรมศาสตร์ เป็นต้น การออกแบบการทดลองมีส่วนสำคัญ 2 ส่วนประกอบด้วย การกำหนดตัวแปรที่ควบคุมได้ เพื่อใช้ในการประเมินผลการทดสอบให้มีประสิทธิภาพ และการกำหนดช่วงของการทดลอง มี 3 ส่วนคือ การออกแบบระบบเป็นการนำความรู้ทางวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์มาหาค่าเริ่มต้น การออกแบบค่าพารามิเตอร์ เป็นการหาค่าดีที่สุดที่เหมาะสมในสภาวะที่ต้องการ และการออกแบบค่าพิกัดเพื่อเป็นการกำหนดช่วงเพื่อที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิต

1. หลักการในการออกแบบการทดลอง

1.1 การทดลองซ้ำ (Replication)

การทดลองซ้ำ คือ การทดลองภายใต้เงื่อนไขการทดลองเดียวกันมากกว่าหนึ่งครั้ง เพื่อเพิ่มความแม่นยำและความถูกต้องของการทดลอง การทดลองซ้ำจะช่วยให้ผู้ทดลองสามารถคำนวณค่าความผิดพลาดของการทดลอง เพื่อใช้ในการประเมินค่าความแปรปรวนของผลการทดลอง กำจัดความคลาดเคลื่อนและอิทธิพลที่ไม่สามารถควบคุมได้ที่มีต่อปัจจัย และสามารถใช้ในการเปรียบเทียบผลกระทบของปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการทดลองอย่างมีนัยสำคัญว่ามีผลต่อการทดลองจริง หรือเกิดจากความผิดพลาดของการทดลอง

1.2 การสุ่ม (Randomization)

การสุ่มการทดลองจะช่วยให้ความผิดพลาดที่เกิดจากปัจจัยรบกวนที่ไม่สามารถควบคุมได้ หรือไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ รวมถึงการให้ข้อมูลแต่ละตัวเป็นอิสระต่อกัน นอกจากนี้ข้อกำหนดเบื้องต้นในการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติมักกำหนดให้ข้อมูลและความผิดพลาดในการทดลองจะต้องเป็นตัวแปรที่มีการแจกแจงสุ่มอย่างอิสระ (Independently distributed random variables) หรือการกระจายตัวอย่างทั่วถึงสมดุล และสุ่มมาจากกลุ่มที่มีการแจกแจงปกติ มีค่าเฉลี่ยและความแปรปรวนคงที่ โดยเป็นการจัดวิธีปฏิบัติ (Treatment) ให้แก่หน่วยการทดลอง โดยมีหลักว่าแต่ละหน่วยการทดลองมีโอกาสเท่าๆ กันที่จะได้รับวิธีปฏิบัติใดก็ได้

1.3 การบล็อก (Blocking)

การบล็อกเป็นวิธีควบคุมปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ หรือปัจจัยภายนอกที่ส่งผลกระทบต่อการวัดค่าภายในระบบ เช่น แหล่งที่มาของวัตถุดิบ ผู้ผลิต วันที่ทดลอง และสภาพแวดล้อม เป็นต้น ซึ่งการบล็อกสามารถช่วยเพิ่มความแม่นยำของผลการทดลอง และลดความคลาดเคลื่อนในการทดลองอีกด้วย โดยทำการแบ่งการทดลองออกเป็นกลุ่ม (บล็อก) โดยให้หน่วยทดลองภายในกลุ่มมีลักษณะเหมือนกันมากที่สุด

2. ขั้นตอนในการการออกแบบการทดลอง

2.1 กำหนดปัญหาและวัตถุประสงค์ของการทดลอง

การกำหนดปัญหาของการทดลองควรกำหนดให้ชัดเจน เข้าใจง่าย และเป็นรูปธรรม โดยต้องทราบว่าการทดลองเป็นแบบไหน มีขั้นตอนอย่างไร ตัวชี้วัดหรือการวัดผลของการทดลองเป็นอย่างไร และมีการศึกษาข้อมูลอย่างเพียงพอก่อนที่จะกำหนดขอบเขตและวัตถุประสงค์เพื่อที่จะสามารถออกแบบการทดลองได้ครอบคลุมปัญหาของการทดลอง

2.2 ศึกษาความสามารถของระบบการวัดค่า

คือการคำนึงถึงความสามารถของผู้วัดค่า เช่น ผู้วัดคนละคนอาจจะอ่านค่าจะเครื่องมือต่างๆ ไม่เท่ากัน หรือประสิทธิภาพของเครื่องมือวัดต่างๆ ซึ่งเครื่องมือวัดควรมีการบำรุงรักษาและเทียบมาตรฐานเพื่อให้อยู่ในสภาพพร้อมใช้งาน

2.3 เลือกปัจจัย ช่วง และระดับในการศึกษา

การเลือกปัจจัย การกำหนดช่วง และระดับในการศึกษา ต้องศึกษาว่าปัจจัยใดควบคุมได้ ปัจจัยใดควบคุมไม่ได้ และจะใช้วิธีใดในการวัดค่า ปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ต้องใช้การสุ่มในการเลือกช่วงของการทดลองและระดับในการศึกษาควรทำการศึกษาข้อมูลก่อนทำการเลือก

2.4 เลือกรูปแบบวิธีการออกแบบการทดลอง

ก่อนทำการเลือกรูปแบบวิธีการออกแบบการทดลอง ต้องกำหนดปัจจัยที่มีผลต่อการทดลอง รวมถึงการออกแบบการทดลองต้องสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการทดลอง เพื่อความแม่นยำและความถูกต้องของการวัดค่า ซึ่งควรมีการวางแผนการทดลอง เช่น จำนวนการทดลองที่จะทำในแต่ละวัน การบันทึกผลการทดลอง และค่าใช้จ่ายในการทดลอง เป็นต้น

2.5 ดำเนินการทดลอง

หลักการสำคัญของการทดลองคือ การทำซ้ำ และการสุ่ม ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มความถูกต้อง และแม่นยำของผลการทดลอง โดยจะต้องทำการทดลองให้เป็นไปตามแผนการทดลอง ตรวจสอบความถูกต้องในการวัด การควบคุมตัวแปรในการทดลอง และการเก็บผลการทดลอง

2.6 วิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลจะช่วยให้การสรุปผลการทดลองมีความสมเหตุสมผล ตรวจสอบลักษณะและคุณภาพของข้อมูล ซึ่งเป็นการนำข้อมูลทางทฤษฎีมาประยุกต์ใช้ในการสรุปเชิงพรรณนา วิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติมีหลายวิธี เช่น การวิเคราะห์ความแปรปรวน การวิเคราะห์ T-Test เป็นต้น และการวิเคราะห์ควรใช้การวิเคราะห์แบบกราฟเพื่อให้สามารถสรุปผลการทดลองได้ง่ายขึ้น เช่น กราฟปกติของส่วนผลกระทบและส่วนตกค้าง

2.7 วิเคราะห์ส่วนตกค้าง

การวิเคราะห์ส่วนตกค้างจะทำก่อนที่จะนำผลการทดลองไปวิเคราะห์ในรูปแบบต่างๆ หรือการนำผลไปใช้ เพื่อเป็นการยืนยันว่าผลในทางปฏิบัติมีค่าใกล้เคียงกับผลจากการทำนายหรือไม่ ผลต่างของค่าของผลในทางปฏิบัติและจากการทำนายเรียกว่า ส่วนตกค้าง (Residuals) ค่าจากการทำนายจะขึ้นกับประสิทธิภาพของแบบจำลอง โดยแบบจำลองจะเป็นผลรวมของเทอมที่มีนัยสำคัญและสร้างจากข้อมูลการทดลอง การวิเคราะห์ส่วนตกค้างสามารถยืนยันความน่าเชื่อถือของผลการทดลองและแบบจำลองที่ได้จากการออกแบบการทดลอง

2.8 สรุปผลการทดลอง

การสรุปผลการทดลองเป็นการสรุปส่วนที่สำคัญของการทดลอง การวิเคราะห์ข้อมูลต่างๆ และเปรียบเทียบผลการทดลองกับวัตถุประสงค์ที่ได้กำหนดไว้

2.9 ทำการทดลองยืนยันผล

เพื่อยืนยันผลการทดลอง ควรทำการทดลองซ้ำ 3-5 ครั้ง เป็นการตรวจสอบความถูกต้องในช่วงความเชื่อมั่น และเปรียบเทียบกับสมมติฐานของค่าเฉลี่ยของการทดลองและการทำนาย (เกล็ดแก้ว, 2557)

3. การสำรวจข้อมูลเบื้องต้นและการทดสอบสมมติฐานทางสถิติ

เมื่อรวบรวมข้อมูลที่ต้องการมาแล้ว จะทำการวิเคราะห์และนำเสนอข้อมูลอย่างอย่างเป็นระบบ โดยใช้ค่าสถิติ (Statistics) อธิบายลักษณะของข้อมูล ค่าสถิติที่นิยมใช้ในการประมาณลักษณะที่แท้จริงของระบบที่สนใจ แบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ ค่าแนวโน้มสู่ศูนย์กลางของข้อมูล และค่าการกระจาย (ประไพศรีและพงศ์ชนัน, 2551)

3.1 ค่าแนวโน้มสู่ศูนย์กลางของข้อมูล

ค่าแนวโน้มสู่ศูนย์กลางของข้อมูล หรือค่าที่ใช้ชี้บ่งตำแหน่ง หรือตัวแทนตำแหน่งของกระบวนการ ได้แก่ ค่าเฉลี่ย (Mean) มัธยฐาน (Medium) และฐานนิยม (Mode) เป็นต้น โดยค่าแนวโน้มสู่ศูนย์กลางจะช่วยให้การวิเคราะห์ข้อมูลให้ได้ง่าย และชัดเจนยิ่งขึ้น

3.2 ค่าการกระจาย (Dispersion)

ค่าการกระจายหรือค่าการเปลี่ยนแปลง (Variability) ในระบบ ได้แก่ ค่าพิสัย (Range) ค่าพิสัยควอไทล์ (Inter-quartile range) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) และค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standard error) วิธีการเปรียบเทียบข้อมูลจากการทดลองอย่างง่าย (Simple comparative experiments) แบ่งเป็น 3 วิธี ดังนี้

3.2.1 การสำรวจข้อมูลเบื้องต้น (Exploratory data analysis) สามารถวิเคราะห์ข้อมูลกราฟ และตารางออกมาในรูปของแผนภาพจุด ฮิสโตแกรม แผนภูมิต้นไม้ และแผนภาพกล่อง

3.2.2 การทดสอบสมมติฐาน เป็นวิธีทดสอบเพื่อหาข้อสรุปทางสถิติเกี่ยวกับค่าพารามิเตอร์ของระบบ เป็นพื้นฐานการอนุมานทางสถิติ โดยมักจะอ้างอิงจากค่าสถิติหลักทั้งสองกลุ่ม คือ ค่าเฉลี่ยและค่าความแปรปรวน เนื่องจากแปรผันตรงกับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ซึ่งเป็นค่าที่ใช้อธิบายการกระจายของข้อมูล หรือความแตกต่างภายในระบบ ข้อสมมติฐานจะแบ่งเป็นสองส่วน คือ สมมติฐานหลัก (Null hypothesis, H_0) และสมมติฐานรอง (Alternate hypothesis, H_1) ตัวอย่างการตั้งสมมติฐานทางสถิติ แสดงในสมการที่ 19 และ 20

$$\text{สมมติฐานหลัก } H_0: \theta \leq \theta_0 \quad (19)$$

$$\text{สมมติฐานรอง } H_1: \theta > \theta_0 \quad (20)$$

เมื่อ θ คือ พารามิเตอร์ของประชากร เช่น ค่าเฉลี่ย (μ) หรือ ความแปรปรวน (σ^2)
 θ_0 คือ ค่าคงที่ที่ต้องการทดสอบ

3.2.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวน เป็นวิธีทดสอบเพื่อหาข้อสรุปทางสถิติเกี่ยวกับค่าเฉลี่ยของระบบ เปรียบเทียบกลุ่มตัวอย่างตั้งแต่สองกลุ่มขึ้นไป โดยมีพื้นฐานมาจากการวิเคราะห์ความแตกต่างของค่าตอบสนอง (Responses) ค่าผลลัพธ์ และลักษณะทางคุณภาพที่ต้องการควบคุม ซึ่งเป็นวิธีหลักที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลอง

4. การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance)

เป็นการทดสอบสมมติฐานสำหรับข้อมูลประกอบด้วยตัวแปรต้นหรือตัวแปรอิสระต้นหลายตัวแปรกับตัวแปรเพียงตัวเดียว (Montgomery, 1976) การวิเคราะห์ความแปรปรวนมีจุดประสงค์เพื่อแยกแหล่งของความแปรปรวนที่เกิดขึ้นทั้งหมดของการทดลอง ขั้นตอนในการวิเคราะห์ความแปรปรวนมีดังนี้

1. กำหนดสมมติฐานหลัก (H_0) และสมมติฐานรอง (H_1)
2. กำหนดระดับนัยสำคัญ (α) เช่น 0.01 0.05 หรือ 0.1 เป็นต้น ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของแต่ละงานวิจัย
3. คำนวณค่าสถิติจากสูตรที่กำหนดไว้ และเปิดตารางค่าสถิติเพื่อหาค่าวิกฤตที่ระดับนัยสำคัญที่กำหนด
4. สร้างเขตการปฏิเสธสมมติฐานหลักที่ตรงข้ามกับสมมติฐานหลัก
5. เปรียบเทียบค่าสถิติที่คำนวณได้กับค่าวิกฤตที่เปิดจากตาราง ถ้าค่าสถิติที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าค่าวิกฤตที่ได้จากตาราง สมมติฐานหลักจะถูกปฏิเสธและยอมรับสมมติฐานรอง
6. สรุปผล

นอกจากนี้ การวิเคราะห์ความแปรปรวนมีข้อกำหนดคือ ข้อมูลต้องมีการแจกแจงแบบปกติ มีความเป็นอิสระต่อกัน และมีความแปรปรวนเท่ากัน

4.1 การทดสอบการแจกแจงแบบปกติ

การทดสอบข้อมูลว่ามีการแจกแจงปกติหรือไม่ ทำการทดสอบด้วยวิธีของ Ryan-Joiner (RJ) (Ryan and Joiner, 1976) ซึ่งเป็นการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลตอบของการทดลองกับค่า P_i วิธีทดสอบสามารถทำได้โดยคำนวณจากสมการที่ 21 และ 22

$$P_i = 100x \left(i - \frac{3}{8} \right) / \left(n + \frac{1}{4} \right) \quad (21)$$

$$R_p = \frac{\sum Y_i b_i}{\sqrt{\sum (Y_i - \bar{Y})^2 \sum b_i^2}} \quad (22)$$

เมื่อ P_i คือ ความน่าจะเป็นของข้อมูลลำดับที่ i ในกลุ่มตัวอย่าง
 i คือ ลำดับตัวอย่าง
 n คือ Correlation coefficient
 b_i คือ Pith percentage point บนการกระจายแบบปกติ
 Y_i คือ ค่าผลตอบของแต่ละตัวอย่าง
 $\bar{Y}$ คือ ค่าเฉลี่ยของผลตอบ

ค่า b_i คำนวณจากสมการที่ 23

$$b_i \approx 4.91[P_i^{0.14} - (1 - P_i)^{0.14}] \quad (23)$$

ค่าวิกฤติ (Critical values) คำนวณจากสมการที่ 24 25 และ 26 เมื่อระดับนัยสำคัญ (α) เท่ากับ 0.10 0.05 และ 0.01 ตามลำดับ ตัวอย่างค่าประมาณของค่าวิกฤติที่จำนวนการทดลองต่างกันแสดงในตารางที่ 6

$$cv(n) \approx 1.0071 - \frac{0.1371}{\sqrt{n}} - \frac{0.3682}{n} + \frac{0.7780}{n^2} \quad (24)$$

$$cv(n) \approx 1.0063 - \frac{0.1288}{\sqrt{n}} - \frac{0.6118}{n} + \frac{1.3505}{n^2} \quad (25)$$

$$cv(n) \approx 0.9963 - \frac{0.0211}{\sqrt{n}} - \frac{1.4106}{n} + \frac{3.1791}{n^2} \quad (26)$$

เมื่อ $cv(n)$ คือ ค่าวิกฤติที่จำนวนการทดลองเท่ากับ n

ตารางที่ 6 ค่าประมาณของค่าวิกฤติสำหรับ R_p

จำนวนการทดลอง	$\alpha = 0.1$	$\alpha = 0.05$	$\alpha = 0.01$
4	0.8951	0.8734	0.8318
5	0.9033	0.8804	0.8320
10	0.9347	0.9180	0.8804
15	0.9506	0.9383	0.9110
20	0.9600	0.9503	0.9290
25	0.9662	0.9582	0.9408
30	0.9707	0.9639	0.9490
40	0.9767	0.9715	0.9597
50	0.9807	0.9764	0.9664
60	0.9835	0.9799	0.9710
75	0.9865	0.9835	0.9757

ที่มา: Ryan and Joiner (1976)

การพิจารณาข้อมูลว่ามีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่ ทำโดยเปรียบเทียบค่า R_p กับค่าวิกฤติ พบว่า

ถ้า R_p มีค่ามากกว่า $cv(n)$ แสดงว่า ข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ

ถ้า R_p มีค่าน้อยกว่า $cv(n)$ แสดงว่า ข้อมูลมีการแจกแจงแบบไม่ปกติ

การพิจารณารูปแบบการแจกแจงของข้อมูลยังสามารถดูจากฮิสโตแกรมระหว่างค่าผลตอบแทนของการทดลองและค่าความถี่ของผลการทดสอบ

4.2 การทดสอบความเป็นอิสระต่อกันของข้อมูล

การทดสอบความเป็นอิสระต่อกันของข้อมูล สามารถทำได้โดยใช้วิธีของ Kruskal-Wallis (H-test) มีขั้นตอนดังนี้ (Kruskal and Wallis, 1952)

4.2.1 ตั้งสมมติฐานในการทดสอบ ดังนี้

H_0 : กลุ่มตัวอย่างทุกกลุ่มมีค่ามัธยฐานเท่ากัน

H_1 : กลุ่มตัวอย่างอย่างน้อย 1 กลุ่มมีค่ามัธยฐานไม่เท่ากัน

4.2.2 คำนวณค่าทดสอบทางสถิติ (F_H)

เป็นการเรียงข้อมูลจากน้อยไปหามาก โดยถือว่าเป็นข้อมูลชุดเดียวกัน หาผลรวมของข้อมูล และคำนวณค่า F_H โดยใช้สมการที่ 27

$$F_H = \frac{12}{N(N+1)} \sum_{i=1}^C \frac{R_i^2}{n_i} - 3(N+1) \quad (27)$$

เมื่อ F_H คือ ค่าสถิติ H-test
 C คือ จำนวนกลุ่มตัวอย่าง
 n_i คือ จำนวนข้อมูลในกลุ่มตัวอย่างที่ i
 N คือ จำนวนตัวอย่างทั้งหมด
 R_i คือ ผลรวมของข้อมูลในกลุ่มตัวอย่างที่ i

4.2.3 เปิดตารางเพื่อหาค่า $\chi^2_{\alpha,df}$ ที่ระดับนัยสำคัญ (α) และ Degree of freedom (df) ที่กำหนด โดยถ้าค่า $\chi^2_{\alpha,df}$ น้อยกว่า F_H สมมติฐานหลัก H_0 ถูกปฏิเสธ โดยตารางแสดงค่า $\chi^2_{\alpha,df}$ แสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ค่า $\chi^2_{\alpha,df}$ ที่ระดับนัยสำคัญ และ Degree of freedom ต่างกัน

Degree of freedom	$\chi^2_{0.1}$	$\chi^2_{0.05}$	$\chi^2_{0.01}$
1	2.706	3.841	6.635
2	4.605	5.991	9.210
3	6.251	7.815	11.345
4	7.779	9.448	13.277
5	9.236	11.070	15.086
6	10.645	12.592	16.812
7	12.017	14.067	18.475

ตารางที่ 7 (ต่อ)

Degree of freedom	$\chi^2_{0.1}$	$\chi^2_{0.05}$	$\chi^2_{0.01}$
8	13.362	15.507	20.090
9	14.684	16.919	21.666
10	15.987	18.307	23.209
11	17.275	19.675	24.725
12	18.549	21.026	26.217
13	19.812	22.362	27.688
14	21.064	23.685	29.141
15	22.307	24.996	30.578
16	23.542	26.296	32.000
17	24.769	27.587	33.409
18	25.989	28.869	34.805
19	27.204	30.144	36.191
20	28.412	31.410	37.566
21	29.615	32.671	38.932
22	30.813	33.924	40.289
23	32.007	35.172	41.638
24	33.196	36.415	42.980
25	34.382	37.652	44.314
26	35.563	38.885	45.642
27	36.741	40.113	46.963
28	37.916	41.337	48.278

ที่มา: Department of Statistics, Pennsylvania State University (2014)

4.3 วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล

กลุ่มตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ต้องมีความแปรปรวนเท่ากันทุกกลุ่ม ทดสอบวิธี Levene's test (Gastwirth *et al.*, 2009) มีขั้นตอนดังนี้

4.3.1 กำหนดสมมติฐานในการทดสอบ ดังนี้

สมมติฐานหลัก (H_0): ความแปรปรวนของข้อมูลมีค่าเท่ากันทุกกลุ่ม

สมมติฐานรอง (H_1): ความแปรปรวนของข้อมูลอย่างน้อย 1 กลุ่มมีค่าไม่เท่ากัน

4.3.2 คำนวณค่า โดยใช้สมการที่ 28

$$F_w = \frac{(N-k) \sum_{i=1}^k N_i (\bar{Z}_i - \bar{Z})^2}{(k-1) \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{N_i} (Z_{ij} - \bar{Z}_i)^2} \quad (28)$$

เมื่อ	F_w	คือ ค่าสถิติสำหรับ Levene's test
	N	คือ จำนวนของข้อมูลทั้งหมด
	N_i	คือ จำนวนของข้อมูลในกลุ่มตัวอย่างที่ i
	k	คือ จำนวนกลุ่มตัวอย่างที่ต่างกัน

โดยค่า Z_{ij} และ $\bar{Z}_i$ หาได้จากสมการที่ 29 30 และ 31 ตามลำดับ

$$Z_{ij} = |Y_{ij} - \bar{Y}_i| \quad (29)$$

เมื่อ	Y_{ij}	คือ ค่าผลตอบของข้อมูลที่ j ในกลุ่มตัวอย่างที่ i
	$\bar{Y}_i$	คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลกลุ่มตัวอย่างที่ i

$$\bar{Z} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{N_i} Z_{ij} \quad (30)$$

$$\bar{Z}_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} Z_{ij} \quad (31)$$

4.3.3 เปิดตารางหาค่า $F_{\alpha,k-1,N-k}$ โดยถ้า F_w มีค่ามากกว่า $F_{\alpha,k-1,N-k}$ สมมติฐานหลัก (H_0) จะถูกปฏิเสธ

การทดลองเพื่อศึกษาผลของปัจจัย 2 ปัจจัย จำนวน 3 ระดับขึ้นไปประกอบด้วย ความแปรปรวนจาก 2 แหล่ง ดังนี้ (นิภาพร, 2551)

1. ความแปรปรวนที่เกิดจากความผิดพลาดของการทดลอง คือ ความแปรปรวนภายในวิธีปฏิบัติ (Treatment) เดียวกันที่ทดลองมากกว่า 1 ครั้ง ขนาดของความผันแปรที่เกิดขึ้นจะแสดงถึงความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการทดลอง

2. ความแปรปรวนที่เกิดขึ้นจากผลของปัจจัย หรือความแปรปรวนที่เกิดขึ้นระหว่างการทรีตเมนต์ (Variance Due to a Factor) คือ ความแปรปรวนที่เกิดจากการปรับเปลี่ยนระดับของปัจจัย หรือเกิดจากผลกระทบของปัจจัยที่ศึกษา

ความแปรปรวนที่เกิดขึ้นจากทั้งสองแหล่งนั้น สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าผลตอบสนอง ปัจจัย และความผิดพลาด ตามรูปแบบการทดลองได้ดังสมการที่ 32-35

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \epsilon_i \quad (32)$$

$$= \mu + \tau_i + \epsilon_{ij} + \beta_j \quad (33)$$

$$= \mu + \tau_i + \epsilon_{ijk} + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} \quad (34)$$

$$= \mu + \tau_i + \gamma_k + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \epsilon_{ijkl} \quad (35)$$

โดย μ หาได้จากสมการที่ 36

$$\mu = \frac{\sum \sum Y_{ij}}{N} \quad (36)$$

เมื่อ μ คือ ค่าเฉลี่ยรวม
 N คือ จำนวนการทดลอง

τ_i	คือ ผลกระทบจากปัจจัยที่ 1 ที่ระดับที่ i เมื่อ $i = 1, 2, 3, \dots, a$
β_j	คือ ผลกระทบจากปัจจัยที่ 2 ที่ระดับที่ j เมื่อ $j = 1, 2, 3, \dots, b$
γ_k	คือ ผลกระทบจากปัจจัยที่ 3 ที่ระดับที่ k เมื่อ $k = 1, 2, 3, \dots, c$
$(\tau\beta)_{ij}$	คือ ผลกระทบร่วมของปัจจัยที่ 1 ที่ระดับที่ i และปัจจัยที่ 2 ที่ระดับที่ j
$(\tau\gamma)_{ik}$	คือ ผลกระทบร่วมของปัจจัยที่ 1 ที่ระดับที่ i และปัจจัยที่ 3 ที่ระดับที่ k
$(\beta\gamma)_{jk}$	คือ ผลกระทบร่วมของปัจจัยที่ 2 ที่ระดับที่ j และปัจจัยที่ 3 ที่ระดับที่ k
$(\tau\beta\gamma)_{ijk}$	คือ ผลกระทบร่วมของปัจจัยที่ 1 ที่ระดับที่ i ปัจจัยที่ 2 ที่ระดับที่ j และปัจจัยที่ 3 ที่ระดับที่ k
ε_{ijkl}	คือ ความผิดพลาด (Error) หรือส่วนที่อธิบายไม่ได้จากการทดลอง

4.4 ชนิดของการออกแบบการทดลอง

จากสมการข้างต้น สามารถแบ่งการวิเคราะห์ความแปรปรวนเป็น 3 แบบ ดังนี้

4.4.1 การจำแนกทางเดียว (One-Way Analysis of Variance) เป็นการออกแบบการทดลองที่ผู้ทดลองทราบว่าปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลเพียงหนึ่งปัจจัย ศึกษาทั้งหมด a ระดับ หรือ a ค่าที่แตกต่างกัน สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 33 ระดับที่แตกต่างกันของปัจจัยนั้นจะมีผลกระทบต่อค่าเฉลี่ยของตัวแปรตอบสนองอย่างไร

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองแบบ CRD (Complete randomized design) สามารถวิเคราะห์ความแปรปรวนได้ดังสมการที่ 37-39

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \quad (37)$$

$$(Y_{ij} - \mu) = \tau_i + \varepsilon_{ij} \quad (38)$$

$$V(Y_{ij} - \mu) = V(\tau_i) + V(\varepsilon_{ij}) \quad (39)$$

ความแปรปรวนทั้งหมดที่ปรับแล้วสามารถหาได้จากสมการที่ 40

$$SS_T = SS_{Tr} + SS_E \quad (40)$$

เมื่อ	SS_T	คือ ความแปรปรวนทั้งหมดที่ปรับค่าแล้ว (Sum square of total)
	SS_{Tr}	คือ ผลบวกกำลังสองของปัจจัย A หรือ วิธีปฏิบัติ (Sum square of factor A effect or treatment)
	SS_E	คือ ผลบวกกำลังสองของค่าผิดพลาดหรือสิ่งที่อธิบายไม่ได้ (Sum square error or residuals)

ค่า SS_T SS_{Tr} และ SS_E หาได้จากสมการที่ 41 42 และ 43 ตามลำดับ จากสมการทั้งหมดสามารถนำไปสร้างตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนได้ดังตารางที่ 8

$$SS_T = \sum_i^a \sum_j^n (Y_{ij} - \bar{Y})^2 \quad (41)$$

$$SS_{Tr} = \sum_i^a [n_i (\bar{Y}_i - \bar{Y})^2] \quad (42)$$

$$SS_E = \sum_i^a \sum_j^n (Y_{ij} - \bar{Y}_i)^2 \quad (43)$$

ตารางที่ 8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนจำแนกทางเดียว

แหล่งที่มา (Source of Variation)	องศาเสรี (Degree of freedom)	ผลบวกกำลังสอง (Sum square)	ค่าเฉลี่ย SS (Mean square)	ค่าสถิติ (F)
วิธีปฏิบัติ (Between Treatments)	a - 1	SS_{Tr}	$MS_{Tr} = \frac{SS_{Tr}}{a - 1}$	$F = \frac{MS_{Tr}}{MS_E}$
ค่าความผิดพลาด (Error)	N - a	SS_E	$MS_E = \frac{SS_E}{N - a}$	
ทั้งหมด (Total)	N - 1	SS_T		

ที่มา: Montgomery (1976)

4.4.2 การจำแนกสองทาง (Two-Way Analysis of Variance) เป็นการศึกษาผลกระทบของตัวแปรต้น 2 ตัวที่มีต่อตัวแปรตาม แสดงดังสมการที่ 34 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลสำหรับแผนการทดลองแบบบล็อกสุ่ม (Randomized block design: RBD) และแผนการทดลองแบบแฟกทอเรียล (Factorial design) ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทางแสดงดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง

แหล่งที่มา	องศาเสรี	ผลบวกกำลังสอง	ค่าเฉลี่ย SS	ค่าสถิติ
วิธีปฏิบัติ	$k - 1$	SS_{Tr}	$MS_{Tr} = \frac{SS_{Tr}}{k - 1}$	$\frac{MS_{Tr}}{MS_E}$
บล็อก (Block)	$n - 1$	SS_B		
ค่าความผิดพลาด	$(k - 1)(n - 1)$	SS_E	$MS_E = \frac{SS_E}{(k - 1)(n - 1)}$	
รวม	$kn - 1$	SS_T		

ที่มา: คณะพยาบาลศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (2557)

4.4.3 การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Experiment of Factorial Design) เป็นการออกแบบการทดลองกรณีที่มีมากกว่า 2 ปัจจัย แสดงสมการที่ 34 เพื่อที่จะหาผลของปัจจัยที่มีต่อผลตอบ (Response variable) ที่เป็นทั้งผลกระทบหลักและอันตรกิริยา

1) การทดลองแฟกทอเรียล 2 ปัจจัย ออกแบบการทดลองแบบกลุ่มสมบูรณ์

สำหรับการทดลองแฟกทอเรียลที่มี 2 ปัจจัย ออกแบบการทดลองแบบกลุ่มสมบูรณ์ ตารางที่ 10 แสดงรูปแบบข้อมูลการทดลอง โดยตารางข้อมูลมี 2 ปัจจัย คือ ปัจจัย A และปัจจัย B ปัจจัย A มี a ระดับ ปัจจัย B มี b ระดับ ทริทเมนต์คอมบินชันคำนวณจากจำนวนระดับของปัจจัย A คูณ จำนวนระดับของปัจจัย B เท่ากับ ab ทริทเมนต์คอมบินชัน และแต่ละทริทเมนต์มี n ค่าสังเกต ผลรวมของแต่ละทริทเมนต์คอมบินชันและค่าเฉลี่ยของแต่ละทริทเมนต์คอมบินชันแสดงดังสมการที่ 44 และ 45 ตามลำดับ

ตารางที่ 10 รูปแบบข้อมูลการทดลองที่มี 2 ปัจจัยของการออกแบบการทดลองสุ่มสมบูรณ์

ปัจจัย A	ปัจจัย B				ผลรวม	ค่าเฉลี่ย
	1	2	...	b		
1	y_{111}	y_{121}	...	y_{131}	$y_{1..}$	$\bar{y}_{1..}$
2	y_{11n}	y_{12n}	.	y_{13n}	$y_{1..}$	$\bar{y}_{1..}$
	y_{111}	y_{121}	...	y_{131}		
	.	.	.	.		
	y_{11n}	y_{12n}	.	y_{13n}		
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
ค่าเฉลี่ย	$\bar{y}_{.1}$	$\bar{y}_{.2}$	...	$\bar{y}_{.b}$		

ที่มา: อัจฉริยา (2551)

$$y_{ij} = \sum_{k=1}^n y_{ijk} \quad (44)$$

$$\bar{y}_{ij} = \frac{y_{ij}}{n} \quad (45)$$

2) การทดลองแฟกทอเรียล 3 ปัจจัยของการออกแบบการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์

การทดลองแฟกทอเรียลที่มี 3 ปัจจัย ออกแบบการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์มีวิธีวิเคราะห์ความแปรปรวนดังนี้

2.1) สร้างตารางข้อมูล ตารางข้อมูลมี 3 ปัจจัยคือ ปัจจัย A มี a ระดับ ปัจจัย B มี b ระดับ และปัจจัย C มี c ระดับ แสดงดังตารางที่ 11 ทริทเมนต์คอมบินันชันคำนวณจาก

จำนวนระดับของทั้ง 3 ปัจจัยเท่ากับ abc ทริทเมนต์คอมบินเนชัน และแต่ละทริทเมนต์คอมบินเนชันมี n ค่าผลตอบแทน

ตารางที่ 11 รูปแบบข้อมูลสำหรับการทดลองที่มี 3 ปัจจัยออกแบบการทดลองแบบกลุ่มสมบูรณ์

ปัจจัย B									
ปัจจัย A	ปัจจัย C				ปัจจัย C				
	1				b				
	1	2	...	c	1	2	...	c	$y_i \dots$
1	y_{1111}	y_{1121}	...	y_{11c1}	y_{1b11}	y_{1b21}	...	y_{1bc1}	$y_{1...}$
	y_{1112}	y_{1122}	...	y_{11c2}	y_{1b12}	y_{1b22}	...	y_{1bc2}	
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	
	y_{111n}	y_{112n}	...	y_{11cn}	y_{1b1n}	y_{1b2n}	...	y_{1bcn}	
2	y_{2111}	y_{2121}	...	y_{21c1}	y_{2b11}	y_{2b21}	...	y_{2bc1}	$y_{2..}$
	y_{2112}	y_{2122}	...	y_{21c2}	y_{2b12}	y_{2b22}	...	y_{2bc2}	
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	
	y_{211n}	y_{212n}	...	y_{21cn}	y_{2b1n}	y_{2b2n}	...	y_{2bcn}	
.									.
.									.
a	y_{2a111}	y_{a121}	...	y_{a1c1}	y_{ab11}	y_{ab21}	...	y_{abc1}	$y_{a...}$
	y_{a112}	y_{a122}	...	y_{a1c2}	y_{ab12}	y_{ab22}	...	y_{abc2}	
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	
	y_{a11n}	y_{a12n}	...	y_{a1cn}	y_{ab1n}	y_{ab2n}	...	y_{abcn}	
$y_{.jk.}$	$y_{.11.}$	$y_{.12.}$	...	$y_{.1c.}$	$y_{.b1.}$	$y_{.b2.}$	...	$y_{.bc.}$	
$y_{.j..}$				$y_{.1..}$				$y_{.b..}$	$y_{....}$

ที่มา: อัจฉริยา (2551)

2.2) เขียนตัวแบบสถิติแสดงการออกแบบการทดลองเป็นรูปสัญลักษณ์

ตัวแบบสถิติสำหรับการทดลองที่มี 3 ปัจจัยออกแบบการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ ตัวแบบสถิติที่มีอิทธิพลแบบกำหนดเขียนเป็นสัญลักษณ์แสดงดังสมการที่ 46

$$y_{ijk} = \mu + A_i + B_j + C_k + (AB)_{ij} + (AC)_{ik} + (BC)_{jk} + (ABC)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl} \quad (46)$$

เมื่อ	y_{ijk}	คือ ค่าผลตอบสนองที่ได้รับที่รีทเมนต์ ikl ตัวที่ l เมื่อ $l = 1, 2, \dots, n$
	μ	คือ ค่าเฉลี่ยรวม
	A_i	คือ อิทธิพลของปัจจัย A เมื่อ $i = 1, 2, \dots, a$
	B_j	คือ อิทธิพลของปัจจัย B เมื่อ $j = 1, 2, \dots, b$
	C_k	คือ อิทธิพลของปัจจัย C เมื่อ $k = 1, 2, \dots, c$
	$(AB)_{ij}$	คือ อิทธิพลร่วมของปัจจัย A และปัจจัย B
	$(AC)_{ik}$	คือ อิทธิพลร่วมของปัจจัย A และปัจจัย C
	$(BC)_{jk}$	คือ อิทธิพลร่วมของปัจจัย B และปัจจัย C
	$(ABC)_{ijk}$	คือ อิทธิพลร่วมของปัจจัย A ปัจจัย B และปัจจัย C
	ε_{ijkl}	คือ ความคลาดเคลื่อนสุ่มของการทดลอง

2.3) สมมติฐานทางสถิติ

สมมติฐานทางสถิติที่ต้องการทดสอบ คือ

1. การทดสอบอิทธิพลหลัก

$H_0: A_i = 0$ และ $H_1: A_i \neq 0$ อย่างน้อย 1 ค่า

$H_0: B_j = 0$ และ $H_1: B_j \neq 0$ อย่างน้อย 1 ค่า

$H_0: C_k = 0$ และ $H_1: C_k \neq 0$ อย่างน้อย 1 ค่า

2. การทดสอบอิทธิพลร่วม

$H_0: (AB)_{ij} = 0$ และ $H_1: (AB)_{ij} \neq 0$ อย่างน้อย 1 ค่า

$H_0:(AC)_{ik} = 0$ และ $H_1:(AC)_{ik} \neq 0$ อย่างน้อย 1 ค่า

$H_0:(BC)_{jk} = 0$ และ $H_1:(BC)_{jk} \neq 0$ อย่างน้อย 1 ค่า

$H_0:(ABC)_{ijk} = 0$ และ $H_1:(ABC)_{ijk} \neq 0$ อย่างน้อย 1 ค่า

2.4) คำนวณค่าสถิติทดสอบ

การคำนวณผลบวกกำลังสองสำหรับทรีทเมนต์สามารถแบ่งออกเป็น 7 ส่วนดังสมการที่ 47-57

$$SS_{Tr} = SS_A + SS_B + SS_C + SS_{AB} + SS_{AC} + SS_{BC} + SS_{ABC} \quad (47)$$

เมื่อ

$$SS_A = \frac{1}{bcn} \sum_i^a y_{i..}^2 - C_T \quad (48)$$

$$SS_B = \frac{1}{acn} \sum_j^b y_{.j.}^2 - C_T \quad (49)$$

$$SS_C = \frac{1}{abn} \sum_k^c y_{..k}^2 - C_T \quad (50)$$

$$SS_{AB} = \frac{1}{cn} \sum_i^a \sum_j^b y_{ij.}^2 - C_T - SS_A - SS_B \quad (51)$$

$$SS_{AC} = \frac{1}{bn} \sum_i^a \sum_k^c y_{i.k.}^2 - C_T - SS_A - SS_C \quad (52)$$

$$SS_{BC} = \frac{1}{an} \sum_j^b \sum_k^c y_{.jk.}^2 - C_T - SS_B - SS_C \quad (53)$$

$$SS_{ABC} = \frac{1}{n} \sum_i^a \sum_j^b \sum_k^c y_{ijk.}^2 - C_T - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} - SS_{AC} - SS_{BC} \quad (54)$$

$$SS_E = SS_T - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} - SS_{AC} - SS_{BC} - SS_{ABC} \quad (55)$$

$$SS_T = \sum_i^a \sum_j^b \sum_k^c \sum_l^n y_{ijkl}^2 - C_T \quad (56)$$

$$C_T = \frac{y_{....}^2}{abcn} \quad (57)$$

จากสมการทั้งหมดสามารถเขียนสรุปการคำนวณลงในตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนได้ดังตารางที่ 12

ตารางที่ 12 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการทดลองแฟกทอเรียลที่มี 3 ปัจจัยของการ
ออกแบบการทดลองแบบกลุ่มสมบูรณ์

แหล่งที่มา	ผลบวกกำลังสอง	องศาเสรี	ค่าเฉลี่ย SS	ค่าสถิติ
ทรีทเมนต์	SS_{Tr}	$abc - 1$		
A	SS_A	$a - 1$	MS_A	MS_A / MS_E
B	SS_B	$b - 1$	MS_B	MS_B / MS_E
C	SS_C	$c - 1$	MS_C	MS_C / MS_E
AB	SS_{AB}	$(a - 1)(b - 1)$	MS_{AB}	MS_{AB} / MS_E
AC	SS_{AC}	$(a - 1)(c - 1)$	MS_{AC}	MS_{AC} / MS_E
BC	SS_{BC}	$(b - 1)(c - 1)$	MS_{BC}	MS_{BC} / MS_E
ABC	SS_{ABC}	$(a - 1)(b - 1)(c - 1)$	MS_{ABC}	MS_{ABC} / MS_E
ค่าผิดพลาด	SS_E	$abc(n - 1)$	MS_E	
รวม	SS_T	$abcn - 1$		

ที่มา: อัจฉริยา (2551)

5. ข้อสังเกตที่สำคัญในการวิเคราะห์ความแปรปรวน

การวิเคราะห์ความแปรปรวนจะสามารถทำได้และรูปแบบสมการตัวแบบจะเหมาะสมเมื่อข้อสมมติทั้ง 4 ข้อนี้เป็นจริง

1. ข้อมูลหรือค่าความผิดพลาด (ϵ) มีการแจกแจงปกติ
2. ค่าเฉลี่ยของค่าความผิดพลาดมีค่าเท่ากับศูนย์; $E(\epsilon_{ij}) = 0$
3. ความแปรปรวนของค่าความผิดพลาดคงที่; $V(\epsilon_{ij}) = \sigma^2$
4. ค่าความผิดพลาดเป็นอิสระต่อกัน; $Cov(\epsilon_i, \epsilon_j) = 0$

6. การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Linear regression analysis)

การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น เป็นการศึกษาความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างตัวแปรปัจจัยหรือตัวแปรอิสระ (Independent variables; X) กับค่าตอบสนองหรือตัวแปรตาม (Response or

Dependent variable; Y) ว่ามีความสัมพันธ์กันในลักษณะใด เพื่อประโยชน์ในการพยากรณ์ค่าตัวแปรตามซึ่งในทางวิศวกรรมจะนำไปใช้เพื่อ ปรับปรุงกระบวนการผลิต และกำหนดค่าตัวปัจจัยเพื่อให้ค่าตอบสนองที่ดีที่สุดซึ่งจะทำให้ในอุตสาหกรรมการลงทุนน้อยที่สุด โดยจะช่วยให้กำไรของการลงทุนมากที่สุด

รูปแบบของการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น แบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ ขึ้นกับจำนวนตัวแปรอิสระ ดังนี้

6.1 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple linear regression analysis)

คือการศึกษาการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง สองตัวแปร (ตัวแปรอิสระเพียง 1 ตัว กับตัวแปรตาม 1 ตัว) และความสัมพันธ์ระหว่างสองตัวแปรดังกล่าวจะต้องเป็นในลักษณะเชิงเส้น ตัวอย่างลักษณะความสัมพันธ์สามารถแบ่งประเภทของการกำหนดได้ในรูปต่อไปนี้

1. สมการเส้นตรงผ่านจุดกำเนิด

$$Y = \alpha_1 X + \varepsilon \quad (58)$$

2. สมการเส้นตรงเต็มรูป

$$Y = \alpha_0 + \alpha_1 X + \varepsilon \quad (59)$$

3. สมการโพลิโนเมียลดีกรีสอง (Quadratic model)

$$Y = \alpha_0 + \alpha_1 X + \alpha_2 X^2 + \varepsilon \quad (60)$$

4. สมการโพลิโนเมียลดีกรีสาม (Cubic model)

$$Y = \alpha_0 + \alpha_1 X + \alpha_2 X^2 + \alpha_3 X^3 + \varepsilon \quad (61)$$

6.2 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงพหุ (Multiple regression analysis)

เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไปกับตัวแปรตาม 1 ตัว โดยกำหนดรูปแบบความสัมพันธ์ของตัวแปรดังกล่าว ยังคงอยู่ในรูปลักษณะเชิงเส้น ตัวอย่างความสัมพันธ์อาจกำหนดได้ดังนี้

$$Y = \alpha_0 + \alpha_1 X_1 + \alpha_2 X_2 + \alpha_{12} X_1 X_2 + \alpha_1 X_1^2 + \alpha_2 X_2^2 + \varepsilon \quad (62)$$

7. การทดสอบความเหมาะสมของสมการต้นแบบ (Model adequacy checking)

การนำสมการที่ใช้ในการทำนายจำเป็นต้องผ่านการทดสอบความเหมาะสมของสมการ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ

7.1 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination; R^2) เป็นค่าที่ใช้อธิบายความสามารถของสมการถดถอย หรือตัวแปรอิสระในสมการถดถอย ที่พบว่าสามารถจะอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าตอบสนอง หรือตัวแปรตามได้ในสัดส่วนเท่าใด ดังนั้นค่า R^2 ยิ่งมาก สมการก็ยิ่งมีความเหมาะสมมาก โดยอาศัยหลักการวิเคราะห์ความแปรปรวน และสามารถเขียนได้ตามสมการที่ 63 ดังนี้

$$R^2 = \frac{(SS_T - SS_E)}{SS_T} \quad (63)$$

R^2 มีความไวในการเปลี่ยนแปลง คือ เมื่อเพิ่มจำนวนตัวแปรอิสระในสมการ ทำให้ค่า R^2 เปลี่ยนแปลงได้ง่าย ดังนั้นจึงพิจารณาใช้ค่า R^2 ที่ทำการปรับค่าแล้วเพื่อเป็นการช่วยเพิ่มการตรวจสอบ ทำให้สมการดังกล่าวมีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น คือ R^2_{adj} แทน จะสามารถเขียนได้ดังสมการ

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{MS_E}{MS_T} \quad (64)$$

$$MS_T = \frac{SS_T}{n-1} \quad (65)$$

7.2 การทดสอบการขาดความเหมาะสมของสมการ (Lack-of-fit test)

การทดสอบความเหมาะสมของสมการ ใช้กับเฉพาะกรณีที่มีการเก็บข้อมูลค่าซ้ำ หรือ มีการซ้ำผลการทดลอง เพื่อให้มีการเปรียบเทียบความแม่นยำของผลการทดลอง ซึ่งผลลัพธ์ของค่า Y ที่ได้ต่างกัน มักจะเป็นข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลอง เขียนได้ตามสมการต่อไปนี้

$$SS_{LOF} = SS_E - SS_{PE} \quad (66)$$

$$SS_{PE} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 \quad (67)$$

โดยที่ SS_{LOF} คือ ผลบวกกำลังสองที่เกิดจากการขาดความเหมาะสมของสมการ (Sum square Lack-of-Fit)

SS_{PE} คือ ผลบวกกำลังสองของข้อผิดพลาดจริง (Sum square pure error)

n_i คือ ขนาดตัวอย่างของ y ในกลุ่มที่เกิดค่า x ซ้ำ กลุ่มที่ i

จากสมการข้างต้น สามารถสรุปการทดสอบความเหมาะสมของสมการได้ โดยแสดงดังตารางที่ 13

ตารางที่ 13 ตารางทดสอบความเหมาะสมของสมการต้นแบบ

รูปแบบทดสอบ	Degree of freedom (d.f.)	SS (Sum square)	MS (Mean square)	F
Regression	P	SS_{Regr}	MS_{Regr}	F1
Error	$n - p$	SS_E	$MS_E = S^2$	
Lack-of-Fit		SS_{LOF}	MS_{LOF}	F2
PE		SS_{PE}	MS_{PE}	
Total (adj)	$n - 1$	SS_T		

ที่มา: ประไพศรีและพงศ์ชนัน (2551)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. การสกัดของเหลว-ของเหลวอะโรมาติกส์

Ahmad *et al.* (2004) ศึกษาสารประกอบในกลุ่มอะโรมาติกส์ เช่น เบนซีน โทลูอิน และไซลีนในการออกแบบเครื่องสกัดสารประกอบอะโรมาติกส์ต้องใช้ความรู้เกี่ยวกับสารประกอบหลายชนิดที่อยู่ในสมดุลวัฏภาคของเหลวกับของเหลว (Multi-component liquid-liquid equilibrium LLE data) แต่ในทางปฏิบัติข้อมูลสมดุลวัฏภาคของเหลวกับของเหลว (LLE data) ที่ได้จากการทดลองนั้นไม่สามารถใช้ได้ เนื่องจากข้อมูลสมดุลวัฏภาคของเหลวกับของเหลวเหมาะสมสำหรับสารเพียง 2 ชนิดเท่านั้น ดังนั้นจึงต้องใช้ activity coefficient models ในการทำนายองค์ประกอบของสารที่สกัด โดยงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการสกัดสารประกอบอะโรมาติกส์ด้วยสารละลายซิลโฟเลน โดยใช้ UNIQUAC models และ UNIFAC models ซึ่งโมเดลทั้งสองมีความแตกต่างกันคือ UNIQUAC models จะขึ้นอยู่กับสมการ UNIQUAC โดยเป็นการประมาณค่าพลังงานอิสระที่มากเกินไปในระบบของเหลวผสม โดยใช้วิธีทางสถิติ โดยค่าสัมประสิทธิ์ในวัฏภาคของเหลวเท่ากับ ผลรวมของ combinatorial term บวกกับ residual term ส่วน UNIFAC models ก็ขึ้นอยู่กับสมการ UNIQUAC แต่ค่าสัมประสิทธิ์ในวัฏภาคของเหลวจะเท่ากับผลรวมของ individual function groups ในแต่ละโมเลกุล โดยจะทำให้ค่าของ combinatorial term เปลี่ยนไปจากการทดลองพบว่า UNIQUAC models ให้ผลการทำนายที่แม่นยำกว่า UNIFAC models เมื่อทำการศึกษาสมดุลของสามองค์ประกอบ แต่เมื่อทำการศึกษาสมดุลขององค์ประกอบที่มากกว่าสาม UNIFAC models ให้ผลการทำนายที่ดีกว่า

Darwish (2002) ศึกษาการสกัดสารไซลีนจากสารแนฟทา ซึ่งมีความสำคัญมากในกระบวนการอุตสาหกรรม ในงานวิจัยนี้ศึกษาการสกัดแยกไซลีนออกจากสารแนฟทาจำลองโดยใช้ Triethylene glycol เป็นตัวทำละลายศึกษาที่อุณหภูมิ 303.1 293.1 และ 323.1 เคลวินซึ่งมีการนำ UNIFAC Model, UNIFAC-LL Model และ UNIFAC-DMD Model มาใช้ในการทำนายองค์ประกอบของสารในวัฏภาคที่สกัดแยกกับวัฏภาคที่ถูกสกัดแยก ซึ่งเปรียบเทียบกับองค์ประกอบที่ได้จากการสกัดจากการทดลอง ผลการทดลอง UNIFAC Model และ UNIFAC-LL Model สามารถนำมาใช้ในการทำนายองค์ประกอบของสารได้ดีกว่า UNIFAC-DMD Model

García (2012) ทำการแยกโทลูอินออกจากเฮปเทนด้วยการสกัดของเหลว-ของเหลว โดยสารป้อน (โทลูอินและเฮปเทน) มีสัดส่วนโดยโมลของโทลูอินเท่ากับ 10.5 เปอร์เซ็นต์ ตัวทำละลายผสม คือ [bpy][BF₄] และ [4bpy][Tf₂N] โดยทำการศึกษาที่อุณหภูมิห้อง และความดันบรรยากาศ โดยใช้โมเดลของ 313.2 logarithmic-linear model ในการทำนายสมดุลระหว่างวัฏภาคของเหลว-ของเหลว จากการทดลองพบว่า เมื่อตัวทำละลายผสมมีสัดส่วนเชิงมวลของ [bpy][BF₄] เท่ากับ 0.7 สามารถมีประสิทธิภาพในการสกัดมากกว่าการสกัดด้วยซัลโฟเลน ดังนั้น ตัวทำละลายผสมนี้จึงสามารถนำไปใช้ในการสกัดอะโรมาติกส์แทนที่ซัลโฟเลนได้

Radwan *et al.* (1996) ศึกษาสมดุลระหว่างวัฏภาคของเหลว-ของเหลว (LLE) ในการสกัดสารประกอบอะโรมาติกส์จากเนพทาโรฟอร์มเมท ใช้ตัวทำละลายผสมระหว่างไดเมทิลฟอร์มาดีไฮด์และเอทิลีนไกลคอล โดยใช้ UNIFAC model ในการทำนายสมดุลของระบบที่มีหลายองค์ประกอบ เปรียบเทียบกับการทดลอง และทำนายสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในกระบวนการแยกเพื่อใช้พลังงานน้อยที่สุด โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ องค์ประกอบของตัวทำละลายและอัตราส่วนระหว่างตัวทำละลายและสารป้อนที่ต่างกัน จากผลการทดลองพบว่า UNIFAC model สามารถใช้ทำนายในสมดุลของระบบที่มีหลายองค์ประกอบได้ โดยมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ย (Root mean square deviation, RMSD) ระหว่างโมเดลกับการทดลอง เท่ากับ 8.4 เปอร์เซ็นต์ โดยสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการใช้พลังงานน้อยที่สุด คือ อัตราส่วนระหว่างตัวทำละลายต่อสารป้อนมีค่าเท่ากับ 2.2 ตัวทำละลายมีสัดส่วนโดยปริมาตรของเอทิลีนไกลคอล เท่ากับ 44 เปอร์เซ็นต์ และอุณหภูมิ 57 องศาเซลเซียส

Manohar (2013) ทำการสกัดของเหลว-ของเหลว โดยทำการสกัดแยกเบนซีน ออกจากเฮกเซนโดยพยายามที่จะแก้ปัญหาในปัจจุบันของ ionic liquid ที่มีความหนืดสูง และราคาแพง โดยในงานวิจัยนี้ทำการเปรียบเทียบการใช้ ionic liquid ชนิดเดียวเป็นตัวทำละลาย และการใช้ตัวทำละลายผสมระหว่าง ionic liquid กับตัวทำละลายอื่น โดยทำการศึกษาประสิทธิภาพในการสกัดเบนซีน (สารประกอบอะโรมาติกส์) ออกจากเฮกเซน (สารประกอบอะลิฟาติกส์) โดยใช้ ionic liquid คือ 1-ethyl-3-methylimidazolium ผสมกับ Acetonitrile ([EMIM][Ac]) และ 1-ethyl-3-methylimidazolium ผสมกับ ethylsulphate ([EMIM][EtSO₄]) โดยทำการทดลองหาสมดุลของของเหลว ที่อุณหภูมิ 298.15 เคลวิน ความดัน 1 บาร์ จากการทดลอง พบว่า ปริมาณเฮกเซนในวัฏภาคที่ถูกสกัด และปริมาณตัวทำละลายในวัฏภาคที่ไม่ถูกสกัด มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การใช้ตัวทำละลายผสม IL-Acetonitrile สามารถลดการปนเปื้อนระหว่างสองวัฏภาคได้และเมื่อพิจารณาค่า selectivity

พบว่า ตัวทำละลายผสม [EMIM][Ac] เป็นทางเลือกที่ดีในแง่ของการประหยัด และการปนเปื้อนระหว่างสองวัฏภาค

2. เครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาค

เครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาคสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการต่างๆ ได้มากมาย เช่น กระบวนการผลิตไบโอดีเซล กระบวนการสกัดก๊าซ-ของเหลว และกระบวนการสกัดของเหลว-ของเหลว ดังต่อไปนี้

Cebollada *et al.* (2009) ได้นำเครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนลที่ผลิตจากสแตนเลสสตีลที่เคลือบผิวด้วยสาร γ -alumina เพื่อให้เครื่องปฏิกรณ์แบบไมโครชาแนลมีรูพรุน และใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนไฟเบอร์ ซึ่งคาร์บอนนาโนไฟเบอร์นี้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการเกิดปฏิกิริยาเคมี โดยจุดประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาปริมาณสาร γ -alumina ที่เหมาะสมต่อการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนไฟเบอร์ โดยการใช้วิธีเคลือบแบบ Sol-Gel ผลที่ได้คือปริมาณ γ -alumina ที่ 0.081 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีความหนาของ γ -alumina เท่ากัน 6.4 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นปริมาณ γ -alumina ที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้ในการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนไฟเบอร์ ซึ่งโดยทั่วไป สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์คาร์บอนนาโนไฟเบอร์จะมี γ -alumina อยู่ในช่วง 5-7 ไมโครเมตร

Tanawannapong *et al.* (2013) ทำการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันเหลือใช้ (Waste cooking oil, WCO) ด้วยช่องจุลภาค ศึกษาผลของอัตราส่วนเมทานอลต่อน้ำมัน (4.5 ต่อ 1 ถึง 18 ต่อ 1) ความเข้มข้นของ H_2SO_4 (0.5-2 เปอร์เซ็นต์โดยมวล) อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา (55-70 องศาเซลเซียส) ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา (5-20 วินาที) พบว่า ที่อัตราส่วน เมทานอลต่อน้ำมันเท่ากับ 9 ต่อ 1 ความเข้มข้นไฮโดรซัลฟิวริก 1 เปอร์เซ็นต์โดยมวล อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา เท่ากับ 5 วินาที สามารถผลิตเมทิลเอสเทอร์ ได้ถึง 91.75 เปอร์เซ็นต์ และพบว่า ค่าความเป็นกรด (Acid value) จะลดลงจาก 3.96 มิลลิกรัม KOH ต่อกรัม เหลือน้อยกว่า 1 มิลลิกรัม KOH ต่อกรัม ด้วยการใช้ตัวเร่งที่เป็นกรด

Peiyong *et al.* (2010) ศึกษาการสังเคราะห์ไบโอดีเซลด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาค โดยใช้น้ำมันที่สกัดจากเมล็ดฝ้ายเป็นสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาและใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยได้ทำการเปรียบเทียบปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อมีการใช้ตัวช่วยในการผสม

ที่แตกต่างกัน ได้แก่ แบบ RIMM, SIMM-V2, T-mixer และ J – mixer พบว่าตัวช่วยการผสมสองชนิดแรกจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผสมดีกว่าสองชนิดหลัง เพราะค่าเปอร์เซ็นต์ FAME ที่ได้จากกรณีที่ใช้ตัวช่วยในการผสมสองชนิดแรกอยู่ที่ 50% ส่วนสองชนิดหลังอยู่ที่ 30% ซึ่งกระบวนการทั้งหมดกระทำที่สภาวะแวดล้อมเดียวกัน นอกจากนี้ยังได้ทดลองเปรียบเทียบขนาดท่อที่ใช้ในส่วนของ delay loop โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างการใช้ท่อสแตนเลส ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.6 มิลลิเมตรกับท่อที่ทำจากพอลิเอทเธอร์ฟลูออไรด์ (PTFE) ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 3 มิลลิเมตรและภายในบรรจุคิกซอนริง (Dixon rings) เป็น delay loop พบว่าที่สภาวะแวดล้อมเดียวกัน คือทำการทดลองที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส อัตราส่วนระหว่างเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 8 ต่อ 1 ค่าเปอร์เซ็นต์ FAME ที่ได้จากการทดลองที่ใช้ท่อที่ทำจากพอลิเอทเธอร์ฟลูออไรด์ (PTFE) ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 3 มิลลิเมตรเป็น delay loop จะได้ค่าเปอร์เซ็นต์ FAME สูงถึง 99.5% โดยใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 17 วินาที ส่วนการทดลองที่ใช้ท่อสแตนเลส ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเป็น 0.6 มิลลิเมตร จะได้ค่าเปอร์เซ็นต์ FAME 94.8% โดยใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยา 44 วินาที

Guoqing *et al.* (2009) ศึกษาปฏิกิริยาทรานเอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันทานตะวันกับเมทานอลโดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์แบบช่องจุลภาค โดยใช้อัตราส่วนของเมทานอลต่อน้ำมันเป็น 23.9 ต่อ 1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 4.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส มีเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเป็น 0.8 มิลลิเมตร และมีความยาวของท่อของเครื่องปฏิกรณ์ขนาดไมโครชาแนล 300 มิลลิเมตร พบว่าน้ำมันทั้งหมดได้ถูกเปลี่ยนไปเป็น FAME (Oil conversion เท่ากับ 100%) โดยใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาเพียง 100 วินาที

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography, GC) รุ่น star 3600 ยี่ห้อ Varian
2. Digital Automatic Voltage Stabilizer (รุ่น SRD 212, บริษัท Sidital True Power)
3. แผ่นช่องจุลภาคนิต T-mixer ยาว 120 เซนติเมตร
4. เครื่องชั่งดิจิตอล ทศนิยม 3 ตำแหน่ง Precision Balance รุ่น GF-300 ยี่ห้อ AND
5. เครื่องกวนสารละลายพร้อมเตาให้ความร้อน Hotplate and Magnetic Stirrer รุ่น C – MAG HS7 ยี่ห้อ IKA
6. เครื่องเหวี่ยงแยกสารยี่ห้อ Jouan รุ่น B 3.11
7. บีกเกอร์ขนาด 50, 100 และ 250 มิลลิลิตร
8. ขวดรูปชมพู่ขนาด 100 และ 250 มิลลิลิตร
9. ขวดแบบมีฝาปิดชนิด PK ขนาด 100 มิลลิลิตร
10. ปิเปตขนาด 1 5 และ 10 มิลลิลิตร
11. หลอดไมโครเซนตริฟิวก์ (Micro centrifuge tube)
12. เครื่องเหวี่ยงหรือศูนย์กลางชนิดไมโคร (Micro centrifuge) ยี่ห้อ IBI รุ่น IMC-15

2. วัสดุดิบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. เฮปเทน AR Grade 99.5% จาก Fisher Scientific
2. โทลูอิน AR Grade 99.8% จาก Fisher Scientific
3. ไตรเอทิลีนไกลคอล AR Grade 99 % จาก Sigma-Aldrich

วิธีการ

1. การสกัดโดยการกวนผสม

1.1 การเตรียมอุปกรณ์การทดลอง

1. เตรียมขวดแบบมีฝาปิดขนาด 100 มิลลิลิตร พร้อมแท่งแม่เหล็กกวนสารในการใช้กวนสกัด
2. ควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ที่ 30 องศาเซลเซียส และตั้งค่าความเร็วรอบของ เครื่องกวนผสมที่ 500 รอบต่อนาที
3. เตรียมเครื่องเหวี่ยง Centrifuge เพื่อใช้ในการเหวี่ยงแยกวัฏภาคระหว่างวัฏภาคสกัดและวัฏภาคที่ไม่ถูก สกัดโดยตั้งค่าความเร็วรอบที่ 3,600 รอบต่อนาที

1.2 ขั้นตอนการทดลอง

1. ผสมตัวทำละลายไตรเอทิลีนไกลคอล 20 ml กับ สารผสมไฮโดรคาร์บอนที่ใช้เป็นสารป้อน 20 ml ซึ่งจะได้อัตราส่วนตัวทำละลายต่อสารป้อน เท่ากับ 1 ต่อ 1
2. นำไปตั้งกวนด้วยเครื่อง Hot plate ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที
3. หลังจากนั้น นำไปเหวี่ยงเป็นเวลา 3 นาที เพื่อให้เกิดการแยกวัฏภาคอย่างชัดเจน
4. เก็บตัวอย่างใส่ vial 2 ขวด ในวัฏภาคที่ถูกสกัดและวัฏภาคที่ไม่ถูกสกัดในลักษณะเต็มขวดเพื่อลดช่องว่างในวัฏภาคแก๊ส
5. นำตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gas chromatography
6. ทำการทดลองซ้ำข้อที่ 2 – 5 ตามลำดับ โดยเปลี่ยนเวลาที่ใช้ในการกวนเป็น 30, 60, 90 และ 180 นาที ตามลำดับ
7. ทำการทดลองซ้ำข้อที่ 1 – 6 ตามลำดับ โดยเปลี่ยนอัตราส่วนตัวทำละลายต่อสารป้อน เป็น 3 ต่อ 1 และ 5 ต่อ 1 ตามลำดับ

2. การสกัดโดยช่องจุลภาค

2.1 การออกแบบการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบการทดลองโดยใช้โปรแกรม Minitab 17 โดยใช้ Design of experiments (DOE) แบบ full factorial design ในการออกแบบการทดลอง โดยแสดงดังตารางที่ 14

ตารางที่ 14 การออกแบบการทดลอง

StdOrder	RunOrder	Blocks	Contact time	Temperature	TEG to feed ratio
44	1	2	6	60	3
41	2	2	6	45	3
48	3	2	10	30	5
49	4	2	10	45	1
36	5	2	2	60	5
43	6	2	6	60	1
46	7	2	10	30	1
52	8	2	10	60	1
37	9	2	6	30	1
38	10	2	6	30	3
47	11	2	10	30	3
32	12	2	2	45	3
30	13	2	2	30	5
53	14	2	10	60	3
34	15	2	2	60	1
28	16	2	2	30	1
54	17	2	10	60	5
50	18	2	10	45	3
45	19	2	6	60	5
51	20	2	10	45	5
33	21	2	2	45	5
42	22	2	6	45	5
39	23	2	6	30	5

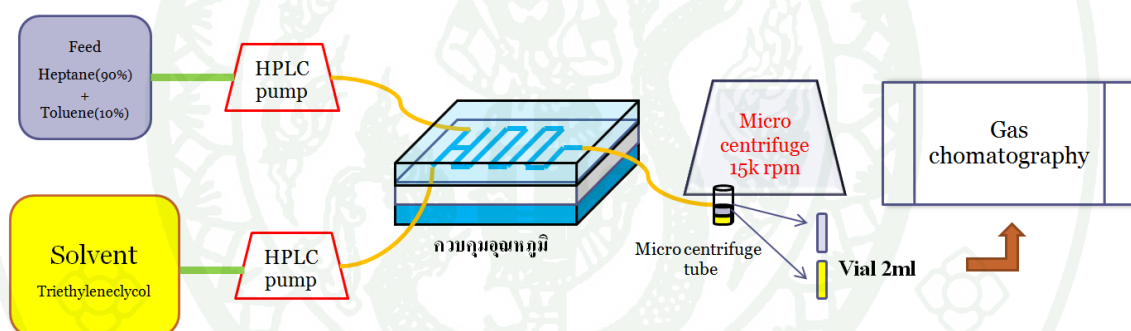
ตารางที่ 14 (ต่อ)

StdOrder	RunOrder	Blocks	Contact time	Temperature	TEG to feed ratio
40	24	2	6	45	1
31	25	2	2	45	1
29	26	2	2	30	3
35	27	2	2	60	3
1	28	1	2	30	1
19	33	1	10	30	1
15	34	1	6	45	5
22	35	1	10	45	1
5	36	1	2	45	3
16	37	1	6	60	1
25	38	1	10	60	1
6	39	1	2	45	5
21	40	1	10	30	5
24	41	1	10	45	5
18	42	1	6	60	5
10	43	1	6	30	1
4	44	1	2	45	1
9	45	1	2	60	5
27	46	1	10	60	5
26	47	1	10	60	3
7	48	1	2	60	1
14	49	1	6	45	3
23	50	1	10	45	3
13	51	1	6	45	1
11	52	1	6	30	3
20	53	1	10	30	3
17	54	1	6	60	3

2.2 การเตรียมอุปกรณ์การทดลองและขั้นตอนการทดลอง

2.2.1 การเตรียมอุปกรณ์การทดลอง

เตรียมช่องจุลภาคแสดงดังภาพที่ 14 โดยนำสารป้อนและตัวทำละลายมาต่อกับปั๊มแรงดันสูง โดยใช้ท่อ PTFE ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.02 นิ้ว เพื่อทำการป้อนตัวทำละลายและสารผสมไฮโดรคาร์บอน เข้าสู่ช่องจุลภาคและเตรียมเครื่องเหวี่ยงหนีศูนย์กลางชนิดไมโคร โดยมีความเร็วรอบที่ 15,000 รอบต่อนาที และควบคุมอุณหภูมิด้วยการป้อนน้ำ (Water bath) และเตรียมหลอดไมโครเซ็นทรีฟิวคสำหรับเก็บสารเพื่อนำไปเหวี่ยงเพื่อให้เกิดการแยกชั้น และเตรียม vial 2 ml เพื่อใช้ในการเก็บสารตัวอย่างทั้ง 2 วัฏภาค เพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี



ภาพที่ 14 การติดตั้งชุดการทดลองด้วยวิธีช่องจุลภาค

2.2.2 ขั้นตอนการทดลอง

1. ทำการทดลองตามที่ได้ออกแบบการทดลองจาก DOE โดยโปรแกรมจะทำการสุ่มการทดลองให้ โดยทำตามการทดลองที่โปรแกรมออกแบบมาให้ โดยเริ่มที่การทดลองที่ 26
2. เก็บสารตัวอย่างใส่หลอดทดลองขนาด 2 มิลลิลิตรหลังจากนั้นนำไปเหวี่ยง 1 นาที ด้วยเครื่องเหวี่ยงแยกสารชนิดไมโคร เพื่อให้เกิดการแยกวัฏภาคอย่างชัดเจน
3. เก็บตัวอย่างใส่ vial 2 ขวด ในวัฏภาคที่ถูกสกัดและวัฏภาคที่ไม่ถูกสกัด
4. นำตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Gas chromatography
5. ทำการทดลองซ้ำข้อที่ 1-4 โดยลดการทดลองที่โปรแกรมออกแบบมาให้ลำดับต่อไป

3. การวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.1 การวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอิน

ในการสกัดแบบของเหลว-ของเหลว ตัวแปรที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์ คือ เปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอิน (Extraction efficiency, E) โดยสามารถหาค่าได้จากสมการที่ 68

$$E(\%) = \frac{[A]_{Solvent} V_{Solvent} \times 100}{[A]_{Solvent} V_{Solvent} + [A]_{Aqueous} V_{Aqueous}} \quad (68)$$

เมื่อ	$[A]_{Solvent}$	คือ ความเข้มข้นของโทลูอินในวัฏภาคที่ถูกสกัด
	$[A]_{Aqueous}$	คือ ความเข้มข้นของโทลูอินในวัฏภาคที่ไม่ถูกสกัด
	$V_{Solvent}$	คือ ปริมาตรทั้งหมดในวัฏภาคที่ถูกสกัด
	$V_{Aqueous}$	คือ ปริมาตรทั้งหมดในวัฏภาคที่ไม่ถูกสกัด

3.2 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography, GC)

ตัวอย่างที่ได้จากการทดลองจะถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี โดยมีสถานะในการทดลองดังนี้

Carrier gas : ไนโตรเจน อัตราการไหล 2 มิลลิตร/นาที

Oven : 70 °c ถึง 110 °c ที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 25 °c/นาที และจาก 110 °c ถึง 230 °c ที่อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 30 °c/นาที

Detector : FID 300 °c

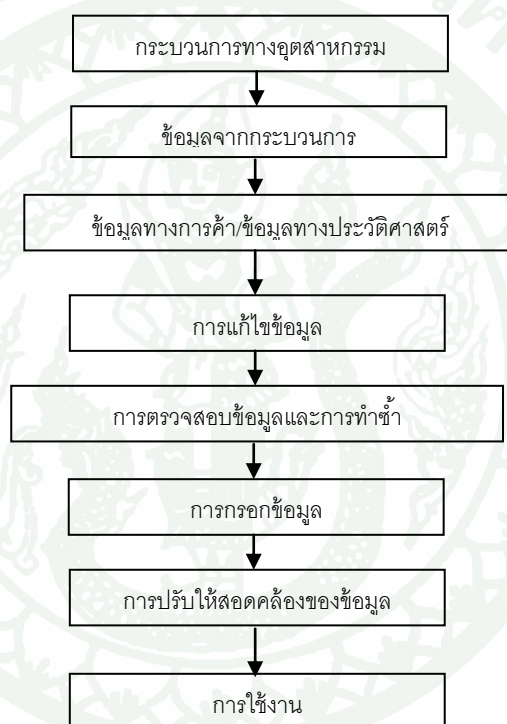
Column : Zebron™ ZB-WAXplus™, GC Cap. Column 30 m x 0.25 mm x 0.25 μm

Split ratio: 200 : 1 ที่อุณหภูมิ 250 °C ปริมาณสารที่ฉีด 1 ไมโครลิตร

3.3 การปรับให้สอดคล้องของข้อมูล (Data reconciliation)

ในกระบวนการอุตสาหกรรมเคมี เช่น ปิโตรเคมี หรือ โรงกลั่นน้ำมัน ต้องวัดค่าตัวแปรต่างๆ เช่น อุณหภูมิ ความดัน อัตราการไหล และอื่นๆ โดยค่าตัวแปรเหล่านี้จะถูกวัดตามเวลาที่

ต่างกัน และมีวิธีดำเนินการของข้อมูลดังภาพที่ 15 โดยในกระบวนการวัดตัวแปรใดๆนั้น ย่อมมีค่าผิดพลาดแฝงอยู่เสมอ ซึ่งค่าผิดพลาดนี้คือผลต่างระหว่างค่าที่วัดได้จริงกับค่าจริงของตัวแปรนั้นๆ ณ เวลาใดๆ โดยการปรับให้สอดคล้องของข้อมูล คือ การคำนวณหาค่าสถานะที่ดีที่สุดของตัวแปรที่ทำการวัด ซึ่งค่าสถานะที่ดีที่สุดคำนวณได้จากการวัดโดยตรง โดยในงานวิจัยนี้จะใช้การปรับให้สอดคล้องของข้อมูลแบบ weighted least-squares optimization problem ดังสมการที่ 69 (Narasimhan and Jordache, 2000)



ภาพที่ 15 การดำเนินการของข้อมูล

ที่มา: Narasimhan and Jordache (2000)

$$\text{Min } \sum_{i=1}^n w_i (y_i - x_i)^2 \quad (69)$$

เมื่อ w_i คือ น้ำหนักของข้อมูล
 y_i คือ ค่าที่ได้จากการวัด

x_i คือ ค่าที่ปรับให้สอดคล้อง

ตัวอย่างในการทำการปรับข้อมูลให้สอดคล้องในการสกัดโทลูอินจากเฮปเทนโดยพิจารณาปริมาณโทลูอินในสารป้อน (F_{toluene}) ในวัฏภาคที่ถูกสกัด (E_{toluene}) และในวัฏภาคที่ไม่ถูกสกัด (R_{toluene}) จากสมดุลมวล พบว่า $F_{\text{toluene}} = E_{\text{toluene}} + R_{\text{toluene}}$ แต่เมื่อทำการทดลอง กลับพบว่าไม่เป็นไปตามสมดุลมวล ดังนั้นจึงต้องมีการทำการปรับข้อมูลให้สอดคล้องเพื่อให้ข้อมูลมีความน่าเชื่อถือ

3.4 การวัดขนาดหยดวัฏภาค

ขนาดของหยดวัฏภาคของสารป้อนในตัวทำละลายสามารถวัดโดยใช้กล้องจุลทรรศน์โดยมีวิธีการดังนี้

1. หยดสารผสมระหว่างสารป้อนและตัวทำละลายที่ทางออกของช่องจุลภาคลงบนแผ่นกระจก
2. นำแผ่นกระจกอีกแผ่นมาปิดทับหยดของสารผสมและนำไปวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์
3. ปรับกำลังขยายให้เหมาะสม โดยให้ได้ภาพชัดที่สุด
4. บันทึกรูปภาพ และนำไปเปรียบเทียบกับขนาดหยดวัฏภาคที่เวลาในการสกัดต่างกัน

4. การคำนวณการเพิ่มกำลังการผลิตของการสกัดโทลูอินด้วยช่องจุลภาค

4.1 การออกแบบช่องจุลภาคที่อัตราการไหลของสารป้อนต่างกัน

การเพิ่มกำลังการผลิตของการสกัดโทลูอินด้วยช่องจุลภาคจะกำหนดอัตราการไหลของสารป้อนเท่ากับ 1 10 และ 100 ดันต่อวัน โดยการเพิ่มจำนวนแผ่นช่องจุลภาคตามปริมาณของสารป้อนที่ต้องการ โดยแบ่งการออกแบบเป็น 2 แบบคือ เครื่องปฏิกรณ์จุลภาคชุดเดียวต่อหนึ่งการผลิต และเครื่องปฏิกรณ์จุลภาคหลายชุดที่มีความสามารถในการผลิตเท่ากัน

สภาวะในการออกแบบการเพิ่มกำลังการผลิตคือ อัตราส่วน TEG ต่อสารป้อนเท่ากับ 5:1 เวลาในการสกัดเท่ากับ 2 วินาที และอุณหภูมิในการสกัด ($30-60^{\circ}\text{C}$) กำหนดให้แผ่นปิดด้านบนและด้านล่างของช่องจุลภาคมีความหนา 1 เซนติเมตร แผ่นช่องจุลภาคมีความหนา 2 มิลลิเมตร และ

เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิจะต้องใส่แผ่นสำหรับป้อนน้ำที่มีความหนา 2 มิลลิเมตรที่ด้านบนและด้านล่างของแผ่นช่องจุลภาค โดยถ้าใช้แผ่นช่องจุลภาคเท่ากับ N_m จะใช้แผ่นสำหรับป้อนน้ำเท่ากับ $N_m + 1$

4.2 การคำนวณพลังงานที่ใช้ในการสกัดโทลูอินด้วยช่องจุลภาค

การคำนวณพลังงานที่ใช้ในการสกัดโทลูอินด้วยช่องจุลภาคจะคิดพลังงานที่ใช้การปั๊มและการให้ความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิ ค่าพลังงานที่ใช้จะอยู่ในหน่วย กิโลวัตต์ (kW)

พลังงานที่ต้องปั๊มใช้คำนวณจากสมการของแบร์นูลลี (Bernoulli's equation) แสดงดังสมการที่ 70 (White, 2011)

$$-w_s = \frac{P_{out} - P_{in}}{\rho} + \frac{V_{out}^2 - V_{in}^2}{2} + g(Z_{out} - Z_{in}) + loss \quad (70)$$

เมื่อ	$-w_s$	คือ พลังงานที่ปั๊มใช้ (N/m)
	P_{in}	คือ ความดันขาเข้า (N/m ²)
	P_{out}	คือ ความดันขาออก (N/m ²)
	ρ	คือ ความหนาแน่นของสาร (kg/m ³)
	V_{in}	คือ อัตราเร็วตามแกนไหลขาเข้า (m/s)
	V_{out}	คือ อัตราเร็วตามแกนไหลขาออก (m/s)
	g	คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (gravity force) เท่ากับ 9.81 m/s ²
	Z_{in}	คือ ความสูงของปั๊มจากพื้น กำหนดให้เท่ากับศูนย์
	Z_{out}	คือ ความสูงที่ปั๊มต้องดันสารขึ้นไป (m)
	$loss$	คือ พลังงานที่สูญเสีย (N/m)

กำหนดให้อัตราเร็วตามแกนมีค่าคงที่ ($\frac{V_{out}^2 - V_{in}^2}{2} = 0$) และไม่มีการสูญเสียพลังงาน ($loss = 0$) จะได้ดังสมการที่ 71

$$-w_s = \frac{P_{out} - P_{in}}{\rho} + g(Z_{out} - Z_{in}) \quad (71)$$

และ $\dot{m} = \rho Q$ (72)

เมื่อ $\dot{m}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวล (kg/s)
 Q คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตร (m³/s)

เมื่อนำสมการที่ 71 และ 72 มารวมกัน ค่าพลังงานที่ได้ในหน่วย วัตต์ จะสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 73

$$\dot{m} \times (-w_s) = Q(P_{out} - P_{in}) + gQ\rho(Z_{out} - Z_{in}) \quad (73)$$

การคำนวณพลังงานในการให้ความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้แก่สารแสดงดังสมการที่ 74

$$\dot{q} = \frac{\dot{m}}{mw} \int_{T_1}^{T_2} C_p dT \quad (74)$$

เมื่อ $\dot{q}$ คือ พลังงานที่ใช้ในการให้ความร้อน (W)
 mw คือ มวลโมเลกุลของสาร (g/mol)
 C_p คือ ค่าความจุความร้อนของสาร (J/mol·°C)
 T_1 คือ อุณหภูมิเริ่มต้น(°C)
 T_2 คือ อุณหภูมิสุดท้าย (°C)

โดย C_p หาได้จากสมการที่ 75

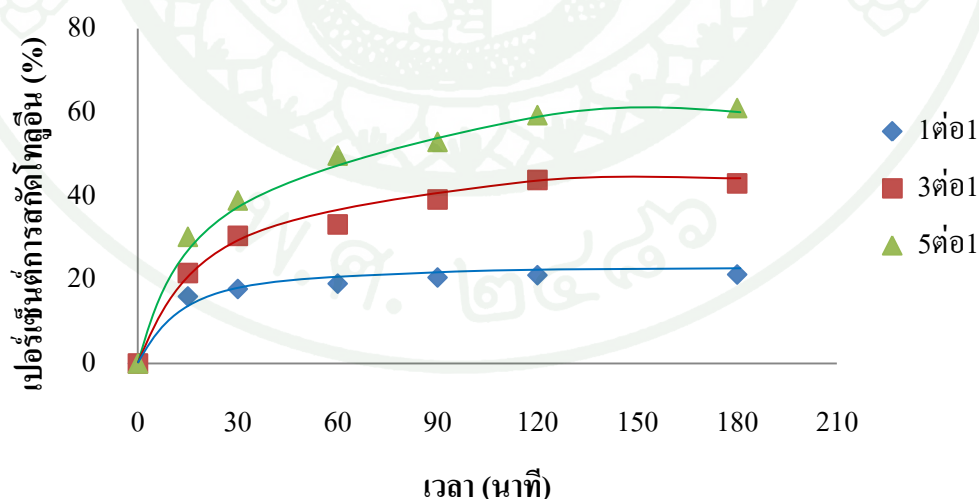
$$C_p = c_1 + c_2T + c_3T^2 + c_4T^3 \quad (75)$$

เมื่อ c_1 c_2 c_3 และ c_4 คือ ค่าคงที่เฉพาะของสารแต่ละตัว
 T คือ อุณหภูมิ (°C)

ผลการทดลองและวิจารณ์

1. ผลการศึกษาการสกัดโทลูอินด้วยวิธีการกวนผสมแบบกะ

การทดลองการสกัดโทลูอินจากเฮปแทนด้วยวิธีการกวนผสมแบบกะที่อุณหภูมิ 30 °C เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่สมดุลของวิธีการสกัดแบบดั้งเดิมแสดงในภาพที่ 16 พบว่า ผลการทดลองที่อัตราส่วนโดยโมลตัวของ TEG ต่อสารป้อนทั้ง 3 ค่า คือ 1:1 3:1 และ 5:1 ให้ผลการทดลองในลักษณะคล้ายคลึงกัน คือ เปอร์เซ็นต์การสกัดจะเพิ่มขึ้นตามเวลาที่ใช้ในการสกัด โดยในช่วงแรก (0-30 นาที) เปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอินจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เพราะในตัวทำละลายยังไม่มีโทลูอินละลายอยู่เลย จึงทำให้เกิดแรงขับ (Driving force) โทลูอินไปยังตัวทำละลายมาก หลังจากนั้นในช่วงกลาง (30-120 นาที) เปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอินจะเพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลง เพราะเริ่มมีปริมาณโทลูอินละลายอยู่ในตัวทำละลาย ทำให้แรงขับมีค่าลดลง และเริ่มเข้าสู่สมดุล โดยที่อัตราส่วน TEG ต่อสารป้อนเท่ากับ 1:1 เข้าสู่สมดุลที่เวลาประมาณ 90 นาที ส่วนอัตราส่วน TEG ต่อสารป้อนเท่ากับ 3:1 และ 5:1 เข้าสู่สมดุลที่เวลาประมาณ 120 นาที โดยพบว่า เปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอินมีค่าเท่ากับ 21 44 และ 60 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราส่วน TEG ต่อสารป้อน 1:1 3:1 และ 5:1 ตามลำดับ



ภาพที่ 16 เปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอินต่อเวลาในการสกัดที่อัตราส่วนตัวทำละลายต่อสารป้อนที่ต่างกัน

2. ผลการศึกษาการสกัดโทลูอินด้วยช่องจุลภาค

ผลของการสกัดโทลูอินจากเฮปเทนด้วยช่องจุลภาคแสดงดังตารางที่ 15 ซึ่งข้อมูลเปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอินนี้ จะถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยวิธีทางสถิติต่อไป

ตารางที่ 15 เปอร์เซนต์การสกัดโทลูอินที่สภาวะต่างกันของการสกัดด้วยช่องจุลภาค

StdOrder	RunOrder	Blocks	เวลา ในการสกัด (วินาที)	อุณหภูมิ (°C)	อัตราส่วน TEG ต่อ สารป้อน	เปอร์เซนต์การสกัด โทลูอิน (%)
44	1	2	6	60	3	44.5770
41	2	2	6	45	3	45.8564
48	3	2	10	30	5	50.1527
49	4	2	10	45	1	13.8542
36	5	2	2	60	5	55.5416
43	6	2	6	60	1	15.3110
46	7	2	10	30	1	17.3921
52	8	2	10	60	1	19.8784
37	9	2	6	30	1	11.5103
38	10	2	6	30	3	41.5593
47	11	2	10	30	3	45.2317
32	12	2	2	45	3	42.1219
30	13	2	2	30	5	61.0071
53	14	2	10	60	3	47.0116
34	15	2	2	60	1	21.5104
28	16	2	2	30	1	21.4776
54	17	2	10	60	5	60.0323
50	18	2	10	45	3	46.7865
45	19	2	6	60	5	56.7683
51	20	2	10	45	5	55.1692

ตารางที่ 15 (ต่อ)

StdOrder	RunOrder	Blocks	เวลา ในการสกัด (วินาที)	อุณหภูมิ (°C)	อัตราส่วน TEG ต่อ สารป้อน	เปอร์เซ็นต์การสกัด โทลูอิน (%)
33	21	2	2	45	5	60.8867
42	22	2	6	45	5	52.5952
39	23	2	6	30	5	43.5480
40	24	2	6	45	1	11.9484
31	25	2	2	45	1	18.6517
29	26	2	2	30	3	39.7180
35	27	2	2	60	3	44.0348
1	28	1	2	30	1	21.1178
12	29	1	6	30	5	48.7398
8	30	1	2	60	3	50.0137
2	31	1	2	30	3	39.1510
3	32	1	2	30	5	58.5142
19	33	1	10	30	1	20.1139
15	34	1	6	45	5	53.2201
22	35	1	10	45	1	22.2590
5	36	1	2	45	3	44.2640
16	37	1	6	60	1	21.2551
25	38	1	10	60	1	13.8688
6	39	1	2	45	5	59.2539
21	40	1	10	30	5	50.3776
24	41	1	10	45	5	52.6390
18	42	1	6	60	5	51.6985
10	43	1	6	30	1	11.4807
4	44	1	2	45	1	23.9497
9	45	1	2	60	5	65.4038

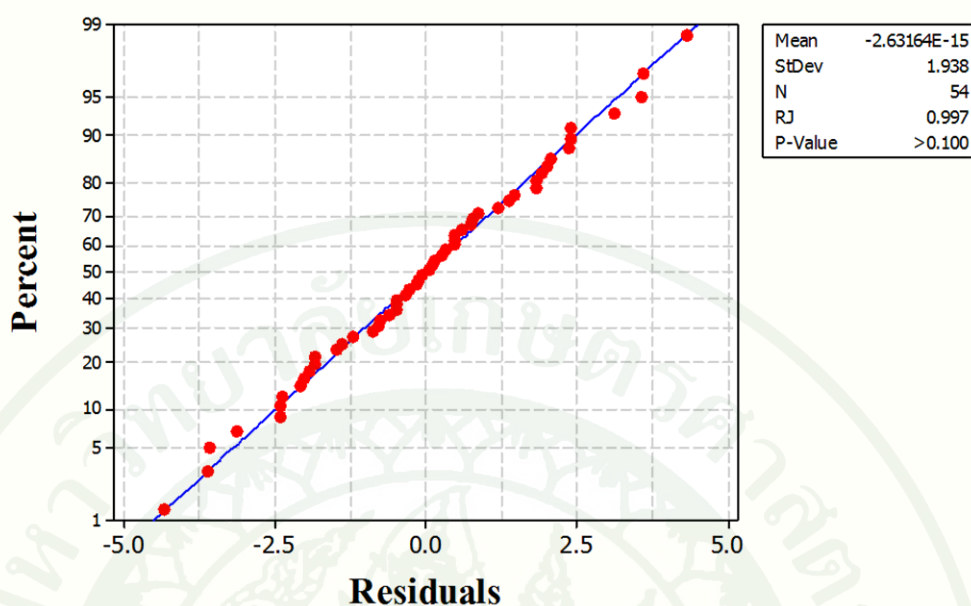
ตารางที่ 15 (ต่อ)

StdOrder	RunOrder	Blocks	เวลา ในการสกัด (วินาที)	อุณหภูมิ (°C)	อัตราส่วน TEG ต่อ สารป้อน	เปอร์เซ็นต์การสกัด โทลูอิน (%)
27	46	1	10	60	5	56.4008
26	47	1	10	60	3	47.4969
7	48	1	2	60	1	22.4281
14	49	1	6	45	3	46.7011
23	50	1	10	45	3	45.0001
13	51	1	6	45	1	14.0907
11	52	1	6	30	3	42.5928
20	53	1	10	30	3	44.0054
17	54	1	6	60	3	49.6158

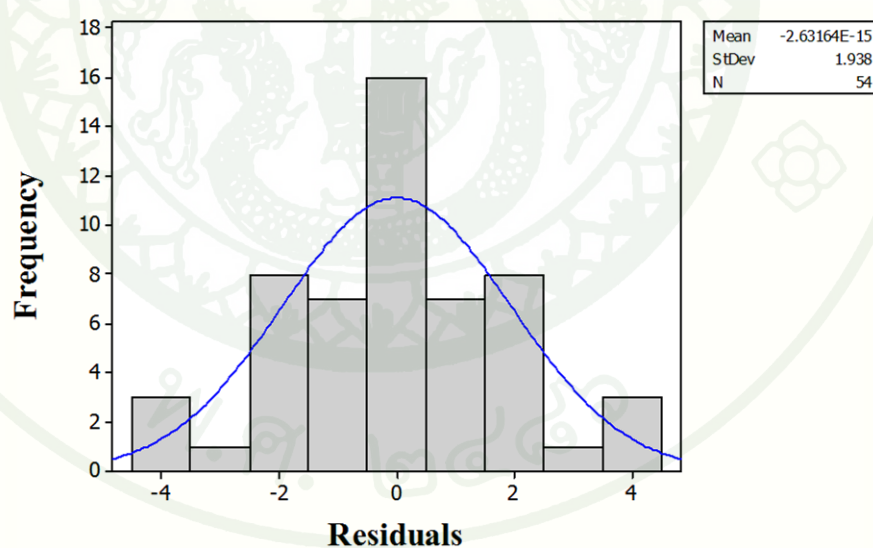
2.1 ข้อสมมติฐานในการวิเคราะห์ความแปรปรวน

การวิเคราะห์ความแปรปรวนสามารถทำได้เมื่อค่าส่วนตกค้าง (Residuals) มีการแจกแจงแบบปกติ ค่าเฉลี่ยของส่วนตกค้างมีค่าเท่ากับศูนย์ ความแปรปรวนของส่วนตกค้างมีค่าคงที่ และค่าส่วนตกค้างเป็นอิสระต่อกัน โดยเมื่อพิจารณากราฟความน่าจะเป็นของการแจกแจงแบบปกติ (Normal probability plot) ของการทดลอง ซึ่งแสดงถึงส่วนตกค้างของการทดลอง แสดงในภาพที่ 17 พบว่า ข้อมูลในกราฟมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง และเมื่อนำไปตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normality test) ตามวิธีของ Ryan-Joiner (RJ) (Ryan and Joiner, 1976) พบว่า ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ ค่า RJ เท่ากับ 0.997 และค่า p-value มากกว่า 0.100 ซึ่งมากกว่าค่า R_p ที่จุดวิกฤต และค่า p-value มากกว่า 0.05 ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า ค่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ

การกระจายตัวของส่วนตกค้างยังสามารถพิจารณาได้จากฮิสโตแกรมของส่วนตกค้าง ดังแสดงในภาพที่ 18 โดยพบว่า ส่วนตกค้างมีการกระจายตัวแบบปกติ (Normal distribution)



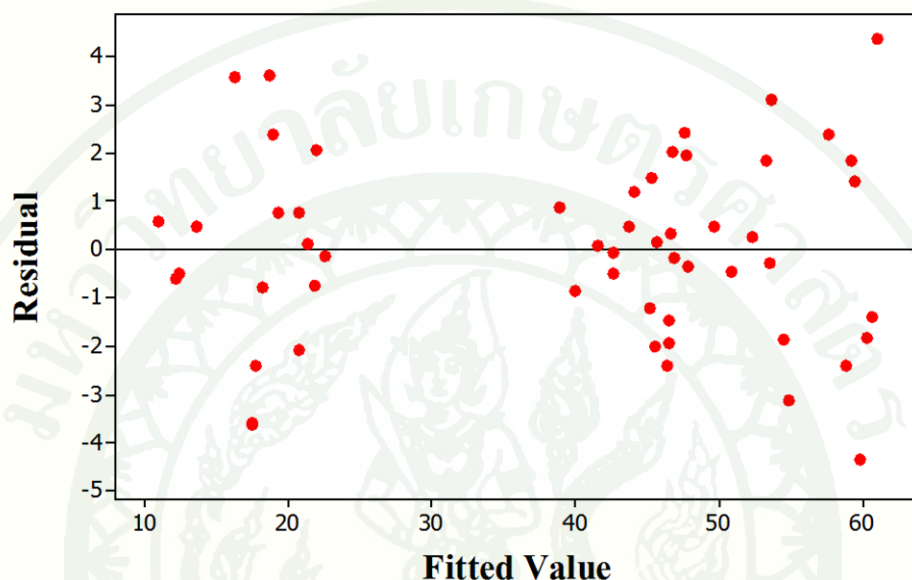
ภาพที่ 17 กราฟความน่าจะเป็นของการแจกแจงแบบปกติของส่วนตกค้าง



ภาพที่ 18 การกระจายตัวในแผนภูมิฮิสโตแกรมของส่วนตกค้าง

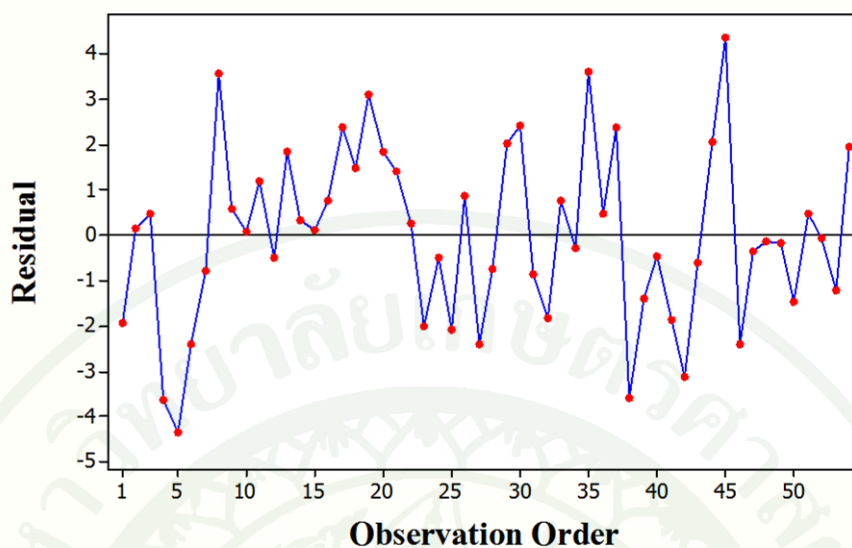
เมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ของส่วนตกค้างและค่าประมาณบนเส้นถดถอย (Fitted value) แสดงดังภาพที่ 19 พบว่า ข้อมูลในกราฟมีการกระจายอยู่รอบเส้นศูนย์ และมีการกระจายตัวอย่างไม่มีรูปแบบ ตรวจสอบด้วยวิธีของ Levene's test (Gastwirth *et al.*, 2009) พบว่าที่

ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ มีค่า F_w และ p-value เท่ากับ 0.03 และ 0.867 ตามลำดับ ซึ่งค่า F_w มีค่าน้อยกว่า $F_{0.05,1,52}$ (เท่ากับ 4.032) และ p-value มากกว่า 0.05 ดังนั้นสรุปได้ว่าความแปรปรวนของส่วนตกค้างมีค่าคงที่



ภาพที่ 19 ความสัมพันธ์ของส่วนตกค้างและค่าประมาณบนเส้นถดถอย

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างและลำดับการทดลองแสดงในภาพที่ 20 โดยสามารถตรวจสอบความเป็นอิสระของค่าส่วนตกค้าง (Independently distributed) ด้วยวิธีของ Kruskal-Wallis (Kruskal and Wallis, 1992) พบว่าที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ ค่า F_H และค่า p-value มีค่าเท่ากับ 53 และ 0.474 ตามลำดับ ซึ่งค่า F_H มีค่าน้อยกว่า $\chi^2_{0.05,53}$ (เท่ากับ 70.993) และค่า p-value มีค่ามากกว่า 0.05 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวอย่างอิสระ และจากการตรวจสอบสมมติฐานทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่าการทดลองนี้สามารถทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนได้



ภาพที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างและลำดับการทดลอง

2.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับค่าเปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอิน

งานวิจัยนี้อาศัยหลักการวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยใช้การทดลองแบบเต็มรูป (Full factorial design) เพื่อทำการศึกษปัจจัยหลัก และผลกระทบร่วมของปัจจัยโดยกำหนดสมมติฐานในการทดสอบคือ

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 \text{ ปัจจัยที่ศึกษาไม่มีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอิน}$$

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \text{ ปัจจัยที่ศึกษามีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอิน}$$

ข้อมูลจากการทดลองถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab 16 โดยความแปรปรวนของข้อมูลที่ได้จากการทดลองแสดงในตารางที่ 16 ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนได้กำหนดนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้น ปัจจัยหลัก (Main effect) หรือปัจจัยร่วม (Interaction effect) ใด ที่มีค่า p-value มากกว่า 0.05 จะถือว่าไม่มีผลกระทบต่อเปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอิน จากตารางที่ 16 พบว่า ผลกระทบของเวลาในการสกัด (A) อุณหภูมิในการสกัด (B) อัตราส่วนโดยโมลของ TEG ต่อสารป้อน (C) และผลกระทบร่วมระหว่างเวลาในการสกัดและอัตราส่วนโดยโมลของ TEG ต่อสารป้อน (A*C) มีค่า p-value เท่ากับ 0.000 0.001 0.000 และ 0.000 ตามลำดับ ซึ่งมีค่า p-value น้อยกว่า 0.05 ดังนั้น ปัจจัยเหล่านี้จึงมีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอิน ส่วนผลกระทบของชุดการทดลอง (Blocks) ผลกระทบร่วมระหว่างเวลาในการสกัดและ

อุณหภูมิในการสกัด (A*B) ผลกระทบร่วมระหว่างอุณหภูมิในการสกัดและอัตราส่วนโดยโมลของ TEG ต่อสารป้อน (B*C) และผลกระทบร่วมของเวลาในการสกัด อุณหภูมิในการสกัด และอัตราส่วนโดยโมลของ TEG ต่อสารป้อน (A*B*C) มีค่า p-value เท่ากับ 0.133 0.443 0.449 และ 0.355 ตามลำดับ ซึ่งต่างมี p-value ค่ามากกว่า 0.05 ดังนั้นปัจจัยเหล่านี้จึงไม่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอิน ดังนั้น สมมติฐานหลัก H_0 จึงถูกปฏิเสธ

ตารางที่ 16 ความแปรปรวนของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง

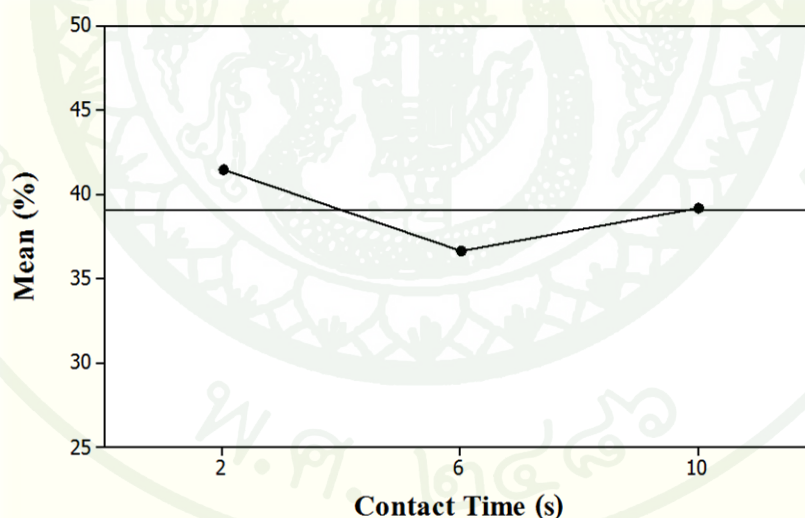
Source (แหล่งที่มา)	d.f. (องศาเสรี)	SS (ผลบวกกำลังสอง)	MS (ค่าเฉลี่ย SS)	F-value (ค่าสถิติ)	Prob>F (p-value)
Blocks	1	18.40	18.40	2.4	0.133
A	2	205.43	107.72	13.42	0.000
B	2	157.49	78.75	10.29	0.001
C	2	13283.00	6641.50	867.90	0.000
A*B	4	29.55	7.39	0.97	0.443
A*C	4	227.81	56.95	7.44	0.000
B*C	4	29.21	7.30	0.95	0.449
A*B*C	8	71.46	8.93	1.17	0.355
Error	26	198.96	7.65		
Total	53	14221.30			

หมายเหตุ	Blocks	คือ ชุดการทดลองแต่ละซ้ำ
	A	คือ เวลาที่ใช้ในการสกัด (วินาที)
	B	คือ อุณหภูมิในการสกัด (องศาเซลเซียส)
	C	คือ อัตราส่วนโดยโมลของตัวทำละลายต่อสารป้อน
	Error	คือ ค่าความผิดพลาด
	Total	คือ ค่าทั้งหมด

2.3 การวิเคราะห์ผลกระทบของปัจจัยหลักที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอิน

2.3.1 ผลกระทบของเวลาในการสกัดที่มีต่อเปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอิน

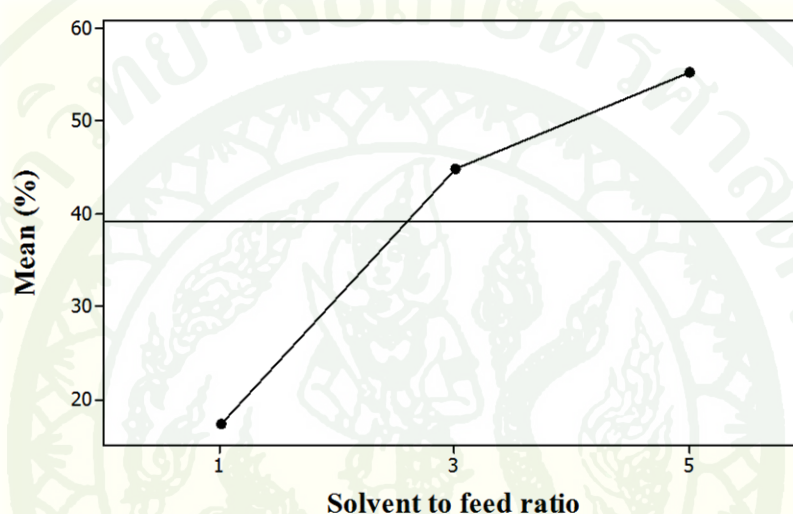
จากภาพที่ 21 แสดงผลกระทบของเวลาในการสกัดที่มีต่อเปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอิน พบว่า ที่เวลาในการสกัด 2 วินาทีมีค่าเปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอินมากที่สุด และลดลงที่เวลาในการสกัด 6 วินาที และเพิ่มขึ้นที่เวลาในการสกัด 10 วินาที เพราะที่เวลาในการสกัด 2 วินาทีใช้อัตราเร็วเชิงปริมาตรมากที่สุด ส่งผลทำให้ใช้ความดันมากที่สุด จึงทำให้หยดวัฏภาคมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับหยดวัฏภาคที่เวลา 6 และ 10 วินาที จึงทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสมากที่สุด ดังนั้นค่าเปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอินจึงมีค่ามากที่สุด และที่เวลาในการสกัด 6 และ 10 วินาที อัตราเร็วที่ใช้มีค่าต่างกันไม่มาก ทำให้ใช้ความดันใกล้เคียงกัน จึงทำให้ขนาดของหยดวัฏภาคมีขนาดใกล้เคียงกัน แต่ที่เวลาในการสกัด 10 วินาที สามารถมีเวลาในการถ่ายโอนมวลสารได้นานกว่า จึงมีค่าเปอร์เซ็นต์การสกัดมากกว่า (อธิบายเพิ่มเติมในหัวข้อที่ 2.5)



ภาพที่ 21 ผลกระทบของเวลาในการสกัดต่อเปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอิน

2.3.2 ผลกระทบของอัตราส่วนตัวโดยโมลของ TEG ต่อสารป้อนที่มีต่อเปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอิน

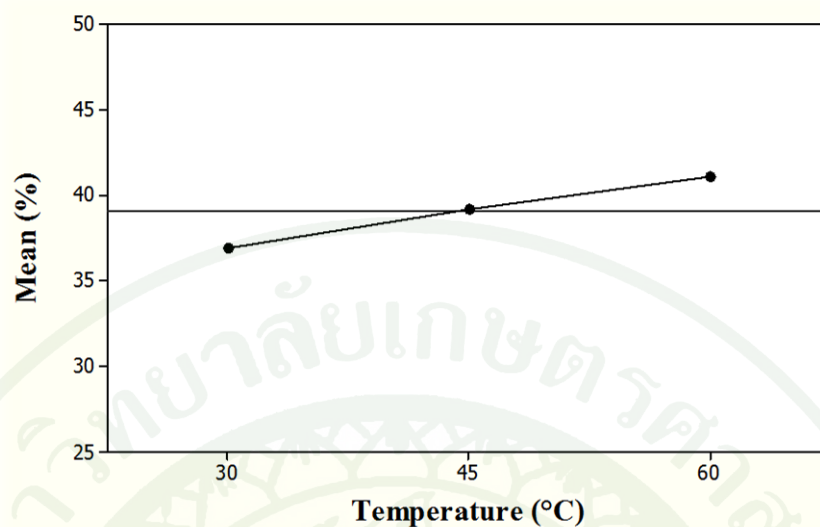
จากภาพที่ 22 แสดงผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลของ TEG ต่อสารป้อนที่มีต่อเปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอิน พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของ TEG ต่อสารป้อนทำให้เปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอินเพิ่มขึ้น เพราะเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของ TEG ต่อสารป้อนทำให้ปริมาณ TEG มีมากขึ้นทำให้โทลูอินสามารถละลายใน TEG ได้มากขึ้น จึงทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอินมีค่าเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 22 ผลกระทบของอัตราส่วนตัวโดยโมลของ TEG ต่อสารป้อนต่อเปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอิน

2.3.3 ผลกระทบของอุณหภูมิในการสกัดที่มีต่อเปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอิน

ภาพที่ 23 แสดงผลกระทบของอุณหภูมิในการสกัดที่มีต่อเปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอิน พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการสกัดทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การสกัดเพิ่มขึ้น เพราะเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion coefficient, D_{AB}) จะมีค่าเพิ่มขึ้นทำให้โทลูอินสามารถถ่ายโอนมวลมายัง TEG ได้มากขึ้น เปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอินจึงมีค่าเพิ่มขึ้น

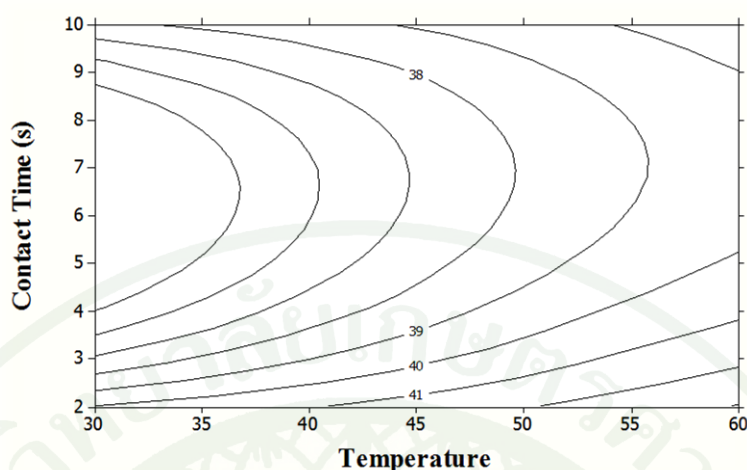


ภาพที่ 23 ผลกระทบของอุณหภูมิในการสกัดต่อเปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอิน

2.4 การวิเคราะห์ผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอิน

2.4.1 ผลกระทบของระยะเวลาในการสกัดและอุณหภูมิในการสกัดที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอิน

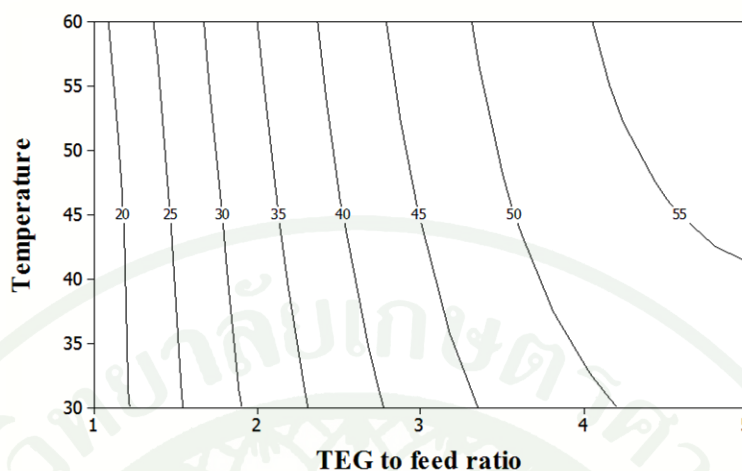
ผลกระทบร่วมระหว่างเวลาในการสกัดและอุณหภูมิในการสกัดที่มีต่อเปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอินแสดงในภาพที่ 24 พบว่า เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการสกัดจะทำให้เปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอินมีค่าเพิ่มขึ้น โดยเมื่อเวลาในการสกัดในช่วง 2-10 วินาที ถ้าใช้เวลาในการสกัด 2 วินาทีจะทำให้ค่าเปอร์เซ็นต์การสกัดสูงที่สุด และจะลดลงเมื่อเวลาในการสกัดเพิ่มขึ้นที่เวลาในการสกัด 3-6 วินาที และจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการสกัดเพิ่มขึ้นที่เวลาในการสกัด 7-10 วินาที เนื่องจากเหตุผลเดียวกันกับหัวข้อที่ 2.3.1 โดยถ้าเพิ่มเวลาในการสกัดและอุณหภูมิในการสกัดพร้อมจะทำให้เปอร์เซ็นต์การสกัดเพิ่มขึ้น หรือลดลงเล็กน้อย หรือคงที่ ขึ้นอยู่กับว่าเพิ่มปัจจัยไหนมากกว่า เพราะปัจจัยทั้งสองให้ส่งผลกระทบตรงข้ามกันที่เวลาในการสกัดช่วงแรก (2-6 วินาที) และปัจจัยทั้งสองส่งผลกระทบในทางเดียวกันที่เวลาในการสกัดช่วงหลัง (6-10 วินาที)



ภาพที่ 24 Contour plot ผลกระทบร่วมของเวลาในการสกัดและอุณหภูมิในการสกัดที่มีต่อเปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอิน

2.4.2 ผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลของ TEG ต่อสารป้อนและอุณหภูมิในการสกัดที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอิน

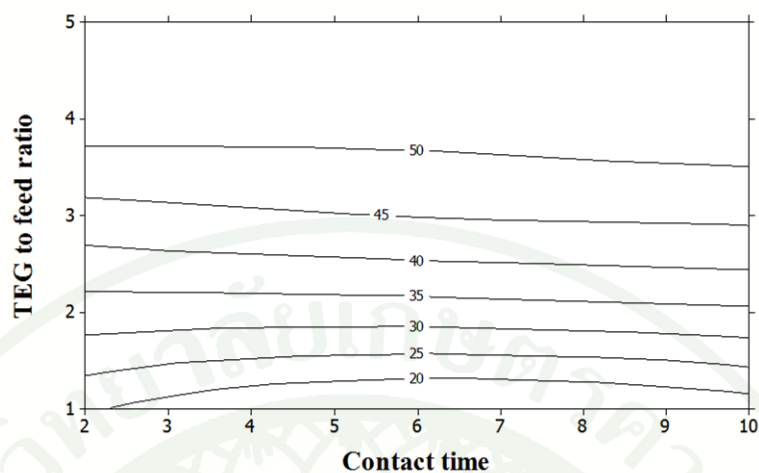
ภาพที่ 25 แสดงผลกระทบร่วมของอัตราส่วนโดยโมลของ TEG ต่อสารป้อนและอุณหภูมิในการสกัดที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอิน พบว่า ปัจจัยทั้งสองส่งผลกระทบต่อเปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอินในทางเดียวกัน คือ เปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอินจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของ TEG ต่อสารป้อนหรือเพิ่มอุณหภูมิในการสกัด โดยการเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของ TEG ต่อสารป้อนจะมีผลเปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอินมากกว่าการเพิ่มอุณหภูมิในการสกัด กล่าวคือ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 30 °C เป็น 60 °C เปอร์เซ็นต์การสกัดจะเพิ่มขึ้นประมาณ 13% แต่ถ้าเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของ TEG ต่อสารป้อนจาก 1:1 เป็น 5:1 เปอร์เซ็นต์การสกัดจะเพิ่มขึ้นประมาณ 210% ดังนั้นเมื่อเพิ่มปัจจัยทั้งสองพร้อมกันจะส่งผลทำให้เปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอินเพิ่มขึ้น เพราะปัจจัยทั้งสองส่งผลในทางเดียวกันคือ เมื่อเพิ่มค่าของปัจจัย จะทำให้เปอร์เซ็นต์การสกัดเพิ่มขึ้น โดยถ้าต้องการเปอร์เซ็นต์การสกัดเพิ่มขึ้น ควรจะเพิ่มอัตราส่วนโดยโมลของ TEG ต่อสารป้อนมากกว่าการเพิ่มอุณหภูมิในการสกัด เพราะอัตราส่วนโดยโมลของ TEG ต่อสารป้อนมีผลต่อเปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอินมากกว่า



ภาพที่ 25 Contour plot ผลกระทบร่วมของอุณหภูมิในการสกัดและอัตราส่วนโดยโมลของ TEG ต่อสารป้อนที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอิน

2.4.3 ผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลของ TEG ต่อสารป้อนและเวลาในการสกัดที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอิน

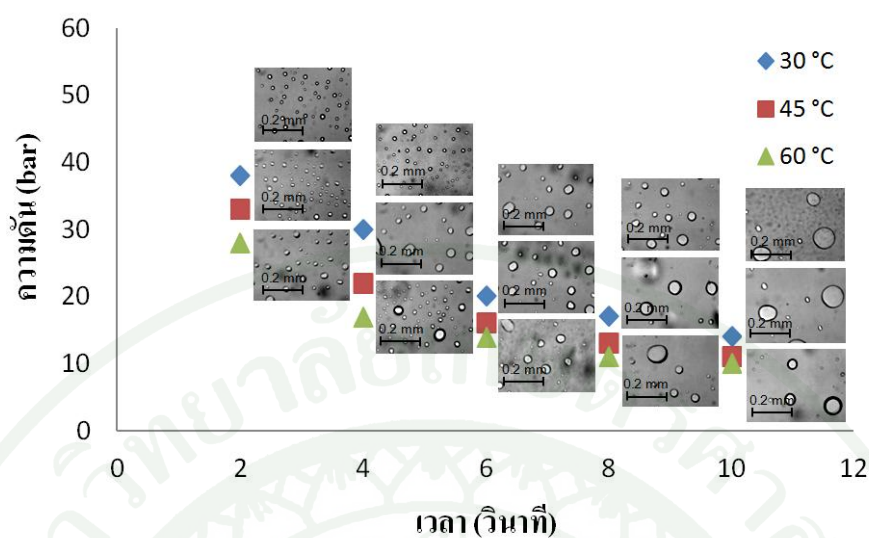
ผลกระทบของอัตราส่วนโดยโมลของ TEG ต่อสารป้อนและเวลาในการสกัดที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอินแสดงในภาพที่ 26 พบว่าเมื่อเพิ่มปัจจัยทั้งสองพร้อมกัน ที่เวลาในการสกัดช่วงแรก (2-6วินาที) เปอร์เซ็นต์การสกัดอาจจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงเล็กน้อย หรืออาจคงที่ขึ้นอยู่กับว่าเพิ่มปัจจัยใดมากกว่า เพราะปัจจัยทั้งสองส่งผลกระทบต่อเปอร์เซ็นต์การสกัดในทางตรงข้ามกัน โดยอัตราส่วนโดยโมลของ TEG ต่อสารป้อนจะส่งผลทางบวก แต่เวลาในการสกัดจะส่งผลทางลบ และที่เวลาในการสกัดช่วงหลัง (6-10วินาที) เปอร์เซ็นต์การสกัดจะเพิ่มขึ้น เพราะปัจจัยทั้งสองส่งผลกระทบต่อเปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอินในทางเดียวกัน คือทางบวก



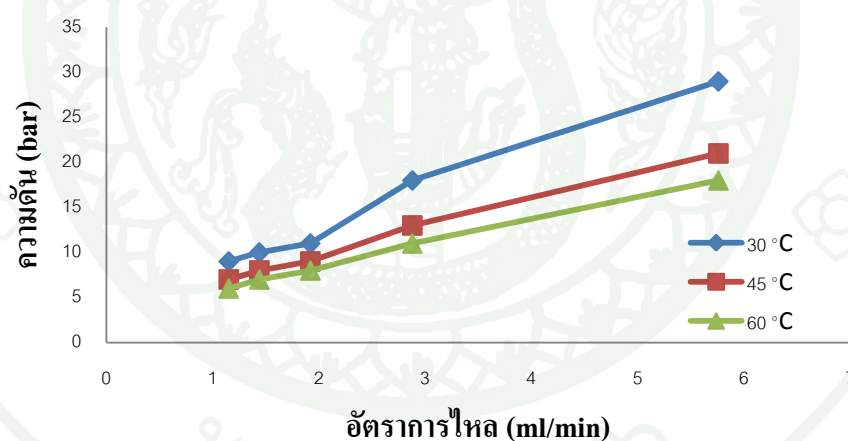
ภาพที่ 26 Contour plot ผลกระทบร่วมของเวลาในการสกัดและอัตราส่วนโดยโมลของ TEG ต่อสารป้อนที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอิน

2.5 การวิเคราะห์ขนาดของหยดวัฏภาคโดยกล้องจุลทรรศน์

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการสกัดแบบของเหลว-ของเหลวโทลูอินออกจากเฮปเทนด้วยช่องจุลภาคและได้ทำการวิเคราะห์ผลกระทบของขนาดหยดวัฏภาคที่มีต่อเปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอิน โดยการใช้กล้องจุลทรรศน์ส่องดูขนาดหยดวัฏภาคของการสกัดโทลูอินด้วยช่องจุลภาค ที่อัตราส่วนโดยโมลของ TEG ต่อสารป้อน 3:1 อุณหภูมิ 30 45 และ 60 °C เวลาในการสกัด 2 4 6 8 และ 10 วินาที แสดงในภาพที่ 27 พบว่า เมื่อเพิ่มเวลาในการสกัด (หรือลดอัตราการไหลเชิงปริมาตร) จะทำให้ใช้แรงดันในการเคลื่อนสารลดลง ทำให้ขนาดหยดวัฏภาคใหญ่ขึ้น และที่เวลาในการสกัดเท่ากัน เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ความดันจะมีค่าลดลง เพราะเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้สารมีความหนืดน้อยลง ส่งผลทำให้สารเคลื่อนที่ได้ง่ายขึ้นทำให้ใช้แรงดันในการเคลื่อนสารน้อยลง แสดงในภาพที่ 28 ซึ่งที่อัตราส่วนโดยโมลของ TEG ต่อสารป้อน 1:1 และ 5:1 ให้ผลการทดลองในลักษณะคล้ายคลึงกัน



ภาพที่ 27 ผลของความดันและขนาดของหยดจุลภาคต่อเวลาที่อุณหภูมิต่างกันที่อัตราส่วน TEG ต่อสารป้อน 3:1



ภาพที่ 28 ผลของความดันต่ออัตราการไหลเชิงปริมาตรในช่องจุลภาคที่อัตราส่วน TEG ต่อสารป้อน 3:1

2.6 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมเชิงปริมาตร ($k_L a$)

ตารางที่ 17 แสดงการเปรียบเทียบค่า $k_L a$ ของงานวิจัยนี้เทียบกับงานวิจัยต่างๆที่มีการใช้ช่องจุลภาค พบว่าค่า $k_L a$ ของงานวิจัยนี้มีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยอื่น โดยมีค่าอยู่ในช่วง 1.4×10^{-1} ถึง 1.15×10^0 ซึ่งมีค่ามากกว่าการใช้ช่องจุลภาคในกระบวนการอื่นเล็กน้อย และเมื่อเปรียบเทียบกับ

เครื่องปฏิกรณ์อื่นในระบบเดียวกันแสดงในตารางที่ 18 พบว่าช่องจุลภาคมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมเชิงปริมาตรมากกว่า ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการเข้าสู่สมดุลที่เร็วกว่า

ตารางที่ 17 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมเชิงปริมาตรของช่องจุลภาคในกระบวนการต่างๆ

แหล่งที่มา	ชนิดของช่องจุลภาค	ระบบ	$k_L a$ (s ⁻¹)
งานวิจัยนี้	T - junction with square tube	Heptane (toluene) TEG	$1.4 \times 10^{-1} - 1.15 \times 10^0$
Dareker <i>et al.</i> (2014)	T - junction with capillary tube	30% TBP in dodecane (uranium) water and nitric acid	$8.2 \times 10^{-4} - 1.5 \times 10^{-1}$
Kashid <i>et al.</i> (2011)	T - junction with capillary tube	Toluene (acetone) water	$1.1 \times 10^{-1} - 7.4 \times 10^{-1}$
Ghani <i>et al.</i> (2010)	Teflon Y - junction with caillary tube	Saturated n-butyl formate - water	$7.0 \times 10^{-1} - 1.5 \times 10^0$
Kashid <i>et al.</i> (2007)	Teflon Y - junction with caillary tube	n-butnol (succinic acid) water	$0.2 \times 10^{-1} - 3.1 \times 10^{-1}$

ตารางที่ 18 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมเชิงปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์อื่นๆ

แหล่งที่มา	ชนิดของเครื่องปฏิกรณ์	ระบบ	$k_L a$ (s ⁻¹)
Seibert <i>et al.</i> (1988)	Spray and packed columns	Toluene (acetone) water, n-butanol (succinic acid) water	$5.0 \times 10^{-4} - 1.0 \times 10^{-2}$
Dehkordi. (2001)	Impinging streams extractor	n-butanol (succinic acid) water	$7.0 \times 10^{-2} - 5.0 \times 10^{-1}$
Saien <i>et al.</i> (2012)	Impinging jet extractor	(succinic acid) water	$8.0 \times 10^{-3} - 3 \times 10^{-1}$
Kim <i>et al.</i> (2007)	Liquid-liquid-solid fluidized bed	Kerosene (butyric acid) water	$7.0 \times 10^{-3} - 1.0 \times 10^{-2}$

3. การวิเคราะห์สมการถดถอย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอินโดยอาศัยการวิเคราะห์สมการถดถอย ข้อมูลจะถูกวิเคราะห์ด้วยการถดถอยแบบพหุนาม (Polynomial regression) ปัจจัยที่ศึกษาคือ เวลาในการสกัด (A) อุณหภูมิในการสกัด (B) อัตราส่วนของ TEG ต่อสารป้อน (C) โดยใช้โปรแกรม Minitab ในการวิเคราะห์หาสมการถดถอย การสร้างสมการถดถอยจะต้องเลือกแบบจำลองที่มีความเหมาะสมมากที่สุด โดยลองสร้างแบบจำลองชนิดต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 8 ความเหมาะสมของแบบจำลองดูจากค่า R^2 และ R^2_{adj} จากตารางที่ 19 พบว่า แบบจำลอง Full quadratic model มีค่า R^2 และ R^2_{adj} มากที่สุด

ตารางที่ 19 เปรียบเทียบความเหมาะสมของแบบจำลองในการสร้างสมการถดถอย

แบบจำลอง	R^2 (%)	R^2_{adj} (%)
Linear model	89.08	88.42
Linear interaction model	89.14	88.25
Linear square model	95.95	95.44
Full quadratic model	96.81	96.16

แบบจำลอง Full quadratic model สามารถสร้างสมการถดถอยออกมาได้ดังสมการที่ 20 พบว่า ปัจจัยหลักที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอินมากที่สุด คือ อัตราส่วนของ TEG ต่อสารป้อน เนื่องจากมีค่าสัมประสิทธิ์มากที่สุด รองลงมาคือ เวลาในการสกัด และอุณหภูมิในการสกัด ตามลำดับ

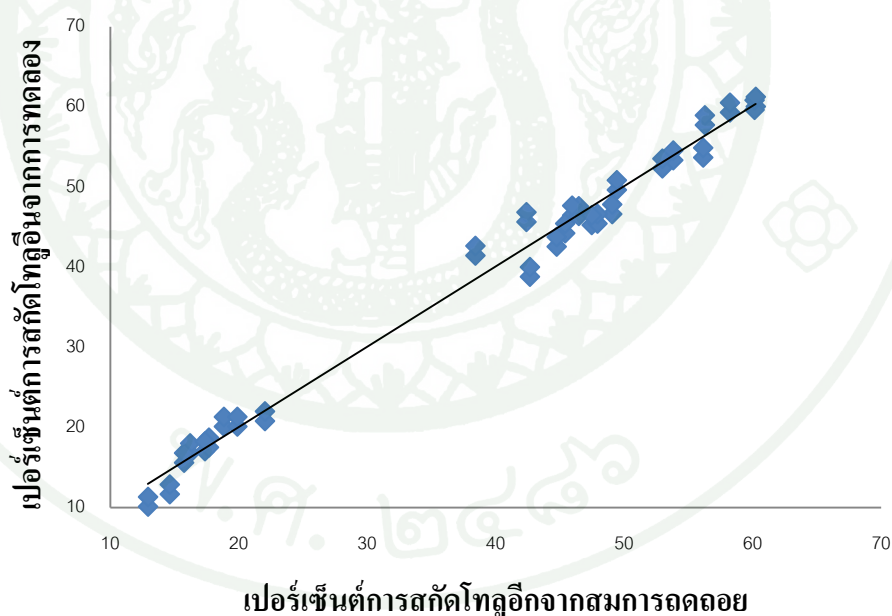
$$\begin{aligned} \text{เปอร์เซ็นต์การสกัด} = & 4.53287 - 3.94849A + 0.227613B + 13.9212C + 0.199629A^2 + 1.22567AC \\ & - 0.000982592B^2 - 0.65826C^2 + 0.00902331A^2C - 0.234537AC^2 \end{aligned} \quad (20)$$

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของสมการถดถอยแสดงในตารางที่ 20 พบว่า ค่า p-value มีค่าเท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ และให้ค่า R^2_{adj} เท่ากับ 96.16 เปอร์เซ็นต์ และทำการตรวจสอบความน่าเชื่อถือของสมการถดถอยโดยสร้างกราฟระหว่างเปอร์เซ็นต์การสกัดที่ได้จากการทดลองและเปอร์เซ็นต์การสกัดที่ได้จากสมการถดถอย แสดงใน

ภาพที่ 29 พบว่า กราฟมีแนวโน้มเป็นเส้นตรง แสดงว่า เปอร์เซ็นต์การสกัดที่ได้จากสมการถดถอยมีค่าใกล้เคียงกับเปอร์เซ็นต์การสกัดที่ได้จากการทดลอง ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า สมการถดถอยนี้สามารถนำไปทำนายเปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอินได้

ตารางที่ 20 วิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับสมการถดถอย

Source (แหล่งที่มา)	d.f. (องศาเสรี)	SS (ผลบวกกำลังสอง)	MS (ค่าเฉลี่ย SS)	F-value (ค่าสถิติ)	Prob>F (p-value)
Regression	9	13767.5	1529.72	148.316	0.000
Error	44	453.8	10.31		
Total	53	14221.3			



ภาพที่ 29 เปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอินที่ได้จากการทดลองและจากสมการถดถอย

เมื่อพิจารณาสถานะที่เหมาะสมสำหรับการสกัดโทลูอินออกจากเฮปแทนด้วยช่องจุลภาคที่ทำนายโดยสมการถดถอยพบว่า เปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอินมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 61.02 % ที่อัตราส่วน TEG ต่อสารป้อน 5:1 เวลาในการสกัด 2 วินาที และอุณหภูมิในการสกัด 60 °C เมื่อ

เปรียบเทียบกับผลการทดลองที่สภาวะดังกล่าวพบว่า เปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอินมีค่าเท่ากับ 58.3678 % มีความคลาดเคลื่อนประมาณ 4.54 % จึงสรุปว่า สมการถดถอยนี้มีความสามารถในการทำนาย เปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอินด้วยช่องจุลภาคได้

4. การเปรียบเทียบการสกัดโทลูอินด้วยวิธีการกวนผสมแบบกะและช่องจุลภาค

จุดเด่นของช่องจุลภาคคือ สามารถลดเวลาในการทำปฏิกิริยาหรือ การเข้าสู่สมดุลได้อย่างมาก ดังนั้น เพื่อเป็นการยืนยันจึงได้เปรียบเทียบการสกัดโทลูอินด้วยวิธีการกวนผสมแบบกะและช่องจุลภาคที่อุณหภูมิในการสกัด 30°C แสดงในตารางที่ 10 พบว่าวิธีการกวนผสมแบบกะใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุลประมาณ 90-120 นาที และมีเปอร์เซ็นต์การสกัดเท่ากับ 21 44 และ 60% ที่อัตราส่วนโดยโมลของ TEG ต่อสารป้อนเท่ากับ 1:1 3:1 และ 5:1 ตามลำดับ

จากตารางที่ 21 พบว่าการสกัดโทลูอินด้วยช่องจุลภาคใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุล เท่ากับ 2 วินาที โดยมีเปอร์เซ็นต์การสกัดเท่ากับ 20 44 และ 60% ที่อัตราส่วนโดยโมลของ TEG ต่อสารป้อนเท่ากับ 1:1 3:1 และ 5:1 ตามลำดับ ซึ่งการสกัดโทลูอินด้วยช่องจุลภาคสามารถเข้าสู่สมดุลได้เร็วกว่าการกวนผสมแบบกะถึง 2,700 ที่อัตราส่วน TEG ต่อสารป้อนเท่ากับ 1:1 และ 3,600 เท่าที่อัตราส่วน TEG ต่อสารป้อนเท่ากับ 3:1 และ 5:1 เปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอินที่สกัดด้วยวิธีการกวนผสมแบบกะและช่องจุลภาคมีค่าใกล้เคียงกัน เพราะไม่ว่าจะสกัดด้วยวิธีใด ที่สภาวะเดียวกัน (อุณหภูมิ อัตราส่วน โดยโมล อัตราเร็ว และอื่นๆ) เมื่อเข้าสู่สมดุลแล้ว ค่าเปอร์เซ็นต์การสกัดจะต้องเท่ากัน

ตารางที่ 21 เปรียบเทียบการสกัดโทลูอินด้วยวิธีการกวนผสมแบบกะและช่องจุลภาคที่อุณหภูมิ 30°C

วิธีการสกัด	อัตราส่วนโดยโมลของ TEG ต่อสารป้อน	เวลาในการเข้าสู่สมดุล	เปอร์เซ็นต์การสกัด (%)
กวนผสมแบบกะ	1:1	90 นาที	21
	3:1	120 นาที	43
	5:1	120 นาที	60
ช่องจุลภาค	1:1	2 วินาที	21
	3:1	2 วินาที	43
	5:1	2 วินาที	60

5. ผลของการศึกษาการเพิ่มกำลังการผลิตของการสกัดโทลูอินออกจากเฮปแทนด้วยช่องจุลภาค

5.1 ผลของการออกแบบช่องจุลภาคสำหรับการเพิ่มกำลังการผลิต

ตารางที่ 22 แสดงความสูงของเครื่องปฏิกรณ์ช่องจุลภาค พบว่า ที่อัตราการไหลของสารป้อนเท่ากับ 1 ตันต่อวัน เครื่องปฏิกรณ์จุลภาคที่ไม่ใช้แผ่นควบคุมอุณหภูมิ และใช้แผ่นควบคุมอุณหภูมิมีความสูงเท่ากับ 1.974 และ 3.842 เมตร ตามลำดับ ที่อัตราการไหลของสารป้อนเท่ากับ 10 ตันต่อวัน โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์จำนวน 10 เครื่องที่มีอัตราการไหลของสารป้อนเท่ากับ 1 ตันต่อเครื่อง มีความสูงเมื่อไม่ใช้แผ่นควบคุมอุณหภูมิและใช้แผ่นควบคุมอุณหภูมิเท่ากับ 1.974 และ 3.842 เมตรต่อเครื่อง ตามลำดับ และเมื่อใช้เครื่องปฏิกรณ์ช่องจุลภาคเครื่องเดียวที่อัตราการไหล 10 ตันต่อวัน จะมีความสูงเมื่อไม่ใช้แผ่นควบคุมอุณหภูมิและใช้แผ่นควบคุมอุณหภูมิเท่ากับ 19.546 และ 39.074 เมตร ตามลำดับ และที่อัตราการไหลของสารป้อนเท่ากับ 100 ตันต่อวัน โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์จำนวน 100 เครื่องที่มีอัตราการไหลของสารป้อนเท่ากับ 1 ตันต่อเครื่อง มีความสูงเมื่อไม่ใช้แผ่นควบคุมอุณหภูมิและใช้แผ่นควบคุมอุณหภูมิเท่ากับ 1.974 และ 3.842 เมตรต่อเครื่อง ตามลำดับ และเมื่อใช้เครื่องปฏิกรณ์ช่องจุลภาคเครื่องเดียวที่อัตราการไหล 100 ตันต่อวัน จะมีความสูงเมื่อไม่ใช้แผ่นควบคุมอุณหภูมิและใช้แผ่นควบคุมอุณหภูมิเท่ากับ 195.262 และ 390.506 เมตร ตามลำดับ

ตารางที่ 22 ความสูงของเครื่องปฏิกรณ์ช่องจุลภาค

อุณหภูมิ (°C)	ความสูงของเครื่องปฏิกรณ์ช่องจุลภาค (เมตร)				
	อัตราการไหลของสารป้อน (ตันต่อวัน)				
	1	10	100		
	1 ตัน/เครื่อง	1 ตัน/เครื่อง (10 เครื่อง)	10 ตัน/ เครื่อง	1 ตัน/เครื่อง (100 เครื่อง)	100 ตัน/ เครื่อง
30	1.974	1.974	19.546	1.974	195.262
45	3.93	3.93	39.074	3.93	390.506
60	3.93	3.93	39.074	3.93	390.506

5.2 ผลของการใช้พลังงานของการเพิ่มกำลังการผลิตในการสกัดโทลูอินด้วยช่องจุลภาค

การใช้พลังงานของการเพิ่มกำลังการผลิตในการสกัดโทลูอินด้วยช่องจุลภาค แสดงดังตารางที่ 23 พบว่า การใช้พลังงานส่วนใหญ่มาจากการให้ความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิในการสกัด โดยจากการทดลองพบว่า ที่อัตราส่วนโดยโมลของ TEG ต่อสารป้อน 5:1 และเวลาในการสกัด 2 วินาที การเพิ่มอุณหภูมิในการสกัดจาก 30 °C เป็น 45 °C และ จาก 30 °C เป็น 60 °C มีเปอร์เซ็นต์การสกัดเพิ่มขึ้นเพียง 6 และ 11.18 % เท่านั้น แต่ต้องใช้พลังงานเพิ่มขึ้นถึง 11.427 และ 21.98 เท่าของการเพิ่มอุณหภูมิในการสกัดจาก 30 °C เป็น 45 °C และ จาก 30 °C เป็น 60 °C ตามลำดับ

การทำการเพิ่มกำลังการผลิตที่ 10 ตันต่อวัน และ 100 ตันต่อวัน ทำโดยแบ่งเป็น 2 กรณี คือ เพิ่มกำลังการผลิตแบบใช้เครื่องปฏิกรณ์ชุดเดียวต่อกำลังการผลิตนั้นๆ และแบ่งเครื่องปฏิกรณ์เป็นหลายชุด แต่ละชุดมีกำลังการผลิต 1 ตันต่อวัน พบว่า การแบ่งเครื่องปฏิกรณ์เป็นชุดๆ โดยแต่ละชุดมีกำลังการผลิต 1 ตันต่อวัน ใช้พลังงานน้อยกว่า และจากตารางที่ 20 พบว่า การใช้เครื่องปฏิกรณ์ชุดเดียวต่อกำลังการผลิตนั้นๆ มีความสูงของเครื่องปฏิกรณ์มากเกินไป จึงควรแบ่งเป็นหลายชุด โดยแต่ละชุดมีกำลังการผลิต 1 ตันต่อวัน

การแบ่งเครื่องปฏิกรณ์เป็นหลายชุด โดยแต่ละชุดมีกำลังการผลิต 1 ตันต่อวัน พบว่า มีจำนวนการใช้ปั๊มมาก ซึ่งในการลดจำนวนการใช้ปั๊มทำได้โดยการเพิ่มจำนวนช่องจุลภาคต่อแผ่น กล่าวคือ ปกติในหนึ่งแผ่นจะมีช่องจุลภาคเพียง 1 ช่อง เราสามารถเพิ่มจำนวนช่องจุลภาคในหนึ่งแผ่นได้ เช่น เพิ่มจำนวนช่องจุลภาคเป็น 4 ช่องต่อหนึ่งแผ่น จะทำให้ความสูงลดลง 4 เท่า และจำนวนการใช้ปั๊มลดลง 4 เท่าเช่นเดียวกัน และอาจจะใช้การต่อท่อสำหรับการแยกหลายสาย โดยติดตั้งวาล์วควบคุมอัตราการไหล (Flow control valve) เพื่อกำหนดอัตราการไหลตามที่ต้องการ

ตารางที่ 23 การใช้พลังงานของการสกัดโทลูอินด้วยช่องจุลภาคที่อัตราส่วน TEG ต่อ สารป้อน เท่ากับ 5:1

อัตราการใช้ ของสารป้อน (ตันต่อวัน)	จำนวนเครื่อง	อุณหภูมิ (°C)	การใช้พลังงานของอุปกรณ์ต่างๆ (kW)		
			ปั๊ม	เครื่องให้ความร้อน	รวม
1	1ตัน/เครื่อง	30	0.302	-	0.302
		45	0.228	3.223	3.451
		60	0.191	6.447	6.638
10	1ตัน/เครื่อง (10 เครื่อง)	30	3.020	-	3.020
		45	2.280	32.230	34.510
		60	1.910	64.470	66.380
	10 ตัน/เครื่อง	30	3.189	-	3.189
		45	2.628	32.230	34.858
		60	2.254	64.470	66.724
100	1ตัน/เครื่อง (100 เครื่อง)	30	30.200	-	30.200
		45	22.800	322.300	345.100
		60	19.100	644.700	663.800
	100 ตัน/เครื่อง	30	48.915	-	48.915
		45	60.344	322.300	382.644
		60	56.594	644.700	701.294

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการแยกโทลูอินออกจากเฮปเทนด้วยวิธีการสกัดแบบของเหลว-ของเหลวด้วยช่องจุลภาค ออกแบบการทดลอง Design of experiment (DOE) ใช้การทดลองแบบเต็มรูป (Full factorial design) ข้อมูลทั้งหมดในงานวิจัยนี้ได้ถูกนำมาวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้โปรแกรม Minitab 16 เพื่อศึกษาความแปรปรวนของข้อมูล ผลกระทบของปัจจัยหลักและผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยที่มีต่อเปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอิน นำข้อมูลที่ได้ไปสร้างสมการถดถอยเพื่อใช้ทำนายค่าเปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอิน เปรียบเทียบการสกัดโทลูอินด้วยวิธีกวนผสมแบบกะและช่องจุลภาค และเปรียบเทียบการใช้พลังงานของการสกัดโทลูอินด้วยหอสกัดและช่องจุลภาค จากการทดลองสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. การสกัดโทลูอินด้วยวิธีกวนผสมแบบกะ

จากการทดลองการสกัดโทลูอินด้วยวิธีกวนผสมแบบกะพบว่า การสกัดด้วยวิธีการผสมแบบกะที่อุณหภูมิในการสกัด 30°C ใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุลประมาณ 90 นาทีที่อัตราส่วน TEG ต่อสารป้อนเท่ากับ 1:1 และ 120 นาทีที่อัตราส่วน TEG ต่อสารป้อนเท่ากับ 3:1 และ 5:1 เมื่อเข้าสู่สมดุลแล้ว ค่าเปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอินมีค่าเท่ากับ 21 44 และ 60 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราส่วนโดยโมลของ TEG ต่อสารป้อนเท่ากับ 1:1 3:1 และ 5:1 ตามลำดับ

2. ผลการศึกษาการสกัดโทลูอินด้วยช่องจุลภาค

จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล พบว่าที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ส่วนตกค้างมีการกระจายตัวแบบปกติ ความแปรปรวนของส่วนตกค้างมีค่าคงที่ และส่วนตกค้างมีการกระจายตัวอย่างอิสระ ดังนั้น การทดลองนี้จึงสามารถทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนได้

เมื่อพิจารณาความแปรปรวนของปัจจัยต่างๆ โดยกำหนดนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ พบว่า ผลกระทบของเวลาในการสกัด อุณหภูมิในการสกัด อัตราส่วนโดยโมลของ TEG ต่อสารป้อน และผลกระทบร่วมระหว่างเวลาในการสกัดและอัตราส่วนโดยโมลของ TEG ต่อสาร

ป้อน มีผลกระทบต่อเปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอินอย่างมีนัยสำคัญ แต่ผลกระทบของชุดการทดลอง (Blocks) ผลกระทบร่วมระหว่างเวลาในการสกัดและอุณหภูมิในการสกัด ผลกระทบร่วมระหว่างอุณหภูมิในการสกัดและอัตราส่วนโดยโมลของ TEG ต่อสารป้อน และผลกระทบร่วมของเวลาในการสกัด อุณหภูมิในการสกัด และอัตราส่วนโดยโมลของ TEG ต่อสารป้อน มีค่า p -value มากกว่า 0.05 จึงถือว่าไม่มีผลกระทบต่อเปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอิน

เมื่อศึกษาปัจจัยหลักที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอินพบว่า เวลาในการสกัดมีผลในทางบวกและทางลบ และเมื่อศึกษาผลกระทบร่วมของปัจจัยพบว่า ผลกระทบร่วมของเวลาในการสกัดกับอุณหภูมิในการสกัด และผลกระทบร่วมของเวลาในการสกัดกับอัตราส่วนโดยโมลของ TEG ต่อสารป้อนให้ผลในทางตรงกันข้ามกันเมื่อเวลาในการสกัดอยู่ในช่วง 2-6 วินาที และให้ผลในทางบวกเหมือนกันเมื่อเวลาในการสกัดอยู่ในช่วง 6-10 วินาที ส่วนผลกระทบร่วมของอุณหภูมิในการสกัดและอัตราส่วนโดยโมลของ TEG ต่อสารป้อน ให้ผลให้ทางบวกเหมือนกัน แต่อัตราส่วนโดยโมลของ TEG ต่อสารป้อนจะมีผลต่อเปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอินมากกว่า

เมื่อศึกษาการเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมเชิงปริมาตรของงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นที่ใช้ช่องจุลภาคในกระบวนการต่างๆ พบว่า งานวิจัยนี้มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมเชิงปริมาตรใกล้เคียงกับงานวิจัยอื่น โดยมากกว่าเล็กน้อย และเมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องปฏิกรณ์ชนิดอื่น พบว่าช่องจุลภาคมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลรวมเชิงปริมาตรสูงกว่า

3. การวิเคราะห์สมการถดถอย

ข้อมูลจากการทดลองถูกนำมาสร้างสมการถดถอยแบบพหุนาม (Polynomial regression) เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของเวลาในการสกัด (A) อุณหภูมิในการสกัด (B) อัตราส่วนโดยโมลของ TEG ต่อสารป้อน (C) ที่มีต่อเปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอิน แสดงดังสมการที่ 20 ซึ่งได้ทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากสมการถดถอย พบว่า กราฟที่ได้มีความชันของกราฟใกล้เคียงหนึ่ง และทำการทดลองซ้ำเพื่อยืนยันพบที่มีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย ดังนั้น สมการถดถอยนี้จึงมีความเหมาะสมในการทำนายค่าเปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอิน โดยมีค่า R^2_{adj} เท่ากับ 96.16 เปอร์เซ็นต์

4. การเปรียบเทียบการสกัดโทลูอินด้วยวิธีการกวนผสมแบบกะและช่องจุลภาค

เมื่อเปรียบเทียบการสกัดโทลูอินด้วยวิธีการกวนผสมแบบกะและแบบช่องจุลภาคที่อุณหภูมิ 30°C พบว่า วิธีการกวนผสมแบบกะใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุล 90-120 นาที ส่วนช่องจุลภาคใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุลเพียง 2 วินาทีเท่านั้น ซึ่งเร็วกว่าถึง 2,700 - 3,600 เท่า โดยเมื่อเข้าสู่สมดุล เปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอินด้วยวิธีการกวนผสมแบบกะและช่องจุลภาคจะมีค่าใกล้เคียงกัน

5. ผลของการศึกษาการเพิ่มกำลังการผลิตของการสกัดโทลูอินออกจากเฮปเทนด้วยช่องจุลภาค

ผลของการใช้พลังงานของการเพิ่มกำลังการผลิตในการสกัดโทลูอินด้วยช่องจุลภาค พบว่า ที่อัตราส่วนโดยโมลของ TEG ต่อสารป้อน 5:1 และเวลาในการสกัด 2 วินาที การเพิ่มอุณหภูมิในการสกัดจาก 30°C เป็น 45°C และ จาก 30°C เป็น 60°C มีเปอร์เซ็นต์การสกัดเพิ่มขึ้นเพียง 6 และ 11.18 % เท่านั้น แต่ต้องใช้พลังงานเพิ่มขึ้นถึง 11.427 และ 21.98 เท่า ของการเพิ่มอุณหภูมิในการสกัดจาก 30°C เป็น 45°C และ จาก 30°C เป็น 60°C ตามลำดับ

เมื่อทำการเพิ่มกำลังการผลิตที่ 10 ตันต่อวัน และ 100 ตันต่อวัน ทำโดยแบ่งเป็น 2 กรณี คือ เพิ่มกำลังการผลิตแบบใช้เครื่องปฏิกรณ์ชุดเดียวต่อกำลังการผลิตนั้นๆ และแบ่งเครื่องปฏิกรณ์เป็นหลายชุด แต่ละชุดมีกำลังการผลิต 1 ตันต่อวัน พบว่า การแบ่งเครื่องปฏิกรณ์เป็นชุดๆ โดยแต่ละชุดมีกำลังการผลิต 1 ตันต่อวัน ใช้พลังงานน้อยกว่า และจากตารางที่ 20 พบว่า การใช้เครื่องปฏิกรณ์ชุดเดียวต่อกำลังการผลิตนั้นๆ มีความสูงของเครื่องปฏิกรณ์มากเกินไป จึงควรแบ่งเป็นหลายชุด โดยแต่ละชุดมีกำลังการผลิต 1 ตันต่อวัน แต่มีจำนวนการใช้ปั๊มพามาก จึงลดจำนวนการใช้ปั๊มพโดยการเพิ่มจำนวนช่องจุลภาคต่อแผ่น และอาจจะใช้การต่อท่อสำหรับการแยกหลายสาย โดยติดตั้งวาล์วควบคุมอัตราการไหล (Flow control valve) เพื่อกำหนดอัตราการไหลตามที่ต้องการ

ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีข้อเสนอแนะแนวทางการศึกษาต่อ ดังนี้

1. สภาวะในการทดลองในงานวิจัยนี้อาจจะยังไม่ใช้สภาวะการทดลองที่ดีที่สุด ดังนั้นควรทำการทดลองที่สภาวะอื่นเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุด
2. ควรมีการศึกษาในการเพิ่มกำลังการผลิตในช่องจุลภาค ไม่ว่าจะเป็นการเพิ่มจำนวนแผ่นช่องจุลภาค หรือ การเพิ่มกำลังการผลิตของปั๊ม เพื่อศึกษาพฤติกรรมของสารในช่องจุลภาค
3. ควรหาวิธีการแยกวัฏภาคแบบต่อเนื่อง เพื่อที่จะสามารถทำการทดลองแบบต่อเนื่องแล้วได้ผลิตภัณฑ์ออกมาเลย โดยไม่ต้องนำไปเข้าเครื่องเหวี่ยง จะทำให้สามารถสกัดได้อย่างต่อเนื่อง

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

เกล็ดแก้ว รัตนปัญญาพันธุ์. 2557. การเพาะเลี้ยงและการผลิตไลโปดของ **Arthrobacter AK19** โดยการใช้วิธีการออกแบบการทดลองร่วมภายใต้สภาวะบีบคั้น. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

คณะพยาบาลศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2557. การใช้โปรแกรม **SPSS for Windows 11.5** ในการวิเคราะห์ความแปรปรวน. แหล่งที่มา: http://mis.nurse.cmu.ac.th/mis/download/publication/460_file.pdf, 28 ตุลาคม 2557.

นิภาพร ชุตินันต์. 2551. การออกแบบการทดลองเบื้องต้น. หจก.มิตรภาพการพิมพ์ 1995, นครราชสีมา.

ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และ พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์. 2551. การออกแบบและการวิเคราะห์การทดลอง. บริษัทสำนักพิมพ์ท้อปจำกัด, กรุงเทพมหานคร.

สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ. 2549. **อุตสาหกรรมปิโตรเคมีและพลาสติก**. แหล่งที่มา: http://www.nesdb.go.th/portals/0/tasks/dev_ability/Profile/industry/อุตสาหกรรมปิโตรเคมีและพลาสติก.pdf, 12 พฤษภาคม 2557.

สำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม. 2557. **สรุปภาวะเศรษฐกิจอุตสาหกรรมปี 2556 และแนวโน้มปี 2557**. แหล่งที่มา: http://www.oie.go.th/sites/default/files/attachments/industry_overview/annual2013.pdf, 12 พฤษภาคม 2557.

สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน. 2553. **เรื่องโครงสร้างอุตสาหกรรมปิโตรเคมี**. แหล่งที่มา : <http://www.eppo.go.th/petro/PT-Petrochemical.pdf>, 12 พฤษภาคม 2557.

สำนักงานสรรพสามิตพื้นที่ระยอง 1. เรื่องความรู้เกี่ยวกับอุตสาหกรรมปิโตรเคมี. แหล่งที่มา: rayong.excise.go.th/km.pptx, 19 พฤษภาคม 2557.

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. การสกัดด้วยตัวทำละลาย. แหล่งที่มา: http://www.chemistry.sc.chula.ac.th/course_info/2302275/chapter8.pdf, 19 พฤษภาคม 2557.

อัญริยา ปราบอริพ่าย. 2551. บทที่ 2 การทดลองแฟกทอเรียล. แหล่งที่มา: <http://pirun.ku.ac.th/~faasatp/734415/data/chapter2.pdf>, 28 ตุลาคม 2557.

Adeosun, J.T. 2009. Numerical and experimental studies of mixing characteristics in a T-junction microchannel using residence-time distribution. **Chemical Engineering Science** 64: 2422-2432.

Ahmad, S.A., R.S. Tanwar, R.K. Gupta and A. Khanna. 2004. Interaction parameters for multi-component aromatic extraction with sulfolane. **Fluid Phase Equilibria**. 220.

Alkhalidia, K.H.A.E., M.S. Fandarya, A.S. Al-Jimaza, M.S. Al-Tuwaima and M.A. Fahimb. 2009. Liquid-liquid equilibria of aromatics removal from middle distillate using NMP. **Fluid Phase Equilibria**. 286, 190-195.

Cebollada, P.A.R. and E. Garcia-Bordejé. 2009. Optimisation of physical properties of Y-alumina coating microreactors used for the growth of a carbon nanofiber layer. **Chemical Engineering Journal**. 149: 447-454.

ChemineerTM. 2013. **Static mixer design**. Available source: <http://www.chemineer.com/static-mixer-design.html>, May 20, 2014.

- Chubo, Y., C. Guangwen and Y. Quan. 2012. Process Characteristics of CO₂ Absorption by Aqueous Monoethanolamine in Microchannel Reactor. **Chinese Journal of Chemical Engineering**. 20(1): 111-119.
- Darekar, M., K.K. Singh, S. Mukhopadhyay, K.T. Shenoy and S.K. Ghosh. 2014. Solvent extraction in microbore tubes with UMPS-TBP in dodecane system. **Separation and Purification Technology**. 128: 96-105.
- Darwish, N.A. 2002. Liquid-liquid equilibrium for the system n-heptane+o-xylene+triethyleneglycol from 293.1 to 323.1 K. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**. 41: 737-741.
- Dehkordi, A.M. 2001. Novel type of impinging streams contactor for liquid-liquid extraction. **Ind. Eng. Chem. Res.** 40: 681-688.
- Department of Statistics, Pennsylvania State University. **Chi-Square Distribution Table**. Available source: <http://sites.stat.psu.edu/~mga/401/tables/Chi-square-table.pdf>, October 23, 2014.
- Doku, G.N., W. Verboom, D.N. Reinhoudt and Albert van den Berg. 2005. On - microchip multiphase chemistry – a review of microreactor design principles and reagent contacting modes. **Tetrahedron report number**. 708: 2733 – 2742.
- Haghnazarloo, H., M.N. Lotfollahi, J. Mahmoudi and A.H. Asl. 2013. Liquid-liquid equilibrium for ternary systems of (ethylene glycol + toluene + heptane) at temperatures (303.15, 308.15, 313.15) K and atmospheric pressure: Experimental results and correlation with UNIQUAC and NRTL models. **J. Chem. Thermodynamics**. 60: 126-131.

- García, S. 2012. Separation of toluene from n-heptane by liquid–liquid extraction using binary mixtures of [bpy][BF₄] and [4bmpy][Tf₂N] ionic liquids as solvent. **The Journal of Chemical Thermodynamics**. 53: 119-124.
- Ghaini, A., M.N. Kashid and D.W. Agar. 2010. Effective interfacial area for mass transfer in the liquid-liquid slug flow capillary microreactors. **Chemical Engineering Process**. 49: 358-366.
- Ghamem, A., T. Lemenand, D.D. Valle and H. Peerhossaini. 2014. Static mixers: Mechanisms, applications, and characterization methods – A review. **Chemical Engineering Research and Design**. 92: 205-228.
- Guoqing, G., K. Kusakabe, K. Moriyama, and N. Sakurai. 2009. Transesterification of Sunflower Oil with Methanol in a Microtube Reactor. **Ind. Eng. Chem. Res.** 48: 1357-1363.
- Kabayashi, J. Y. Mori and S. Kobayashi. 2005. Hydrogenation Reaction using scCO₂ as A Solvent in Microchannel Reactors. **Chem. Commun.** 20: 2567-2568.
- Kashid, M.N., Y.M. Harshe and D.W. Agar. 2007. Liquid-liquid slug flow in a capillary: an alternative to suspended drop or film contactors. **Ind. Eng. Chem. Res.** 46: 8420-8430
- _____, A. Renken and L. Kiwi-Minsker. 2011. Influence of flow regime on mass transfer in different types of microchannels. **Ind. Eng. Chem. Res.** 50: 6906-6914.
- Kim, S.D., Y.H. Yu and P.W. Han. 1988. Phase holdups and liquid-liquid extraction in three phase fluidized beds. **Chem. Eng. Commun.** 68(1): 57-68.
- Ko, M., S. Lee and H. Kim. 2002. Liquid-liquid Equilibria for Binary Systems Containing N-Formylmorpholine. **J. Chem. Eng. Data**. 47: 923-926.

Kruskal, W. H. and W. A. Wallis. 1952. Use of ranks in one-criterion variance analysis.

Journal of the American Statistical Association. 47 (260): 583-621.

Laporte, M., C. Loisel, D. Della Valle, A. Riaublanc and A. Montillet. 2014. Flow process conditions to control the void fraction of food foams in static mixers. **Journal of Food Engineering.** 128: 119-126.

Li, Y.J. 2013. Transport of Dynamic Biochemical Signals in Steady Flow in a Shallow Y-Shaped Microfluidic Channel: Effect of Transverse Diffusion and Longitudinal Dispersion. **Journal of Biomechanical Engineering.** 135.

Manohar, C.V. 2013. Co-solvent effects for aromatic extraction with ionic liquids. **Journal of Molecular Liquids.** 180: 145-153.

Mazzotti, M. 2013. **Liquid-Liquid Contactors.** Available source: <http://www.hypertvt.ethz.ch/contactors-liquid.php>, May 20, 2014.

Meindersma, G.W. 2005. **Extraction of Aromatics from Naphtha with Ionic liquids from Solvent Development to Pilot RDC Evaluation.** Thesis, University of Twente.

Montgomery D.C. 1976. **Design and Analysis of Experiments.** JOHN WILEY & SONS, USA.

Narasimhan, S. and C. Jordache, 2000. **Data Reconciliation , & Gross Error Detection.** Gulf Publishing Company, Houston, Texas.

Ozone Solutions, Inc. 2012. **Static Mixer Action with Ozone.** Available source: <http://www.ozonolutions.com/info/static-mixer-action-with-ozone>, May 20, 2014.

- Peiyong, S., B. Wang, J. Yao, L. Zhang and N. Xu. 2010. Fast Synthesis of Biodiesel at High Throughput in Microstructured Reactors. **Ind. Eng. Chem. Res.** 49: 1259-1264.
- Radwan, G.M., A. Shaheen, Al-Muhtaseb and A.F. Mohamed. 1997. Liquid-liquid equilibria for the extraction of aromatics from naphtha reformat by dimethylformamide/ethylene glycol mixed solvent. **Fluid Phase Equilibria.** 129: 175–186.
- Rappel, R., Luiz Mário Nelson de Góis and S. Mattedi. 2002. Liquid–liquid equilibria data for systems containing aromatic + nonaromatic + sulfolane at 308.15 and 323.15 K. **Fluid Phase Equilibria.** 202: 263-276.
- Ryan, T. A. and B. L. Joiner. 1976. **Normal probability plots and tests for normality.** Statistics Department, The Pennsylvania State University.
- Saien, J. and V. Moradi. 2012. Low interfacial tension liquid-liquid extraction with impinging-jets contacting method: influencing parameters and relationship. **J. Ind. Eng. Chem.** 18(4): 1293-1300.
- Salem, A.B.S.H. 1993. Liquid-liquid equilibria for the systems triethylene glycol-toluene-heptane, propylene carbonate-toluene-heptane and propylene carbonate-*o*-xylene-heptane. **Fluid Phase Equilibria.** 86: 351-361.
- Sattler, K. and H.J. Feindt. 1995. **Thermal Separation Processes Principles and Design.** VCH, cop. New York.
- Seader, J.D., E.J. Henley and D.Keith Roper. 2011. **Separation Process Principles.** 3rd ed. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Seibert, A.F. and J.R. Fair. 1988. Hydronamics and mass transfer in spray and packed liquid-liquid extraction columns. **Ind. Eng. Chem. Res.** 27(3): 470-481.

- Singh, M.K., P.D. Anderson and HEH. Meijer. 2009. Understanding and optimizing the SMX static mixer. **Macromol Rapid Communications**. 30: 362–76.
- Tanawannapong, Y., A. Kaewchada and A. Jaree. 2013. Biodiesel production from waste cooking oil in a microtube reactor. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**. 19: 37-41.
- Treybal, R.E. 1968. **Mass Transfer Operations**. 2nd ed., McGraw-Hill, New York.
- _____. 1980. **Mass Transfer**, 3rd ed., McGraw-Hill, New York.
- Weissermel, K. and H.J. Arpe. 2003. Aromatics-Production and Conversion. **In Industrial Organic Chemistry**, 4th ed.; Wiley-VCH: Weinheim, Germany.
- White, F.M. 2011. **Fluid Mechanics**, 7th ed., McGraw-Hill, New York.



ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

ผลการทดลองการสกัดแบบของเหลว-ของเหลวโทลูอิน

1. ผลการทดลองการสกัดแบบของเหลว-ของเหลวโทลูอินด้วยวิธีกวนผสมแบบกะ

ผลการทดลองการสกัดโทลูอินจากเฮปแทนด้วยวิธีกวนผสมแบบกะแสดงดังตารางผนวกที่ ก1

ตารางผนวกที่ ก1 สภาวะในการทดลองและค่าเปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอินในการสกัดด้วยวิธีกวนผสมแบบกะ

การทดลองที่	อัตราส่วนโดยโมล TEG/สาร ป้อน	อุณหภูมิ (°C)	เวลา (นาที)	เปอร์เซ็นต์การ สกัดโทลูอิน (%)
1	1:1	30	15	16.01
2	1:1	30	30	17.80
3	1:1	30	60	19.07
4	1:1	30	90	20.55
5	1:1	30	120	21.10
6	1:1	30	180	21.26
7	3:1	30	15	21.61
8	3:1	30	30	30.50
9	3:1	30	60	33.22
10	3:1	30	90	39.18
11	3:1	30	120	43.85
12	3:1	30	180	43.03
13	5:1	30	15	30.26
14	5:1	30	30	38.95
15	5:1	30	60	49.68
16	5:1	30	90	52.95
17	5:1	30	120	59.33
18	5:1	30	180	61.03

2. ผลการทดลองการสกัดแบบของเหลว-ของเหลวโทลูอินด้วยช่องจุลภาค

จากการทำการทดลองการสกัดโทลูอินจากสบู่แทนด้วยช่องจุลภาคที่สภาวะต่างกัน โดยทำการทดลองแบบเต็มรูปแบบ ได้ผลการทดลองแสดงดังตารางผนวกที่ ก2

ตารางผนวกที่ ก2 สภาวะในการทดลองและค่าเปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอินในการสกัดด้วยช่องจุลภาค

สภาวะการทดลอง และค่าคุณสมบัติ	การทดลองที่					
	1	2	3	4	5	6
อัตราส่วนโดย โมล TEG ต่อสาร ป้อน	3:1	3:1	5:1	1:1	5:1	1:1
เวลาในการสกัด (sec)	6	6	10	10	2	6
อุณหภูมิในการ สกัด (°C)	60	45	30	45	60	60
StdOrder	44	41	48	49	36	43
Blocks	2	2	2	2	2	2
อัตราการไหลของ TEG (ml/min)	1.43	1.43	1.589	0.564	4.77	0.94
อัตราการไหลของ สารป้อน (ml/min)	0.49	0.49	0.331	0.588	0.99	0.98
ความดัน (bar)	8	9	10	5	20	7
เปอร์เซ็นต์การ สกัด (%)	44.5770	45.8564	50.1527	13.8542	55.5416	15.3110

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

สภาวะการ ทดลองและค่า คุณสมบัติ	การทดลองที่					
	7	8	9	10	11	12
อัตราส่วนโดย โมล TEG ต่อสาร ป้อน	1:1	1:1	1:1	3:1	3:1	3:1
เวลาในการสกัด (sec)	10	10	6	6	10	2
อุณหภูมิในการ สกัด (°C)	30	60	30	30	30	45
StdOrder	46	52	37	38	47	32
Blocks	2	2	2	2	2	2
อัตราการไหล ของ TEG (ml/min)	0.564	0.564	0.94	1.43	0.86	4.28
อัตราการไหล ของสารป้อน (ml/min)	0.588	0.588	0.98	0.49	0.29	1.48
ความดัน (bar)	7	5	9	11	9	21
เปอร์เซ็นต์การ สกัด (%)	17.3921	19.8784	11.5103	41.5593	45.2317	42.1219

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

สภาวะการ ทดลองและค่า คุณสมบัติ	การทดลองที่					
	13	14	15	16	17	18
อัตราส่วนโดย โมล TEG ต่อสาร ป้อน	5:1	3:1	1:1	1:1	5:1	3:1
เวลาในการสกัด (sec)	2	10	2	2	10	10
อุณหภูมิในการ สกัด (°C)	30	60	60	30	60	45
StdOrder	30	53	34	28	54	50
Blocks	2	2	2	2	2	2
อัตราการไหล ของ TEG (ml/min)	4.77	0.86	2.821	2.821	0.953	0.86
อัตราการไหล ของสารป้อน (ml/min)	0.99	0.29	2.939	0.939	0.199	0.29
ความดัน (bar)	32	6	14	20	7	7
เปอร์เซ็นต์การ สกัด (%)	61.0071	47.0116	21.5104	21.4776	60.0323	46.7865

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

สภาวะการ ทดลองและค่า คุณสมบัติ	การทดลองที่					
	19	20	21	22	23	24
อัตราส่วนโดย โมล TEG ต่อสาร ป้อน	5:1	5:1	5:1	5:1	5:1	1:1
เวลาในการสกัด (sec)	6	10	2	6	6	6
อุณหภูมิในการ สกัด (°C)	60	45	45	45	30	45
StdOrder	45	51	33	42	39	40
Blocks	2	2	2	2	2	2
อัตราการไหล ของ TEG (ml/min)	1.589	0.953	4.77	1.589	1.589	0.94
อัตราการไหล ของสารป้อน (ml/min)	0.331	0.199	0.99	0.331	0.331	0.98
ความดัน (bar)	9	8	24	10	13	7
เปอร์เซ็นต์การ สกัด (%)	56.7683	55.1692	60.8867	52.5952	43.5480	11.94

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

สภาวะการ ทดลองและค่า คุณสมบัติ	การทดลองที่					
คุณสมบัติ	25	26	27	28	29	30
อัตราส่วนโดย โมล TEG ต่อสาร ป้อน	1:1	3:1	3:1	1:1	5:1	3:1
เวลาในการสกัด (sec)	2	2	2	2	6	2
อุณหภูมิในการ สกัด (°C)	45	30	60	30	30	60
StdOrder	31	29	35	1	12	8
Blocks	2	2	2	1	1	1
อัตราการไหล ของ TEG (ml/min)	2.821	4.28	4.28	2.821	1.589	4.28
อัตราการไหล ของสารป้อน (ml/min)	2.939	1.48	1.48	2.939	0.331	1.48
ความดัน (bar)	15	29	18	20	13	18
เปอร์เซ็นต์การ สกัด (%)	18.6517	39.7180	44.0348	21.1178	48.7398	50.0137

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

สภาวะการ ทดลองและค่า คุณสมบัติ	การทดลองที่					
	31	32	33	34	35	36
อัตราส่วนโดย โมล TEG ต่อสาร ป้อน	3:1	5:1	1:1	5:1	1:1	3:1
เวลาในการสกัด (sec)	2	2	10	6	10	2
อุณหภูมิในการ สกัด (°C)	30	30	30	45	45	45
StdOrder	2	3	19	15	22	5
Blocks	1	1	1	1	1	1
อัตราการไหล ของ TEG (ml/min)	4.28	4.77	0.564	1.589	0.564	4.28
อัตราการไหล ของสารป้อน (ml/min)	1.48	0.99	0.588	0.331	0.588	1.48
ความดัน (bar)	29	32	7	10	5	21
เปอร์เซ็นต์การ สกัด (%)	39.1510	58.5142	20.1139	53.2201	22.2590	44.2640

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

สภาวะการ ทดลองและค่า คุณสมบัติ	การทดลองที่					
	37	38	39	40	41	42
อัตราส่วนโดย โมล TEG ต่อสาร ป้อน	1:1	1:1	5:1	5:1	5:1	5:1
เวลาในการสกัด (sec)	6	10	2	10	10	6
อุณหภูมิในการ สกัด (°C)	60	60	45	30	45	60
StdOrder	16	25	6	21	24	18
Blocks	1	1	1	1	1	1
อัตราการไหล ของ TEG (ml/min)	0.94	0.564	4.77	0.953	0.953	1.589
อัตราการไหล ของสารป้อน (ml/min)	0.98	0.588	0.99	0.199	0.199	0.331
ความดัน (bar)	7	5	24	10	8	9
เปอร์เซ็นต์การ สกัด (%)	21.2551	13.8688	59.2539	50.3776	52.6390	51.6985

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

สภาวะการ ทดลองและค่า คุณสมบัติ	การทดลองที่					
	43	44	45	46	47	48
อัตราส่วนโดย โมล TEG ต่อสาร ป้อน	1:1	1:1	5:1	5:1	3:1	1:1
เวลาในการสกัด (sec)	6	2	2	10	10	2
อุณหภูมิในการ สกัด (°C)	30	45	60	60	60	60
StdOrder	10	4	9	27	26	7
Blocks	1	1	1	1	1	1
อัตราการไหล ของ TEG (ml/min)	0.94	2.821	4.77	0.953	0.86	2.821
อัตราการไหล ของสารป้อน (ml/min)	0.98	2.939	0.99	0.199	0.29	2.939
ความดัน (bar)	9	15	20	7	6	14
เปอร์เซ็นต์การ สกัด (%)	11.4807	23.9497	65.4038	56.4008	47.4969	22.4281

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

สถานะการ ทดลองและค่า คุณสมบัติ	การทดลองที่					
คุณสมบัติ	49	50	51	52	53	54
อัตราส่วนโดย โมล TEG ต่อสาร ป้อน	3:1	3:1	1:1	3:1	3:1	3:1
เวลาในการสกัด (sec)	6	10	6	6	10	6
อุณหภูมิในการ สกัด (°C)	45	45	45	30	30	60
StdOrder	14	23	13	11	20	17
Blocks	1	1	1	1	1	1
อัตราการไหล ของ TEG (ml/min)	1.43	0.86	0.94	1.43	0.86	1.43
อัตราการไหล ของสารป้อน (ml/min)	0.49	0.29	0.98	0.49	0.29	0.49
ความดัน (bar)	9	7	7	11	9	8
เปอร์เซ็นต์การ สกัด (%)	46.7011	45.0001	14.0907	42.5928	44.5054	49.6158

3. พื้นที่ใต้กราฟของโทลูอินและสารมาตรฐานภายในจากเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีที่สภาวะต่างๆ

พื้นที่ใต้กราฟของโทลูอินและสารมาตรฐานภายใน (Internal standard, IS) ในวัฏภาคที่ถูกสกัดและวัฏภาคที่ไม่ถูกสกัดที่สภาวะต่างๆในการสกัดโทลูอินจากเฮปแทนด้วยการกวนผสมแบบกะและช่องจุลภาคแสดงดังตารางผนวกที่ ก3และ ตารางผนวกที่ ก4 ตามลำดับ และพื้นที่ใต้กราฟของโทลูอินและสารมาตรฐานภายในของสารป้อนแสดงดังตารางผนวกที่ ก5

ตารางผนวกที่ ก3 พื้นที่ใต้กราฟของโทลูอินและสารมาตรฐานภายในที่สภาวะต่างๆของการสกัดโทลูอินจากเฮปแทนด้วยการกวนผสมแบบกะที่อุณหภูมิในการสกัด 30 °C

เวลาในการสกัด (นาท)	อัตราส่วนโดย โมล TEG ต่อสาร ป้อน	ครั้งที่	วัฏภาคที่ถูกสกัด		วัฏภาคที่ไม่ถูกสกัด	
			โทลูอิน	IS	โทลูอิน	IS
15	1:1	1	21455	300434	342642	829389
15	1:1	2	37033	462191	459859	1043160
30	1:1	1	27105	374785	217795	607315
30	1:1	2	26006	358713	272100	753985
60	1:1	1	28108	362995	328687	887240
60	1:1	2	27435	353901	222963	675922
90	1:1	1	57943	612775	322471	822843
90	1:1	2	33494	394500	139953	417383
120	1:1	1	49435	571314	221007	624824
120	1:1	2	29103	340538	244896	760174
180	1:1	1	40337	479045	225036	665644
180	1:1	2	44961	504071	236300	703424
15	3:1	1	1881	269687	272744	702165
15	3:1	2	15921	609931	338098	925419
30	3:1	1	51619	1339271	328080	935476
30	3:1	2	13035	413797	134046	416747
60	3:1	1	9228	210145	258256	793925

ตารางผนวกที่ ก3 (ต่อ)

เวลาในการ สกัด (นาทีก)	อัตราส่วนโดย โมล TEG ต่อสาร ป้อน	ครั้งที่	วัฏภาคที่ถูกสกัด		วัฏภาคที่ไม่ถูกสกัด	
			โทลูอิน	IS	โทลูอิน	IS
60	3:1	2	21085	313997	262268	654229
90	3:1	1	13013	197043	252319	767455
90	3:1	2	12151	200075	245969	784823
120	3:1	1	38613	450549	151256	481834
120	3:1	2	64088	683517	267700	644547
180	3:1	1	86936	1021625	279897	903556
180	3:1	2	13212	199895	188530	590694
15	5:1	1	7492	332685	180484	558984
15	5:1	2	5669	250774	448493	1112616
30	5:1	1	19414	711765	202526	705411
30	5:1	2	14048	492425	186304	665769
60	5:1	1	9943	246022	210697	928492
60	5:1	2	8076	230548	210697	928492
90	5:1	1	14887	353517	179518	794796
90	5:1	2	10036	257527	131933	681349
120	5:1	1	22633	463748	122235	713158
120	5:1	2	21949	472513	131933	681349
180	5:1	1	24099	498785	142744	907697
180	5:1	2	17143	352308	121648	651922

ตารางผนวกที่ ก4 พื้นที่ใต้กราฟของโทลูอินและสารมาตรฐานภายในที่สภาวะต่างๆของการสกัด
โทลูอินจากเฮปแทนด้วยช่องจุลภาค

เวลาใน การสกัด (วินาที)	อุณหภูมิใน การสกัด (°C)	อัตราส่วนโดย		วัฏภาคที่ถูกสกัด		วัฏภาคที่ไม่ถูกสกัด	
		โมล TEG ต่อ สารป้อน	ครั้งที่	โทลูอิน	IS	โทลูอิน	IS
2	30	1:1	1	40172	507488	327466	869807
2	30	1:1	2	42420	524853	195830	538216
6	30	1:1	1	74347	1326340	485000	1066648
6	30	1:1	2	21074	418376	402353	925261
10	30	1:1	1	75524	1214320	374284	1009790
10	30	1:1	2	22501	440050	369140	980532
2	45	1:1	1	34395	477416	192004	564500
2	45	1:1	2	9994	184991	246206	671716
6	45	1:1	1	9131	182520	342879	813091
6	45	1:1	2	24928	414286	494548	11224490
10	45	1:1	1	14225	300100	266417	797467
10	45	1:1	2	9016	243125	260196	653012
2	60	1:1	1	18990	284346	222549	634211
2	60	1:1	2	29295	395960	213962	599397
6	60	1:1	1	6974	141818	316047	912849
6	60	1:1	2	16624	296606	470930	1171394
10	60	1:1	1	9012	221467	440170	1060395
10	60	1:1	2	13559	310186	311180	903728
2	30	3:1	1	9461	196809	240240	858948
2	30	3:1	2	21785	375703	239488	801354
6	30	3:1	1	34484	534372	261353	904212
6	30	3:1	2	10833	240453	193275	799408
10	30	3:1	1	43937	639109	211937	742266
10	30	3:1	2	42513	586973	151126	537618

ตารางผนวกที่ ก4 (ต่อ)

เวลาในการสกัด (วินาที)	อุณหภูมิในการสกัด (°C)	อัตราส่วนโดย โมล TEG ต่อ สารป้อน	ครั้งที่	วัฏภาคที่ถูกสกัด		วัฏภาคที่ไม่ถูกสกัด	
				โทลูอิน	IS	โทลูอิน	IS
2	45	3:1	1	30469	450026	208501	745514
2	45	3:1	2	9790	169294	222984	818293
6	45	3:1	1	27680	363953	190748	689220
6	45	3:1	2	22212	362507	164305	678146
10	45	3:1	1	27502	500220	159981	680970
10	45	3:1	2	54676	713513	208501	745514
2	60	3:1	1	62791	773129	190431	746824
2	60	3:1	2	53025	757696	217142	756394
6	60	3:1	1	60440	713218	140347	520678
6	60	3:1	2	41151	581323	204207	720386
10	60	3:1	1	58591	804255	175050	676570
10	60	3:1	2	62326	840840	131558	493045
2	30	5:1	1	15893	392390	233192	1570164
2	30	5:1	2	43994	881138	64011	372537
6	30	5:1	1	19712	606406	182790	862244
6	30	5:1	2	5452	206031	181482	773271
10	30	5:1	1	13389	460941	134191	752626
10	30	5:1	2	30003	894946	132054	652831
2	45	5:1	1	25298	563028	117330	723808
2	45	5:1	2	45895	1080639	143990	1048773
6	45	5:1	1	40446	1018616	96321	481950
6	45	5:1	2	27372	754821	115948	607687
10	45	5:1	1	24917	587223	160537	732960
10	45	5:1	2	29215	612039	139457	633729
2	60	5:1	1	80646	1002585	184188	686128

ตารางผนวกที่ ก4 (ต่อ)

เวลาในการสกัด (วินาที)	อุณหภูมิในการสกัด (°C)	อัตราส่วนโดย โมล TEG ต่อ สารป้อน	ครั้งที่	วัฏภาคที่ถูกสกัด		วัฏภาคที่ไม่ถูกสกัด	
				โทลูอิน	IS	โทลูอิน	IS
2	60	5:1	2	13309	365597	98983	599999
6	60	5:1	1	5703	161318	127252	653166
6	60	5:1	2	23338	505758	150898	768738
10	60	5:1	1	7983	276068	114296	993976
10	60	5:1	2	14179	351837	121496	896784

ตารางผนวกที่ ก5 พื้นที่ใต้กราฟของโทลูอินและสารมาตรฐานภายในของสารป้อนในการสกัด
โทลูอินจากเฮปเทนด้วยช่องจุลภาค

วิธีการสกัด	ครั้งที่	โทลูอิน	IS
กวนผสมแบบกะ	1	420632	789209
กวนผสมแบบกะ	2	422635	798419
ช่องจุลภาค	1	364087	714279
ช่องจุลภาค	2	414845	844273



1. การคำนวณอัตราการไหลของ TEG และสารป้อน

1.1 คำนวณอัตราการไหลรวม

การคำนวณอัตราการไหลรวมใช้สมการ

$$Q = \frac{V}{t}$$

เมื่อ	t	คือ เวลาในการสกัด (min)
	V	คือ ปริมาตรของช่องจุลภาค (cm^3 หรือ ml)
	Q	คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตร (ml/min)

โดยช่องจุลภาคมีความยาว 120 เซนติเมตร มีพื้นที่หน้าตัด 0.4×0.4 มิลลิเมตร

ตัวอย่างการคำนวณอัตราการไหลรวมเมื่อกำหนดเวลาในการสกัดเท่ากับ 2 วินาที

$$Q = \frac{0.4 \times 0.4 \times 10^{-2} \times 120 \text{ ml}}{2/60 \text{ min}} = 5.76 \text{ ml/min}$$

1.2 เปลี่ยนอัตราส่วนโดยโมลให้อยู่ในรูปอัตราส่วนโดยปริมาตร

ในการคำนวณหาอัตราการไหลเชิงปริมาตรของแต่ละสายต้องเปลี่ยนอัตราส่วนโดยโมลให้อยู่ในรูปอัตราส่วนโดยปริมาตร โดยใช้ความสัมพันธ์ดังนี้

ข้อมูลมวลโมเลกุล (M_w) และความหนาแน่น (ρ) จากตารางผนวกที่ ข1 มวลโมเลกุลของสารป้อนเป็นการประมาณค่า โดยกำหนดให้สารผสมรวมเท่ากับ 100 กรัม จะได้

$$\begin{aligned} 10 \%wt_{\text{toluene}} + 90 \%wt_{\text{heptane}} &= \frac{10 \text{ g toluene}}{92.14 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \text{ toluene}} + \frac{90 \text{ g heptane}}{100.2 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \text{ heptane}} \\ &= 1.0067 \cong 1 \text{ mol} \end{aligned}$$

ตารางผนวกที่ ข1 มวลโมเลกุลและความหนาแน่นของสาร

ชื่อสาร	มวลโมเลกุล (g/mol)	ความหนาแน่น (g/ml)
TEG	150.17	1.124
Toluene	92.14	0.87
Heptane	100.2	0.6795
สารผสม (toluene 10%wt ใน heptane)	$\cong 100$	0.71856

ตัวอย่างการเปลี่ยนอัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 3:1 เป็นอัตราส่วนโดยปริมาตร มีวิธีการดังนี้

$$3:1 = \frac{3 \text{ mol}_{TEG} \times M_{w,TEG} / \rho_{TEG}}{1 \text{ mol}_{Feed} \times M_{w,Feed} / \rho_{Feed}}$$

$$= \frac{3 \text{ mol}}{1 \text{ mol}} \times \frac{150.17 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \div 1.124 \frac{\text{g}}{\text{ml}}}{100 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \div 0.71856 \frac{\text{g}}{\text{ml}}} = \frac{2.88 \text{ ml}}{1 \text{ ml}}$$

ดังนั้น อัตราการไหลของ TEG และสารป้อนที่อัตราส่วนโดยโมลเท่ากับ 3:1 และเวลาในการสกัดเท่ากับ 2 วินาที มีค่าดังนี้

$$\text{อัตราการไหลของ TEG} = 5.76 \frac{\text{ml}}{\text{min}} \times 2.88/3.88 = 4.27 \text{ ml/min}$$

$$\text{อัตราการไหลของสารป้อน} = 5.76 \frac{\text{ml}}{\text{min}} \times 1/3.88 = 1.48 \text{ ml/min}$$

อัตราการไหลของ TEG และสารป้อน ที่เวลาในการสกัดและอัตราส่วนโดยโมลของ TEG ต่อสารป้อนที่ต่างกันแสดงในตารางผนวกที่ ข2

ตารางผนวกที่ ข2 อัตราการไหลของ TEG และสารป้อน ที่เวลาในการสกัดและอัตราส่วนโดยโมลของ TEG และสารป้อนที่ต่างกัน

อัตราส่วนโดย โมลของ TEG ต่อ สารป้อน	อัตราส่วนโดย ปริมาตรของ TEG ต่อสารป้อน	เวลาในการสกัด (วินาที)	อัตราการไหล ของ TEG (ml/min)	อัตราการไหล ของสารป้อน (ml/min)
1:1	0.9599:1	2	2.821	2.939
		6	0.94	0.98
		10	0.564	0.588
3:1	2.88:1	2	4.28	1.48
		6	1.43	0.49
		10	0.86	0.29
5:1	4.8:1	2	4.77	0.99
		6	1.589	0.331
		10	0.953	0.199

2. การคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอิน

2.1 คำนวณปริมาณโทลูอินจากโครมาโตแกรมจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

จากการทำ Calibration curve ด้วยสารมาตรฐานภายใน (Internal standard) ได้สมการ

$$\text{ปริมาณโทลูอิน (g)} = 18.164 \times \left(\frac{\text{area of toluene}}{\text{area of internal standard}} \right) + 0.2048$$

2.2 การปรับให้สอดคล้องของข้อมูล (Data reconciliation)

นำปริมาณโทลูอินที่ได้จากสารป้อน วัฏภาคที่ถูกสกัด และวัฏภาคที่ไม่ถูกสกัด มาทำการปรับให้สอดคล้องของข้อมูลเพื่อหาปริมาณโทลูอินที่เหมาะสมในวัฏภาคที่ถูกสกัด (E_{recon}) และวัฏภาคที่ไม่ถูกสกัด (R_{recon}) จากสมการ

$$\text{Min}\{(R_{\text{measure}} - R_{\text{recon}})^2 + (E_{\text{measure}} - E_{\text{recon}})^2\}$$

โดย

$$F_{\text{measure}} = R_{\text{recon}} + E_{\text{recon}}$$

เมื่อ	R_{measure}	คือ ปริมาณโทลูอิกจากการทดลองในวัฏภาคที่ไม่ถูกสกัด (g)
	R_{recon}	คือ ปริมาณโทลูอิกจากการปรับให้สอดคล้องในวัฏภาคที่ไม่ถูกสกัด (g)
	E_{measure}	คือ ปริมาณโทลูอิกจากการทดลองในวัฏภาคที่ถูกสกัด (g)
	E_{recon}	คือ ปริมาณโทลูอิกจากการปรับให้สอดคล้องในวัฏภาคที่ถูกสกัด (g)
	F_{measure}	คือ ปริมาณโทลูอินจากทดลองในสารป้อน (g)

2.3 คำนวณเปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอิน

คำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอินจากสมการ

$$\text{เปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอิน (\%)} = \frac{E_{\text{recon}}}{R_{\text{recon}} + E_{\text{recon}}} \times 100$$

2.4 ตัวอย่างการคำนวณเปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอิน

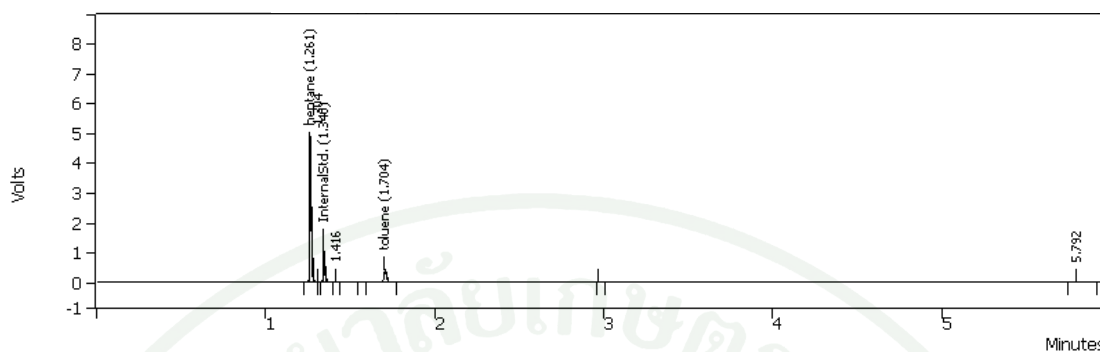
คำนวณปริมาณโทลูอินที่อัตราส่วนโดยโมล TEG ต่อสารป้อน 5:1 จากโครมาโตแกรมของสารป้อน วัฏภาคที่ถูกสกัด และวัฏภาคที่ไม่ถูกสกัด ดังภาพผนวกที่ ข1 ข2 และข3 ตามลำดับ

$$\text{ปริมาณโทลูอินของสารป้อน} = 18.164 \times \left(\frac{414845}{844278}\right) + 0.2048 = 9.1299 \text{ g}$$

$$\text{ปริมาณโทลูอินของวัฏภาคที่ถูกสกัด} = 18.164 \times \left(\frac{14179}{351837}\right) + 0.2048 = 0.9368 \text{ g}$$

ที่อัตราส่วนโดยโมล TEG ต่อสารป้อน 5:1 เท่ากับ ดังนั้นจะมีปริมาณโทลูอินของสารวัฏภาคที่ถูกสกัดเท่ากับ $0.732 \times 4.8 = 4.4967 \text{ g}$

$$\begin{aligned} \text{ปริมาณโทลูอินของวัฏภาคที่ไม่ถูกสกัด} &= 18.164 \times \left(\frac{121496}{896784}\right) + 0.2048 \\ &= 2.6657 \text{ g} \end{aligned}$$



Peak No.	Peak Name	Result (glam)	Ret. Time (min)	Time Offset (min)	Area (counts)	Sep. Code	Width 1/2 (sec)	Status Codes
1	heptane	70.8842	1.261	-0.006	3091054	BB	0.6	
2		0.0316	1.304	0.000	1376	TS	0.0	
3	InternalStd.	19.3610	1.340	-0.000	844278	VB	0.6	
4		0.0820	1.416	0.000	3575	TS	0.0	
5	toluene	9.5132	1.704	-0.025	414845	BB	0.9	
6		0.1279	5.792	0.000	5578	BB	3.0	
Totals:		99.9999		-0.031	4360706			

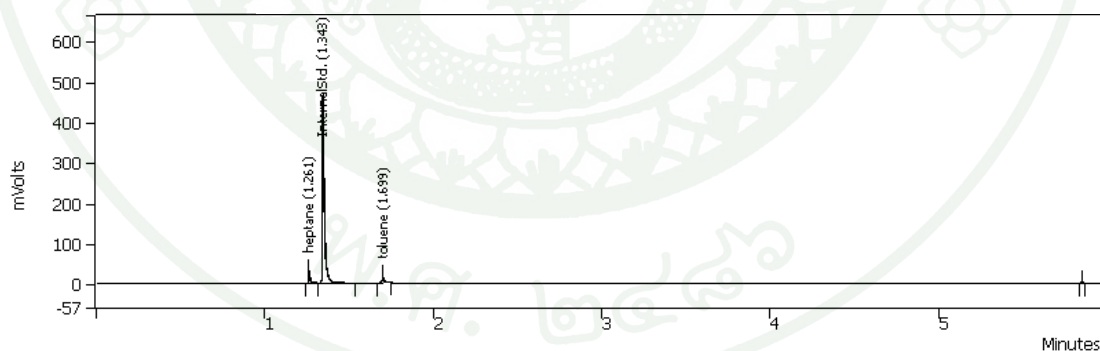
Total Unidentified Counts : 10530 counts

Detected Peaks: 7

Rejected Peaks: 1

Identified Peaks: 3

ภาพผนวกที่ ข1 ตัวอย่างโครมาโตแกรมของสารป้อน



Peak No.	Peak Name	Result ()	Ret. Time (min)	Time Offset (min)	Area (counts)	Sep. Code	Width 1/2 (sec)	Status Codes
1	heptane	3.8181	1.261	0.002	14530	BV	0.4	
2	InternalStd.	92.4558	1.343	-0.004	351837	VB	0.6	
3	toluene	3.7260	1.699	-0.001	14179	BB	1.0	
Totals:		99.9999		-0.003	380546			

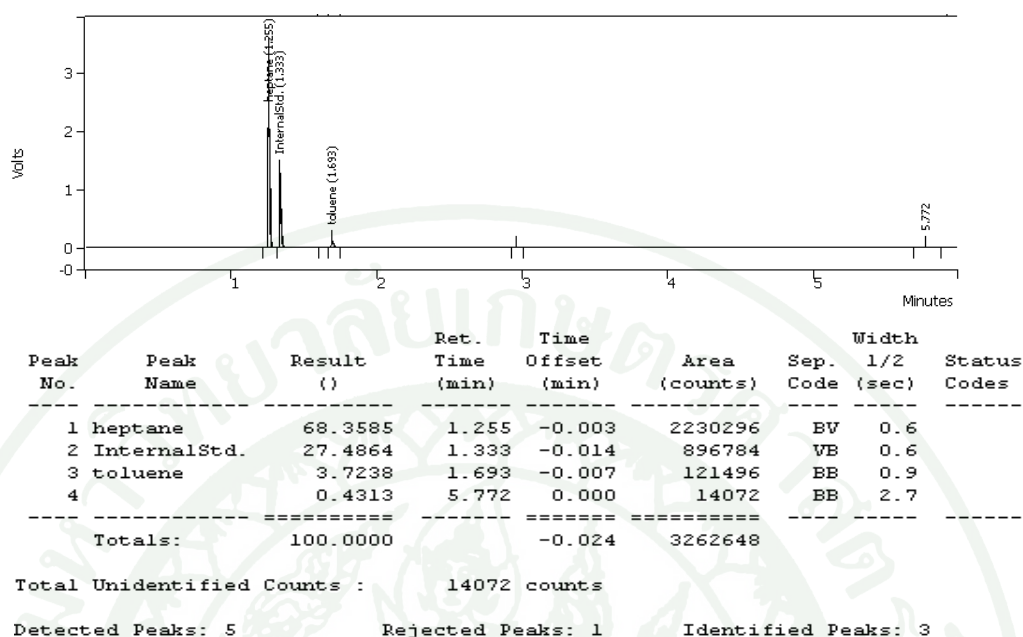
Total Unidentified Counts : 0 counts

Detected Peaks: 4

Rejected Peaks: 1

Identified Peaks: 3

ภาพผนวกที่ ข2 ตัวอย่างโครมาโตแกรมของวัฏภาคที่ถูกสกัด



ภาพผนวกที่ ข3 ตัวอย่างโครมาโตแกรมของวัฏภาคที่ไม่ถูกสกัด

การปรับให้สอดคล้องของข้อมูลแสดงดังตารางผนวกที่ ข3 พบว่า ผลบวกของกำลังสองที่น้อยที่สุด เท่ากับ 1.935667867 ที่ $R_{recon} = 3.649$ g และ $E_{recon} = 5.4809$ g ดังนั้นเปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอินจะมีค่าเท่ากับ

$$\text{เปอร์เซ็นต์การสกัดโทลูอิน} = \frac{5.4809}{3.649 + 5.4809} \times 100 = 60.032\%$$

ตารางผนวกที่ ข3 ตัวอย่างการปรับให้สอดคล้องของข้อมูล

at 10 sec.	feed	raff	ext	(y-raff)^2	(z-ext)^2	sum
no.	9.1299	2.665653	4.496676			
1	9.1299	3.7	5.4299	1.069874	0.870906	1.940780488
2	9.1299	3.6	5.5299	0.873005	1.067551	1.940555741
3	9.1299	3.5	5.6299	0.696135	1.284196	1.980330994
4	9.1299	3.61	5.5199	0.891792	1.046986	1.938778215
5	9.1299	3.62	5.5099	0.910779	1.026622	1.93740069

ตารางผนวกที่ ข3 (ต่อ)

at 10 sec.	feed	raff	ext	(y-raff) ²	(z-ext) ²	sum
no.	9.1299	2.665653	4.496676			
6	9.1299	3.63	5.4999	0.929966	1.006457	1.936423165
7	9.1299	3.64	5.4899	0.949353	0.986493	1.935845639
8	9.1299	3.65	5.4799	0.96894	0.966729	1.935668114
9	9.1299	3.66	5.4699	0.988727	0.947164	1.935890589
10	9.1299	3.651	5.4789	0.970909	0.964763	1.935672362
11	9.1299	3.649	5.4809	0.966972	0.968696	1.935667867
12	9.1299	3.648	5.4819	0.965006	0.970665	1.935671619

3. การคำนวณการใช้พลังงานของการสกัดโทลูอินจากเฮปเทนด้วยช่องจุลภาค

3.1 การหาความสูงของช่องจุลภาค

ความสูงของเครื่องปฏิกรณ์ช่องจุลภาคคำนวณจากสมการ

$$\text{ความสูง (เมตร)} = \text{แผ่นประกบบนล่าง (1 cm. x 2)} + \{ \text{จำนวนช่องจุลภาค (n) x 2 mm.} \} \\ + \{ \text{จำนวนแผ่นให้ควบคุมอุณหภูมิ (ถ้ามี) (n+1) x 2 mm.} \}$$

ตัวอย่างการหาความสูงของช่องจุลภาคที่อัตราการไหลของสารป้อนเท่ากับ 1 ตันต่อวัน อัตราส่วน TEG ต่อสารป้อน 5:1

จากการทดลอง อัตราการไหลของสารป้อนเมื่อใช้ช่องจุลภาคหนึ่งแผ่นเท่ากับ

$$0.99 \frac{\text{ml}}{\text{min}} = 0.99 \frac{\text{ml}}{\text{min}} \cdot 0.71856 \frac{\text{g}}{\text{ml}} \cdot \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \cdot \frac{1 \text{ ton}}{1000 \text{ kg}} \cdot \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ hr}} \cdot \frac{24 \text{ hr}}{1 \text{ day}} \\ = 1.0243 \times 10^{-3} \text{ ton/day} \cdot \text{plate}$$

ดังนั้น จำนวนแผ่นช่องจุลภาคที่อัตราการไหลของสารป้อนเท่ากับ 1 ตันต่อวัน เท่ากับ

$$\begin{aligned}\text{จำนวนแผ่นช่องจุลภาค} &= \frac{1 \text{ ton}}{\text{day}} \cdot \frac{1}{1.0243 \times 10^{-3}} \frac{\text{day} \cdot \text{plate}}{\text{ton}} \\ &= 976.27 \cong 977 \text{ plate}\end{aligned}$$

ถ้าไม่ต้องใช้แผ่นควบคุมอุณหภูมิ ความสูงของเครื่องปฏิกรณ์ช่องจุลภาคจะเท่ากับ

$$\begin{aligned}\text{ความสูง (m)} &= (0.01 \times 2) + (977 \times 0.002) \\ &= 1.974 \text{ m}\end{aligned}$$

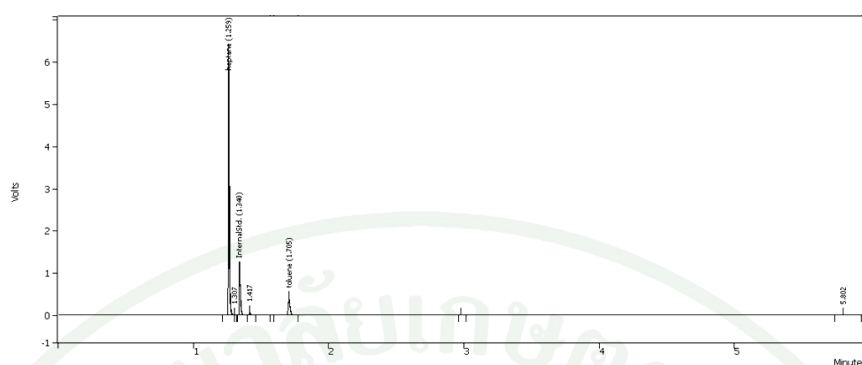
ถ้าไม่ต้องใช้แผ่นควบคุมอุณหภูมิ ความสูงของเครื่องปฏิกรณ์ช่องจุลภาคจะเท่ากับ

$$\begin{aligned}\text{ความสูง (m)} &= (0.01 \times 2) + (977 \times 0.002) + (978 \times 0.002) \\ &= 3.93 \text{ m}\end{aligned}$$



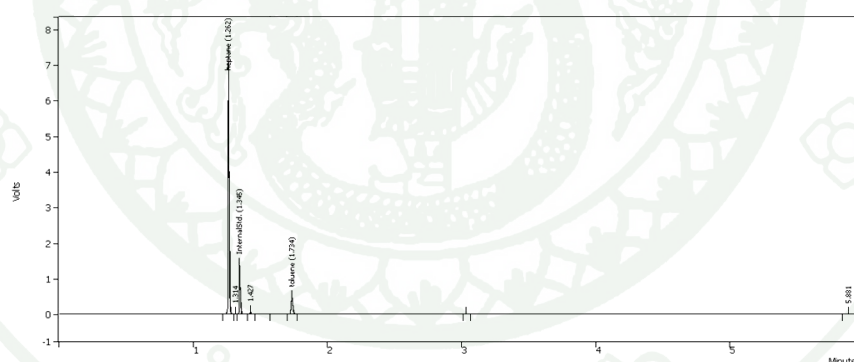
ภาคผนวก ค

ตัวอย่างโครมาโทแกรมของผลการทดลองที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี



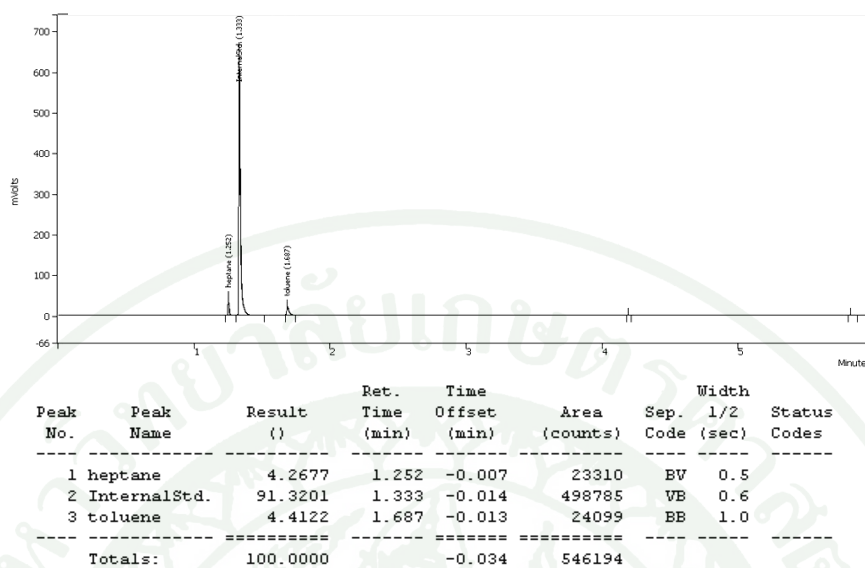
Peak No.	Peak Name	Result (glam)	Ret. Time (min)	Time Offset (min)	Area (counts)	Sep. Code	Width 1/2 (sec)	Status Codes
1	heptane	74.0683	1.259	0.000	2803084	BB	0.4	
2		0.0000	1.307	0.000	1669	TS	0.0	
3	InternalStd. INT STD		1.340	-0.001	714279	VB	0.5	S
4		0.0000	1.417	0.000	36686	TS	0.0	
5	toluene	7.5474	1.705	-0.023	364087	BB	0.8	
6		0.0000	5.802	0.000	5627	BB	4.0	
Totals:		81.6157		-0.024	3925432			

ภาพผนวกที่ ค1 โครมาโทแกรมของสารป้อนที่ได้จากการทดลองการสกัดโทลูอินด้วยช่องจุลภาค

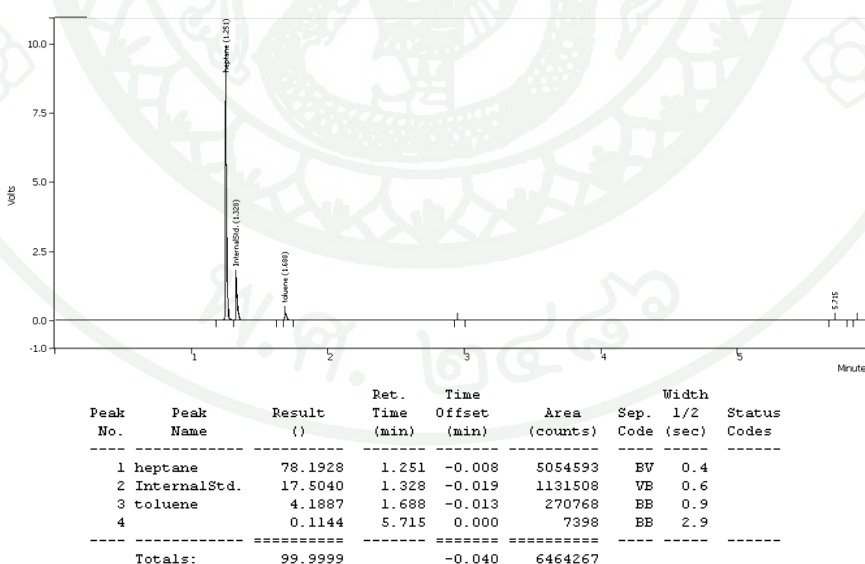


Peak No.	Peak Name	Result (glam)	Ret. Time (min)	Time Offset (min)	Area (counts)	Sep. Code	Width 1/2 (sec)	Status Codes
1	heptane	83.3197	1.262	0.003	3483978	BB	0.4	
2		0.0000	1.314	0.000	2248	TS	0.0	
3	InternalStd. INT STD		1.345	-0.034	789209	VB	0.5	S
4		0.0000	1.427	0.000	25286	TS	0.0	
5	toluene	7.8917	1.734	0.006	420632	BB	0.8	
6		0.0000	5.881	0.000	2087	BB	2.3	
Totals:		91.2114		-0.025	4723440			

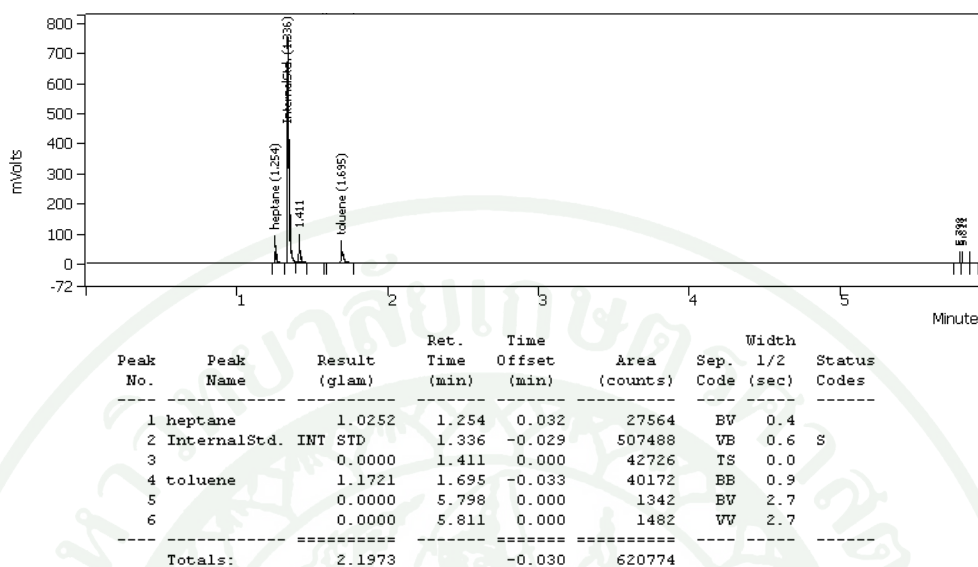
ภาพผนวกที่ ค2 โครมาโทแกรมของสารป้อนที่ได้จากการทดลองการสกัดโทลูอินด้วยวิธีกวนผสมแบบกะ



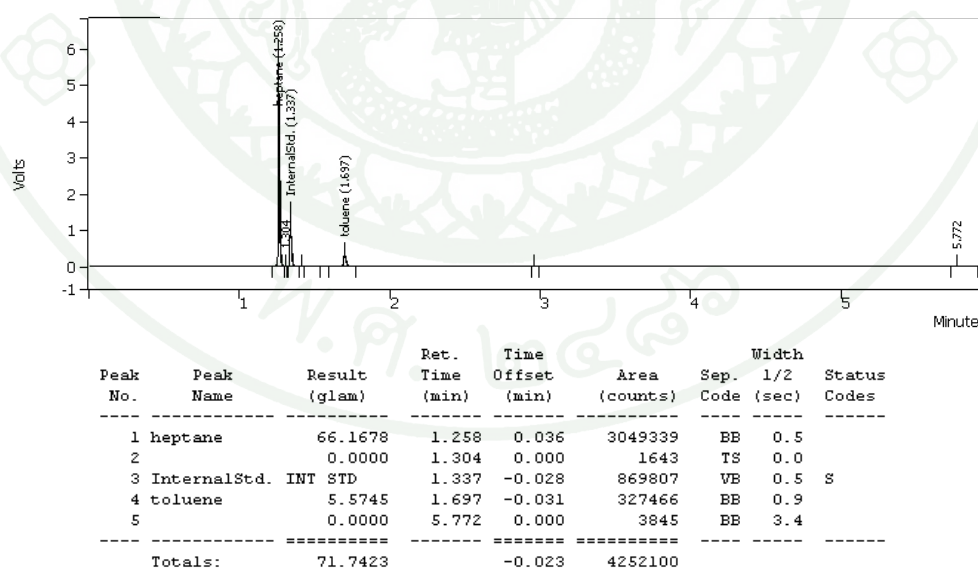
ภาพผนวกที่ ค3 โครมาโทแกรมของวัฏภาคที่ถูกสกัดของการสกัดโทลูอินด้วยวิธีกวนผสมแบบกะที่สภาวะการทดลองอัตราส่วน TEG ต่อสารป้อน 5:1 เวลาในการสกัด 180 นาที และอุณหภูมิในการสกัด 30 °C



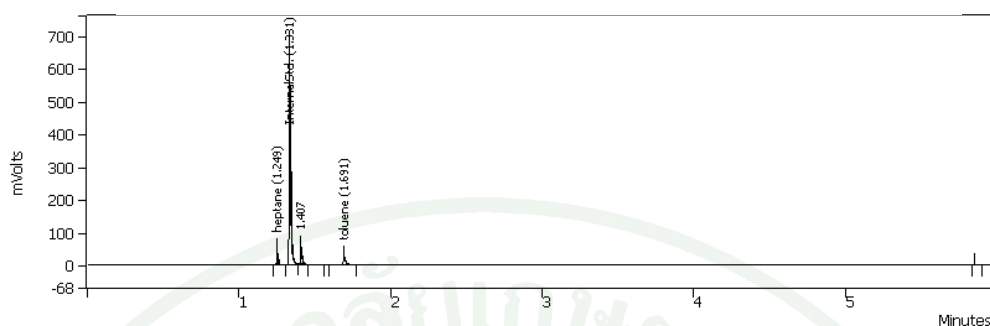
ภาพผนวกที่ ค4 โครมาโทแกรมของวัฏภาคที่ไม่ถูกสกัดของการสกัดโทลูอินด้วยวิธีกวนผสมแบบกะที่สภาวะการทดลองอัตราส่วน TEG ต่อสารป้อน 5:1 เวลาในการสกัด 180 นาที และอุณหภูมิในการสกัด 30 °C



ภาพผนวกที่ ค5 โครมาโทแกรมของวัฏภาคที่ถูกสกัดของการสกัดโทลูอินด้วยช่องจุลภาคที่สภาวะการทดลองอัตราส่วน TEG ต่อสารป้อน 1:1 เวลาในการสกัด 2 วินาที และอุณหภูมิในการสกัด 30 °C

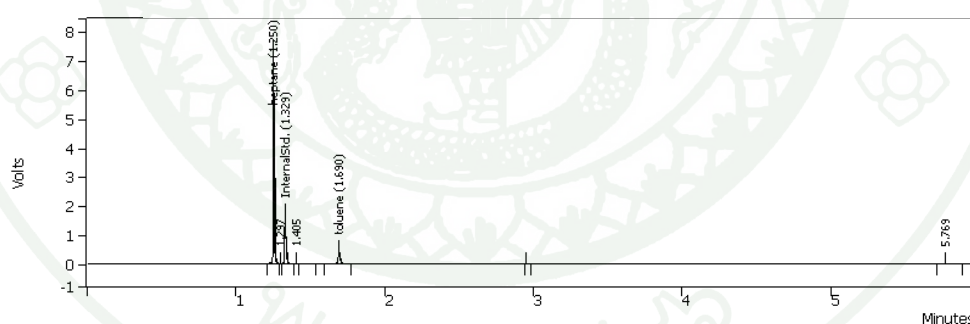


ภาพผนวกที่ ค6 โครมาโทแกรมของวัฏภาคที่ไม่ถูกสกัดของการสกัดโทลูอินด้วยช่องจุลภาคที่สภาวะการทดลองอัตราส่วน TEG ต่อสารป้อน 1:1 เวลาในการสกัด 2 วินาที และอุณหภูมิในการสกัด 30 °C



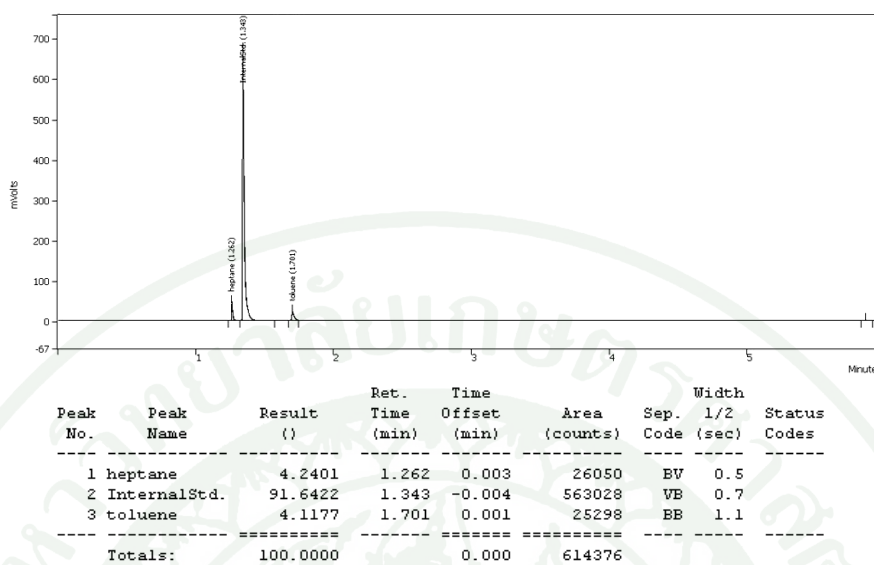
Peak No.	Peak Name	Result (g/lam)	Ret. Time (min)	Time Offset (min)	Area (counts)	Sep. Code	Width 1/2 (sec)	Status Codes
1	heptane	0.8889	1.249	0.027	20724	BV	0.4	
2	InternalStd. INT STD		1.331	-0.034	440050	VB	0.5	S
3		0.0000	1.407	0.000	35108	TS	0.0	
4	toluene	0.7571	1.691	-0.037	22501	BB	0.9	
Totals:		1.6460		-0.044	518383			

ภาพผนวกที่ ๗ โครมาโทแกรมของวัฏภาคที่ถูกสกัดของการสกัดโทลูอินด้วยช่องจุลภาคที่สภาวะการทดลองอัตราส่วน TEG ต่อสารป้อน 1:1 เวลาในการสกัด 10 วินาที และอุณหภูมิในการสกัด 30 °C

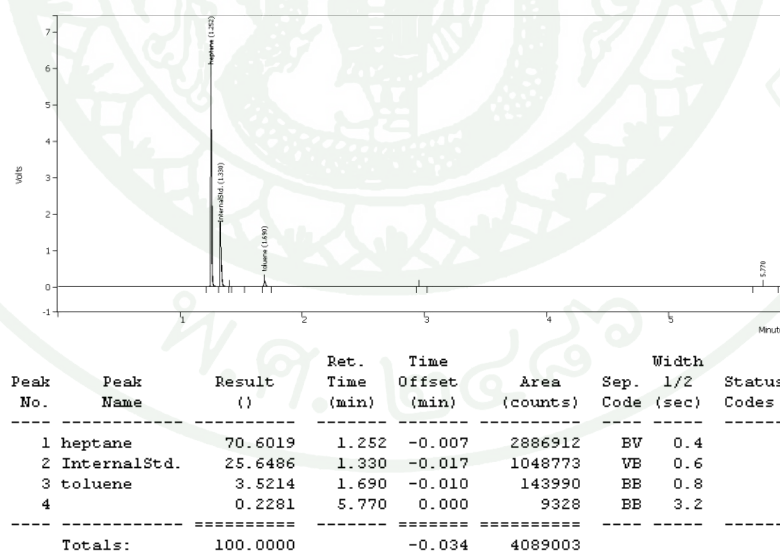


Peak No.	Peak Name	Result (g/lam)	Ret. Time (min)	Time Offset (min)	Area (counts)	Sep. Code	Width 1/2 (sec)	Status Codes
1	heptane	62.3694	1.250	0.028	3336863	BV	0.4	
2		0.0000	1.297	0.000	1521	TS	0.0	
3	InternalStd. INT STD		1.329	-0.036	1009790	VB	0.5	S
4		0.0000	1.405	0.000	1882	TS	0.0	
5	toluene	5.4882	1.690	-0.038	374284	BB	0.8	
6		0.0000	5.769	0.000	9048	BB	2.4	
Totals:		67.8576		-0.046	4733388			

ภาพผนวกที่ ๘ โครมาโทแกรมของวัฏภาคที่ไม่ถูกสกัดของการสกัดโทลูอินด้วยช่องจุลภาคที่สภาวะการทดลองอัตราส่วน TEG ต่อสารป้อน 1:1 เวลาในการสกัด 10 วินาที และอุณหภูมิในการสกัด 30 °C



ภาพผนวกที่ ค9 โครมาโทแกรมของวัฏภาคที่ถูกสกัดของการสกัดโทลูอินด้วยช่องจุลภาคที่สภาวะการทดลองอัตราส่วน TEG ต่อสารป้อน 5:1 เวลาในการสกัด 2 วินาที และอุณหภูมิในการสกัด 45 °C



ภาพผนวกที่ ค10 โครมาโทแกรมของวัฏภาคที่ไม่ถูกสกัดของการสกัดโทลูอินด้วยช่องจุลภาคที่สภาวะการทดลองอัตราส่วน TEG ต่อสารป้อน 5:1 เวลาในการสกัด 2 วินาที และอุณหภูมิในการสกัด 45 °C

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ ศรัณย์ ทับศฤงฆรา

เกิดวันที่ 25 พฤษภาคม 2532

สถานที่เกิด อำเภอเมืองสมุทรปราการ จังหวัดสมุทรปราการ

ประวัติการศึกษา วศ.บ.(วิศวกรรมศาสตร์) ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ตำแหน่งปัจจุบัน -

สถานที่ทำงานปัจจุบัน -

ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทางวิชาการ -

ทุนการศึกษาที่ได้รับ โครงการพัฒนานวัตกรรมและวิจัยด้านวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (ADB) ศูนย์ความเป็น
เลิศด้านเทคโนโลยีปิโตรเคมีและวัสดุ (PETROMAT) บริษัท เอสซีจี เคมิ
คอลส์ จำกัด