การออกแบบหอกลั่นแบบเบดบรรจุสำหรับการแยกเบนซีน โทลูอีน และไซลีน จากไพโรไลซิสแก๊สโซลีน

นายอภิสิทธิ์ ทัศนา

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2542

ISBN 974-333-349-5

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DESIGN OF PACKED BED DISTILLATION COLUMN FOR SEPARATION OF BENZENE, TOLUENE AND XYLENE FROM PYROLYSIS GASOLINE

Mr.Apisith Thatsana

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Chemical Technology
Department of Chemical Technology
Faculty of Science
Chulalongkorn University
Academic Year 1999
ISBN 974-333-349-5

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบหอกลั่นแบบเบดบรรจุสำหรับการแยกเบนซีน โทลูอีน และไซลีน จากไพโรไลซิสแก๊สโซลีน
โดย	นายอภิสิทธิ์ ทัศนา
ภาควิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. วันชัย โพธิ์พิจิตร)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)

.... อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์)

.... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ)

.... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เลอสรวง เมฆสุต)

.... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อภิสิทธิ์ ทัศนา : การออกแบบหอกลั่นแบบเบดบรรจุสำหรับการแยกเบนซีน โทลูอีน และไซลีนจากไพโรไลซิสแก๊สโซลีน. (DESIGN OF PACKED BED DISTILLATION COLUMN FOR SEPARATION OF BENZENE, TOLUENE AND XYLENE FROM PYROLYSIS GASOLINE) อ. ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์, อ. ที่ปรึกษาร่วม : ศ.ดร.สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ, 118 หน้า. ISBN 974-333-349-5.

งานวิจัยนี้ศึกษาการออกแบบและสร้างหอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วนสำหรับการแยกเบนซีน โทลูอีน และไซลีนจากไพโรไลซิสแก๊สโซลีน โดยใช้ข้อมูลการจำลองภาวะการณ์ในหอกลั่นแบบเบดบรรจุด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป HYSYS เพื่อแยกสารอะโรมาติกส์ได้แก่ เบนซีน โทลูอีน และไซลีน แต่ละชนิดให้มีความบริสุทธิ์สูง นำสารป้อนมาทดลองที่ภาวะต่างๆในหอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วนให้สอดคล้องกับการจำลองภาวะการณ์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป HYSYS เปรียบเทียบความบริสุทธิ์ของสารอะโรมาติกส์ที่กลั่นแยกได้จากการทดลองกับการจำลองภาวะการณ์ วิธีตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ อัตราการไหลของสารป้อน และอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ งานวิจัยนี้แบ่งออกเป็นสองส่วน ได้แก่

ส่วนแรก การทดลองในหอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วนสำหรับกลั่นแยกเบนซีน

ภาวะที่เหมาะสมในการกลั่นแยกเบนซีนคือ อัตราการไหลของสารป้อน 3.0 ลิตรต่อชั่วโมง หรือ 2.630 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ 9.83 ได้ความบริสุทธิ์ของเบนซีน โทลูอีน และไซลีนในผลิตภัณฑ์ยอดหอร้อยละ 99.42 0.58 และ 0.00 โดยน้ำหนักตามลำดับ มีเบนซีน โทลูอีน และไซลีนเหลือในผลิตภัณฑ์ก้นหอร้อยละ 32.17 45.56 และ 22.27 โดยน้ำหนักตามลำดับ ประสิทธิภาพรวมของหอกลั่นสำหรับกลั่นแยกเบนซีนคิดเป็น 93.37 %

ส่วนที่สอง การทดลองในหอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วนสำหรับกลั่นแยกโทลูอีน

ภาวะที่เหมาะสมในการกลั่นแยกโทลูอีนคือ อัตราการไหลของสารป้อน 3.0 ลิตรต่อชั่วโมง หรือ 2.605 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ 7.13 ได้ความบริสุทธิ์ของ เบนซีน โทลูอีน และไซลีนในผลิตภัณฑ์ยอดหอร้อยละ 6.77 91.01 และ 2.22 โดยน้ำหนักตามลำดับ มีเบนซีน โทลูอีนและไซลีนเหลือในผลิตภัณฑ์ก้นหอร้อยละ 0.00 41.38 และ 58.62 โดยน้ำหนักตามลำดับ ประสิทธิภาพรวมของหอกลั่นสำหรับกลั่นแยกโทลูอีนคิดเป็น 68.11 %

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา เคมีเทคนิค	ลายมือชื่อนิสิต......อภิสิทธิ์ ทัศนา......
สาขาวิชา เคมีเทคนิค	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..........
ปีการศึกษา 2542	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม..........

4072453623: MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD: AROMATICS / PACKED BED COLUMN / BTX / PYROLYSIS GASOLINE

APISITH THATSANA: DESIGN OF PACKED BED DISTILLATION COLUMN FOR SEPARATION OF BENZENE, TOLUENE AND XYLENE FROM PYROLYSIS GASOLINE.THESIS ADVISOR: ASST. PROF. SOMKIAT NGAMPRASERTSITH, Ph.D. THESIS CO-ADVISOR: PROF. SOMSAK DAMRONGLERD, Ph.D. 118 pp. ISBN 974-333-349-5.

This research studied the design and construction the pilot scale of packed bed distillation column for separation of benzene, toluene and xylene from pyrolysis gasoline. A computer program HYSYS, was used to simulate the conditions in order to separate each of high purity aromatics such as benzene, toluene and xylene. Aromatics were fed into the packed bed distillation column at conditions obtained from HYSYS's simulation. The purity of aromatics from experiment was compared with that from simulation. The studied variables were feed flow rate and reflux ratio. This research was divided into two parts;

The first part was the separation of benzene by using packed bed distillation column. The appropriate conditions in order to separate benzene are 3.0 l/h or 2.630 kg/h of feed flow rate, and 9.83 of reflux ratio. The purity of benzene, toluene and xylene at top products are 99.42 0.58 and 0.00 percent by weight, respectively. The purity of benzene, toluene and xylene at bottom products are 32.17 45.56 and 22.27 percent by weight, respectively. The overall efficiency of packed bed distillation column for separate benzene is 93.37 %.

The second part was the separation of toluene. The appropriate conditions are 3.0 l/h or 2.605 kg/h of feed flow rate, and 7.13 of reflux ratio. The purity of benzene, toluene and xylene at top products are 6.77 91.01 and 2.22 percent by weight, respectively. The purity of benzene, toluene and xylene at bottom products are 0.00 41.38 and 58.62 percent by weight, respectively. The overall efficiency of packed bed distillation column for separate toluene is 68.11 %.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา เคมีเทคนิค	ลายมือชื่อนิสิต..
สาขาวิชา เคมีเทคนิค	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..
ปีการศึกษา 2542	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม..................................

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาในระดับปริญญามหาบัณฑิตและวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จด้วยความสมบูรณ์ โดยได้รับความกรุณาเป็นอย่างดียิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษา และ ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ซึ่งท่านทั้งสองได้ให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางในการทำงานวิจัยแก้ไขรูปเล่มวิทยานิพนธ์ตลอดจนอบรมตักเตือน และเสนอข้อคิดเห็นต่างๆ ด้วยดีมาตลอด เนื่องจากทุนการวิจัยนี้บางส่วนได้รับมาจากทุนอุดหนุนการวิจัยของบัณฑิตวิทยาลัยจึงขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้อย่างสูงยิ่ง

ขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เลอสรวง เมฆสุต และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรพจน์ เปี่ยมสมบูรณ์ ที่กรุณารับเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์

ขอกราบขอบพระคุณ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือด้านเงินทุนการศึกษา และเงินทุนอุดหนุนเพื่อการทำงานวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ บริษัท อะโรเมติกส์ (ประเทศไทย) จำกัด(มหาชน) และบริษัท ไทยโอเลฟินส์ จำกัด ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์ทางด้านวัตถุดิบสำหรับการทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ คุณสุณี พรรคประพันธ์ เจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย คุณสังข์ ชมชื่น และเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือในการสร้างเครื่องมือ และความสะดวกในการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ภาควิชาเคมีเทคนิคที่ให้กำลังใจด้วยดีมาตลอด

ขอขอบคุณ คุณลักษมณ เพ็งสุภาพ เพื่อนสนิทจากบริษัท อะโรเมติกส์ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) ที่ช่วยเหลือ และประสานงานทางด้านวัตถุดิบสำหรับการทำงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ คุณสายวรุณ สินธุวรานนท์ เพื่อนสนิทที่คอยช่วยเหลือและเป็นกำลังใจในทุกๆ เรื่องกับความสำเร็จในครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อประสาท ทัศนา ที่กรุณาช่วยสร้างหอกลั่นจนสำเร็จบรรลุเป้าหมายที่ได้วางไว้ อีกทั้งคุณแม่ พี่สาว และน้องสาวที่คอยให้ความช่วยเหลือทั้งกำลังกาย กำลังทรัพย์ และเป็นกำลังใจที่สำคัญกับความสำเร็จในชีวิตการศึกษาด้วยดีเสมอมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฌ
สารบัญรูป	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฑ
บทที่ 1. บทนำ	1
บทที่ 2. ทฤษฎีและวารสารปริทัศน์	3
สายผลิตภัณฑ์ของสารอะโรมาติกส์	3
แหล่งสารป้อนสำหรับอุตสาหกรรมอะโรมาติกส์	5
กระบวนการแยกสารอะโรมาติกส์โดยวิธีกลั่นแบบลำดับส่วน	5
กระบวนการแยกสารอะโรมาติกส์ในระดับอุตสาหกรรม	8
เครื่องสกัดแบบจานหมุน	10
การกลั่นลำดับส่วน	11
หลักการออกแบบหอกลั่นแบบเบดบรรจุ	12
ชนิดและความสำคัญของเบดบรรจุ	12
อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน	15
ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	24
บทที่3. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	26
อุปกรณ์การทดลอง	26
สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	34
วิธีการทดลอง	35
บทที่ 4. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล	40
บทที่ 5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	61
สรุปผลการทดลอง	61
ข้อเสนอแนะ	64

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

รายการอ้างอิง.. 65

ภาคผนวก.. 67

ก. ตัวอย่างการคำนวณ.. 68

ข. ตัวอย่างโครมาโทแกรมจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือแก๊สโครมาโทกราฟี....... 80

ค. ข้อมูลการทดลองในหอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วนสำหรับกลั่นแยกเบนซีนที่อัตราการไหลของสารป้อน 4.0 ลิตรต่อชั่วโมง.................... 84

ง. ข้อมูลการทดลองในหอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วนสำหรับกลั่นแยกเบนซีนที่อัตราการไหลของสารป้อน 3.0 ลิตรต่อชั่วโมง.................... 91

จ. ข้อมูลการทดลองในหอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วนสำหรับกลั่นแยกโทลูอีนที่อัตราการไหลของสารป้อน 4.0 ลิตรต่อชั่วโมง.................... 98

ฉ. ข้อมูลการทดลองในหอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วนสำหรับกลั่นแยกโทลูอีนที่อัตราการไหลของสารป้อน 3.0 ลิตรต่อชั่วโมง.................... 105

ช. ข้อมูลการจำลองภาวะการณ์หอกลั่นแบบเบดบรรจุด้วยโปรแกรม HYSYS........ 112

ซ. การปรับเทียบค่าประสิทธิภาพรวมของหอกลั่นแบบเบดบรรจุที่ประมวลผลจากโปรแกรมจำลองภาวะการณ์ HYSYS กับค่าความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ยอดหอที่ได้จากการทดลองหอกลั่นขนาดขยายส่วน.. 116

ประวัติผู้เขียน.. 118

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ปริมาณการนำเข้าสารอะโรมาติกส์ของไทยในปี 2534-2540......................	4
2.2	ปริมาณการผลิตและความต้องการใช้เบนซีนและพารา-ไซลีนของประเทศไทย ปี 2540-2542..	4
2.3	ปริมาณของสารอะโรมาติกส์ในรีฟอร์มเมต และไพโรไลซิสแก๊สโซลีน.............	5
2.4	แสดงจุดเดือดและค่าการระเหยสัมพัทธ์ของสารอะโรมาติกส์แต่ละชนิด..........	5
2.5	ข้อเปรียบเทียบระหว่างหอกลั่นแบบเบดบรรจุกับหอกลั่นแบบเทรย์หรือเพลต....	12
3.1	สมบัติของสารเคมีที่ใช้ในระบบ ที่อุณหภูมิ 25 ^{o}C....................................	34
3.2	สมบัติของน้ำมันถ่ายโอนความร้อนคุณภาพสูง (TRANSCAL N) บริษัท บีพี ออยล์ (ประเทศไทย) จำกัด...	34
4.1	องค์ประกอบในสารป้อน ส่วนที่สกัดได้ และส่วนราฟฟิเนต จากภาวะที่เหมาะสม จากภาวะที่เหมาะสม...	40
4.2	องค์ประกอบสารป้อน ส่วนที่สกัดได้ และส่วนราฟฟิเนต จากภาวะที่เหมาะสม หน่วยร้อยละโดยน้ำหนัก...	41
4.3	ส่วนที่สกัดได้จากบริษัท และสารป้อนที่ผสมแล้ว....................................	42
4.4	ข้อมูลการจำลองภาวะการณ์หอกลั่นแบบเบดบรรจุสำหรับกลั่นแยกเบนซีน ด้วยโปรแกรม HYSYS โดยนำส่วนที่สกัดได้จากการทดลองในเครื่องสกัดแบบจานหมุนเป็นสารป้อนและกำหนดอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ 9.83.........	42
4.5	ข้อมูลการจำลองภาวะการณ์ด้วยโปรแกรม HYSYS ในส่วนของ Tray Sizing โดยส่วนที่สกัดได้จากการทดลองในเครื่องสกัดแบบจานหมุนเป็นสารป้อน........	43
4.6	ข้อมูลการจำลองภาวะการณ์หอกลั่นแบบเบดบรรจุสำหรับกลั่นแยกเบนซีน ด้วยโปรแกรม HYSYS โดยนำส่วนที่ผสมแล้วมาเป็นสารป้อน......................	44
4.7	ข้อมูลการจำลองภาวะการณ์ด้วยโปรแกรม HYSYS ในส่วนของ Tray Sizing โดยนำส่วนที่ผสมแล้วมาเป็นสารป้อน..	45
4.8	เปรียบเทียบข้อมูลการจำลองภาวะการณ์หอกลั่นแบบเบดบรรจุสำหรับกลั่นแยกเบนซีน ด้วยโปรแกรม HYSYS ที่อัตราการไหลของสารป้อนคงที่ 3.506 กิโลกรัมต่อชั่วโมง กับการทดลองหอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วน.........	46

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

4.9 ข้อมูลแสดงการทำดุลมวลสารสำหรับกลั่นแยกเบนซีนจากการทดลองหอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วนที่อัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ 4.42 5.50 7.13 และ 9.83........ 48

4.10 เปรียบเทียบข้อมูลการจำลองภาวะการณ์หอกลั่นแบบเบดบรรจุสำหรับกลั่นแยกเบนซีนด้วยโปรแกรม HYSYS ที่อัตราการไหลของสารป้อนคงที่ 2.630 กิโลกรัมต่อชั่วโมง กับการทดลองหอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วน......... 49

4.11 เปรียบเทียบข้อมูลการทดลองหอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วนสำหรับกลั่นแยกเบนซีนอัตราการไหลของสารป้อนระหว่าง 3.506 และ 2.630 กิโลกรัมต่อชั่วโมง........ 51

4.12 ข้อมูลแสดงการทำดุลมวลสารสำหรับกลั่นแยกเบนซีนจากการทดลองหอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วนที่อัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ 6.29 7.13 8.29 และ 9.83........ 52

4.13 สารป้อนที่เหมาะสมสำหรับหอกลั่นแยกโทลูอีน........ 52

4.14 ข้อมูลการจำลองภาวะการณ์หอกลั่นแบบเบดบรรจุสำหรับกลั่นแยกโทลูอีนด้วยโปรแกรม HYSYS 53

4.15 เปรียบเทียบข้อมูลการจำลองภาวะการณ์หอกลั่นแบบเบดบรรจุสำหรับกลั่นแยกโทลูอีนด้วยโปรแกรม HYSYS ที่อัตราการไหลของสารป้อนคงที่ 3.473 กิโลกรัมต่อชั่วโมง กับการทดลองหอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วน........ 54

4.16 ข้อมูลแสดงการทำดุลมวลสารสำหรับกลั่นแยกโทลูอีนจากการทดลองหอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วนที่อัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ 4.42 5.50 7.13 และ 9.83........ 56

4.17 เปรียบเทียบข้อมูลการจำลองภาวะการณ์หอกลั่นแบบเบดบรรจุสำหรับกลั่นแยกโทลูอีนด้วยโปรแกรม HYSYS ที่อัตราการไหลของสารป้อนคงที่ 2.605 กิโลกรัมต่อชั่วโมง กับการทดลองหอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วน........ 57

4.18 เปรียบเทียบข้อมูลการทดลองหอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วนสำหรับกลั่นแยกโทลูอีนอัตราการไหลของสารป้อนระหว่าง 3.473 และ 2.605 กิโลกรัมต่อชั่วโมง........ 59

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ หน้า

4.19 ข้อมูลแสดงการทำดุลมวลสารสำหรับกลั่นแยกโทลูอีนจากการทดลองหอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วนที่อัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ 6.29 7.13 8.29 และ 9.83 60

ก.1 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของของไหลทางด้านเชลล์และทางด้านท่อ........ 69

ก.2 ข้อมูลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนบางส่วนที่ได้จากการคำนวณ............ 73

ก.3 ข้อมูลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนบางส่วนที่นำไปออกแบบสร้าง.......... 73

ก.4 Constant for use in estimate of the bundle and shell Diameter........... 74

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	โครงสร้างผลิตภัณฑ์และการใช้ประโยชน์ของสารอะโรมาติกส์......................	3
2.2	แผนภาพกระบวนการแยกสารอะโรมาติกส์ Atmospheric Pressure System.....	6
2.3	แผนภาพกระบวนการแยกสารอะโรมาติกส์ Vacuum Operation System.........	7
2.4	แผนภาพกระบวนการแยกสารอะโรมาติกส์ Prefractionation System.............	8
2.5	แผนภาพกระบวนกระแยกสารอะโรมาติกส์ในระดับอุตสาหกรรมของ UOP.........	9
2.6	เครื่องสกัดแบบจานหมุน..	10
2.7	แสดงเบดบรรจุแบบแรนดอมชนิดต่างๆ..	13
2.8	โครงสร้างและชื่อเรียกส่วนประกอบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อ..	17
2.9	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดแผ่นยึดท่อสองชั้น..................................	19
2.10	เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนหัวลอยแบบดึงออกได้ตลอด.............................	20
3.1	แผนภาพระบบและส่วนประกอบของเครื่องสกัดแบบจานหมุน........................	29
3.2	แผนภาพระบบหอกลั่นแบบเบดบรรจุที่ใช้ในการทดลอง...............................	30
3.3	แผนภาพแสดงการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ กันภายในระบบหอกลั่น...........	31
3.4	หอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วน..	32
3.5	เบดบรรจุแบบราสจิก..	32
3.6	เครื่องควบแน่นบางส่วน..	32
3.7	เครื่องควบแน่นทั้งหมด...	33
3.8	เครื่องต้มซ้ำ..	33
4.1	ความบริสุทธิ์ของเบนซีนในผลิตภัณฑ์ยอดหอจากการทดลองด้วยหอกลั่นขนาดขยายส่วนที่อัตราการไหลของสารป้อนคงที่ 3.506 กิโลกรัมต่อชั่วโมง โดยเปลี่ยนอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับเป็น 4.42 5.50 7.13 และ 9.83 ตามลำดับ	47
4.2	ความบริสุทธิ์ของเบนซีนในผลิตภัณฑ์ยอดหอจากการทดลองด้วยหอกลั่นขนาดขยายส่วนที่อัตราการไหลของสารป้อนคงที่ 2.630 กิโลกรัมต่อชั่วโมง โดยเปลี่ยนอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับเป็น 6.22 7.13 8.29 และ 9.13 ตามลำดับ............	50

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.3 ความบริสุทธิ์ของโทลูอีนในผลิตภัณฑ์ยอดหอจากการทดลองด้วยหอกลั่นขนาดขยายส่วนที่อัตราการไหลของสารป้อนคงที่ 3.473 กิโลกรัมต่อชั่วโมง โดยเปลี่ยนอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับเป็น 4.42 5.50 7.13 และ9.83 ตามลำดับ 55

4.4 ความบริสุทธิ์ของโทลูอีนในผลิตภัณฑ์ยอดหอจากการทดลองด้วยหอกลั่นขนาดขยายส่วนที่อัตราการไหลของสารป้อนคงที่ 2.605 กิโลกรัมต่อชั่วโมง โดยเปลี่ยนอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับเป็น 6.22 7.13 8.29 และ9.83 ตามลำดับ 58

ก.1 Temperature correction factor : one shell pass; two tube pass................ 74

ก.2 Shell-bundle clearance.. 75

ก.3 Tube-side heat-transfer factor.. 76

ก.4 Shell-side heat-transfer factors, segmental baffles.............................. 77

ข.1 โครมาโทแกรมของไพโรไลซิสแก๊สโซลีนที่ใช้เป็นสารป้อนในเครื่องสกัดแบบจานหมุน.. 80

ข.2 โครมาโทแกรมของส่วนที่สกัดได้.. 81

ข.3 โครมาโทแกรมของส่วนราฟฟิเนต.. 81

ข.4 โครมาโทแกรมของสารป้อน ผลิตภัณฑ์ยอดหอ และผลิตภัณฑ์ก้นหอจากการทดลองหอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วนสำหรับกลั่นแยกเบนซีน.... 82

ข.5 โครมาโทแกรมของสารป้อน ผลิตภัณฑ์ยอดหอ และผลิตภัณฑ์ก้นหอจากการทดลองหอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วนสำหรับกลั่นแยกโทลูอีน.... 83

ซ.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของหอกลั่นกับความบริสุทธิ์ที่ภาวะเหมาะสมสำหรับปรับเทียบค่าเพื่อหาประสิทธิภาพรวมของหอกลั่นขนาดขยายส่วนสำหรับกลั่นแยกเบนซีน.. 116

ซ.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของหอกลั่นกับความบริสุทธิ์ที่ภาวะเหมาะสมสำหรับปรับเทียบค่าเพื่อหาประสิทธิภาพรวมของหอกลั่นขนาดขยายส่วนสำหรับกลั่นแยกโทลูอีน.. 117

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์

α	แอกทิวิตี
T	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)
P	ความดัน
d_r	เส้นผ่านศูนย์กลางของจานหมุน (เซนติเมตร)
d_s	ช่องเปิดของวงแหวนสถิต (เซนติเมตร)
T_F	ถังพักสารป้อน
T_S	ถังพักตัวทำละลาย
P_S	เครื่องสูบตัวทำละลาย
P_F	เครื่องสูบสารป้อน
Z_C	ความสูงของคอมพาร์ทเมนต์ (เซนติเมตร)
M	มอเตอร์
t_1	อุณหภูมิขาเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้านเชลล์ (องศาเซลเซียส)
t_2	อุณหภูมิขาออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้านเชลล์ (องศาเซลเซียส)
T_1	อุณหภูมิขาเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้านท่อ (องศาเซลเซียส)
T_2	อุณหภูมิขาออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้านท่อ (องศาเซลเซียส)
m	อัตราการไหลเชิงมวล (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)
F	อัตราการไหลของสารป้อน
D	อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ยอดหอ
B	อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ก้นหอ
X_F	สัดส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของสารป้อน
X_D	สัดส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ยอดหอ
X_B	สัดส่วนร้อยละโดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ก้นหอ

คำย่อ

BTX	เบนซีน โทลูอีน และไซลีน
HETP	ความสูงของชั้นเทียบเท่าทางทฤษฎี (Height of a equivalent theoretical plate)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1
บทนำ

ในปัจจุบันประเทศไทยมีการขยายตัวทางอุตสาหกรรมเป็นอย่างมากความต้องการวัตถุดิบทางด้านปิโตรเลียมจึงเพิ่มขึ้น สารกลุ่มอะโรมาติกส์ได้แก่ เบนซีน โทลูอีน และไซลีน (BTX) เป็นวัตถุดิบมูลฐานที่สำคัญในโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมสี พลาสติก ยาฆ่าแมลง หมึกพิมพ์ ยาง เป็นต้น ประเทศไทยมีโรงงานอุตสาหกรรมปิโตรเคมีขั้นต้น (upstream) คือโรงงานโอเลฟินส์ มีบริษัท ไทยโอเลฟินส์ เป็นผู้ดำเนินการ จากกระบวนการผลิตมีไพโรไลซิสแก๊สโซลีนเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ ซึ่งมีสารอะโรมาติกส์เป็นองค์ประกอบอยู่ด้วยจึงเลือกใช้วิธีการสกัดเพื่อแยกสารอะโรมาติกส์ด้วยตัวทำละลายในเครื่องสกัดแบบจานหมุน (Rotating Disk Contactor, RDC) หลังจากผ่านกระบวนการสกัดจะได้ 2 ส่วนที่เรียกว่า ส่วนที่สกัดได้ (Extract Phase) และส่วนราฟฟิเนต (Raffinate Phase) หลังจากนั้นจะทำการแยกสารอะโรมาติกส์แต่ละชนิดออกจากกัน โดยผ่านกระบวนการกลั่นลำดับส่วน ด้วยหอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วน (Packed Bed Distillation Column) ซึ่งเป็นหอกลั่นอีกชนิดหนึ่งที่มีการนำไปใช้งานกันอย่างกว้างขวางในระดับห้องปฏิบัติการเพราะว่าสร้างง่าย ราคาถูก เบดบรรจุที่ใช้เป็นแบบราสจิกริง (Raschig ring) เป็นทรงกระบอกกลวงมีความสูงเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม ซึ่งทนต่อการกัดกร่อนได้ดี ราคาถูก ไม่มีปัญหาด้านการแตกหักอีกทั้งยังเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างวัฏภาคไอและวัฏภาคของเหลวให้เกิดการถ่ายโอนมวลและถ่ายโอนความร้อนได้ดี ข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบและสร้างหอกลั่นได้มาจากการจำลองภาวะการณ์ในหอกลั่นแบบเบดบรรจุด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป HYSYS จะทำให้สามารถแยกสารอะโรมาติกส์แต่ละชนิดออกจากกันให้มีความบริสุทธิ์มากยิ่งขึ้นเหมาะที่จะนำไปใช้เป็นวัตถุดิบมูลฐานสำหรับงานด้านอื่นๆ ต่อไป

<u>**วัตถุประสงค์ของงานวิจัย**</u>

1. ออกแบบและสร้างหอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วนโดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการจำลองการทำงานที่ภาวะต่างๆ ในหอกลั่นแบบเบดบรรจุด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป HYSYS
2. หาภาวะที่เหมาะสมในการทำงานของหอกลั่นแบบเบดบรรจุเพื่อแยกสารอะโรมาติกส์แต่ละชนิดให้มีความบริสุทธิ์สูง

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ขอบเขตของการวิจัย

ศึกษาการนำเอาข้อมูลที่ได้จากการจำลองภาวะการณ์หอกลั่นแบบเบดบรรจุด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป HYSYS มาแปรผลทำการออกแบบและสร้างหอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วน เปรียบเทียบความบริสุทธิ์ของสารอะโรมาติกส์ที่กลั่นแยกได้ระหว่างผลจากการจำลองภาวะการณ์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป HYSYS กับหอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วน โดยวิเคราะห์หาองค์ประกอบของสารอะโรมาติกส์ที่ได้ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟี

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

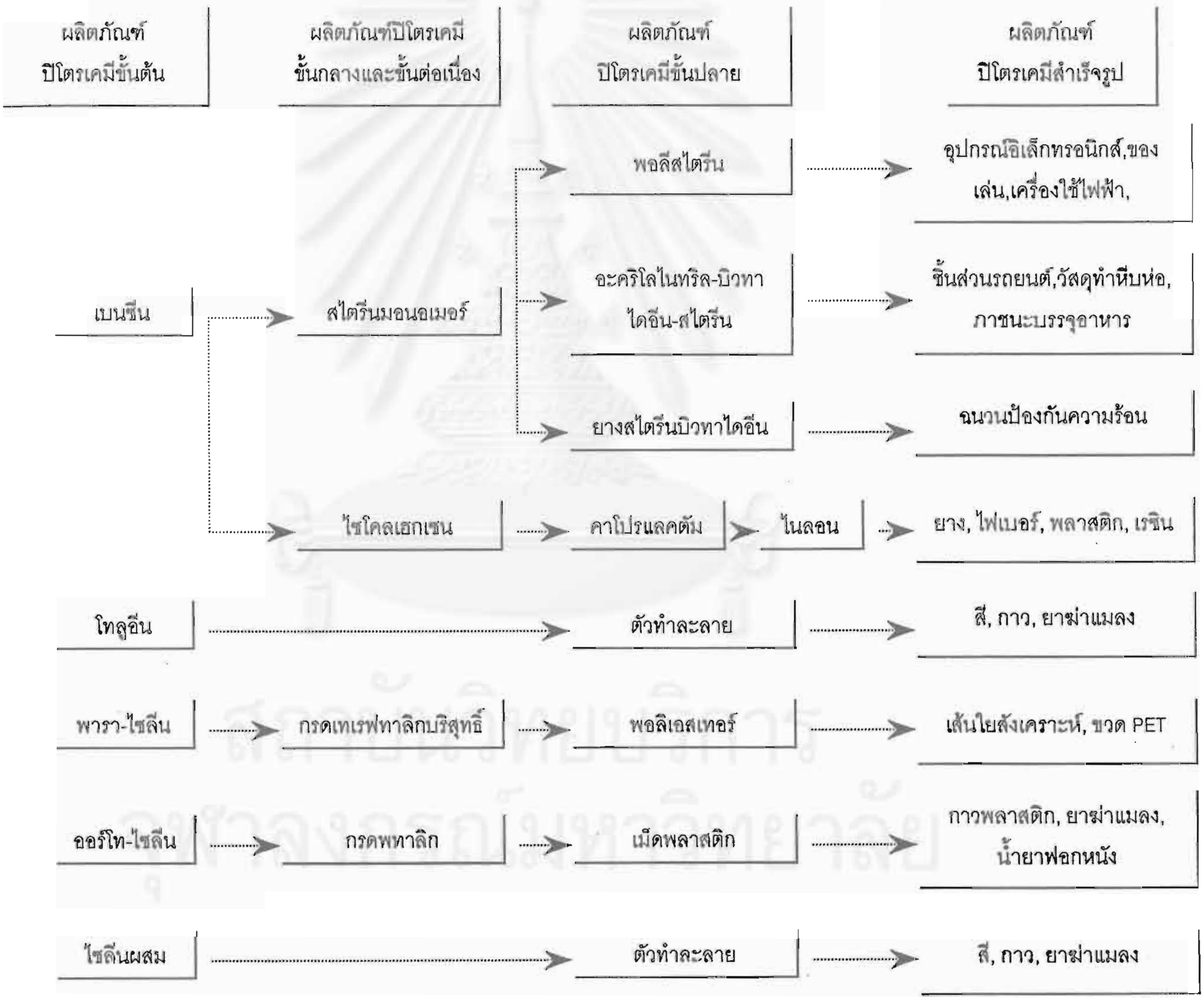
เรียนรู้แนวทางและขั้นตอนในการออกแบบระบบ การสร้างหอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วน และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยนำข้อมูลทางทฤษฎีมาประยุกต์ในการสร้างและใช้งานได้จริง อีกทั้งยังสามารถกลั่นแยกเบนซีน โทลูอีน และไซลีนออกจากกันให้มีความบริสุทธิ์สูงพอที่จะใช้เป็นวัตถุดิบมูลฐานสำหรับงานด้านอื่นๆ ต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2
ทฤษฎีและวารสารปริทัศน์

ในประเทศไทยจัดเป็นกลุ่มประเทศที่กำลังพัฒนาที่มีความก้าวหน้าค่อนข้างมาก อุตสาหกรรมและเทคโนโลยีต่างๆในประเทศก็ได้รับการพัฒนาตามไปด้วยโดยเฉพาะอุตสาหกรรมประเภทปิโตรเคมี ดังนั้นวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมประเภทนี้จึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญมากขึ้นในอุตสาหกรรมอะโรมาติกส์นั้นมีผลิตภัณฑ์ที่สำคัญได้แก่ เบนซีน โทลูอีน และไซลีนจัดเป็นวัตถุดิบที่สำคัญที่สามารถนำไปเป็นสารตั้งต้นในอุตสาหกรรมหลายประเภทดังนี้

1. สายผลิตภัณฑ์ของสารอะโรมาติกส์



รูปที่ 2.1 โครงสร้างผลิตภัณฑ์และการใช้ประโยชน์ของสารอะโรมาติกส์ (บริษัท อะโรเมติกส์(ประเทศไทย),2539)

เมื่อมีการขยายตัวในการผลิต ผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีสำเร็จรูปเหล่านี้มากขึ้น ความต้องการ เบนซีน โทลูอีน และไซลีนผสม จึงเพิ่มขึ้นหลายเท่าตัวและยังมีแนวโน้มที่เพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ดังตารางที่ 2.1 และตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.1 ปริมาณการนำเข้าสารอะโรมาติกส์ของไทยในปี 2534-2540

สารอะโรมาติกส์	2534	2535	2536	2537	2538	2539	2540	อัตราเพิ่มเฉลี่ย	
								2539-2540	2534-2540
เบนซีน	30.2	2.5	3.2	10.2	1.3	199.0	24,475.6	12199.3%	205.3%
โทลูอีน	51,043.7	69,563.8	81,946.9	84,786.6	69,936.6	64,007	35,240	-44.9%	-6.0%
ออร์โท-ไซลีน	16,272	17,376.4	11,406.4	26,903.4	19,621.2	25,223	8,000.6	-68.3%	-11.2%
พารา-ไซลีน	13.9	0.0	0.3	0.0	86,840.1	222,119	49,377	-77.8%	290.8%
ไซลีนผสม	6,695	14,124.8	20,421.1	26,484.3	17,440.4	23,914	14,199.9	-40.6%	13.4%

ที่มา : กรมเศรษฐกิจการพาณิชย์, 2534-2540

หน่วย : เมตริกตันต่อปี

ตารางที่ 2.2 ปริมาณการผลิตและความต้องการใช้เบนซีนและพารา-ไซลีนของประเทศไทย ปี 2540-2542 หน่วย : เมตริกตัน

	เบนซีน			พารา-ไซลีน		
	2540	2541	2542	2540	2541	2542
ปริมาณความต้องการใช้	226,000	326,000	360,000	245,000	257,000	515,000
ปริมาณการผลิต	252,000	329,000	424,000	256,000	337,000	440,000
สมดุล	26,000	3,000	64,000	11,000	80,000	(75,000)

ที่มา : สถาบันปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย (PTIT) และบมจ.อะโรเมติกส์ (ประเทศไทย)

หมายเหตุ : ประมาณการปริมาณความต้องการใช้ คิดจากกำลังการผลิตของผู้ผลิตในอุตสาหกรรมปิโตรเคมีขั้นกลาง (Intermediate Plant) ที่อัตราการเดินเครื่องผลิตเฉลี่ยร้อยละ 100

: ประมาณการปริมาณการผลิต คิดจากกำลังการผลิตของผู้ผลิตปัจจุบันที่อัตราการเดินเครื่องผลิตเฉลี่ยร้อยละ 100

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2. แหล่งสารป้อนสำหรับอุตสาหกรรมผลิตสารอะโรมาติกส์ ได้แก่

2.1 รีฟอร์เมต คือ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการรีฟอร์มมิงสารไฮโดรคาร์บอนเพื่อให้ได้สารอะโรมาติกส์ในปริมาณที่มากขึ้น

2.2 ไพโรไลซิสแก๊สโซลีน คือ ผลิตภัณฑ์พลอยได้ที่ได้จากกระบวนการแตกตัวของโมเลกุลที่ซับซ้อน (แนฟทาหรือแก๊สธรรมชาติ) ไปเป็นโมเลกุลที่ไม่ซับซ้อนโดยอาศัยความร้อน

ตารางที่ 2.3 ปริมาณของสารอะโรมาติกส์ในรีฟอร์มเมต และไพโรไลซิสแก๊สโซลีน ในหน่วยร้อยละโดยน้ำหนัก (Lee, F.M.; Coomb, D.M., 1987)

องค์ประกอบ	รีฟอร์มเมต	ไพโรไลซิสแก๊สโซลีน
เบนซีน	3.61	47.69
โทลูอีน	18.94	24.79
พารา-เมตา-ไซลีน	1.21	4.45
ออร์โท-ไซลีน	13.64	1.33
เอทิลเบนซีน	12.70	7.46
Higher Aromatics	6.45	0.46
นอน-อะโรมาติกส์	43.46	13.82
รวม	100.00	100.00

3. กระบวนการแยกสารอะโรมาติกส์โดยวิธีกลั่นลำดับส่วน (fractional distillation)

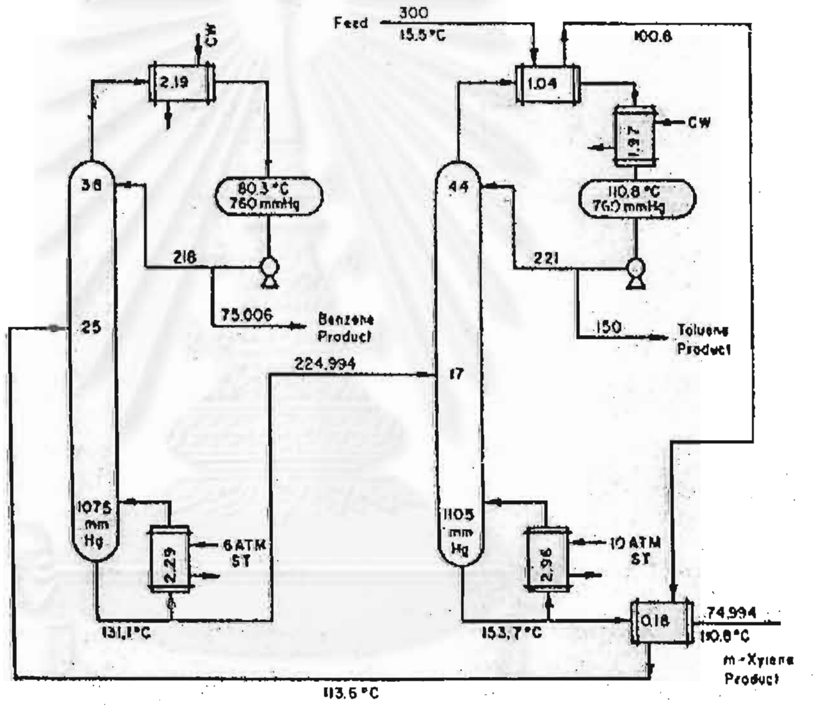
เป็นกระบวนการแยกสารผสมออกจากกันโดยอาศัยจุดเดือดและค่าการระเหยสัมพัทธ์ที่แตกต่างกัน จากตารางที่ 2.4 จะพบว่าสารอะโรมาติกส์แต่ละชนิดมีจุดเดือดและค่าการระเหยสัมพัทธ์ที่แตกต่างกันสามารถที่จะแยกออกจากกันโดยอาศัยกระบวนการกลั่นลำดับส่วน กระบวนการกลั่นแยกสารอะโรมาติกส์ พิจารณาในเชิงการอนุรักษ์พลังงานมีด้วยกันหลายระบบแบ่งออกได้ดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.4 แสดงจุดเดือดและค่าการระเหยสัมพัทธ์ของสารอะโรมาติกส์แต่ละชนิด(Perry, 1997)

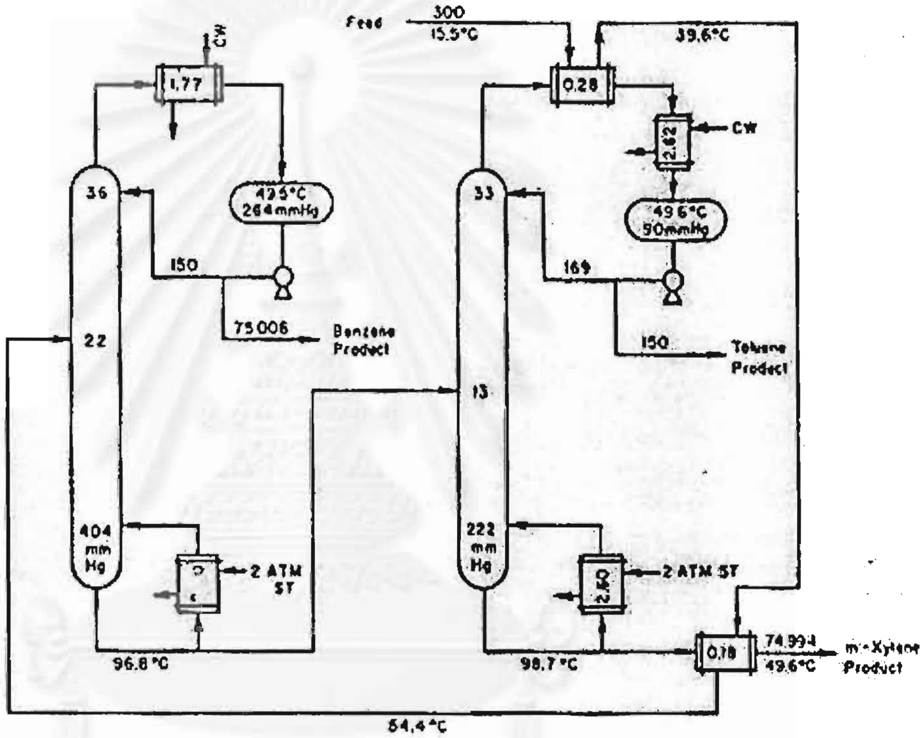
	จุดเดือด(^{o}C)	ค่าการระเหยสัมพัทธ์ (P=101.32 kPa, T=100 ^{o}C)
เบนซีน	80	$\alpha_{\text{เบนซีน-โทลูอีน}} = 2.422$
โทลูอีน	110	$\alpha_{\text{เบนซีน-ไซลีน}} = 6.034$
ไซลีน	138 – 145	$\alpha_{\text{โทลูอีน-ไซลีน}} = 2.491$

3.1 Atmospheric Pressure System หอกลั่นที่ใช้มี 2 คอลัมน์ สารป้อนเป็นสารอะโรมาติกส์ 3 ชนิดคือ เบนซีน โทลูอีน และไซลีนโดยนำสารป้อนไป Pre-heat ที่เครื่องควบแน่นที่คอลัมน์ที่สองก่อนป้อนเข้าคอลัมน์แรกเพื่อที่จะแยกเบนซีนออกทางผลิตภัณฑ์ยอดหอที่คอลัมน์แรก โทลูอีน และไซลีนออกทางผลิตภัณฑ์ยอดหอและก้นหอที่คอลัมน์ที่สองตามลำดับ โดยระบบการกลั่นกระทำที่ความดันบรรยากาศ แสดงดังรูปที่ 2.2 พลังงานที่ใช้ทั้งหมดของเครื่องต้มซ้ำ 5.25 x 10^6 kcal/hr อัตราการไหลของสารป้อน 300 kg-mole/hr ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 โดยโมล



รูปที่ 2.2 แผนภาพกระบวนการแยกสารอะโรมาติกส์ Atmospheric Pressure System (Cheng and W.L. Luyben, 1985)

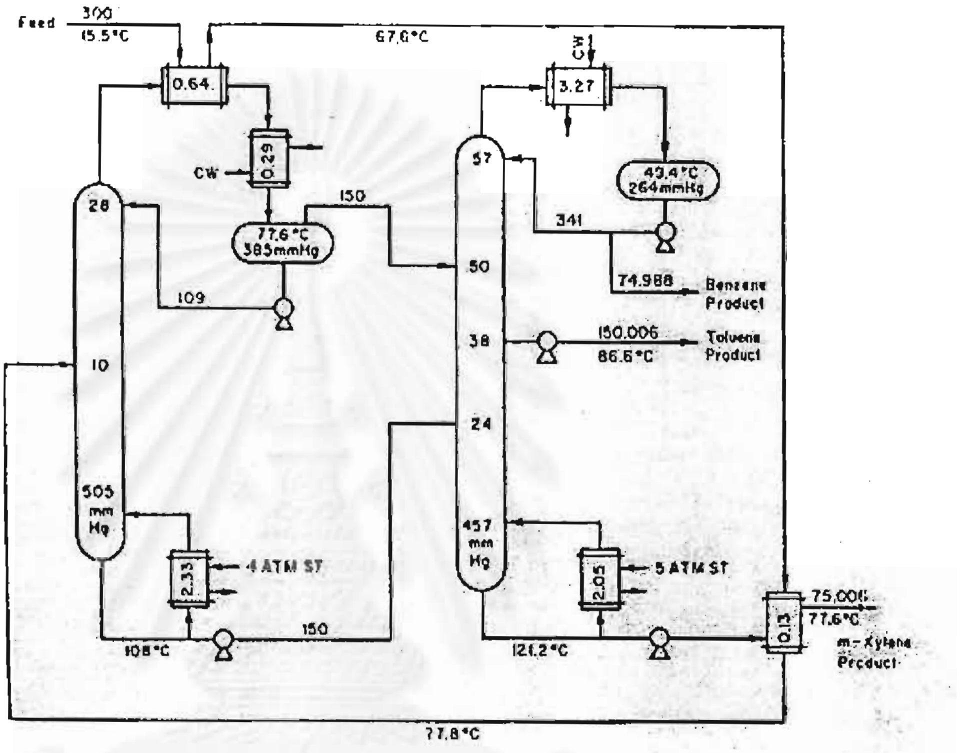
3.2 Vacuum Operation System สารป้อนถูก Pre-heat ที่เครื่องควบแน่นที่คอลัมน์ที่สองก่อนป้อนเข้าคอลัมน์แรก โดยระบบการกลั่นกระทำที่สูญญากาศอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ยอดหอประมาณ 50 องศาเซลเซียส แต่ใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนใหญ่กว่าระบบที่ความดันบรรยากาศ แสดงดังรูปที่ 2.3 พลังงานที่ใช้ทั้งหมดพลังงานที่ใช้ทั้งหมดของเครื่องต้มซ้ำ 4.80 x 10^6 kcal/hr ข้อดีของระบบนี้ คือใช้พลังงานน้อยกว่าและประหยัดเชื้อเพลิงในการป้อนให้กับเครื่องต้มซ้ำ



รูปที่ 2.3 แผนภาพกระบวนการแยกสารอะโรมาติกส์ Vacuum Operation System (Cheng and W.L. Luyben, 1985)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3 Prefractionation System สำหรับระบบนี้ปฏิบัติการภายใต้สูญญากาศใช้คอลัมน์ที่หนึ่งเป็นคอลัมน์สำหรับแยกเบื้องต้นก่อน ผลิตภัณฑ์ยอดหอและก้นหอจะถูกป้อนเข้าไปยังคอลัมน์ที่สอง เบนซีนที่ได้ออกทางยอดคอลัมน์และได้โทลูอีนออกมาทางกระแสด้านข้างซึ่งระบบนี้จะใช้พลังงานน้อยกว่า Vacuum Operation System คือ 4.38 x 10^6 kcal/hr แสดงดังรูปที่ 2.4

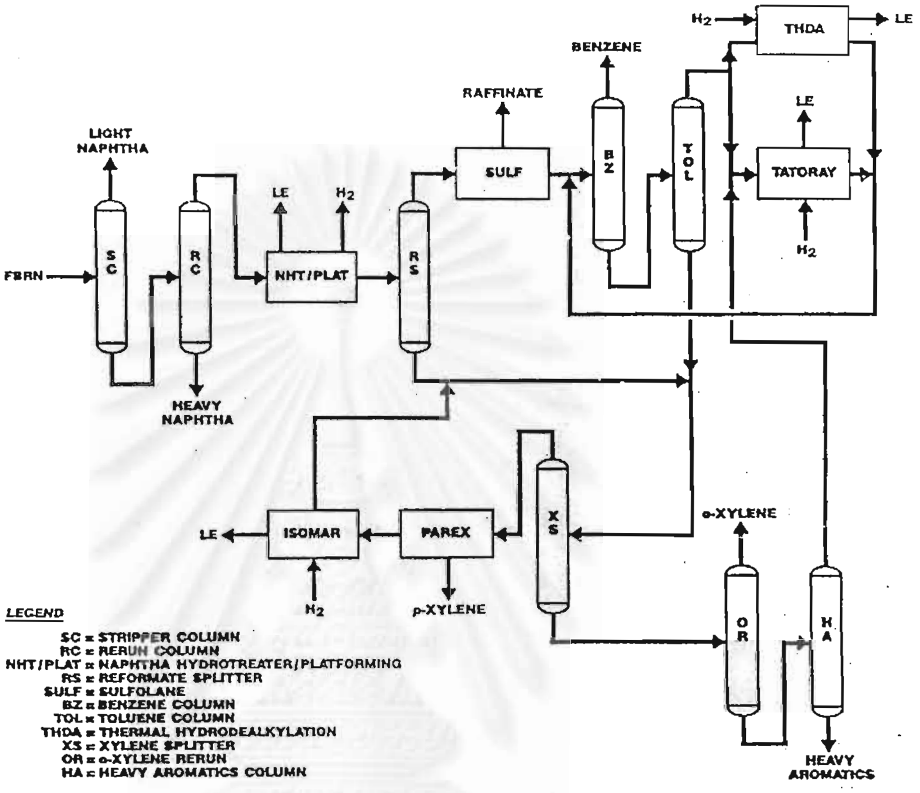


รูปที่ 2.4 แผนภาพกระบวนการแยกสารอะโรมาติกส์ Prefractionation System (Cheng and W.L. Luyben, 1985)

4. กระบวนการผลิตสารอะโรมาติกส์ในระดับอุตสาหกรรม

กระบวนการแยกสารอะโรมาติกส์ออกจากสารผสมไฮโดรคาร์บอนที่มีใช้ในอุตสาหกรรมปัจจุบันประกอบไปด้วยกระบวนการสกัดและกลั่นควบคู่กันไปได้รับการพัฒนาโดย UOP Process Div. Of UOP Inc. เป็นกระบวนการเชิงพาณิชย์กระบวนการแรกที่แยกสารอะโรมาติกส์และกระบวนการนี้ได้รับการพัฒนาเป็นลำดับ (E.C. Haun, M.W. Golem, P.P. Piotrowski and S. Sapuntzakis, 1988) แผนภาพรวมของกระบวนการแยกสารอะโรมาติกส์แสดงดังรูปที่ 2.5 ประกอบด้วยหลายหน่วยปฏิบัติการดังนี้

4.1 Naphtha Fractionation เป็นหน่วยที่แยกแนพทาเบา (C_6^-) และแนพทาหนัก (C_9^+) ออกจากสารป้อนซึ่งจะได้สารป้อนที่เหมาะสมที่มีปริมาณของสารอะโรมาติกส์สูง (C_6-C_8) จากนั้นสารป้อนที่ได้ก็ถูกส่งต่อไปยังหน่วยแพลทฟอร์มมิง



รูปที่ 2.5 แผนภาพกระบวนกระแยกสารอะโรมาติกส์ในระดับอุตสาหกรรมของ UOP (E.C. Haun, 1988)

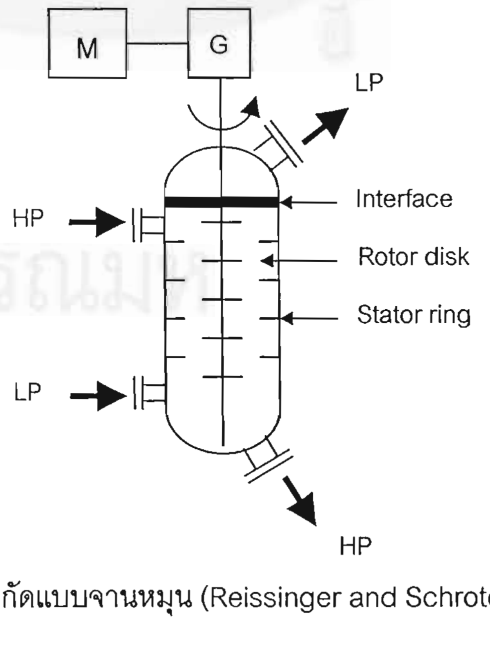
4.2 NHT/Platforming เป็นหน่วยแพลทฟอร์มิงที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลททินัมเปลี่ยนพาราฟินส์และแนพทีนซึ่งอยู่ในแนฟทีนให้เป็นสารอะโรมาติกส์

4.3 Sulfolane Unit เป็นหน่วยที่ใช้ตัวทำละลายซัลโฟเลนในกระบวนการแยกสกัดของเหลว-ของเหลว (liquid-liquid extraction) สำหรับแยกสารอะโรมาติกส์และสารนอน-อะโรมาติกส์ออกจากกันโดยสารนอน-อะโรมาติกส์จะถูกแยกออกมาในรูปของราฟฟิเนต เพราะกระบวนการกลั่นจะแยกสารทั้งสองชนิดออกจากกันได้ยากในกรณีที่สารทั้งสองชนิดมีจุดเดือดใกล้เคียงกัน แต่กระบวนการแยกสกัดของเหลว-ของเหลวทำโดยอาศัยความแตกต่างของค่า solubility และค่า selectivity ของตัวทำละลายที่มีต่อสารไฮโดรคาร์บอนชนิดต่างๆ เป็นหน่วยที่เพิ่มความบริสุทธิ์ของเบนซีน พารา-ไซลีน และออร์โท-ไซลีน

4.4 Aromatics Fractionation Unit ประกอบไปด้วยหลายหน่วยปฏิบัติการสำหรับผลิตเบนซีน พารา-ไซลีน และออร์โท-ไซลีน โดยใช้หน่วยปฏิบัติการหอกลั่น หน่วยคะตะลิส และความร้อนในการที่จะเพิ่มคุณภาพและความบริสุทธิ์ของสารอะโรมาติกส์

เครื่องสกัดแบบจานหมุน (Rotating Disk Contactor, RDC)

เครื่องสกัดแบบจานหมุน แสดงดังรูปที่ 2.6 พัฒนาโดย Reman ในปี ค.ศ. 1951 มีลักษณะเป็นคอลัมน์ สารป้อนและตัวทำละลายไหลแบบสวนทางกันในคอลัมน์โดยวัฏภาคหนัก (heavy phase) มีความหนาแน่นมากจะป้อนเข้าทางด้านบนของคอลัมน์ ส่วนวัฏภาคเบา (light phase) ป้อนเข้าทางด้านล่าง ภายในคอลัมน์ประกอบด้วยวงแหวนสถิต (stator ring) ติดอยู่กับผนังของคอลัมน์เป็นระยะๆ ตลอดคอลัมน์เพื่อแยกคอลัมน์ออกเป็นส่วนๆ ในแต่ละส่วนเรียกว่าคอมพาร์ตเมนต์ (compartment) แต่ละคอมพาร์ตเมนต์มีจานหมุน (rotor disk) อยู่ตรงกลางซึ่งติดอยู่กับแกนยาวที่หมุนด้วยมอเตอร์ การหมุนของจานหมุนเป็นการเพิ่มความปั่นป่วนระหว่างสารป้อนกับตัวทำละลายทำให้มีการถ่ายโอนมวลสารดีขึ้น โดยทำให้ของเหลวชนิดหนึ่งกระจายเป็นหยดเล็กๆ เรียกว่า วัฏภาคกระจาย (dispersed phase) เคลื่อนที่อยู่ในของเหลวอีกชนิดหนึ่งที่ไม่กระจายตัวเรียกว่า วัฏภาคต่อเนื่อง (continuous phase) ได้อย่างสะดวกถ้าปราศจากการหมุนของจานหมุนหยดของเหลวจะถูกกักให้ค้างอยู่ในคอมพาร์ตเมนต์ได้การหมุนของจานหมุนทำให้หยดของเหลวถูกเฉือนเป็นหยดเล็กลง (rupture) ส่งผลให้มีพื้นที่ในการถ่ายโอนมวลสารระหว่างวัฏภาคสูงขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อหยดของเหลวแต่ละหยดเข้าใกล้กันก็สามารถรวมตัวกันเป็นหยดใหญ่ขึ้น (coalescence) ทำให้พื้นที่ในการถ่ายโอนมวลสารลดลง



รูปที่ 2.6 เครื่องสกัดแบบจานหมุน (Reissinger and Schroter, 1993)

เครื่องสกัดแบบจานหมุนสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องและมีความยืดหยุ่นในขนาดการทำงานและการควบคุม สามารถปรับความเร็วของจานหมุนเพื่อให้ได้การกระจายตามต้องการ เครื่องสกัดแบบจานหมุนมีการใช้กันอย่างกว้างขวางโดยเฉพาะในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี เช่น ในกระบวนการสกัดน้ำมันหล่อลื่นด้วยฟิวเฟอรอล (furfural), กระบวนการสกัดแยกสารอะโรมาติกส์, กระบวนการทำให้คาโปรแลกทัมบริสุทธิ์

การกลั่นลำดับส่วน

การกลั่น คือวิธีการแยกของผสมในสภาพที่เป็นสารละลายออกจากกันกระบวนการกลั่นเกิดขึ้นได้ เพราะองค์ประกอบมีการระเหยไม่เท่ากันซึ่งอาจดูได้จากค่าของจุดเดือด หรือความดันไอของสารนั้นๆ ในภาวะสมดุลหนึ่งๆ ส่วนที่เป็นไอจะมีสัดส่วนขององค์ประกอบที่ระเหยง่าย(หรือสารเบา) มากกว่าในส่วนที่เป็นของเหลว ดังนั้นเมื่อนำไอนี้มาทำให้เป็นของเหลวก็จะได้ของเหลวที่มีสารเบาเข้มข้นขึ้น ถ้าเอาส่วนที่ได้นี้มาทำซ้ำๆ กันอีกเช่นนี้จะได้ของเหลวที่มีสารเบาเข้มข้นขึ้นทุกทีอันเป็นหลักการที่ใช้กันอยู่ในหอกลั่น การแยกเอาไอกับของเหลวออกจากกันครั้งหนึ่งๆ ก็เรียกว่าชั้น (stage) หนึ่ง หอกลั่นจะประกอบด้วยชั้น (trays หรือ plates) ซึ่งไอระเหยผ่านขึ้นไปในขณะที่ของเหลวไหลผ่านลงมา ไอและของเหลวก็จะสัมผัสกันอย่างดีบนชั้นนั้นจนถึงสมดุลก่อนจะแยกออกจากกันจัดเป็นชั้นหนึ่ง ไอจะเกิดการถ่ายโอนความร้อนและมวลสารกับของเหลวทำให้สารเบาบริสุทธิ์ขึ้นเรื่อยๆ จนได้ความบริสุทธิ์ตามต้องการเมื่อไอออกจากยอดหอกลั่นก็ถูกทำให้เย็นลงเป็นของเหลวด้วยเครื่องควบแน่น ส่วนหนึ่งของของเหลวที่ได้นี้จะถูกส่งกลับเข้ามาที่ยอดหอกลั่นใหม่ วิธีนี้จะทำให้สารที่กลั่นได้จากทางยอดหอมีความบริสุทธิ์เพิ่มขึ้นอย่างมาก ของเหลวที่ส่งคืนกลับมาทางยอดหอกลั่นนี้เรียกว่า ของเหลวป้อนย้อนกลับ (reflux) ในระหว่างที่ไอเกิดการถ่ายโอนความร้อนและมวลสารกับของเหลวทำให้สารเบาบริสุทธิ์ขึ้นนั้นของเหลวที่ไหลลงไปจากชั้นก็จะมีสารเบาเหลืออยู่น้อยลงและมีสารหนักเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกว่าจะไหลออกจากก้นหอกลั่นไปในทำนองเดียวกับด้านบนเพื่อให้ความบริสุทธิ์ของสารหนักเพิ่มขึ้นของเหลวที่ออกจากก้นหอกลั่น จะถูกทำให้เป็นไอส่วนหนึ่งในเครื่องต้มซ้ำ (reboiler) แล้วส่งไอที่ได้คืนเข้ามาทางก้นหอกลั่นนั้น ไอที่เข้ามานี้จะช่วยไล่สารเบาๆ ที่ติดอยู่กับของเหลวให้กลับขึ้นไปในหอกลั่นใหม่ทำให้ของเหลวที่แยกออกจากก้นหอมีความบริสุทธิ์เพิ่มขึ้น ส่วนของหอกลั่นที่อยู่เหนือจุดที่สารป้อนเรียกว่าส่วน เรคติไฟอิง (rectifying section) ส่วนที่อยู่ใต้จุดนี้ลงไปจนถึงก้นหอกลั่นเรียกว่า ส่วนสตริพพิง (stripping section) หอกลั่นที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีหลายแบบอาทิ เช่น บับเบิลแคปเทรย์ (bubble cab tray) วาล์วเทรย์ (valve tray) หรือซีฟเทรย์ (sieve tray) มีการนำไปใช้งานที่แตกต่างกัน หอกลั่นแบบเบดบรรจุเป็นหอกลั่นอีกชนิดหนึ่งที่มีการนำไปใช้งานกันมากเพราะว่าสร้างง่าย ราคาถูก กว่าหอกลั่นชนิดอื่น เบดบรรจุที่ใช้มีด้วยกันหลายชนิดเช่น pall ring, berl saddles และ

raschig ring เป็นต้น เบดบรรจุส่วนใหญ่ที่กล่าวมาข้างต้นทำจากวัสดุหลายชนิด เช่น เซรามิก โลหะ แก้ว คาร์บอน และยาง เป็นต้น

หลักการออกแบบหอกลั่นแบบเบดบรรจุ

หอกลั่นแบบเบดบรรจุจะเหมาะสมกับคอลัมน์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อย (ไม่เกิน 2 ฟุต) เพราะจะประหยัดค่าใช้จ่ายกว่าหอกลั่นแบบเทรย์หรือเพลต ขณะเดียวกันถ้าคอลัมน์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ควรเลือกใช้หอกลั่นแบบเทรย์หรือเพลต เพราะจะเสียค่าใช้จ่ายน้อยกว่าแบบเบดบรรจุ อีกทั้งการใช้เบดบรรจุกับคอลัมน์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่จะทำให้ของเหลวมีแนวโน้มที่จะเกิดปรากฏการณ์ การเกิดช่องกลวง (channelling) คือ ถ้าอัตราการไหลของไอน้อยเกินไปจะเกิดปรากฏการณ์ไอ-ของเหลวสัมผัสกันไม่เต็มที่ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการถ่ายโอนมวลสารลดลง

ตารางที่ 2.5 ข้อเปรียบเทียบระหว่างหอกลั่นแบบเบดบรรจุกับหอกลั่นแบบเทรย์หรือเพลต

หอกลั่นแบบเทรย์หรือเพลต		หอกลั่นแบบเบดบรรจุ	
ข้อดี	ข้อเสีย	ข้อดี	ข้อเสีย
1.พิกัดของการปฏิบัติงานกว้าง 2.สามารถสร้างคอลัมน์ให้มีขนาดใหญ่ได้ สามารถที่จะป้อนสารป้อนในปริมาณที่มากๆ ได้	1.ความดันลดมีค่ามาก 2.โครงสร้างภายในซับซ้อน	1.ความดันลดมีค่าน้อย 2.โครงสร้างภายในไม่ซับซ้อน, สร้างง่าย, ราคาถูก	1.พิกัดของการปฏิบัติงานแคบ 2.ต้องติดตั้งแผ่นกระจายของเหลว เพื่อมิให้ของเหลวไหลมารวมกัน 3.ไม่เหมาะที่จะใช้กับคอลัมน์ที่มีขนาดใหญ่

ชนิดและความสำคัญของเบดบรรจุ

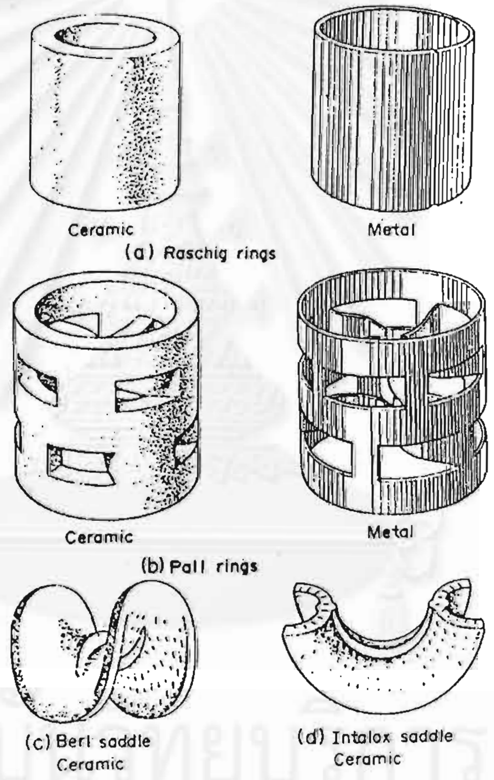
เบดบรรจุที่ดีควรมีลักษณะดังนี้

1. ควรให้พื้นที่ที่เปียกของของเหลวต่อปริมาตรของหอมีค่ามาก เพื่อเพิ่มพื้นที่ในการถ่ายโอนมวลสารสำหรับไอ-ของเหลวที่จะสัมผัสกันมากขึ้น
2. ควรมีปริมาณของช่องว่าง (void volume) มากทั้งนี้เพื่อให้วัฏภาคไอและวัฏภาคของเหลวไหลผ่านโดยสะดวกไม่เกิดความดันลดมากเกินไป
3. ควรมีลักษณะที่เปียกของเหลวและเกิดเป็นฟิล์มบางๆ ได้ดี
4. ควรมีความหนาแน่นต่ำ เพราะว่าคอลัมน์ที่มีขนาดใหญ่จำนวนและน้ำหนักของเบดบรรจุจะมากซึ่งมีผลเกี่ยวกับการค้ำจุนเบดบรรจุให้อยู่ภายในคอลัมน์ได้

5. ควรมีราคาไม่แพงนัก

จากลักษณะต่างๆ ที่เหมาะสมของเบดบรรจุจะพบว่าในปัจจุบันมีผู้ออกแบบเบดบรรจุให้มีแบบและรูปร่างต่างๆ กันเป็นจำนวนมากโดยทั่วไปมักแบ่งเบดบรรจุเป็นสองประเภท คือ เบดบรรจุแบบสะแตค (stacked packings) และเบดบรรจุแบบแรนดอม (random packing)

เบดบรรจุแบบสะแตคตัวอย่างเช่น กริด (grids) จะมีโครงสร้างใช้กับอัตราการไหลของแก๊สที่สูงได้โดยมีความดันลดไม่มากนัก ตัวอย่างเช่น ในหอทำความเย็น (cooling towers) ส่วนเบดบรรจุแบบแรนดอมใช้กันอย่างกว้างขวางในกระบวนการอุตสาหกรรมชนิดหลักๆ เบดบรรจุแบบแรนดอมแสดงดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงเบดบรรจุแบบแรนดอมชนิดต่างๆ (ปิยะสาร, 2530)

เบดบรรจุแบบ ราสจิกริง (raschig ring) แสดงดังรูปที่ 2.7 (a) เป็นแบบที่ใช้ในอุตสาหกรรมเก่าแก่แบบหนึ่งของแบบเบดบรรจุและขณะนี้ก็คงใช้อยู่ทั่วไป แพลริง (pall ring) ดังแสดงในรูป 2.7 (b) เป็น ราสจิกริงพิเศษซึ่งรูเปิดทำโดยการพับพื้นผิวบนวงแหวน จะเพิ่มพื้นที่ผิวในการถ่ายโอนมวลสารและปรับปรุงลักษณะการกระจายของของเหลว แบร์ลสาดเดอร์ (berl saddles) แสดงดังรูปที่ 2.7 (c) พัฒนามาเพื่อให้มีการกระจายของของเหลวดีกว่าราสจิกริง อินทาลอคสาดเดอร์ (intalox saddles) แสดงดังรูปที่ 2.7 (d) เป็นแบบที่ปรับปรุงมาจากแบบ แบร์ลสาดเดอร์ เบดบรรจุส่วนใหญ่ที่กล่าวมาข้างต้นสามารถทำจากวัสดุได้หลายชนิด ตัวอย่างเช่น เซรามิก เหล็กกล้าไร้สนิม แก้ว พลาสติก คาร์บอน และยาง เป็นต้น บางครั้งเบดบรรจุที่เป็นเหล็กกล้าไร้สนิมจะทนต่อการกัดกร่อนได้ดีแต่จะมีน้ำหนักมาก ดังนั้นต้องใช้ที่รองรับและฐานรากที่แข็งแรงพลาสติกบางอย่างไม่เหมาะสมในการนำมาทำเป็นเบดบรรจุ เพราะมีพื้นผิวเป็นมันไม่เปียกของเหลวทำให้ของเหลวกระจายไม่สม่ำเสมอตามภาคตัดขวางของคอลัมน์และการต้านทานการไหลของของเหลวจะเกิดขึ้นน้อย ถ้าใช้เบดบรรจุที่มีรูปร่างแน่นอนจะให้พื้นผิวต่อปริมาตรมากกว่าชนิดอื่น เพราะว่าช่องว่าง (voidage) ของการสัมผัสจะลดลง การไหลของชั้นบางๆ บนผิวของเบดบรรจุที่มีรูปร่างแน่นอนจะดีกว่าแรนดอมเบดบรรจุและของเหลวจะมีโอกาสไหลไปสู่ผนังน้อยกว่าแบบแรนดอมเบดบรรจุในทางตรงข้ามเบดบรรจุที่มีรูปร่างแน่นอนจะแพงกว่า

ขนาดของเบดบรรจุที่ใช้มีผลต่อความสูง เส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์ ความดันลด และราคา โดยทั่วไปเมื่อขนาดของเบดบรรจุเพิ่มขึ้นราคาต่อหน่วยปริมาตรของเบดบรรจุ และความดันลดต่อหน่วยความสูงของเบดบรรจุจะลดลงและประสิทธิภาพการถ่ายโอนมวลสารก็ลดลงด้วยเมื่อประสิทธิภาพของการถ่ายโอนมวลสารลดลงคอลัมน์ก็จำเป็นต้องสูงขึ้น โดยปกติขนาดของเบดบรรจุไม่ควรเกิน 1/8 เท่าของขนาดของคอลัมน์ถ้ามีขนาดใหญ่กว่านี้การกระจายของเหลวและประสิทธิภาพการถ่ายโอนมวลสารจะลดลงอย่างรวดเร็วขณะที่ประสิทธิภาพตกลงเรื่อยๆ ดังนั้นจึงไม่มีข้อดีสำหรับการใช้เบดบรรจุขนาดเกิน 50 มิลลิเมตร สำหรับคอลัมน์ที่บรรจุแบบแรนดอม

ช่วงของขนาดเบดบรรจุที่ควรใช้ คือ

ขนาดของคอลัมน์	เบดบรรจุขนาด
น้อยกว่า 0.3 ม. (1ฟุต)	น้อยกว่า 25 มม. (1 นิ้ว)
0.3 ถึง 0.9 ม. (1 ถึง 3 ฟุต)	25 ถึง 38 มม. (1 ถึง 1.5 นิ้ว)
มากกว่า 0.9 ม.	50 ถึง 75 มม. (2 ถึง 3 นิ้ว)

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเป็นอุปกรณ์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่างๆ หน้าที่หลักของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนคือ การให้ความร้อนแก่ของไหลประเภทหนึ่งในขณะเดียวกันก็ดึงเอาความร้อนออกจากของไหลประเภทที่สอง ดังนั้นการใช้งานอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจึงมีเป็นจำนวนมาก ขึ้นกับรูปแบบและโครงสร้างของอุปกรณ์ที่ได้รับการออกแบบให้เหมาะสมกับลักษณะการใช้งาน เนื่องจากหน้าที่สำคัญของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนคือ การใช้ประโยชน์พลังงานความร้อนอย่างถูกหลักการจึงจำเป็นที่จะต้องมีการกำหนดรูปร่างในการออกแบบเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการผลิต

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อ

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้กันอย่างกว้างขวางที่สุดในกระบวนการอุตสาหกรรมปิโตรเคมี เพราะไม่ถูกจำกัดโดยอุณหภูมิและความดันที่จำต้องใช้ในอุตสาหกรรมและสามารถใช้กับงานทุกชนิดตั้งแต่การระเหย การเพิ่มความร้อน การระบายความร้อนจนกระทั่งการควบแน่นยิ่งกว่านั้นยังมีสมบัติโดยเฉลี่ยดีเยี่ยมในแง่การผลิตการบำรุงรักษาและราคา

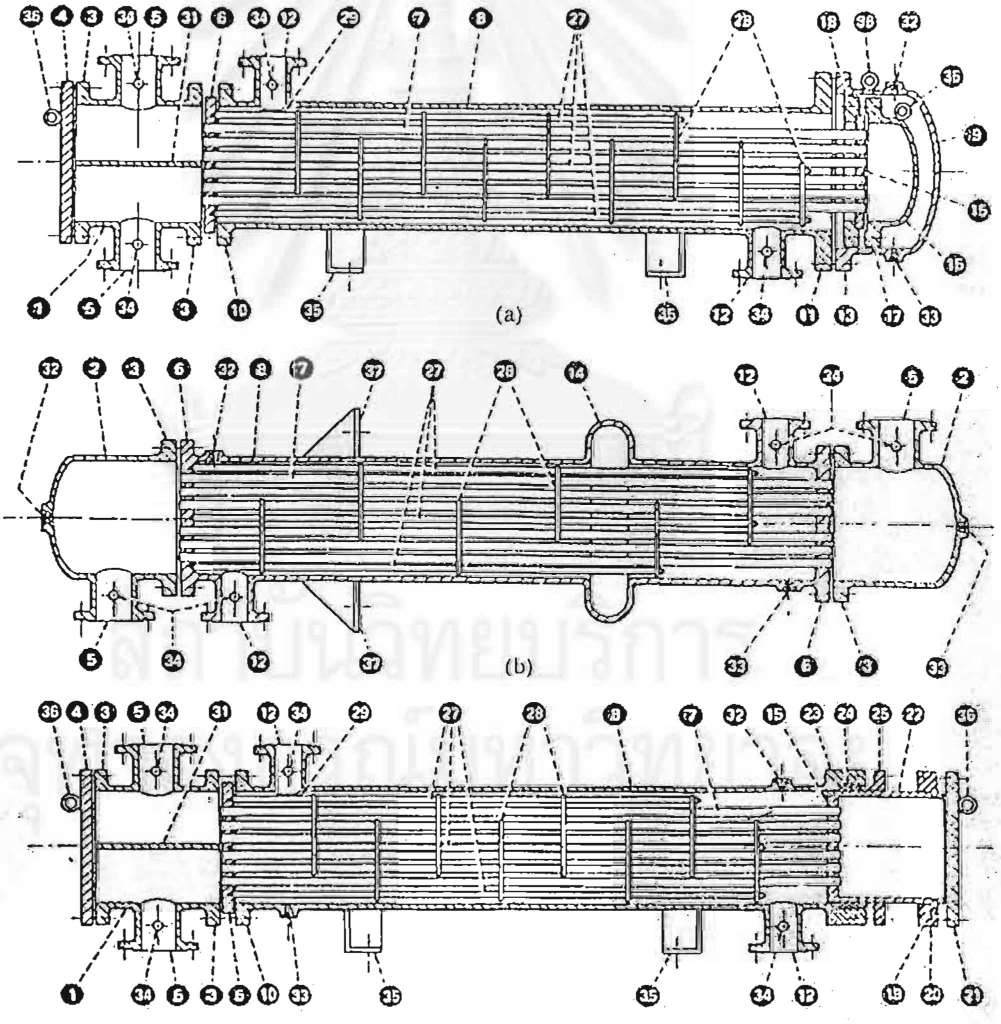
ชื่อเรียกส่วนประกอบของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อ

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อที่มีชื่อเรียกเช่นนี้ เพราะว่ามีท่อถ่ายโอนความร้อนจำนวนมากติดตั้งไว้ภายในเชลล์ (shell = เปลือก, ปลอก) ของเครื่อง ของไหลในท่อและของไหลด้านเชลล์จะทำการแลกเปลี่ยนความร้อนผ่านผนังท่อซึ่งกั้นระหว่างของไหลทั้งสองประเภทแสดงดังรูปที่ 2.8 แสดงโครงสร้างและชื่อเรียกส่วนประกอบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อประเภทต่างๆ ตัวอย่างกรณีรูป 2.8 (a) ของไหลด้านเชลล์จะถูกปิดกั้นจากบรรยากาศโดยตัวเชลล์และฝาปิดตัวเชลล์ ของไหลด้านเชลล์นี้จะถูกนำให้ไหลจากปากทางเข้าไปยังปากทางออกโดยแผ่นกั้น (baffle) และทำการแลกเปลี่ยนความร้อนกับของไหลในท่อโดยการสัมผัสกับท่อถ่ายโอนความร้อน ในระหว่างนั้นแผ่นกั้นการปะทะ (impingement baffle) จำเป็นต้องมีเพราะถ้าความเร็วที่ทางเข้าของของไหลด้านเชลล์มีค่าสูง เกรงว่าอาจก่อความเสียหายให้กับท่อถ่ายโอนความร้อนได้ ท่อถ่ายโอนความร้อนจะถูกยึดไว้ระหว่างแผ่นยึดท่อที่อยู่กับที่ (stationary tube sheet) ซึ่งจับแน่นกับตัวเชลล์กับแผ่นยึดท่อลอย (floating tube sheet) ของไหลในท่อจะไหลเข้าทางพวยของแชนเนล (channel nozzle) ในที่นี้ของไหลจะพบกับแผ่นแบ่งเที่ยวการไหล (pass partition) ซึ่งติดตั้งไว้สำหรับควบคุมจำนวนเที่ยวการไหลของของไหลในท่อแล้วไหลผ่านท่อถ่ายโอนความร้อนไปออกที่หัวลอย (floating head) จากนั้นของไหลในท่อจะกลับทิศและไหลกลับไป

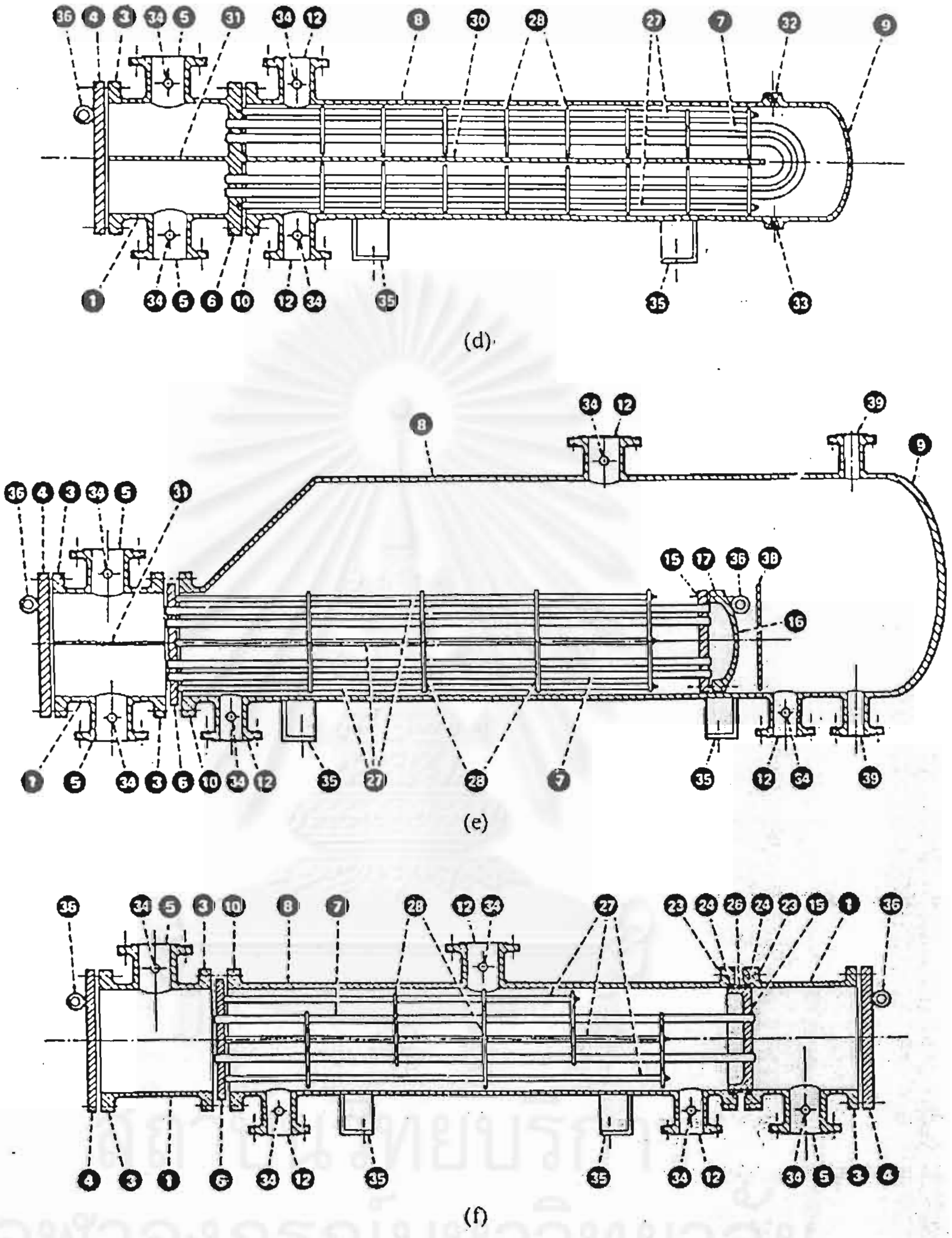
ยังแชนเนล (channel) หลังจากวิ่งไปกลับภายในท่อถ่ายโอนความร้อนจนได้จำนวนเที่ยวตามที่ต้องการของไหลจะไหลออกจากพวยทางออกของแชนเนล

1. Stationary head-channel
2. Stationary head-bonnet
3. Stationary head flange-channel or bonnet
4. Channel cover
5. Channel head nozzle
6. Stationary tubesheet
7. Tubes
8. Shell
9. Shell cover
10. Shell flange-stationary head end
11. Shell flange-rear head end
12. Shell nozzle
13. Shell cover flange
14. Expansion joint
15. Floating tubesheet
16. Floating head cover
17. Floating head flange
18. Floating head backing device
19. Split shear ring
20. Slip-on backing flange
21. Floating-head cover-external
22. Floating-tubesheet skirt
23. Packing-box flange
24. Packing
25. Packing follower ring
26. Lantern ring
27. Tie rods and spacers
28. Transverse baffles or support plates
29. Impingement baffle
30. Longitudinal baffle
31. Pass partition
32. Vent connection
33. Drain connection
34. Instrument connection
35. Support saddle
36. Lifting lug
37. Support bracket
38. Weir
39. Liquid level connection

(a) (b) (c) (d) (f)



(c)



รูปที่ 2.8 โครงสร้างและชื่อเรียกส่วนประกอบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อ

(Ernest E. Ludwig, 1983)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การแบ่งประเภทเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อ

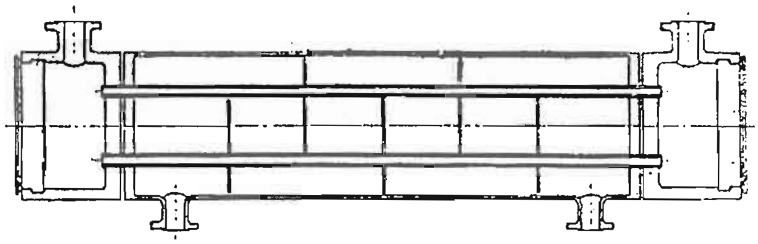
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อแบ่งออกได้เป็น 2 จำพวกใหญ่ๆ คือ จำพวกท่อในแนวระดับและจำพวกท่อในแนวดิ่ง เครื่องจำพวกท่อในแนวระดับเป็นแบบธรรมดาที่สุด ในกรณีที่บริเวณติดตั้งมีจำกัดหรือในกรณีที่ระบบท่อหรือมาตรการติดตั้งบีบบังคับให้ท่อถ่ายโอนความร้อนตั้งอยู่ในแนวดิ่งเท่านั้นจึงจะใช้เครื่องจำพวกท่อในแนวดิ่ง เนื่องจากค่าความดันลดของเครื่องจำพวกท่อในแนวดิ่งที่ของไหลไหลผ่านเพียงเที่ยวเดียว (single phase) มีน้อย เครื่องจำพวกนี้จึงเหมาะสำหรับใช้เป็นเครื่องระเหย (evaporator) เครื่องควบแน่น (condenser) และเครื่องต้มซ้ำแบบกาลักน้ำเชิงความร้อน (thermosyphon type reboiler) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อยังแบ่งตามโครงสร้างออกได้เป็นชนิดใหญ่ๆ 3 ชนิด คือ ชนิดแผ่นยึดท่ออยู่กับที่ ชนิดท่อรูปตัวยู และชนิดหัวลอย

ชนิดแผ่นยึดท่ออยู่กับที่ (Stationary Tube Sheet Exchanger)

โครงสร้างชนิดนี้เป็นแบบที่แผ่นยึดท่อที่ปลายสองข้างถูกยึดติดแน่นกับเชลล์โดยวิธีเชื่อมโลหะหรืออื่นๆ ท่อถ่ายโอนความร้อนถูกยึดติดกับแผ่นยึดท่อ (tube sheet) ด้วยวิธีขยายตัว (expanding) เชื่อมโลหะ (welding) หรืออื่นๆ แสดงดังรูปที่ 2.8 (b)

เนื่องจากท่อถ่ายโอนความร้อนยึดติดกับแผ่นยึด ในกรณีที่อุณหภูมิโลหะของเชลล์และของท่อถ่ายโอนความร้อนแตกต่างกันมาก จะเกิดความเค้นเชิงความร้อน (thermal stress) ขึ้นสูง เพราะอัตราการขยายตัวของเชลล์และท่อไม่เท่ากัน ในกรณีที่ความเค้นเชิงความร้อนนี้ขึ้นสูงเกินไป มีความจำเป็นที่จะต้องติดตั้งข้อต่อยืดหดได้ (expansion joint) บรรเทาความเค้นเชิงความร้อน โดยทั่วไปแล้ว ควรจะพิจารณาถึงความเค้นเชิงความร้อนถ้าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของโลหะมีมากกว่า 30 K เนื่องจากโครงสร้างของเครื่องไม่อำนวยต่อการทำความสะอาดหรือตรวจตราพื้นผิวนอกของท่อถ่ายโอนความร้อนและพื้นผิวในของเชลล์ ต้องเลือกของไหลในเชลล์ให้เป็นของไหลที่มีฤทธิ์กัดกร่อนน้อย สกปรกน้อย และไม่มีตะกอนปนอยู่ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดแผ่นยึดท่ออยู่กับที่นี้มีโครงสร้างที่ง่ายกว่าชนิดหัวลอย น้ำหนักเบาและราคาก็ถูกกว่ายิ่งกว่านั้น จำนวนท่อถ่ายโอนความร้อนที่ใส่ในเชลล์ก็มากกว่าถ้าเส้นผ่านศูนย์กลางของเชลล์เท่ากัน

ในกรณีที่อาจมีอันตรายจากการระเบิดหรืออุบัติเหตุอื่นๆ ถ้าของเหลวในเชลล์และของเหลวในท่อรั่วออกจากบริเวณรูยึดตัวท่อมาปนกันหรือในกรณีที่ความบริสุทธิ์ของของไหลที่ความสำคัญเป็นพิเศษ ควรเพิ่มแผ่นยึดท่อ (tube sheet) เป็น 2 ชั้น แสดงดังรูปที่ 2.9 เครื่องชนิดนี้มีชื่อเรียกว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดแผ่นยึดท่อ 2 ชั้น (double-tube-sheet exchanger) เมื่อเกิดการรั่วไหลที่บริเวณรูยึดตัวท่อ ของไหลที่รั่วจะไหลออกตามช่องว่างระหว่างแผ่นยึดท่อทั้งสอง ทำให้สามารถตรวจพบได้อย่างรวดเร็วและไม่เกิดการผสมกับของไหลในเชลล์



รูปที่ 2.9 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดแผ่นยึดท่อสองชั้น (วิวัฒน์ , 2536)

ชนิดท่อรูปตัวยู (U-Tube Exchanger)

โครงสร้างของเครื่องชนิดนี้ประกอบด้วยท่อถ่ายโอนความร้อนที่ถูกดัดให้เป็นรูปตัว U เพื่อยึดปลายท่อทั้งสองข้าง อยู่บนแผ่นยึดท่อแผ่นเดียวกันผลก็คือ ท่อถ่ายโอนความร้อนสามารถขยายตัวได้อย่างมีอิสรภาพจากเชลล์เมื่อถูกความร้อนแสดงดังรูปที่ 2.8 (d) โครงสร้างของเครื่องชนิดนี้เป็นแบบง่ายๆ เพราะมีแต่แผ่นยึดท่อแบบอยู่กับที่เท่านั้นและไม่มีแผ่นยึดท่อแบบลอยหรือหัวลอย อีกทั้งหน้าแปลน (flange) ที่ฝาเชลล์ก็สามารถตัดทิ้งได้ ดังนั้นจึงสามารถสร้างได้น้ำหนักเบา เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดนี้เหมาะสำหรับของไหลในท่อที่มีความดันสูงและปริมาณการถ่ายโอนความร้อนน้อย เนื่องจากความลำบากในการทำความสะอาดภายในท่อด้วยเครื่องมือทำความสะอาดควรเลือกใช้เฉพาะของไหลในท่อที่มีสิ่งสกปรกน้อย โดยปกติรัศมีที่สั้นที่สุดของส่วนโค้งของท่อตัว U ควรมากกว่า 1.5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อวิธีวางเรียงท่อส่วนใหญ่วางเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า (triangular pitch) ข้อเสียของเครื่องชนิดนี้คือต้องใช้ความระมัดระวังในการสร้างเพราะรัศมีส่วนโค้งของท่อแต่ละแถบยาวไม่เท่ากันและไม่สามารถถอดเอาเฉพาะท่อที่อยู่บริเวณใจกลางออกมาเพื่อซ่อมแซม ในกรณีที่มีความจำเป็นสามารถที่จะดึงเอามัดท่อออกจากตัวเชลล์เพื่อทำความสะอาดพื้นผิวในของเชลล์และพื้นผิวนอกของท่อถ่ายโอนความร้อนได้

ชนิดหัวลอย (Floating-Head Exchanger)

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดนี้ประกอบด้วยแผ่นยึดท่อที่ตรึงติดกับเชลล์ด้วยโบลท์ (bolt) ที่ปลายด้านหนึ่งและหัวลอยซึ่งเคลื่อนที่ได้ตามการขยายตัวเนื่องจากความร้อนที่ปลายอีกด้านหนึ่ง โครงสร้างของหัวลอยแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ แบบมีสิ่งหนุนหลัง (floating head with backing device), แบบมีของอุด (packed floating head) และแบบดึงออกได้ตลอด (pull-through floating head) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบหัวลอยนี้ไม่ต้องห่วงเรื่องความแตกต่างในอัตราการขยายตัวของตัวเชลล์และของท่อถ่ายโอนความร้อน อีกทั้งยังสามารถดึงมัดท่อออกมาจากเชลล์ได้เมื่อจำเป็น เนื่องจากท่อที่ใช้เป็นท่อตรงซึ่งมีส่วนสัดและความยาวเท่ากันหมดเครื่อง

แบบนี้จึงดีเลิศในแง่การผลิตการทำความสะอาดและการบำรุงรักษา เช่นการใส่เปลี่ยนหรือหาซื้อท่ออะไหล่ด้วยเหตุที่โครงสร้างค่อนข้างซับซ้อนน้ำหนักของเครื่องและค่าก่อสร้างจึงค่อนข้างสูง แต่ประสิทธิภาพของการแลกเปลี่ยนความร้อนดีเพราะสามารถเลือกจำนวนเที่ยวการไหลในเชลล์และจำนวนเที่ยวการไหลในท่อได้ตามความเหมาะสม ดังนั้นจึงเป็นที่นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมน้ำมัน

1. หัวลอยแบบมีสิ่งหนุนหลัง (Floating head with backing device)

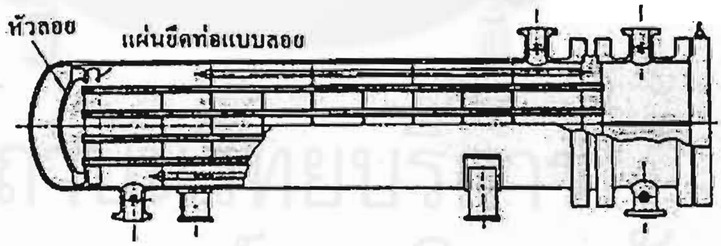
โครงสร้างแบบนี้มีแสดงดังรูปที่ 2.8 (a) หัวลอยแบบนี้เป็นแบบที่ใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุด แต่ควรใช้กับของไหลในท่อที่มีความดันต่ำกว่า 50 bar เท่านั้น เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการรั่วไหลของอากาศที่หัวลอย ทำได้ยากที่ความดันสูงมาก

2.หัวลอยแบบมีของอุด (Packed floating head)

โครงสร้างแบบนี้มีแสดงดังรูปที่ 2.8 (c) ส่วนใหญ่ใช้สำหรับน้ำระบายความร้อนที่มีความดันต่ำกว่า 10 bar ภายในท่อหรือในเชลล์

3. หัวลอยแบบดึงออกได้ตลอด (Pull-through floating head)

แสดงดังรูปที่ 2.10 หัวลอยแบบนี้ถูกตรึงติดกับแผ่นยึดท่อโดยตรงด้วยโบลท์ (bolt) ดังนั้นการติดตั้งหัวลอยจึงสะดวกและง่ายดายแต่มีข้อเสียคือ ช่องห่างระหว่างท่อและเชลล์มีมากทำให้บางครั้งของไหลในเชลล์สามารถไหลโดยไม่เกิดการสัมผัสกับท่อถ่ายโอนความร้อน



รูปที่ 2.10 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนหัวลอยแบบดึงออกได้ตลอด (วิวัฒน์, 2536)

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การเลือกประเภทของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

ในการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสิ่งที่จะต้องตัดสินใจเลือกก่อนสิ่งอื่นใดก็คือการเลือกประเภทของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสม ข้อที่จะต้องคำนึงถึงในการเลือกประเภทของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้แก่ ความเหมาะสมกับงานที่ใช้ ปัญหาของโครงสร้างซึ่งรวมทั้งความแข็งแกร่งของวัสดุเมื่อเกิดการยืดหดตัวเพราะความร้อนและกรรมวิธีผลิต การซ่อมแซมและบำรุงรักษา ราคา ปัญหาของความเหมาะสมกับกระบวนการอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง เป็นต้น

ในอุตสาหกรรมกลั่นน้ำมัน (oil refinery industry) และอุตสาหกรรมปิโตรเคมี (petrochemical industry) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบหัวลอย (floating head) นิยมใช้กันมากที่สุด เพราะมีสมบัติเฉลี่ยดีมากในแง่ต่างๆ แต่มีข้อยกเว้นคือ เครื่องแบบหัวลอยชนิดมีของอุด (packed floating head) ควรใช้สำหรับกรณีที่ความดันต่ำกว่า 10 bar เพื่อป้องกันปัญหาอากาศรั่ว ส่วนเครื่องแบบหัวลอยชนิดมีสิ่งหนุนหลัง (floating head with backing device) ควรใช้สำหรับความดันไม่เกิน 50 bar ในกรณีที่ความดันของของไหลในท่อสูงกว่า 50 bar เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อตัวU (U-Tube Exchanger) หรือเครื่องแบบหัวลอยชนิดแบบดึงออกได้ตลอด (Pull-Through Floating Head) จะเหมาะสมที่สุด

ในกรณีที่จำนวนเที่ยวการไหลในท่อเป็นแบบเที่ยวเดียว (single pass) การไหลจะเป็นแบบไหลสวนทาง (counter flow) อย่างสมบูรณ์ ดังนั้นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อมาตรฐานจึงมีจำนวนเที่ยวการไหลในเชลล์เพียงเที่ยวเดียวแต่จำนวนเที่ยวการไหลในท่อหลายเที่ยว

รูปร่างมาตรฐานของแผ่นกั้นแบบวางตั้ง (transverse baffle) คือ แผ่นกั้นแบบรูปเสี้ยววงกลม (segmental baffle) ซึ่งมีพื้นที่ส่วนเปิด 20-25% ในกรณีที่แก๊สที่ละลายอยู่ในของเหลวในเชลล์เกิดการแยกตัวออกมาหรือในกรณีที่ไอในเชลล์เกิดการควบแน่นควรวางเรียงแผ่นกั้นในลักษณะที่ทำให้การไหลในเชลล์เป็นแบบซ้ายขวาๆ อยู่ในแนวระดับส่วนในกรณีที่เพิ่มความร้อนให้กับของเหลวและแก๊สในขณะเดียวกับที่ผสมไปด้วยควรวางเรียงแผ่นกั้นในลักษณะที่ทำให้การไหลในเชลล์เป็นแบบขึ้นลงๆ

การเลือกเส้นทางการไหลในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อ

ในการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ต้องรู้สมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีของของไหลแต่ละชนิดที่ใช้ส่วนในการเลือกเส้นทางการไหลสิ่งที่จะต้องตรวจสอบและพิจารณาอย่างถี่ถ้วนคืออัตราการไหลและความเร็วของการไหล อุณหภูมิและความดันที่ใช้ ค่าความดันลด ฤทธิ์กัดกร่อนและความสกปรกของของไหล ตลอดจนความหนืดของของไหล

เนื่องจากในปัจจุบันเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อมีใช้กันมาก ในกระบวนการอุตสาหกรรมเคมีหลายแขนง การเลือกเส้นทางการไหลของของไหลเฉพาะชนิด เช่น น้ำระบายความร้อน ไอน้ำให้ความร้อน เป็นต้น จึงสามารถทำกันโดยอาศัยประสบการณ์โดยปรกติน้ำระบายความร้อนจะเลือกให้ไหลในท่อ นอกจากนี้ไอน้ำให้ความร้อนและสารตัวทำความเย็น (refrigerant) มักเลือกให้ไหลในท่อ อย่างไรก็ดีขึ้นกับลักษณะพิเศษของกระบวนการหรือลักษณะงานที่ใช้ โดยทั่วไปแล้วของไหลที่ระเหยหรือเปลี่ยนสถานะเป็นแก๊สและของไหลที่ควบแน่นเป็นของเหลวจะให้ไหลในเชลล์

การตัดสินใจเลือกเส้นทางการไหล อาศัยเงื่อนไขต่างๆเกี่ยวกับของไหลทั้งคู่ที่ใช้ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน แต่อาจเลือกโดยอาศัยประสบการณ์ก็ได้หัวข้อต่อไปนี้อาจใช้เป็นมาตรฐานสำหรับเลือกเส้นทางการไหล

(1) ของไหลที่มีความดันสูงเหมาะสำหรับให้ไหลในท่อ

ถ้าปล่อยให้ของไหลความดันสูงไหลในเชลล์ ความหนาของเชลล์จะต้องใช้เพิ่มขึ้นเพื่อให้ทนทานความดันสูงได้ ผลก็คือ หน้าแปลน (flange) และชิ้นส่วนอื่นๆของเครื่องจะต้องใหญ่ตามด้วย ทำให้น้ำหนักของเครื่องเพิ่มขึ้นและราคาผลิตสูงขึ้น ดังนั้นของไหลที่มีความดันสูงจึงควรเลือกให้ไหลในท่อ ถ้าเป็นไปได้แล้วการใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อตัว U จะประหยัดที่สุด

(2) ของไหลที่สกปรกง่ายเหมาะที่จะให้ไหลในท่อ

การทำความสะอาดผิวในของท่อถ่ายโอนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อแบบมาตรฐานทำได้โดยไม่ต้องดึงเอามัดท่อออกจากตัวเครื่อง ดังนั้น ของไหลที่ทำให้ผิวในท่อถ่ายโอนความร้อนเปรอะเปื้อนได้ง่าย จึงควรเลือกให้ไหลในท่อ แต่มีข้อยกเว้นคือ เครื่องแบบท่อตัว U ซึ่งทำความสะอาดผิวในของท่อได้ลำบาก

(3) ของไหลที่มีตะกอนหรือเศษของชิ้นเล็กๆปนอยู่จำนวนมาก เหมาะที่จะให้ไหลในเชลล์

ถ้าปล่อยให้ของไหลประเภทนี้ไหลในท่อด้วยความเร็วต่ำ สารไม่บริสุทธิ์จะตกตะกอนสะสมในท่อถ่ายโอนความร้อนและแชนเนล (channel) ทำให้เกิดการผุกร่อนเร็วหรืออาจทำให้ท่อถ่ายโอนความร้อนอุดตันได้แต่ถ้าให้ไหลในท่อด้วยความเร็วสูงจะก่อให้เกิดการกัดเซาะ (erosion) ท่อถ่ายโอนความร้อนขึ้น ดังนั้น ในกรณีเช่นนี้จึงควรให้ของไหลประเภทนี้ไหลในเชลล์โดยวางมาตรการสำหรับรวบรวมตะกอนที่ตกค้างอยู่ในส่วนล่างของเชลล์เพื่อทิ้งออกจากเครื่อง

(4) แก๊สที่มีอัตราการไหลสูงเหมาะกับการไหลในเชลล์

ความเร็วของการไหลในเชลล์จะขึ้นกับโครงสร้างของแผ่นกั้นและวิธีวางเรียงแผ่นกั้น แต่โดยทั่วไปแล้ว พื้นที่สำหรับการไหลในเชลล์สามารถออกแบบได้กว้างใหญ่เพื่อลดความเร็วของการไหลได้ ผลดีก็คือออกแบบเครื่องให้มีค่าความดันลดของแก๊สน้อยลงได้

(5) ของไหลที่ร้อน เหมาะที่จะให้ไหลในท่อ

ในกรณีที่ของไหลร้อนในท่อถ่ายโอนความร้อนให้กับของไหลเย็นในเชลล์ ของไหลเย็นนอกท่อจะทำหน้าที่คล้ายกับฉนวนกันความร้อน เนื่องจากผนังของเชลล์ซึ่งสัมผัสกับของไหลเย็นในเชลล์จะมีอุณหภูมิต่ำกว่าในกรณีที่เลือกเส้นทางการไหลของของไหลตรงกันข้าม ด้วยเหตุนี้ความร้อนที่สูญเสียออกนอกเครื่องจะมีน้อยกว่า อีกทั้งยังสามารถลดความหนาของฉนวนกันความร้อนที่ใช้หุ้มเชลล์ตลอดจนค่าติดตั้งฉนวนได้ด้วย

(6) ของไหลที่ต้องการให้มีค่าความดันลดน้อยเหมาะที่จะให้ไหลในเชลล์

ส่วนใหญ่แล้วในเวลาออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ของไหลในท่อถ่ายโอนความร้อนจะถูกออกแบบให้ไหลด้วยความเร็วสูงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อน เนื่องจากการลดความเร็วของของไหลในท่อยังเป็นสาเหตุของอุบัติเหตุได้ด้วย การจะลดค่าความดันลดในท่อจึงทำค่อนข้างยาก ด้วยเหตุนี้ค่าความดันลดในท่อโดยปรกติจะมากกว่าค่าความดันลดในเชลล์ ดังนั้น ในกรณีที่ต้องการให้เกิดค่าความดันลดของของไหลน้อยที่สุดควรเลือกให้ของไหลนั้นไหลในเชลล์

(7) ของไหลที่มีฤทธิ์กัดกร่อนสูงควรให้ไหลในท่อ

ถ้าให้ของไหลฤทธิ์กัดกร่อนสูงไหลในเชลล์ จะต้องใช้วัสดุทนการกัดกร่อนมาทำตัวเชลล์ด้วย แต่ถ้าให้ของไหลฤทธิ์กัดกร่อนสูงไหลในท่อเพียงแต่ใช้วัสดุทนการกัดกร่อนทำมัดท่อและห้องกั้นก็พอ ดังนั้นจึงสามารถประหยัดค่าวัสดุทนการกัดกร่อนและการบำรุงรักษาก็ทำได้ง่ายกว่าด้วย

(8) ของไหลที่มีสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนผ่านฟิล์มสูง ควรให้ไหลในท่อ

โดยทั่วไปแล้วการเลือกให้ของไหลที่มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนผ่านฟิล์มสูงกว่าไหลในท่อจะเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนของเครื่อง ทำให้ราคาถูกลงโดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ท่อถ่ายโอนความร้อนมีครีบ (fin) ติดผิวนอกพื้นที่สำหรับถ่ายโอนความร้อนที่เพิ่มขึ้นจะช่วยชดเชยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนผ่านฟิล์มนอกท่อที่ต่ำกว่า ผลก็คือสามารถออกแบบขนาดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนให้เล็กลงได้

(9) ของไหลที่มีความหนืดสูงควรให้ไหลในเชลล์

การไหลของของไหลความหนืดสูงที่ความเร็วสูงต้องใช้ค่าความดันลดสูง นอกจากนี้ของไหลที่มีความหนืดสูงมักมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนผ่านฟิล์มต่ำด้วยการเลือกให้ของไหลความหนืดสูงในเชลล์จึงสมเหตุสมผล

(10) ของไหลที่มีแก๊สปนอยู่หรือแก๊สควบแน่นได้ที่มีแก๊สอื่นปนอยู่ควรให้ไหลในท่อ

ถ้าปล่อยให้ของไหลที่มีแก๊สที่ไม่ควบแน่นไหลในเชลล์ในระหว่างที่ไหลอยู่ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน แก๊สที่ไม่ควบแน่นอาจแยกตัวออกมาสะสมอยู่ในเชลล์ทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อนเลวลง แต่เหตุการณ์เช่นนี้มีมาตรการป้องกันได้ถ้าเลือกใช้ให้ไหลในท่อ

ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Fu-Ming Lee and Daniel M. Coombs (1987) ศึกษาเกี่ยวกับการกลั่นแยกวัฏภาคของของเหลวสองวัฏภาคต่อสมดุลไอ-ของเหลวในระดับห้องปฏิบัติการโดยที่ระบบประกอบไปด้วยของผสมระหว่างตัวทำละลายซัลโฟเลนกับสารป้อน (โทลูอีน 50% wt. และ เฮปเทน 50 % wt.) ซึ่งความสามารถในการละลายของซัลโฟเลนที่มีอย่างจำกัดต่อเฮปเทน เมื่อนำสารป้อนและตัวทำละลายมาผสมกันในอัตราส่วนต่างๆกันระหว่าง 0-8% wt. พบว่าจะได้เป็นของเหลวสองวัฏภาค แสดงว่าซัลโฟเลนละลายในสารอะโรมาติกส์ได้ดีแต่ไม่สามารถละลายในสารนอน-อะโรมาติกส์หรือละลายได้น้อย ยกเว้นเมื่ออัตราส่วนสารป้อนต่อตัวทำละลายมีค่าสูงมาก (F/S = 8) จะเกิดเป็นสารละลายเนื้อเดียว แสดงว่าเมื่อปริมาณของตัวทำละลายสูงขึ้นทำให้สารนอน-อะโรมาติกส์ถูกสกัดได้เพิ่มขึ้น

Fu-Ming Lee and Daniel M. Coombs (1988) ได้ทำการศึกษากระบวนการกลั่นสกัดแบบวัฏภาคของเหลวสองวัฏภาคเพื่อเพิ่มค่าออกเทนของ Catalytic Cracked Gasoline โดยทำการศึกษาในระดับ Pilot plant สำหรับกระบวนการที่ศึกษาประกอบไปด้วย คอลัมน์สกัด มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว ซีฟเทรย์ จำนวน 74 เทรย์ ใช้ซัลโฟเลนเป็นตัวทำละลายในการสกัด และหอกลั่น Stripper มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว สูง 20 ฟุต เทรย์ที่ใช้เป็นแบบเบดบรรจุชนิด Pall ring ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ อัตราการไหลของตัวทำละลาย อัตราการไหลของสารป้อน อุณหภูมิของสารป้อน และอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับของหอกลั่นสกัด จากการศึกษาถึงอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ผลที่ได้จากการทดลองพบว่าค่าออกเทนของสารป้อนมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 89.2 เป็น 93.3

B.Demirel, W.H. Wiser, A.G.Oblad, W.Zmierczak and J.Shabtai (1998) ศึกษากระบวนการแปรรูปสารอะโรมาติกส์ไฮโดรคาร์บอนที่เป็นอนุพันธ์ของถ่านหินเหลว (ใช้ 1-Methylnaphthalene เป็นตัวแทน) เป็นแก๊สโซลีนที่มีองค์ประกอบมีค่าออกเทนสูงและมีปริมาณสารอะโรมาติกส์ต่ำการทดลองแบ่งเป็นสองขั้นตอนคือ ขั้นตอนที่หนึ่ง 1-Methylnaphthalene เกิดปฏิกิริยาหลังจากการเติมไฮโดรเจนเป็น Methyldecalin ขั้นตอนที่สอง Methyldecalin จากขั้นตอนแรก เกิดปฏิกิริยาการแตกตัวเป็นองค์ประกอบในแก๊สโซลีน ได้แก่ พาราฟิน ไอโซพาราฟิน ไซโคลพาราฟิน โอเลฟิน ไซโคลโอเลฟิน และสารอะโรมาติกส์ ซึ่งวัตถุประสงค์ของขั้นตอนที่หนึ่งเพื่อหาตัวเร่งปฏิกิริยาและภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้เกิด Methyldecalin ในปริมาณที่มากที่สุดและสำหรับขั้นตอนที่สอง เพื่อหาตัวเร่งปฏิกิริยาและภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดองค์ประกอบในแก๊สโซลีนที่มีค่าออกเทนสูงได้แก่ ไอโซพาราฟิน ไซโคลเฮกเซน ไซโคลเพนเทน และมีสารอะโรมาติกส์ในปริมาณที่ต่ำ พบว่าภาวะที่เหมาะสมที่สุดของขั้นตอนที่หนึ่ง คือใช้ $NiMo/TiO_2$-Al_2O_3 เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 325 องศาเซลเซียส ความดัน 6.7 เมกะปาสคาล ใช้เวลาทำ

ปฏิกิริยา 10 ชั่วโมง และภาวะที่เหมาะสมที่สุดของขั้นตอนที่สอง คือใช้ Pd/REX เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 325 องศาเซลเซียส ความดัน 4.7 เมกะปาสคาล ทำให้เกิดองค์ประกอบในแก๊สโซลีนที่มีค่าออกเทนสูงและมีสารอะโรมาติกส์ในปริมาณที่ต่ำ

ปฏิพัทธ์ ฉายาพันธุ์ (2536) ศึกษาถึงการนำเอาคอนเดนเสตมาผลิตเป็นสารเบนซีน โทลูอีน และไซลีนโดยอาศัยกระบวนการคะตะไลติกรีฟอร์มมิงด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาแพลททินัม-เรเนียมบนอะลูมินากระทำที่อุณหภูมิระหว่าง 420-510 องศาเซลเซียส ความดัน 120-180 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว พบว่ามีความเป็นไปได้ในการนำคอนเดนเสตมาเป็นสารตั้งต้นเพื่อเปลี่ยนโครงสร้างของสารไฮโดรคาร์บอนบางชนิดให้เป็นสารประกอบเบนซีน โทลูอีน และไซลีนเนื่องจากที่ภาวะการทดลองความดัน 120 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว อุณหภูมิ 420 องศาเซลเซียส น้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยา 20 กรัม ร้อยละการเพิ่มของสารทั้งสามมีค่าระหว่าง 10-30 ร้อยละโดยน้ำหนัก

สมพงษ์ พรพิสุทธิมาศ (2539) ศึกษาการสกัดไพโรไลซิสแก๊สโซลีนด้วยตัวทำละลายซัลโฟเลนเพื่อแยกสารอะโรมาติกส์ ได้แก่เบนซีน โทลูอีน และไซลีน(BTX) ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสกัดได้จากการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ อุณหภูมิ อัตราส่วนสารป้อนต่อตัวทำละลาย พบว่าการสกัดที่อุณหภูมิสูงผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความบริสุทธิ์ต่ำกว่าการสกัดที่อุณหภูมิห้อง และอัตราส่วนสารป้อนต่อตัวทำละลาย 1:2.3 โดยน้ำหนัก เป็นอัตราส่วนต่ำสุดที่ให้ร้อยละการสกัดสูงที่อุณหภูมิห้อง จากภาวะดังกล่าวได้นำมาประยุกต์ในเครื่องสกัดแบบจานหมุนจากการทดลองที่กระทำในระบบต่อเนื่อง พบว่าเมื่อใช้อัตราการไหลของสารป้อน 60 กรัมต่อนาที อัตราการไหลของตัวทำละลาย 200 กรัมต่อนาที คิดเป็นอัตราส่วนสารป้อนต่อตัวทำละลาย 1:3.33 และความเร็วรอบมอเตอร์ 600 รอบต่อนาที สามารถสกัดสารอะโรมาติกส์ออกจากสารป้อนได้ร้อยละ 96 และในส่วนที่สกัดได้มีสารอะโรมาติกส์อยู่ร้อยละ 95

พรสวรรค์ พรมมาตย์ (2541) ศึกษาการทำปฏิกิริยาอะโรมาไทเซชันของของเหลวแก๊สธรรมชาติ โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดแพลทินัมโด๊ปด้วยฟลูออไรด์การศึกษาทำที่อุณหภูมิช่วง 350-430 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดันของแก๊สไฮโดรเจนในช่วง 20-60 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว พบว่าอะโรมาไทเซชันของของเหลวแก๊สธรรมชาติ เกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิ 430 องศาเซลเซียส และที่ความดันไฮโดรเจน 40 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว ความเข้มข้นที่เหมาะสมของแพลทินัม และฟลูออไรด์ คือร้อยละ 0.6 และ0.5 โดยน้ำหนักตามลำดับ ตัวรองรับที่เหมาะสมสำหรับอะโรมาไทเซชันของของเหลวแก๊สธรรมชาติ คืออะลูมินาเมื่อเทียบกับโมเลกูลาซีฟกระบวนการที่ใช้สามารถผลิตสารอะโรมาติกส์ได้มากจากสารตั้งต้นที่เป็นสารผสมและได้สารประกอบอะโรมาติกส์ต่อการเปลี่ยนแปลงทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 95

บทที่ 3
อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

อุปกรณ์การทดลอง

คอลัมน์สกัดแบบจานหมุน (สมพงษ์, 2539)

รูปที่ 3.1 แสดงแผนภาพของเครื่องสกัดแบบจานหมุนมีรายละเอียดดังนี้ คอลัมน์แก้วมีความสูง 100 เซนติเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 4.10 เซนติเมตร วงแหวนสถิต (stator ring) ทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิมวางห่างกัน 2.5 เซนติเมตร ตลอดคอลัมน์มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน หรือช่องเปิดของวงแหวนสถิต (d_s) 2.85 เซนติเมตร และระหว่างวงแหวนสถิตมีจานหมุน (rotor disk) อยู่กึ่งกลางทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิมเส้นผ่านศูนย์กลาง (d_r) 2.75 เซนติเมตร ถังใส่สารป้อน (Feed) ถังใส่ตัวทำละลาย (Solvent) ถังพักสารป้อน (T_F) และถังพักตัวทำละลาย (T_S) ทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม เครื่องสูบสารป้อน (P_F) เป็นเครื่องสูบแบบรีด (peristaltic pump) เครื่องสูบตัวทำละลาย (P_S) เป็นเครื่องสูบหอยโข่ง (centrifugal pump) มอเตอร์ (M) ขนาด ¼ แรงม้าความเร็วรอบสูงสุด 1750 รอบต่อนาที

เครื่องมือวิเคราะห์แก๊สโครมาโทกราฟี

ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ประกอบด้วย

เครื่องมือ	:	Shimadzu GC-14B
คอลัมน์	:	แคปิลลารีคอลัมน์ยาว 30 เมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.53 มิลลิเมตร เฟสคงที่ (Stationary phase) เป็น DB-PSWAX
แก๊สพา	:	แก๊สฮีเลียม
เครื่องตรวจวัด	:	Flame Ionization Detector (FID)
เครื่องวิเคราะห์ผล	:	C-R6A Chromatopac Integrator
เครื่องฉีดสารอัตโนมัติ	:	AOC-17 Automatic Injector

ซอฟท์แวร์ที่ใช้ในการจำลองภาวะการณ์หอกลั่นแบบเบดบรรจุด้วยโปรแกรม HYSYS

โปรแกรม HYSYS รุ่น 1.2.7 เป็นโปรแกรมสำเร็จรูปของบริษัท Hyprotech Ltd. ทำงานบนวินโดวส์ 95/98/NT เหมาะสมที่จะใช้สำหรับออกแบบและจำลองภาวะการทำงานของกระบวนการทางเคมี และวิศวกรรมเคมี (Chemical process simulation) มีหน่วยปฏิบัติการที่ใช้ในการแก้

ปัญหาทางด้านกระบวนการทางเคมีหลายหน่วยซึ่งจะทำให้สามารถแก้ไขปัญหาที่ซับซ้อนได้อย่างรวดเร็ว และน่าเชื่อถือ

โครงสร้างของระบบหอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วน

ดังแสดงในรูปที่ 3.2 อันประกอบด้วย หอกลั่น หม้อต้มซ้ำแบบเชลล์และท่อแนวตั้ง ปั๊มแบบบังคับไหลเวียนพร้อมชุดควบคุมมอเตอร์ เครื่องควบแน่นบางส่วน เครื่องควบแน่นทั้งหมด ถังรองรับผลิตภัณฑ์ป้อนย้อนกลับ ปั๊มของเหลวป้อนย้อนกลับ เครื่องวัดอัตราการไหล และรูปที่ 3.3 แผนภาพแสดงการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ กันภายในระบบหอกลั่น

ส่วนหลักของหอกลั่น

หอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วน (Packed bed distillation column)

ทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิมความหนา 3 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 25 เซนติเมตร ความสูงตลอดหอกลั่น 280 เซนติเมตร มีจำนวนชั้นจริงทั้งหมด 12 ชั้น (นับตั้งแต่ชั้นที่ 1 ถึง เครื่องต้มซ้ำ) โดยจะป้อนสารป้อนในชั้นที่ 8 นับจากชั้นที่ 1 ลงมาดังแสดงในรูปที่ 3.4 ซึ่งสามารถแบ่งรายละเอียดออกได้เป็นดังนี้

เบดบรรจุ (Packed bed)

เบดบรรจุเป็นแบบราสจิกริง (Raschig rings) ทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิมเป็นทรงกระบอกกลวงมีความสูงเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลาง ความสูงของเบดบรรจุ 180 เซนติเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 2.54 เซนติเมตร ความสูง 2.54 เซนติเมตร ความหนา 1.2 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.5 มีขนาดความสูงเทียบเท่าหนึ่งชั้น (HETP) เท่ากับ 16.60 เซนติเมตร

ตัวกระจายของเหลว (Liquid distributors)

ตัวกระจายของเหลวเป็นแบบฝักบัวขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 14 เซนติเมตร เจาะรูขนาด 2 มิลลิเมตร ตลอดหน้าสัมผัสของเส้นผ่านศูนย์กลาง

ส่วนด้านล่างของหอกลั่น (Bottom sump)

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 25 เซนติเมตร ความสูง 50 เซนติเมตร มีหลอดแก้วคอยดูและรักษาระดับของสารป้อนให้คงที่ในขณะทำการทดลอง

ส่วนประกอบของหอกลั่น

เครื่องควบแน่นบางส่วน (Partial condenser)

ชนิดแผ่นยึดท่ออยู่กับที่ แบบหนึ่งทางเดินเชลล์และสองทางเดินท่อ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเชลล์ 17 เซนติเมตร ยาว 60 เซนติเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 1.58 เซนติเมตร วางท่อเรียงรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าระยะพิทช์ 2.0 เซนติเมตร จำนวน 48 ท่อ ดังแสดงในรูปที่ 3.6

เครื่องควบแน่นทั้งหมด (Total condenser)

ชนิดแผ่นยึดท่ออยู่กับที่ แบบหนึ่งทางเดินเชลล์และสองทางเดินท่อ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเชลล์ 27 เซนติเมตร ยาว 80 เซนติเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 1.91 เซนติเมตร วางท่อเรียงรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าระยะพิทช์ 2.5 เซนติเมตร จำนวน 82 ท่อ ดังแสดงในรูปที่ 3.7

เครื่องต้มซ้ำ (Reboiler)

ชนิดแผ่นยึดท่ออยู่กับที่ แบบหนึ่งทางเดินเชลล์และหนึ่งทางเดินท่อในแนวดิ่ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเชลล์ 28 เซนติเมตร ยาว 80 เซนติเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ 2.54 เซนติเมตร วางท่อเรียงรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าระยะพิทช์ 3.0 เซนติเมตร จำนวน 52 ท่อ ดังแสดงในรูปที่ 3.8

ถังใส่น้ำมันให้ความร้อนแก่เครื่องต้มซ้ำ

พร้อมชุดขดลวดให้ความร้อนกำลังไฟฟ้าขนาด 10,000 วัตต์ ควบคุมการให้ความร้อนด้วยชุดควบคุมอุณหภูมิ มีปั๊มแบบบังคับไหลเวียนพร้อมชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ซึ่งสามารถปรับอัตราการไหลของน้ำมันให้ความร้อนด้วยชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์

ถังรองรับผลิตภัณฑ์ป้อนย้อนกลับ

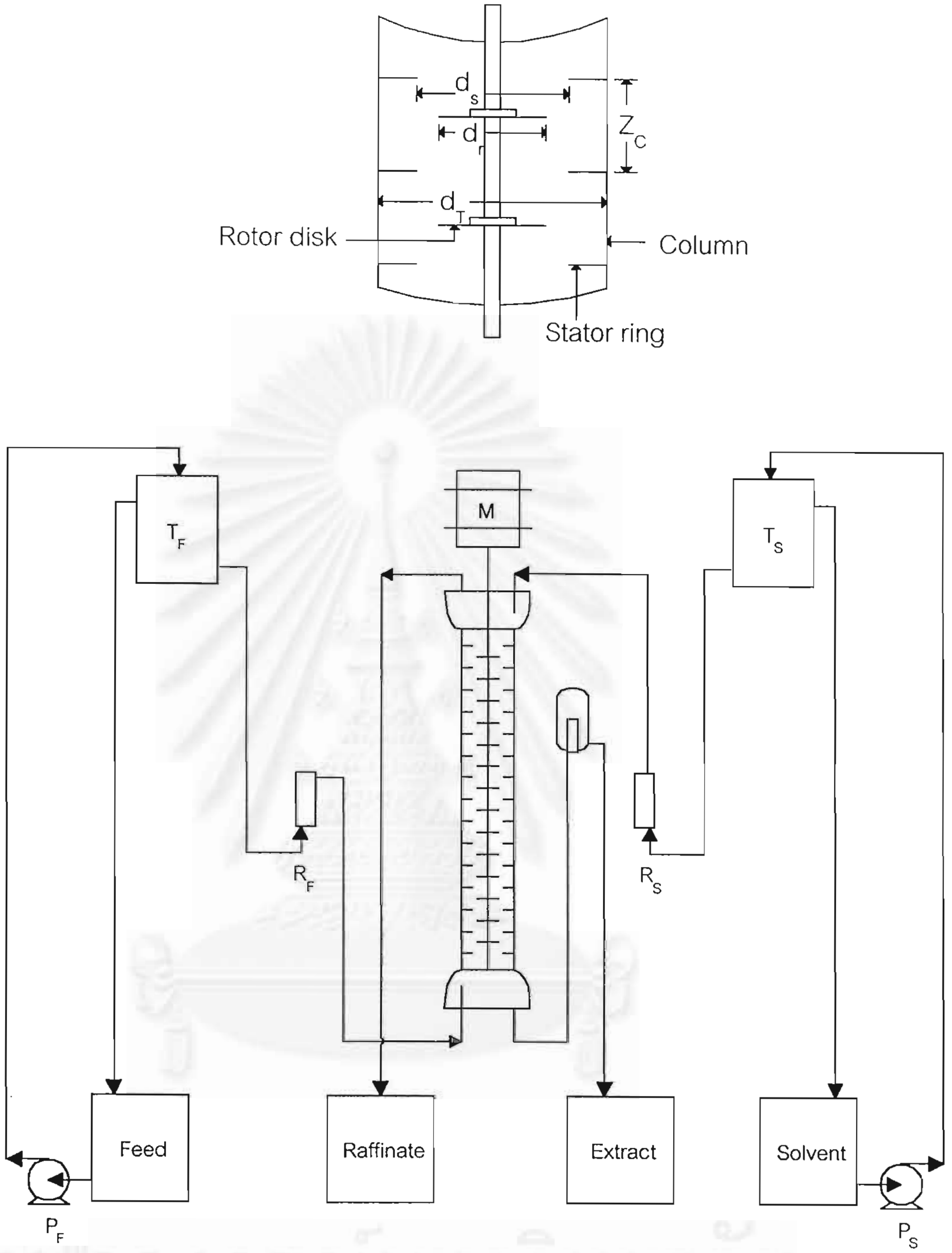
มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 16 เซนติเมตร สูง 30 เซนติเมตร มีความจุประมาณ 6 ลิตร

เครื่องวัดอัตราการไหล

มีขนาด 1-14.5 ลิตรต่อชั่วโมง ใช้สำหรับวัดอัตราการไหลของสารอินทรีย์ความหนาแน่น 900 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร แบ่งการวัดเป็นสามส่วน วัดอัตราการไหลของสารป้อน วัดอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ป้อนย้อนกลับ และวัดอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ยอดหอ

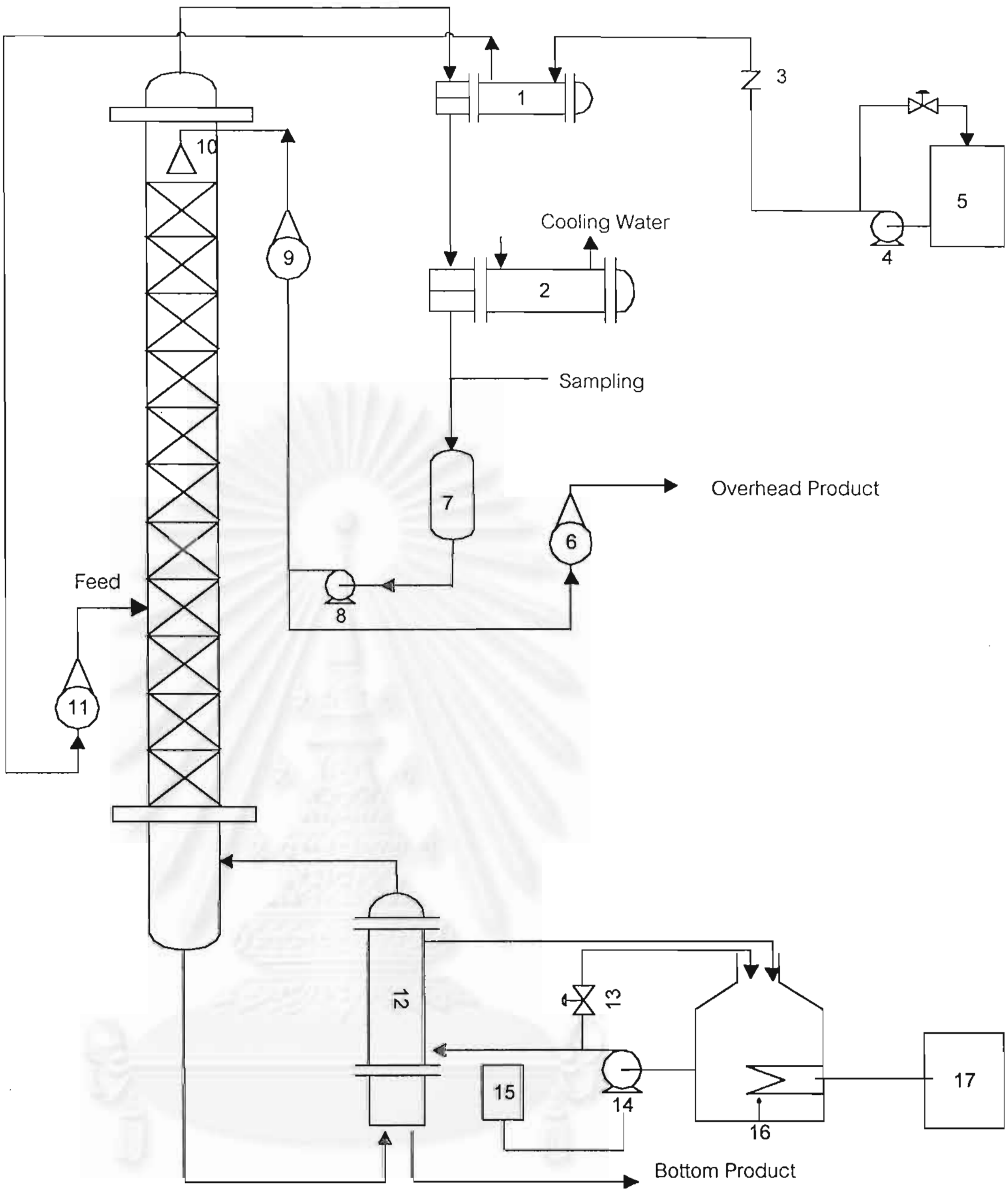
ชุดควบคุมอุณหภูมิ ประกอบด้วย

1. เครื่องควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิตอล (Temperature controller)
2. ชุดจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ (Magnetic controller)
3. ขดลวดให้ความร้อนกำลังไฟฟ้าขนาด 10,000 วัตต์
4. เทอร์โมคัปเปิลชนิดโครเมลอะลูเมล (K-Type) มีช่วงการวัดอุณหภูมิคือ -200 ถึง 1200 องศาเซลเซียส ทำงานโดยอาศัยหลักเมื่อเกิดความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิที่ขั้วและที่ปลายจุดต่อบนโลหะสองชนิดของเทอร์โมคัปเปิล ทำให้เกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าระหว่างขั้วทั้งสองและส่งเข้าเครื่องควบคุมอุณหภูมิ
5. ชุดเลือกอ่านอุณหภูมิจำนวน 8 ช่องสัญญาณ พร้อมด้วยเครื่องอ่านอุณหภูมิแบบดิจิตอล



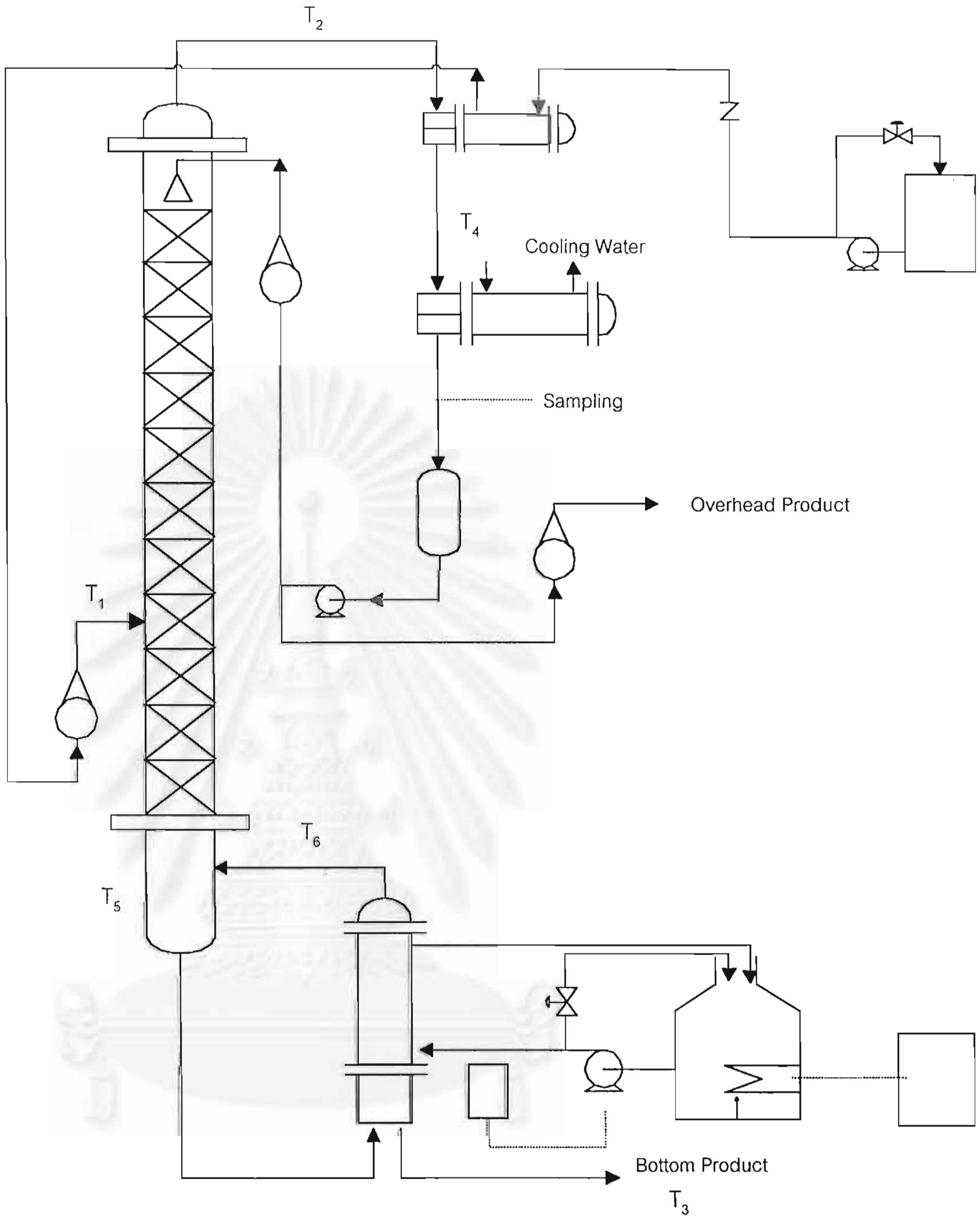
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.1 แผนภาพระบบและส่วนประกอบของเครื่องสกัดแบบจานหมุน (สมพงษ์, 2539)



1. เครื่องควบแน่นบางส่วน
2. เครื่องควบแน่นทั้งหมด
3. เชควาล์ว
4,14. ปั๊มแบบบังคับไหลเวียน
5. ถังใส่สารป้อน
6. เครื่องวัดอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ยอดหอ
7. ถังรองรับผลิตภัณฑ์ป้อนย้อนกลับ
8. ปั๊มป้อนย้อนกลับ
9. เครื่องวัดอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ป้อนย้อนกลับ
10. ตัวกระจายของเหลว
11. เครื่องวัดอัตราการไหลของสารป้อน
12. เครื่องต้มซ้ำ
13. วาล์วบายพาส
15. ชุดควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์
16. ถังน้ำมันให้ความร้อนแก่เครื่องต้มซ้ำ
17. ชุดควบคุมอุณหภูมิ

รูปที่ 3.2 แผนภาพระบบหอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วนที่ใช้ในการทดลอง

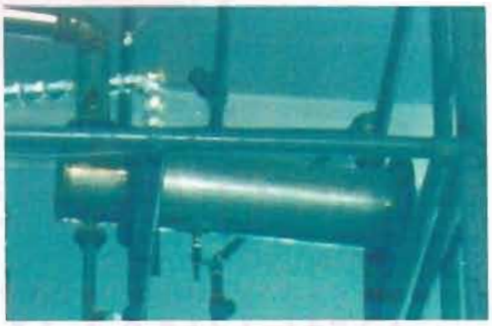


1. อุณหภูมิของสารป้อน (T_1, ^oC)
2. อุณหภูมิของไอยอดหอกลั่น (T_2, ^oC)
3. อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ก้นหอ (T_3, ^oC)
4. อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ออกจากเครื่องควบแน่นบางส่วน (T_4, ^oC)
5. อุณหภูมิภายในส่วนด้านล่างของหอกลั่น (Bottom sump) (T_5, ^oC)
6. อุณหภูมิของไอที่ออกจากเครื่องต้มซ้ำ (T_6, ^oC)

รูปที่ 3.3 แผนภาพแสดงการวัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ กันภายในระบบหอกลั่นขนาดขยายส่วน

รูปที่ 3.4 หอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วน

รูปที่ 3.5 เบดบรรจุแบบราสจิกริง



รูปที่ 3.6 เครื่องควบแน่นบางส่วน

รูปที่ 3.7 เครื่องควบแน่นทั้งหมด

รูปที่ 3.8 เครื่องต้มซ้ำ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. ส่วนที่สกัดได้ บริษัท อะโรเมติกส์ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน)
2. เบนซีน บริษัท อะโรเมติกส์ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน)
3. ไซลีนผสม บริษัท อะโรเมติกส์ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน)
4. โทลูอีน บริษัท เอ็กซอนเคมี ประเทศไทย จำกัด
5. น้ำมันให้ความร้อนคุณภาพสูง (TRANSCAL N) บริษัท บีพี ออยล์(ประเทศไทย) จำกัด
6. ตัวทำละลายซัลโฟเลน
7. ไพโรไลซิสแก๊สโซลีน บริษัท ไทยโอเลฟินส์ จำกัด

ตารางที่ 3.1 สมบัติของสารเคมีที่ใช้ในระบบ ที่อุณหภูมิ 25 ^{o}C (Perry,1997)

สมบัติของสารเคมี	น้ำ	ส่วนที่สกัดได้*	เบนซีน	โทลูอีน	ไซลีนผสม
ความหนาแน่น (g/cm^3)	0.997	0.871	0.872	0.864	0.867
ความหนืด (mPa.s),cP	0.890	0.589	0.605	0.546	0.604
ความจุความร้อนจำเพาะ (C_p) (cal/g.^{o}C)	1.000	0.382	0.377	0.386	0.401
สภาพการนำความร้อน (W/m.K)	0.606	0.133	0.131	0.136	0.140

หมายเหตุ * ข้อมูลจากบริษัท อะโรเมติกส์ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน)

ตารางที่ 3.2 สมบัติของน้ำมันถ่ายโอนความร้อนคุณภาพสูง (TRANSCAL N) บริษัท บีพี ออยล์ (ประเทศไทย) จำกัด

สมบัติของสารเคมี	วิธีการทดสอบ	หน่วย
ความหนาแน่น @ 15 ^{o}C (kg/litre)	ASTM D1298	0.867
จุดวาบไฟ (^{o}C)	ASTM D92	221
จุดติดไฟ (^{o}C)	ASTM D92	243
ความหนืด (cSt) @ 40 ^{o}C	ASTM D445	30
ความหนืด (cSt) @ 100 ^{o}C	ASTM D445	5.1
อุณหภูมิติดไฟอัตโนมัติ (^{o}C)	ASTM D2155	350

วิธีการทดลอง

1. การทดลองในเครื่องสกัดแบบจานหมุนในระบบป้อนต่อเนื่อง

ศึกษาการสกัดสารอะโรมาติกส์ออกจากไพโรไลซิสแก๊สโซลีนด้วยตัวทำละลายในเครื่องสกัดแบบจานหมุนระบบป้อนต่อเนื่อง (สมพงษ์, 2539) โดยใช้สารป้อนเป็นไพโรไลซิสแก๊สโซลีนและซัลโฟเลนเป็นตัวทำละลายในการสกัด เครื่องสูบ (P_S) สูบตัวทำละลายเข้าไปในถังพัก (T_S) ที่อยู่ด้านบนของคอลัมน์ปล่อยตัวทำละลายจากถังพักผ่านโรตามิเตอร์ (R_S) เพื่อควบคุมอัตราการไหลตัวทำละลายจะไหลเข้าคอลัมน์ทางด้านบน โดยให้มีอัตราการไหล 200 กรัมต่อนาที เปิดมอเตอร์ (M) เมื่อแกนและจานหมุนที่ติดอยู่ด้วยหมุนปรับความเร็วรอบ 600 รอบต่อนาที ใช้เครื่องสูบ (P_F) สูบสารป้อนเข้าไปในถังพัก (T_F) ที่อยู่ด้านบนของคอลัมน์ปล่อยสารป้อนจากถังพักผ่านโรตามิเตอร์ (P_F) และไหลเข้าคอลัมน์ทางด้านล่างด้วยอัตราการไหล 60 กรัมต่อนาที คิดเป็นอัตราส่วนสารป้อนต่อตัวทำละลาย 1 : 3.33 ส่วนที่สกัดได้จะออกทางด้านล่างของคอลัมน์และส่วนราฟฟิเนตจะออกทางด้านบน นำส่วนที่สกัดได้และส่วนราฟฟิเนตไปทำการวิเคราะห์หาองค์ประกอบด้วยเครื่องมือแก๊สโครมาโทกราฟี

2. เตรียมสารป้อนให้เหมาะสมในการทดลองหอกลั่นแบบเบดบรรจุเพื่อกลั่นแยกเบนซีน

นำส่วนที่สกัดได้ที่ปราศจากตัวทำละลายซัลโฟเลนจาก บริษัท อะโรเมติกส์ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) มาผสมกับเบนซีนบริสุทธิ์ ไซลีนบริสุทธิ์ เพื่อให้ได้องค์ประกอบที่ใกล้เคียงกับส่วนที่สกัดได้จากข้อ 1. เพื่อใช้ในการทดลองกลั่นแยกเบนซีนโดยนำส่วนที่สกัดได้จากทาง บริษัท อะโรเมติกส์ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) และส่วนที่ผสมแล้วไปทำการวิเคราะห์หาองค์ประกอบสารแต่ละชนิดด้วยเครื่องมือแก๊สโครมาโทกราฟี

3. จำลองภาวะการณ์หอกลั่นแบบเบดบรรจุเพื่อกลั่นแยกเบนซีนด้วยโปรแกรม HYSYS และหาภาวะที่เหมาะสมในการออกแบบหอกลั่น

ศึกษาหลักการและการทำงานของโปรแกรมจำลองภาวะการณ์ HYSYS นำข้อมูลทางด้านองค์ประกอบของสารป้อนในข้อ 2. มาจำลองภาวะการณ์ด้วยโปรแกรม HYSYS กำหนด Specification ในการออกแบบหอกลั่น หาภาวะที่เหมาะสมในการออกแบบหอกลั่นสำหรับกลั่นแยกเบนซีน หลังจากนั้นทำ Tray Sizing นำข้อมูลที่ได้ไปสร้างหอกลั่นขนาดขยายส่วน และหาภาวะที่เหมาะสมในการจำลองภาวะการณ์ที่สามารถกลั่นแยกเบนซีนให้ได้ความบริสุทธิ์สูง

I19233462

4. การทดลองในหอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วนสำหรับกลั่นแยกเบนซีน

ทำการทดลองโดยนำสารป้อนที่ได้จากข้อ 2. โดยป้อนเข้าไปยังถังใส่สารป้อนเปิดปั๊มแบบบังคับไหลเวียนบรรจุสารป้อนเข้าไปยังเครื่องควบแน่นบางส่วนก่อนเข้าหอกลั่น หลังจากนั้นสารป้อนจะถูกบรรจุเข้าไปในเครื่องต้มซ้ำ โดยปริมาณสารป้อนที่บรรจุเข้าไปจะเห็นได้จากระดับของหลอดแก้วซึ่งอยู่ในส่วนด้านล่างของหอกลั่น (Bottom Sump) โดยใช้ปริมาณของสารป้อนประมาณ 30 ลิตร จากนั้นทำการเปิดชุดควบคุมอุณหภูมิโดยตั้งค่าอุณหภูมิไว้ที่ 125 องศาเซลเซียส ให้กับน้ำมันให้ความร้อนใช้เวลาประมาณ 40-50 นาที สารป้อนที่บรรจุอยู่เมื่อได้รับความร้อนเกิดการระเหยกลายเป็นไอ ควบแน่นที่เครื่องควบแน่นบางส่วนซึ่งใช้สารป้อนเป็นสารหล่อเย็นพร้อมทั้ง Pre-heat สารป้อนก่อนเข้าหอกลั่น จากนั้นของเหลวและไอบางส่วนเข้าสู่เครื่องควบแน่นทั้งหมดใช้น้ำเป็นสารหล่อเย็นตามลำดับ ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นของเหลวทั้งหมดจะเข้าสู่ถังรองรับของผลิตภัณฑ์ป้อนย้อนกลับ จากนั้นเปิดปั๊มป้อนย้อนกลับให้ของเหลวกลับเข้าสู่ภายในหอกลั่นทั้งหมด ปล่อยระบบให้เข้าสู่สถานะคงตัวเป็นเวลา 20 นาทีหลังจากนั้นก็ปล่อยให้เป็นระบบต่อเนื่องโดยมีอัตราการไหลของสารป้อน อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ยอดหอ อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ก้นหอ ปรับอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับค่าหนึ่งนานเป็นเวลา 40 นาที และเก็บตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ยอดหอที่ได้ทุกๆ 10 นาที วิเคราะห์หาองค์ประกอบด้วยเครื่องมือแก๊สโครมาโทกราฟี

ตัวแปรที่ศึกษาในหอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วนสำหรับกลั่นแยกเบนซีน ได้แก่

4.1 อัตราการไหลของสารป้อน 4.0 ลิตรต่อชั่วโมง หรือ 3.506 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ทำการทดลองโดยควบคุมอุณหภูมิของน้ำมันให้ความร้อนคงที่ๆ 125 องศาเซลเซียส ปรับอัตราการไหลของสารป้อนคงที่ตลอดการทดลอง และปรับอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับให้สอดคล้องกับการจำลองภาวะการณ์ด้วยโปรแกรม HYSYS

4.2 อัตราการไหลของสารป้อน 3.0 ลิตรต่อชั่วโมง หรือ 2.630 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ทำการทดลองโดยควบคุมอุณหภูมิของน้ำมันให้ความร้อนคงที่ๆ 125 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารป้อนให้คงที่ตลอดการทดลอง และปรับอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับให้สอดคล้องกับการจำลองภาวะการณ์ด้วยโปรแกรม HYSYS

5. เตรียมสารป้อนให้เหมาะสมในการทดลองหอกลั่นแบบเบดบรรจุเพื่อกลั่นแยกโทลูอีน

เพื่อเป็นการประหยัดงบประมาณการลงทุนที่จะสร้างหอกลั่นขึ้นมาอีกหนึ่งหอสำหรับกลั่นแยกโทลูอีน จึงใช้หอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วนสำหรับกลั่นแยกเบนซีนที่ออกแบบและสร้างไว้แล้วในข้อ 3. มาทำการทดลองเพื่อกลั่นแยกโทลูอีน โดยนำผลิตภัณฑ์ก้นหอที่ได้มาจาก

หอกลั่นสำหรับกลั่นแยกเบนซีนในข้อ 5. มาทำการทดลองโดยทำการกลั่นแบบกะ (Batch Distillation) เพื่อกลั่นแยกเบนซีนที่มีอยู่ออกไปให้เหลือน้อยที่สุด โดยป้อนผลิตภัณฑ์ก้นหอที่เข้าไปในเครื่องต้มซ้ำ ปริมาณของสารป้อนที่บรรจุเข้าไปจะเห็นได้จากระดับของหลอดแก้วซึ่งอยู่ในส่วนด้านล่างของหอกลั่น ซึ่งใช้ปริมาณของสารป้อนประมาณ 30 ลิตร จากนั้นทำการเปิดชุดควบคุมอุณหภูมิโดยตั้งค่าอุณหภูมิไว้ที่ 140 องศาเซลเซียส ให้กับน้ำมันให้ความร้อน เก็บผลิตภัณฑ์ยอดหอ และผลิตภัณฑ์ก้นหอวิเคราะห์หาองค์ประกอบด้วยเครื่องมือแก๊สโครมาโทกราฟี

6. จำลองภาวะการณ์หอกลั่นแบบเบดบรรจุเพื่อกลั่นแยกโทลูอีนด้วยโปรแกรม HYSYS

นำผลิตภัณฑ์ก้นหอที่ได้จากข้อ 6. มาเป็นสารป้อนเพื่อทำการกลั่นแยกโทลูอีนโดยใช้ข้อมูลทางด้าน Tray Sizing ของหอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วนที่ออกแบบและสร้างแล้วในข้อ 3. มากำหนด Specification ในการทดลองสำหรับกลั่นแยกโทลูอีนด้วยโปรแกรม HYSYS และหาภาวะที่เหมาะสมในการจำลองภาวะการณ์ที่สามารถกลั่นแยกโทลูอีนให้ได้ความบริสุทธิ์สูง

7. การทดลองในหอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วนสำหรับกลั่นแยกโทลูอีน

ทำการทดลองโดยใช้หอกลั่นที่ออกแบบและสร้างแล้วในข้อ 3. นำผลิตภัณฑ์ก้นหอที่ได้จากข้อ 6. มาเป็นสารป้อนเพื่อทำการกลั่นแยกโทลูอีน โดยป้อนเข้าไปยังถังใส่สารป้อนเปิดปั๊มแบบบังคับไหลเวียนบรรจุสารป้อนเข้าไปยังเครื่องควบแน่นบางส่วนก่อนเข้าหอกลั่น หลังจากนั้นสารป้อนจะถูกบรรจุเข้าไปในเครื่องต้มซ้ำ โดยปริมาณสารป้อนที่บรรจุเข้าไปจะเห็นได้จากระดับของหลอดแก้วซึ่งอยู่ในส่วนด้านล่างของหอกลั่น โดยใช้ปริมาณของสารป้อนประมาณ 30 ลิตร จากนั้นทำการเปิดชุดควบคุมอุณหภูมิโดยตั้งค่าอุณหภูมิไว้ที่ 160 องศาเซลเซียส ให้กับน้ำมันให้ความร้อนใช้เวลาประมาณ 50-60 นาที สารป้อนที่บรรจุอยู่เมื่อได้รับความร้อนเกิดการระเหยกลายเป็นไอ ควบแน่นที่เครื่องควบแน่นบางส่วนซึ่งใช้สารป้อนเป็นสารหล่อเย็นพร้อมทั้ง Pre-heat สารป้อนก่อนเข้าหอกลั่น จากนั้นของเหลวและไอบางส่วนเข้าสู่เครื่องควบแน่นทั้งหมดใช้น้ำเป็นสารหล่อเย็นตามลำดับ ผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นของเหลวทั้งหมดจะเข้าสู่ถังรองรับของผลิตภัณฑ์ป้อนย้อนกลับ จากนั้นเปิดปั๊มป้อนย้อนกลับให้ของเหลวกลับเข้าสู่ภายในหอกลั่นทั้งหมด ปล่อยระบบให้เข้าสู่สถานะคงตัวเป็นเวลา 20 นาทีหลังจากนั้นก็ปล่อยให้เป็นระบบต่อเนื่องมีอัตราการไหลของสารป้อน อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ยอดหอ อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ก้นหอ ปรับอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับค่าหนึ่งนานเป็นเวลา 40 นาที และเก็บตัวอย่างของผลิตภัณฑ์ยอดหอที่ได้ทุกๆ 10 นาที วิเคราะห์หาองค์ประกอบด้วยเครื่องมือแก๊สโครมาโทกราฟี

ตัวแปรที่ศึกษาในหอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วนสำหรับกลั่นแยกโทลูอีน ได้แก่

7.1 อัตราการไหลของสารป้อน 4.0 ลิตรต่อชั่วโมง หรือ 3.473 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ทำการทดลองโดยควบคุมอุณหภูมิของน้ำมันให้ความร้อนคงที่ๆ 160 องศาเซลเซียส ปรับอัตราการไหลของสารป้อนคงที่ตลอดการทดลอง และปรับอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับให้สอดคล้องกับการจำลองภาวะการณ์ด้วยโปรแกรม HYSYS

7.2 อัตราการไหลของสารป้อน 3.0 ลิตรต่อชั่วโมง หรือ 2.605 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ทำการทดลองโดยควบคุมอุณหภูมิของน้ำมันให้ความร้อนคงที่ๆ 125 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารป้อนให้คงที่ตลอดการทดลอง และปรับอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับให้สอดคล้องกับการจำลองภาวะการณ์ด้วยโปรแกรม HYSYS

8. บันทึกข้อมูลอุณหภูมิที่จุดต่างๆ ของหอกลั่นทุกๆ 10 นาที โดยใช้เทอร์โมคัปเปิลและเครื่องอ่านอุณหภูมิแบบดิจิตอล แสดงจุดต่างๆ ที่บันทึกข้อมูลดังรูปที่ 3.3 ข้อมูลที่บันทึกไว้ได้แก่

8.1 อุณหภูมิของสารป้อน (T_1, ^{o}C)

8.2 อุณหภูมิของไอยอดหอกลั่น (T_2, ^{o}C)

8.3 อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ก้นหอ (T_3, ^{o}C)

8.4 อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์ที่ขาออกจากเครื่องควบแน่นบางส่วน (T_4, ^{o}C)

8.5 อุณหภูมิภายในส่วนด้านล่างของหอกลั่น (Bottom sump) (T_5, ^{o}C)

8.6 อุณหภูมิของไอที่ออกจากเครื่องต้มซ้ำ (T_6, ^{o}C)

9. การวิเคราะห์หาองค์ประกอบโดยใช้เครื่องมือแก๊สโครมาโทกราฟี

ใช้ไมโครปิเปตดูดสารตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ปริมาตร 1000 ไมโครลิตร ลงในหลอดเก็บสารชนิดมีฝาปิด ฉีดสารละลายตัวอย่างเข้าเครื่องมือแก๊สโครมาโทกราฟีด้วยเครื่องฉีดสารอัตโนมัติปริมาตร 0.2 ไมโครลิตร โดยมีภาวะดังนี้

อุณหภูมิระบบฉีดสาร	:	200 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิเครื่องตรวจวัด	:	200 องศาเซลเซียส
อุณหภูมิคอลัมน์	:	อุณหภูมิเริ่มต้น 60 องศาเซลเซียส ให้อุณหภูมิคงที่นาน 1 นาที จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิเป็น 120 องศาเซลเซียส โดยเพิ่มด้วยอัตรา 20 องศาเซลเซียสต่อนาที ให้อุณหภูมิคงที่ 4 นาที

อัตราการไหลของแก๊สพา : 5.0 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง

อัตราส่วนการแยก(Split Ratio) : 50 : 1

จากภาวะดังกล่าว เวลาที่อยู่ในคอลัมน์ (Retention time) ของเบนซีนประมาณ 3.3 นาที โทลูอีน ประมาณ 4.1 นาที และไซลีนผสม ประมาณ 5.00 5.12 และ 5.63 นาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4
ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

1. การทดลองในเครื่องสกัดแบบจานหมุนในระบบป้อนต่อเนื่อง

จากภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทดลองในเครื่องสกัดแบบจานหมุนในระบบป้อนต่อเนื่อง คือ อัตราการไหลของตัวทำละลาย 200 กรัมต่อนาที อัตราการไหลของสารป้อน 60 กรัมต่อนาที คิดเป็นอัตราส่วนสารป้อนต่อตัวทำละลาย 1:3.33 โดยน้ำหนัก และความเร็วรอบมอเตอร์ 600 รอบต่อนาที สามารถแสดงองค์ประกอบสารป้อน ส่วนที่สกัดได้ ส่วนราฟฟิเนตแสดงดังตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2 จากการทดลองสามารถสกัดสารอะโรมาติกส์ได้ร้อยละ 96 โดยน้ำหนัก และในส่วนที่สกัดได้มีสารอะโรมาติกส์ และสารนอน-อะโรมาติกส์อยู่ร้อยละ 95.42 และ 4.58 โดยน้ำหนักตามลำดับ (สมพงษ์, 2539)

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบในสารป้อน ส่วนที่สกัดได้ และส่วนราฟฟิเนต จากภาวะที่เหมาะสม

องค์ประกอบ	ปริมาณ (กรัมต่อนาที)		
	สารป้อน	ส่วนที่สกัดได้	ส่วนราฟฟิเนต
n-Pentane	3.30	0.19	3.05
Cyclopentane	1.43	0.14	1.24
n-Hexane	2.02	0.08	1.91
Cyclohexane	1.36	0	1.36
Benzene	23.86	22.89	0.97
n-Heptane	0.43	0	0.43
Cycloheptane	1.42	0	1.42
Toluene	9.18	8.91	0.27
n-Octane	0.19	0	0.19
Cyclooctane	0.95	0	0.95
Xylene	6.05	5.85	0.20
Cyclononane	0.41	0	0.41
C_9-Aromatics	2.79	1.21	1.56
Cyclodecane	0.12	0	0.12
C_{10}-Aromatics	0.22	0.15	0.06
Other	6.27	0.04	6.22
รวม	60.00	39.46	20.36

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบของส่วนที่สกัดได้จากภาวะที่เหมาะสม (หน่วย : ร้อยละโดยน้ำหนัก)

องค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
	ส่วนที่สกัดได้
n-Pentane	0.48
Cyclopentane	0.35
n-Hexane	0.20
Benzene	58.01
Toluene	22.58
Xylene	14.83
C_9-Aromatics	3.07
C_{10}-Aromatics	0.48
รวม	100.00

หมายเหตุ : เนื่องจากสาร Other จากตารางที่ 4.1 ไม่สามารถระบุได้ว่าเป็นสารประเภทไหนพบว่ามีอยู่ในปริมาณน้อยมากดังนั้นจึงสมมุติให้รวมอยู่ในสารจำพวก C_{10}-Aromatics เพื่อความสะดวกในการจำลองภาวะการณ์ด้วยโปรแกรม HYSYS

2. เตรียมสารป้อนให้เหมาะสมในการทดลองหอกลั่นแบบเบดบรรจุเพื่อกลั่นแยกเบนซีน

ส่วนที่สกัดได้จากตารางที่ 4.2 มีปริมาณของสารอะโรมาติกส์และสารนอน-อะโรมาติกส์คิดเป็นร้อยละ 95.42 และ 4.58 โดยน้ำหนักตามลำดับ ซึ่งมีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นสารป้อนสำหรับการจำลองภาวะการณ์ด้วยโปรแกรม HYSYS แต่เนื่องจากตัวทำละลายซัลโฟเลนมีปริมาณไม่เพียงพอที่จะทำการสกัดสารอะโรมาติกส์ออกจากไพโรไลซิสแก๊สโซลีนในเครื่องสกัดแบบจานหมุน ดังนั้นจึงขอความอนุเคราะห์สารอะโรมาติกส์ส่วนที่สกัดได้ที่ปราศจากตัวทำละลายซัลโฟเลนจากบริษัท อะโรเมติกส์ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) นำมาผสมกับเบนซีนบริสุทธิ์ ไซลีนบริสุทธิ์ในอัตราส่วน 1 : 1 : 0.5 ตามลำดับ เพื่อให้ได้สารป้อนที่มีองค์ประกอบที่ใกล้เคียงกับส่วนที่สกัดได้จากตารางที่ 4.2 สามารถแสดงองค์ประกอบของส่วนที่สกัดได้จากทางบริษัทและสารป้อนที่ผสมแล้วแสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ส่วนที่สกัดได้จากบริษัท และสารป้อนที่ผสมแล้ว (หน่วย : ร้อยละโดยน้ำหนัก)

องค์ประกอบ	ส่วนที่สกัดได้	สารป้อน
เบนซีน	45.58	59.46
โทลูอีน	47.52	29.06
ไซลีน	6.90	11.48
รวม	100.00	100.00

3. จำลองภาวะการณ์หอกลั่นแบบเบดบรรจุเพื่อกลั่นแยกเบนซีนด้วยโปรแกรม HYSYS และหาภาวะที่เหมาะสมในการออกแบบหอกลั่น

นำส่วนที่สกัดได้จากการทดลองในเครื่องสกัดแบบจานหมุนดังตารางที่ 4.2 มาจำลองภาวะการณ์หอกลั่นแบบเบดบรรจุด้วยโปรแกรม HYSYS โดยใช้คำสั่ง Short cut ในการหาจำนวนชั้นทางทฤษฎีพบว่าได้ 12 ชั้นและนำมาใช้ในการจำลองภาวะการณ์ โดยข้อมูลสำหรับการกำหนด Specification ในการออกแบบหอกลั่นด้วยโปรแกรม HYSYS มีดังนี้

1. กำหนดอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ยอดหอ 2.019 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เหตุผลที่กำหนดเช่นนี้ เพราะต้องการที่จะดึงเบนซีนที่อยู่ในสารป้อนออกมาทางผลิตภัณฑ์ยอดหอให้ได้มากที่สุด โดยที่จะให้เหลือเบนซีนในผลิตภัณฑ์ก้นหอน้อยที่สุด โดยนำ mass fraction of Benzene คูณด้วย mass flow rate of Feed
2. กำหนดอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ (Reflux ratio) ให้มีค่าต่างๆ ที่เหมาะสม

ผลที่ได้จากการจำลองภาวะการณ์ด้วยโปรแกรม HYSYS แสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ข้อมูลการจำลองภาวะการณ์หอกลั่นแบบเบดบรรจุสำหรับกลั่นแยกเบนซีนด้วยโปรแกรม HYSYS โดยนำส่วนที่สกัดได้จากการทดลองในเครื่องสกัดแบบจานหมุนเป็นสารป้อนและกำหนดอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ 9.83

Conditions	Material Stream		
	Feed	Top Product	Bottom Product
Pressure (kPa)	101.325	101.325	101.325
Temperature (^{o}C)	50.000	78.506	117.597
Mass Flow (kg/h)	3.481	2.019	1.462
Liquid Volume Flow (Litre/h)	4.000	2.300	1.700

ตารางที่ 4.4 (ต่อ)

Components	Mass fraction		
	Feed	Top Product	Bottom Product
n-Pentane	0.0048	0.0083	0.0000
Cyclopentane	0.0035	0.0061	0.0000
n-Hexane	0.0020	0.0035	0.0000
Benzene	0.5801	0.9808	0.0267
Toluene	0.2258	0.0013	0.5357
Xylene	0.1483	0.0000	0.3530
1-tr2-ECC5 (C_9-Aromatics)	0.00307	0.0000	0.0731
Tert-BCC6 (C_{10}-Aromatics)	0.0048	0.0000	0.0114
Total	1.0000	1.0000	1.0000

จากการศึกษาและจำลองภาวะการณ์หอกลั่นแบบเบดบรรจุด้วยโปรแกรม HYSYS ที่ระบบสถานะคงตัว (Steady State Mode) ภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือ อัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ 9.83 จำนวนชั้นทางทฤษฎี 12 ชั้น (นับตั้งแต่ชั้นที่ 1 ถึง เครื่องต้มซ้ำ) ชั้นที่ 8 เป็นชั้นป้อนสาร อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ยอดหอ 2.019 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ได้เบนซีน โทลูอีน และไซลีนที่ผลิตภัณฑ์ยอดหอร้อยละ 98.08 0.13 และ 0.00 โดยน้ำหนัก และความบริสุทธิ์ของเบนซีน โทลูอีน และไซลีนที่ผลิตภัณฑ์ก้นหอร้อยละ 2.67 53.57 และ 35.30 โดยน้ำหนักตามลำดับ หลังจากนั้นทำการจำลองภาวะการณ์ในส่วนของ Tray Sizing ผลที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ข้อมูลการจำลองภาวะการณ์ด้วยโปรแกรม HYSYS ในส่วนของ Tray Sizing โดยส่วนที่สกัดได้จากการทดลองในเครื่องสกัดแบบจานหมุนเป็นสารป้อน

Tray Sizing : Packed Bed Column	Results
Section Diameter (m)	0.1524
Cross Sectional Area (m^2)	0.01824
Section Height (m)	1.760
Calculated Maximum Flooding (%)	17.81
Pressure Drop Per Length (kPa/m)	0.06037
Flooding Gas Velocity ($m^3/h.m^2$)	2438
HETP (m)	0.160
HETP Correlation	Hands
Packing Type	Raschig Rings 1/32 in wall (Csteel) 1/4 inch

จากการทำ Tray Sizing ได้นำข้อมูลจากตารางที่ 4.5 ไปสร้างหอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วนจะพบว่าใช้ Diameter 0.1524 เมตร, ความสูง 1.760 เมตร, HETP 0.160 เมตร และใช้ราสจิกริงขนาด 1/4 นิ้ว เป็นเบดบรรจุ แต่เนื่องจากว่าต้องใช้ส่วนที่สกัดได้เป็นสารป้อนในปริมาณที่มากสำหรับแต่ละการทดลอง จึงใช้วิธีผสมสารป้อนเพื่อให้ได้องค์ประกอบที่ใกล้เคียงกับส่วนที่สกัดได้มาทำการทดลองดังรายละเอียดในข้อ 2. ดังนั้นจึงนำข้อมูลจากตารางที่ 4.3 มาจำลองภาวะการณ์หอกลั่นแบบเบดบรรจุด้วยโปรแกรม HYSYS ซึ่งข้อมูลสำหรับการกำหนด Specification ในการออกแบบหอกลั่นด้วยโปรแกรม HYSYS มีดังนี้

1. กำหนดอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ยอดหอ 2.085 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เหตุผลที่กำหนดเช่นนี้ เพราะต้องการที่จะดึงเบนซีนที่อยู่ในสารป้อนออกมาทางผลิตภัณฑ์ยอดหอให้ได้มากที่สุด โดยที่จะให้เหลือเบนซีนในผลิตภัณฑ์ก้นหอน้อยที่สุด โดยนำ mass fraction of Benzene คูณด้วย mass flow rate of Feed
2. กำหนดอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ 9.83

ผลที่ได้จากการจำลองภาวะการณ์ด้วยโปรแกรม HYSYS แสดงดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ข้อมูลการจำลองภาวะการณ์หอกลั่นแบบเบดบรรจุสำหรับกลั่นแยกเบนซีนด้วยโปรแกรม HYSYS โดยนำส่วนที่ผสมแล้วมาเป็นสารป้อน

Conditions	Material Stream		
	Feed	Top Product	Bottom Product
Pressure (kPa)	101.325	101.325	101.325
Temperature (^{o}C)	50.000	80.622	115.395
Mass Flow (kg/h)	3.506	2.085	1.421
Liquid Volume Flow (Litre/h)	4.000	2.400	1.600

Components	Mass fraction		
	Feed	Top Product	Bottom Product
Benzene	0.5946	0.9933	0.0097
Toluene	0.2906	0.0067	0.7071
Xylene	0.1148	0.0000	0.2832
Total	1.0000	1.0000	1.0000

จากการศึกษาและจำลองภาวะการณ์หอกลั่นแบบเบดบรรจุด้วยโปรแกรม HYSYS ที่ระบบสถานะคงตัว (Steady State Mode) ภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือ อัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ 9.83 จำนวนชั้นทางทฤษฎี 12 ชั้น (นับตั้งแต่ชั้นที่ 1 ถึงเครื่องต้มซ้ำ) ชั้นที่ 8 เป็นชั้นป้อนสาร อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ยอดหอ 2.085 กิโลกรัมต่อชั่วโมง จะได้เบนซีน โทลูอีน และไซลีนที่ผลิตภัณฑ์ยอดหอร้อยละ 99.33 0.67 และ 0.00 โดยน้ำหนัก และความบริสุทธิ์ของเบนซีน โทลูอีน และไซลีนที่ผลิตภัณฑ์ก้นหอร้อยละ 0.97 70.71 และ 28.32 โดยน้ำหนักตามลำดับ แต่เนื่องจากในการสร้างหอกลั่นได้ทำการขยายขนาด Diameter ของหอกลั่นจากเดิม 0.1524 เมตร เป็น 0.2500 เมตร มีค่าเท่ากับการจำลองภาวะการณ์แสดงดังตารางที่ 4.5 โดยมีสมมุติฐานว่า HETP = 0.160 เมตร และเปลี่ยนขนาดของเบดบรรจุจากเดิม 1/4 นิ้ว เป็น ขนาด 1.0 นิ้ว เนื่องจาก

- เบดบรรจุที่มีขนาดเล็กมากการจัดเรียงตัวกันอย่างหนาแน่นทำให้ภายในหอกลั่นเกิดความดันลดมากเกินไป
- เบดบรรจุขนาด 1.0 นิ้ว ช่วยเพิ่มพื้นที่ช่องว่างระหว่างเบดบรรจุซึ่งจะทำให้วัฏภาคไอลอยตัวผ่านเบดบรรจุได้อย่างสะดวก

หลังจากนั้นทำการจำลองภาวะการณ์ในส่วนของ Tray Sizing ผลที่ได้จากการจำลองภาวะการณ์แสดงดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ข้อมูลการจำลองภาวะการณ์ด้วยโปรแกรม HYSYS ในส่วนของ Tray Sizing โดยนำส่วนที่ผสมแล้วมาเป็นสารป้อน

Tray Sizing : Packed Bed Column	Results
Section Diameter (m)	0.3048
Cross Sectional Area (m^2)	0.07297
Section Height (m)	1.760
Calculated Maximum Flooding (%)	2.17
Pressure Drop Per Length (kPa/m)	0.0006113
Flooding Gas Velocity ($m^3/h.m^2$)	5157
HETP (m)	0.160
HETP Correlation	Specified HETP
Packing Type	Raschig Rings 1/32 in wall (CSteel) 1 inch

4. การทดลองในหอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วนสำหรับกลั่นแยกเบนซีน

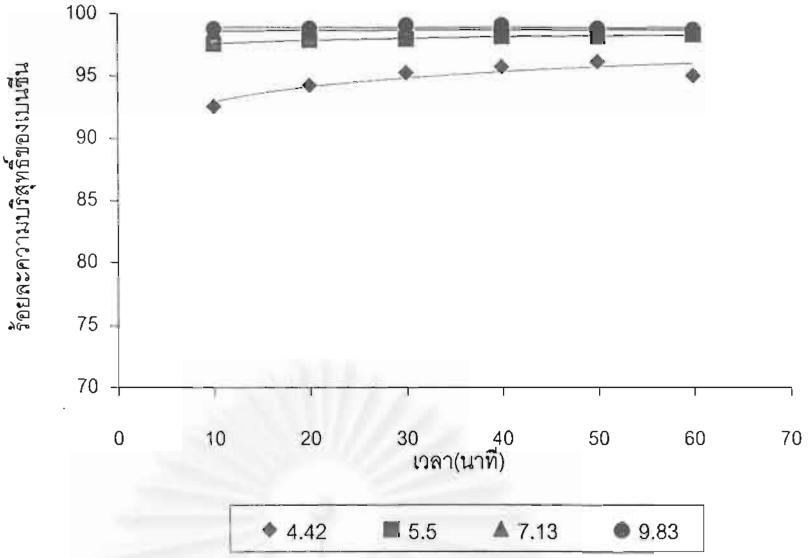
4.1 ศึกษาผลของอัตราการไหลของสารป้อน 3.506 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

นำสารป้อนจากตารางที่ 4.3 มาทดลองจำลองภาวะการณ์หอกลั่นแบบเบดบรรจุสำหรับกลั่นแยกเบนซีนด้วยโปรแกรม HYSYS ให้อัตราการไหลของสารป้อน 3.506 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ยอดหอ 2.085 กิโลกรัมต่อชั่วโมง คงที่ตลอดการประมวลผลข้อมูลโดยเปลี่ยนอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับเป็น 4.42 5.50 7.13 และ 9.83 ตามลำดับ ที่สถานะคงตัวผลที่ได้จากการจำลองภาวะการณ์แสดงดังตารางที่ 4.8 เมื่ออัตราส่วนการป้อนย้อนกลับเพิ่มขึ้นความบริสุทธิ์ของเบนซีนในผลิตภัณฑ์ยอดหอก็เพิ่มขึ้น จากการเปรียบเทียบอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับกับผลที่ได้จากการทดลองด้วยหอกลั่นขนาดขยายส่วน พบว่าเมื่ออัตราส่วนการป้อนย้อนกลับเพิ่มขึ้นความบริสุทธิ์ของเบนซีนในผลิตภัณฑ์ยอดหอก็เพิ่มขึ้น โดยมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับการจำลองภาวะการณ์ด้วยโปรแกรม HYSYS แสดงดังรูปที่ 4.1 (แสดงข้อมูลการทดลองภาคผนวก ค.)

ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบข้อมูลการจำลองภาวะการณ์หอกลั่นแบบเบดบรรจุสำหรับกลั่นแยกเบนซีน ด้วยโปรแกรม HYSYS ที่อัตราการไหลของสารป้อนคงที่ 3.506 กิโลกรัมต่อชั่วโมง กับการทดลองหอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วน

อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ยอดหอ (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	อัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ	โปรแกรม HYSYS องค์ประกอบผลิตภัณฑ์ยอดหอ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			หอกลั่นขนาดขยายส่วน องค์ประกอบผลิตภัณฑ์ยอดหอ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
		เบนซีน	โทลูอีน	ไซลีน	เบนซีน	โทลูอีน	ไซลีน
2.085	4.42	98.89	1.11	0.00	95.13	4.78	0.09
	5.50	99.06	0.94	0.00	98.42	1.58	0.00
	7.13	99.20	0.80	0.00	98.79	1.21	0.00
	9.83	99.33	0.67	0.00	98.83	1.17	0.00

หมายเหตุ : จากโปรแกรม HYSYS ให้อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ยอดหอคงที่ 2.085 กิโลกรัมต่อชั่วโมง แล้วปรับอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ แต่จากการทดลองด้วยหอกลั่นขนาดขยายส่วนไม่สามารถปรับอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ยอดหอให้สอดคล้องกับโปรแกรม HYSYS ได้แต่สามารถปรับอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับให้สอดคล้องกับโปรแกรม HYSYS



รูปที่ 4.1 ความบริสุทธิ์ของเบนซีนในผลิตภัณฑ์ยอดหอจากการทดลองด้วยหอกลั่นขนาดขยายส่วนที่อัตราการไหลของสารป้อนคงที่ 3.506 กิโลกรัมต่อชั่วโมงโดยเปลี่ยนอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับเป็น 4.42 5.50 7.13 และ 9.83 ตามลำดับ

ซึ่งอธิบายได้ว่าเนื่องจากการเพิ่มอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับเป็นการเพิ่มอัตราการถ่ายโอนความร้อนและมวลสารในวัฏภาคไอและวัฏภาคของเหลวบนพื้นผิวสัมผัสของเบดบรรจุโดยจะมีสภาพสมดุลกันระหว่างไอและของเหลวในแต่ละชั้นของหอกลั่น เบนซีนที่ระเหยง่ายกว่าโทลูอีนและไซลีนในผลิตภัณฑ์ยอดหอจะได้รับความร้อนจากไอแล้วระเหยกลายเป็นไอออกไปจากพื้นผิวสัมผัสของเบดบรรจุ ในขณะเดียวกันโทลูอีนและไซลีนที่มีจุดเดือดสูงกว่าที่อยู่ในไอก็จะกลายเป็นของเหลวกลับเข้าไปภายในหอกลั่นทำให้มีการถ่ายโอนมวลสารสวนทางกันตลอดเวลาจนได้ความบริสุทธิ์ของเบนซีนเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนการป้อนย้อนกลับเพิ่มขึ้นจากการทดลองพบว่า

ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการจำลองภาวะการณ์ด้วยโปรแกรม HYSYS ที่อัตราการไหลของสารป้อน 3.506 กิโลกรัมต่อชั่วโมง คืออัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ 9.83 ได้ความบริสุทธิ์ของเบนซีน โทลูอีน และไซลีนที่ผลิตภัณฑ์ยอดหอร้อยละ 99.33 0.67 และ 0.00 โดยน้ำหนักตามลำดับ และความบริสุทธิ์ของเบนซีน โทลูอีน และไซลีนที่ผลิตภัณฑ์ก้นหอร้อยละ 0.97 70.71 และ 28.32 โดยน้ำหนักตามลำดับ (แสดงข้อมูลการทดลองภาคผนวก ช.)

ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทดลองด้วยหอกลั่นขนาดขยายส่วน คืออัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ 9.83 ได้ความบริสุทธิ์ของเบนซีน โทลูอีน และไซลีนที่ผลิตภัณฑ์ยอดหอร้อยละ 98.83 1.17 และ 0.00 โดยน้ำหนักตามลำดับ และความบริสุทธิ์ของเบนซีน โทลูอีน และไซลีนที่ผลิตภัณฑ์ก้นหอร้อยละ 30.65 38.31 และ 31.04 โดยน้ำหนักตามลำดับ (แสดงข้อมูลการทดลอง ภาคผนวก ค.)

จากการทดลองด้วยหอกลั่นขนาดขยายส่วนเมื่อระบบเข้าสู่สถานะคงตัวทำดุลมวลสารขององค์ประกอบแต่ละชนิดและดุลมวลสารรวมแสดงดังตารางที่ 4.9 จากการทำดุลมวลสารพบว่าในส่วนของกระแสขาเข้าและกระแสขาออกไม่ดุลมวลสารกันอาจเกิดเนื่องมาจาก

1. ความผิดพลาดในการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี
2. การที่สารอะโรมาติกส์เป็นสารระเหยง่ายทำให้ขั้นตอนการเก็บตัวอย่างเพื่อที่จะนำไปวิเคราะห์จึงเกิดความผิดพลาดได้
3. ในการทดลองหอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วนระบบที่เก็บตัวอย่างสำหรับที่จะนำไปวิเคราะห์ในส่วนของผลิตภัณฑ์ก้นหอยังไม่ดีเท่าที่ควร
4. ระบบอาจจะไม่อยู่ในสถานะคงตัวอย่างแท้จริง

ตารางที่ 4.9 ข้อมูลแสดงการทำดุลมวลสารสำหรับกลั่นแยกเบนซีนจากการทดลองหอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วน ที่อัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ 4.42 5.50 7.13 และ9.83

อัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ	ดุลมวลสาร (หน่วย : กิโลกรัมต่อชั่วโมง)							
	กระแสขาเข้า				กระแสขาออก			
	เบนซีน	โทลูอีน	ไซลีน	รวม	เบนซีน	โทลูอีน	ไซลีน	รวม
4.42	2.085	1.019	0.402	3.506	2.380 (+14.15)	0.668 (-34.45)	0.458 (+13.93)	3.506 (0.00)
5.50	2.085	1.019	0.402	3.506	2.204 (+5.71)	0.725 (-28.85)	0.573 (+42.54)	3.502 (-0.11)
7.13	2.085	1.019	0.402	3.506	1.959 (-6.04)	0.856 (-16.00)	0.687 (+70.90)	3.502 (-0.11)
9.83	2.085	1.019	0.402	3.506	1.792 (-14.53)	0.948 (-6.97)	0.762 (+89.55)	3.502 (-0.11)

หมายเหตุ : ร้อยละความคลาดเคลื่อน (ในวงเล็บ) คิดเปรียบเทียบกับกระแสขาเข้า

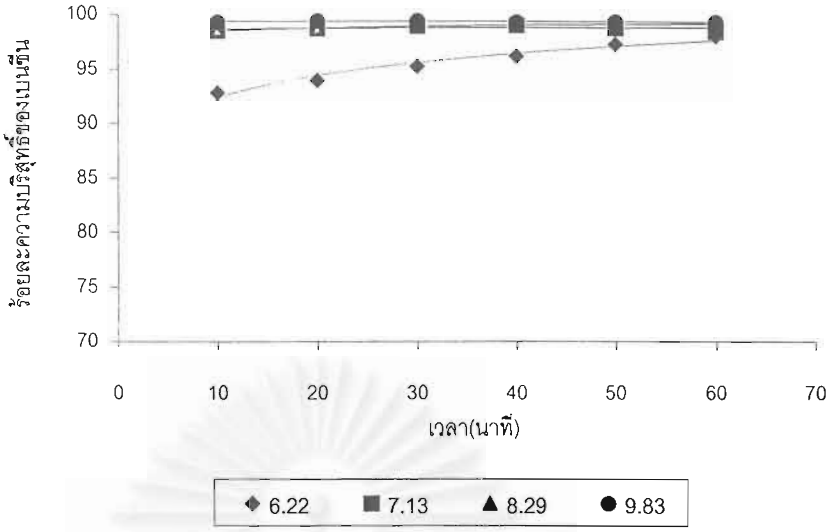
4.2 การศึกษาผลของอัตราการไหลของสารป้อน 2.630 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

นำสารป้อนจากตารางที่ 4.3 มาทดลองจำลองภาวะการณ์หอกลั่นแบบเบดบรรจุสำหรับกลั่นแยกเบนซีนด้วยโปรแกรม HYSYS ให้อัตราการไหลของสารป้อน 2.630 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ยอดหอ 1.564 กิโลกรัมต่อชั่วโมง คงที่ตลอดการประมวลผลข้อมูลโดยเปลี่ยนอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับเป็น 6.22 7.13 8.29 และ 9.83 ตามลำดับ ที่สถานะคงตัวผลที่ได้จากการจำลองภาวะการณ์แสดงดังตารางที่ 4.10 เมื่ออัตราส่วนการป้อนย้อนกลับเพิ่มขึ้นความบริสุทธิ์ของเบนซีนในผลิตภัณฑ์ยอดหอก็เพิ่มขึ้น จากการเปรียบเทียบอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับกับผลที่ได้จากการทดลองด้วยหอกลั่นขนาดขยายส่วน พบว่าเมื่ออัตราส่วนการป้อนย้อนกลับเพิ่มขึ้นความบริสุทธิ์ของเบนซีนในผลิตภัณฑ์ยอดหอก็เพิ่มขึ้นโดยมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับการจำลองภาวะการณ์ด้วยโปรแกรม HYSYS แสดงดังรูปที่ 4.2 (แสดงข้อมูลการทดลอง ภาคผนวก ง.) เหตุผลอธิบายได้ในทำนองเดียวกับหัวข้อที่ 4

ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบข้อมูลการจำลองภาวะการณ์หอกลั่นแบบเบดบรรจุสำหรับกลั่นแยกเบนซีนด้วยโปรแกรม HYSYS ที่อัตราการไหลของสารป้อนคงที่ 2.630 กิโลกรัมต่อชั่วโมง กับการทดลองหอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วน

อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ยอดหอ (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	อัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ	โปรแกรม HYSYS องค์ประกอบผลิตภัณฑ์ยอดหอ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			หอกลั่นขนาดขยายส่วน องค์ประกอบผลิตภัณฑ์ยอดหอ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
		เบนซีน	โทลูอีน	ไซลีน	เบนซีน	โทลูอีน	ไซลีน
1.564	6.22	99.14	0.86	0.00	98.08	1.92	0.00
	7.13	99.21	0.79	0.00	99.05	0.95	0.00
	8.29	99.28	0.72	0.00	99.22	0.78	0.00
	9.83	99.33	0.67	0.00	99.42	0.58	0.00

หมายเหตุ : จากโปรแกรม HYSYS ให้อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ยอดหอคงที่ 1.564 กิโลกรัมต่อชั่วโมง แล้วปรับอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ แต่จากการทดลองด้วยหอกลั่นขนาดขยายส่วนไม่สามารถปรับอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ยอดหอให้สอดคล้องกับโปรแกรม HYSYS ได้แต่สามารถปรับอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับให้สอดคล้องกับโปรแกรม HYSYS



รูปที่ 4.2 ความบริสุทธิ์ของเบนซีนในผลิตภัณฑ์ยอดหอจากการทดลองด้วยหอกลั่นขนาดขยายส่วนที่อัตราการไหลของสารป้อนคงที่ 2.630 กิโลกรัมต่อชั่วโมงโดยเปลี่ยนอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับเป็น 6.22 7.13 8.29 และ 9.83 ตามลำดับ

ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อลดอัตราการไหลของสารป้อนจะทำให้ความบริสุทธิ์ของเบนซีนเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบที่อัตราส่วนการป้อนย้อนกลับค่าเดียวกันแสดงดังตารางที่ 4.11 อธิบายได้ว่าเมื่ออัตราการไหลของสารป้อนลดลงเป็น 2.630 กิโลกรัมต่อชั่วโมง สารป้อนได้รับความร้อนอัตราการไหลของไอที่เกิดขึ้นก็จะลดลงด้วยดังนั้นไอจะมีเวลาอยู่ภายในหอกลั่นได้ยาวนานขึ้นซึ่งจะเป็นการเพิ่มอัตราการถ่ายโอนความร้อนและมวลสารในวัฏภาคไอและวัฏภาคของเหลวบนพื้นผิวสัมผัสของเบดบรรจุ ความบริสุทธิ์ของเบนซีนที่ได้ก็จะสูงกว่าที่อัตราการไหล 3.506 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการจำลองภาวะการณ์ด้วยโปรแกรม HYSYS ที่อัตราการไหลของสารป้อน 2.630 กิโลกรัมต่อชั่วโมง คืออัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ 9.83 ได้ความบริสุทธิ์ของเบนซีน โทลูอีน และไซลีนที่ผลิตภัณฑ์ยอดหอร้อยละ 99.33 0.67 และ 0.00 โดยน้ำหนักตามลำดับ และความบริสุทธิ์ของ เบนซีน โทลูอีน และไซลีนที่ผลิตภัณฑ์ก้นหอร้อยละ 0.97 70.71 และ 28.32 โดยน้ำหนักตามลำดับ (แสดงข้อมูลการทดลองภาคผนวก ข.)

ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทดลองด้วยหอกลั่นขนาดขยายส่วน คืออัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ 9.83 ได้ความบริสุทธิ์ของ เบนซีน โทลูอีน และไซลีนที่ผลิตภัณฑ์ยอดหอร้อยละ 99.42 0.58 และ 0.00 โดยน้ำหนักตามลำดับ และความบริสุทธิ์ของ เบนซีน โทลูอีน และไซลีนที่ผลิตภัณฑ์ก้นหอร้อยละ 32.17 45.56 และ 22.27 โดยน้ำหนักตามลำดับ (แสดงข้อมูลการทดลองภาคผนวก ง.)

ตารางที่ 4.11 เปรียบเทียบข้อมูลการทดลองหอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วนสำหรับกลั่นแยกเบนซีนอัตราการไหลของสารป้อนระหว่าง 3.506 และ 2.630 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

อัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ	อัตราการไหลของสารป้อน 3.506 กิโลกรัมต่อชั่วโมง			อัตราการไหลของสารป้อน 2.630 กิโลกรัมต่อชั่วโมง		
	องค์ประกอบผลิตภัณฑ์ยอดหอ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			องค์ประกอบผลิตภัณฑ์ยอดหอ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	เบนซีน	โทลูอีน	ไซลีน	เบนซีน	โทลูอีน	ไซลีน
9.83	98.83	1.17	0.00	99.42	0.58	0.00
8.29	-	-	-	99.22	0.78	0.00
7.13	98.79	1.21	0.00	99.05	0.95	0.00
6.22	-	-	-	98.08	1.92	0.00
5.50	98.42	1.58	0.00	-	-	-
4.42	95.13	4.78	0.09	-	-	-

จากการทดลองด้วยหอกลั่นขนาดขยายส่วนเมื่อระบบเข้าสู่สถานะคงตัวทำดุลมวลสารขององค์ประกอบแต่ละชนิดและดุลมวลสารรวมแสดงดังตารางที่ 4.12 จากการทำดุลมวลสารพบว่าในส่วนของกระแสขาเข้าและกระแสขาออกไม่ดุลมวลสารกันอาจเกิดเนื่องมาจาก

1. ความผิดพลาดในการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี
2. การที่สารอะโรมาติกส์เป็นสารระเหยง่ายทำให้ขั้นตอนการเก็บตัวอย่างเพื่อที่จะนำไปวิเคราะห์จึงเกิดความผิดพลาดได้
3. ในการทดลองหอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วนระบบที่เก็บตัวอย่างสำหรับที่จะนำไปวิเคราะห์ในส่วนของผลิตภัณฑ์ก้นหอยังไม่ดีเท่าที่ควร
4. ระบบอาจจะไม่อยู่ในสถานะคงตัวอย่างแท้จริง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.12 ข้อมูลแสดงการทำดุลมวลสารสำหรับกลั่นแยกเบนซีนจากการทดลองหอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วน ที่อัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ 6.22 7.13 8.29 และ9.83

อัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ	ดุลมวลสาร (หน่วย : กิโลกรัมต่อชั่วโมง)							
	กระแสขาเข้า				กระแสขาออก			
	เบนซีน	โทลูอีน	ไซลีน	รวม	เบนซีน	โทลูอีน	ไซลีน	รวม
6.22	1.564	0.764	0.302	2.630	1.833 (+17.20)	0.451 (-40.97)	0.346 (+14.57)	2.630 (0.00)
7.13	1.564	0.764	0.302	2.630	1.717 (+9.78)	0.509 (-33.38)	0.404 (+33.77)	2.630 (0.00)
8.29	1.564	0.764	0.302	2.630	1.647 (+5.31)	0.544 (-28.80)	0.438 (+45.03)	2.629 (-0.04)
9.83	1.564	0.764	0.302	2.630	1.553 (-0.70)	0.725 (-5.10)	0.351 (+16.23)	2.629 (-0.04)

หมายเหตุ : ร้อยละความคลาดเคลื่อน (ในวงเล็บ) คิดเปรียบเทียบกับกระแสขาเข้า

5. เตรียมสารป้อนให้เหมาะสมในการทดลองหอกลั่นแบบเบดบรรจุเพื่อกลั่นแยกโทลูอีน

เพื่อเป็นการประหยัดงบประมาณการลงทุนที่จะสร้างหอกลั่นขึ้นมาอีกหนึ่งหอสำหรับกลั่นแยกโทลูอีน จึงใช้หอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วนสำหรับกลั่นแยกเบนซีนที่ออกแบบและสร้างไว้แล้วมาทำการทดลอง โดยนำผลิตภัณฑ์ก้นหอที่ได้มาจากหอกลั่นสำหรับกลั่นแยกเบนซีนมาเป็นสารป้อนเพื่อใช้ในการกลั่นแยกโทลูอีน แต่เนื่องจากการทดลองของหอกลั่นขนาดขยายส่วนสำหรับกลั่นแยกเบนซีนมีข้อจำกัดทำให้ผลิตภัณฑ์ก้นหอยังคงมีปริมาณของเบนซีนที่สูง ดังนั้นจึงทดลองโดยทำการกลั่นแบบกะ (Batch Distillation) ป้อนผลิตภัณฑ์ก้นหอที่ได้เข้าไปในเครื่องต้มซ้ำ และกลั่นแยกเบนซีนที่เหลืออยู่ออกให้เหลือปริมาณน้อยที่สุด เพราะเบนซีนเป็นสารที่ระเหยง่ายถ้าเปรียบเทียบกับโทลูอีน และไซลีน ถ้าสารป้อนมีเบนซีนในปริมาณมากทำให้ความบริสุทธิ์ของโทลูอีนในผลิตภัณฑ์ยอดหอลดลง ผลจากการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 สารป้อนที่เหมาะสมสำหรับหอกลั่นแยกโทลูอีน (หน่วย : ร้อยละโดยน้ำหนัก)

องค์ประกอบ	สารป้อน
เบนซีน	3.38
โทลูอีน	59.94
ไซลีน	36.68
รวม	100.00

6. จำลองภาวะการณ์หอกลั่นแบบเบดบรรจุเพื่อกลั่นแยกโทลูอีนด้วยโปรแกรม HYSYS

นำสารป้อนจากตารางที่ 4.13 มาจำลองภาวะการณ์หอกลั่นแบบเบดบรรจุด้วยโปรแกรม HYSYS แต่เนื่องจากว่าต้องใช้หอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วนสำหรับกลั่นแยกเบนซีนที่ออกแบบและสร้างไว้แล้วมาทำการทดลอง ข้อมูลสำหรับการกำหนด Specification ในการทดลองหอกลั่นสำหรับกลั่นแยกโทลูอีนด้วยโปรแกรม HYSYS มีดังนี้

1. กำหนดอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ยอดหอ 2.081 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เหตุผลที่กำหนดเช่นนี้ เพราะต้องการที่จะดึงโทลูอีนที่อยู่ในสารป้อนออกมาทางผลิตภัณฑ์ยอดหอให้ได้มากที่สุด โดยที่จะให้เหลือโทลูอีนในผลิตภัณฑ์ก้นหอน้อยที่สุด โดยนำ mass fraction of Toluene คูณด้วย mass flow rate of Feed
2. กำหนดอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ 9.83

ผลที่ได้จากการจำลองภาวะการณ์ด้วยโปรแกรม HYSYS แสดงดังตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 ข้อมูลการจำลองภาวะการณ์หอกลั่นแบบเบดบรรจุสำหรับกลั่นแยกโทลูอีนด้วยโปรแกรม HYSYS

Conditions	Material Stream		
	Feed	Top Product	Bottom Product
Pressure (kPa)	101.325	101.325	101.325
Temperature (^{o}C)	60.000	107.600	135.000
Mass Flow (kg/h)	3.473	2.081	1.392
Liquid Volume Flow (Litre/h)	4.000	2.400	1.600

Components	Mass fraction		
	Feed	Top Product	Bottom Product
Benzene	0.0338	0.0564	0.0000
Toluene	0.5994	0.9416	0.0879
Xylene	0.3668	0.0020	0.9121
Total	1.0000	1.0000	1.0000

จากการศึกษาและจำลองภาวะการณ์หอกลั่นแบบเบดบรรจุด้วยโปรแกรม HYSYS ที่ระบบสถานะคงตัว (Steady State Mode) ภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือ อัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ 9.83 จำนวนชั้นทางทฤษฎี 12 ชั้น (นับตั้งแต่ชั้นที่ 1 ถึงเครื่องต้มซ้ำ) ชั้นที่ 8 เป็นชั้นป้อนสาร อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ยอดหอ 2.081 กิโลกรัมต่อชั่วโมง จะได้เบนซีน โทลูอีน และไซลีนที่ผลิต

ภัณฑ์ยอดหอร้อยละ 5.64 94.16 และ 0.2 โดยน้ำหนัก และความบริสุทธิ์ของเบนซีน โทลูอีน และไซลีนที่ผลิตภัณฑ์ก้นหอโดยเฉลี่ยร้อยละ 0.00 8.79 และ 91.21 โดยน้ำหนักตามลำดับ

7. การทดลองในหอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วนสำหรับกลั่นแยกโทลูอีน

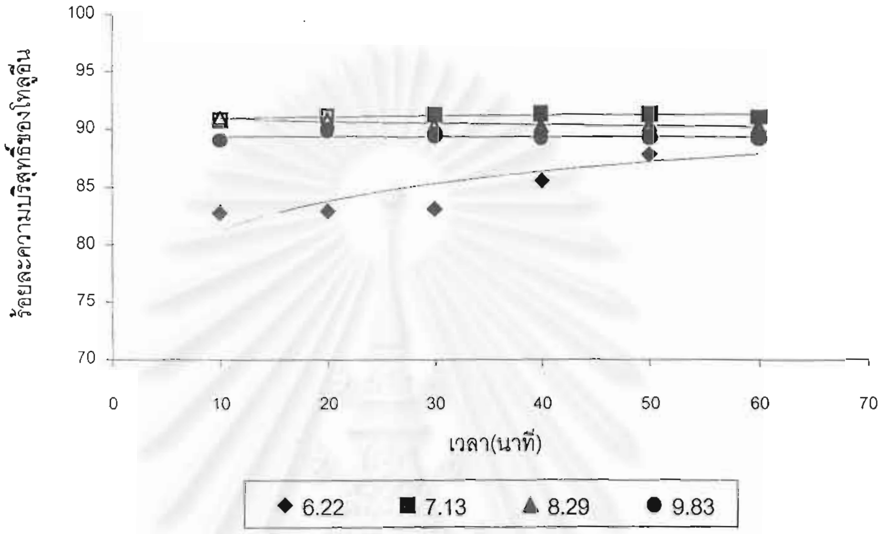
7.1 ศึกษาผลของอัตราการไหลของสารป้อน 3.473 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

นำสารป้อนจากตารางที่ 4.13 มาทดลองจำลองภาวะการณ์หอกลั่นแบบเบดบรรจุสำหรับกลั่นแยกโทลูอีนด้วยโปรแกรม HYSYS ให้อัตราการไหลของสารป้อน 3.473 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ยอดหอ 2.081 กิโลกรัมต่อชั่วโมง คงที่ตลอดการประมวลผลข้อมูลโดยเปลี่ยนอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับเป็น 4.42 5.50 7.13 และ 9.83 ตามลำดับ ที่สถานะคงตัวผลที่ได้จากการจำลองภาวะการณ์แสดงดังตารางที่ 4.15 เมื่ออัตราส่วนการป้อนย้อนกลับเพิ่มขึ้นความบริสุทธิ์ของโทลูอีนในผลิตภัณฑ์ยอดหอก็เพิ่มขึ้นเล็กน้อย จากการเปรียบเทียบอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับกับผลที่ได้จากการทดลองด้วยหอกลั่นขนาดขยายส่วน พบว่าเมื่ออัตราส่วนการป้อนย้อนกลับเพิ่มขึ้นความบริสุทธิ์ของโทลูอีนในผลิตภัณฑ์ยอดหอก็เพิ่มขึ้น และที่อัตราส่วนการป้อนย้อนกลับค่าหนึ่งความบริสุทธิ์ของโทลูอีนก็เริ่มลดลงแสดงดังรูปที่ 4.3 (แสดงข้อมูลการทดลองภาคผนวก จ.)

ตารางที่ 4.15 เปรียบเทียบข้อมูลการจำลองภาวะการณ์หอกลั่นแบบเบดบรรจุสำหรับกลั่นแยกโทลูอีน ด้วยโปรแกรม HYSYS ที่อัตราการไหลของสารป้อนคงที่ 3.473 กิโลกรัมต่อชั่วโมง กับการทดลองหอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วน

อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ยอดหอ (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	อัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ	โปรแกรม HYSYS องค์ประกอบผลิตภัณฑ์ยอดหอ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			หอกลั่นขนาดขยายส่วน องค์ประกอบผลิตภัณฑ์ยอดหอ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
		เบนซีน	โทลูอีน	ไซลีน	เบนซีน	โทลูอีน	ไซลีน
2.081	4.42	5.64	93.87	0.49	4.65	87.44	7.91
	5.50	5.64	94.00	0.36	5.01	90.33	4.67
	7.13	5.64	94.09	0.27	5.17	90.27	4.56
	9.83	5.64	94.16	0.20	5.53	90.24	4.23

หมายเหตุ : จากโปรแกรม HYSYS ให้อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ยอดหอคงที่ 2.081 กิโลกรัมต่อชั่วโมง แล้วปรับอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ แต่จากการทดลองด้วยหอกลั่นขนาดขยายส่วนไม่สามารถปรับอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ยอดหอให้สอดคล้องกับโปรแกรม HYSYS ได้แต่สามารถปรับอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับให้สอดคล้องกับโปรแกรม HYSYS



รูปที่ 4.3 ความบริสุทธิ์ของของโทลูอีนในผลิตภัณฑ์ยอดหอจากการทดลองด้วยหอกลั่นขนาดขยายส่วนที่อัตราการไหลของสารป้อนคงที่ 3.506 กิโลกรัมต่อชั่วโมงโดยเปลี่ยนอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับเป็น 4.42 5.50 7.13 และ 9.83 ตามลำดับ

ซึ่งอธิบายได้ว่าเนื่องจากการเพิ่มอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับเป็นการเพิ่มอัตราการถ่ายโอนความร้อนและมวลสารในวัฏภาคไอและวัฏภาคของเหลวบนพื้นผิวสัมผัสของเบดบรรจุโดยจะมีสภาพสมดุลกันระหว่างไอและของเหลวในแต่ละชั้นของหอกลั่น แต่เนื่องจากเบนซีนเป็นสารระเหยง่ายและจุดเดือดต่ำกว่าโทลูอีนและไซลีนอีกทั้งยังมีเบนซีนอยู่ในสารป้อนในปริมาณที่มากคือร้อยละ 3.38 โดยน้ำหนัก เมื่อได้รับความร้อนก็จะระเหยกลายเป็นไอออกไปจากพื้นผิวสัมผัสของเบดบรรจุจึงทำให้ ความบริสุทธิ์ของเบนซีนในผลิตภัณฑ์ยอดหอเพิ่มขึ้นซึ่งทำให้ความบริสุทธิ์ของโทลูอีนในผลิตภัณฑ์ยอดหอได้ไม่สูงเท่าที่ควร จากข้อมูลที่ได้จะเห็นว่าความบริสุทธิ์ของโทลูอีนที่ผลิตภัณฑ์ยอดหอจากการจำลองภาวะการณ์ด้วยโปรแกรม HYSYS กับการทดลองด้วยหอกลั่นขนาดขยายส่วนไม่มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน อาจจะเป็นเพราะส่วนหนึ่งเกิดจากความคลาดเคลื่อนในการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือแก๊สโครมาโทกราฟี จากการทดลองพบว่า

ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการจำลองภาวะการณ์ด้วยโปรแกรม HYSYS ที่อัตราการไหลของสารป้อน 3.473 กิโลกรัมต่อชั่วโมง คืออัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ 9.83 ได้ความบริสุทธิ์ของ

เบนซีน โทลูอีน และไซลีนที่ผลิตภัณฑ์ยอดหอร้อยละ 5.64 94.17 และ 0.20 โดยน้ำหนักตามลำดับ และความบริสุทธิ์ของเบนซีน โทลูอีน และไซลีนที่ผลิตภัณฑ์ก้นหอร้อยละ 0.00 8.79 และ 91.21 โดยน้ำหนักตามลำดับ (แสดงข้อมูลการทดลอง ภาคผนวก ช.)

ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทดลองด้วยหอกลั่นขนาดขยายส่วน คืออัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ 5.50 ได้ความบริสุทธิ์ของเบนซีน โทลูอีน และไซลีนที่ผลิตภัณฑ์ยอดหอร้อยละ 5.01 90.33 และ 4.67 โดยน้ำหนักตามลำดับ และความบริสุทธิ์ของเบนซีน โทลูอีน และไซลีนที่ผลิตภัณฑ์ก้นหอร้อยละ 0.00 27.67 และ 72.33 โดยน้ำหนักตามลำดับ (แสดงข้อมูลการทดลองภาคผนวก จ.)

จากการทดลองด้วยหอกลั่นขนาดขยายส่วนเมื่อระบบเข้าสู่สถานะคงตัวทำดุลมวลสารขององค์ประกอบแต่ละชนิดและดุลมวลสารรวมแสดงดังตารางที่ 4.16 จากการทำดุลมวลสารพบว่าในส่วนของกระแสขาเข้าและกระแสขาออกไม่ดุลมวลสารกันอาจเกิดเนื่องมาจาก

1. ความผิดพลาดในการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี
2. การที่สารอะโรมาติกส์เป็นสารระเหยง่ายทำให้ขั้นตอนการเก็บตัวอย่างเพื่อที่จะนำไปวิเคราะห์จึงเกิดความผิดพลาดได้
3. ในการทดลองหอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วนระบบที่เก็บตัวอย่างสำหรับที่จะนำไปวิเคราะห์ในส่วนของผลิตภัณฑ์ก้นหอยังไม่ดีเท่าที่ควร
4. ระบบอาจจะไม่อยู่ในสถานะคงตัวอย่างแท้จริง

ตารางที่ 4.16 ข้อมูลแสดงการทำดุลมวลสารสำหรับกลั่นแยกโทลูอีนจากการทดลองหอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วน ที่อัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ 4.42 5.50 7.13 และ9.83

อัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ	ดุลมวลสาร (หน่วย : กิโลกรัมต่อชั่วโมง)							
	กระแสขาเข้า				กระแสขาออก			
	เบนซีน	โทลูอีน	ไซลีน	รวม	เบนซีน	โทลูอีน	ไซลีน	รวม
4.42	0.117	2.082	1.274	3.473	0.097 (-17.09)	2.217 (+6.48)	1.159 (-9.03)	3.473 (0.00)
5.50	0.117	2.082	1.274	3.473	0.087 (-25.64)	2.049 (-1.59)	1.337 (+4.95)	3.473 (0.00)
7.13	0.117	2.082	1.274	3.473	0.076 (-35.04)	1.871 (-10.13)	1.526 (+19.78)	3.473 (0.00)
9.83	0.117	2.082	1.274	3.473	0.063 (-46.15)	1.712 (-17.77)	1.698 (+33.28)	3.473 (0.00)

หมายเหตุ : ร้อยละความคลาดเคลื่อน (ในวงเล็บ) คิดเปรียบเทียบกับกระแสขาเข้า

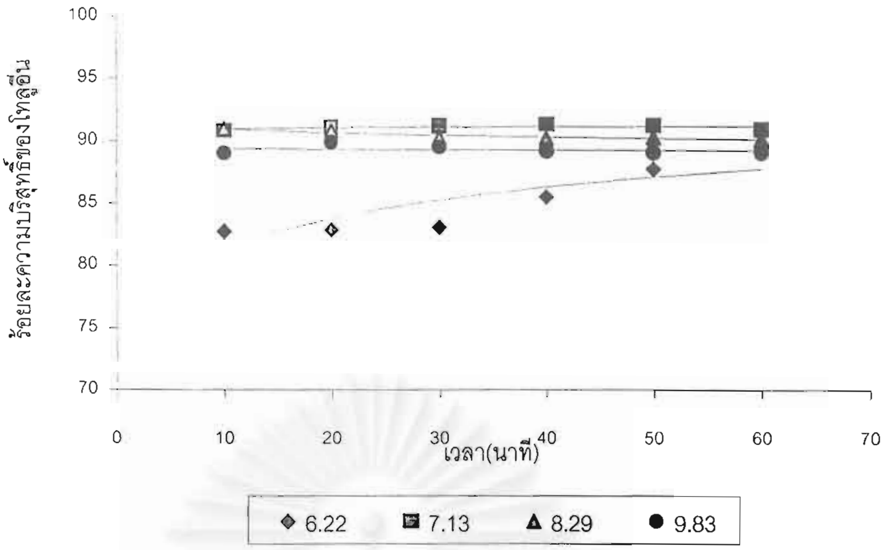
7.2 ศึกษาผลของอัตราการไหลของสารป้อน 2.605 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

นำสารป้อนจากตารางที่ 4.13 มาทดลองจำลองภาวะการณ์หอกลั่นแบบเบดบรรจุสำหรับกลั่นแยกโทลูอีนด้วยโปรแกรม HYSYS ให้อัตราการไหลของสารป้อน 2.605 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ยอดหอ 1.561 กิโลกรัมต่อชั่วโมง คงที่ตลอดการประมวลผลข้อมูลโดยเปลี่ยนอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับเป็น 6.22 7.13 8.29 และ 9.83 ตามลำดับ ที่สถานะคงตัวผลที่ได้จากการจำลองภาวะการณ์แสดงดังตารางที่ 4.17 เมื่ออัตราส่วนการป้อนย้อนกลับเพิ่มขึ้นความบริสุทธิ์ของโทลูอีนในผลิตภัณฑ์ยอดหอก็เพิ่มขึ้นเล็กน้อย จากการเปรียบเทียบอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับกับผลที่ได้จากการทดลองด้วยหอกลั่นขนาดขยายส่วน พบว่าเมื่ออัตราส่วนการป้อนย้อนกลับเพิ่มขึ้นค่าหนึ่งความบริสุทธิ์ของโทลูอีนก็เริ่มลดลง แสดงดังรูปที่ 4.4 (แสดงข้อมูลการทดลองภาคผนวก ฉ.) ซึ่งอธิบายได้ในทำนองเดียวกับหัวข้อที่ 8.

ตารางที่ 4.17 เปรียบเทียบข้อมูลการจำลองภาวะการณ์หอกลั่นแบบเบดบรรจุสำหรับกลั่นแยกโทลูอีน ด้วยโปรแกรม HYSYS ที่อัตราการไหลของสารป้อนคงที่ 2.605 กิโลกรัมต่อชั่วโมง กับการทดลองหอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วน

อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ยอดหอ (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	อัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ	โปรแกรม HYSYS องค์ประกอบผลิตภัณฑ์ยอดหอ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			หอกลั่นขนาดขยายส่วน องค์ประกอบผลิตภัณฑ์ยอดหอ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
		เบนซีน	โทลูอีน	ไซลีน	เบนซีน	โทลูอีน	ไซลีน
1.561	6.22	5.64	94.05	0.31	5.85	89.56	4.59
	7.13	5.64	94.09	0.27	6.77	91.01	2.22
	8.29	5.64	94.13	0.23	7.32	90.27	2.41
	9.83	5.64	94.16	0.20	9.26	89.16	1.58

หมายเหตุ : จากโปรแกรม HYSYS ให้อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ยอดหอคงที่ 1.561 กิโลกรัมต่อชั่วโมง แล้วปรับอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ แต่จากการทดลองด้วยหอกลั่นขนาดขยายส่วนไม่สามารถปรับอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ยอดหอให้สอดคล้องกับโปรแกรม HYSYS ได้แต่สามารถปรับอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับให้สอดคล้องกับโปรแกรม HYSYS



รูปที่ 4.4 ความบริสุทธิ์ของของโทลูอีนในผลิตภัณฑ์ยอดหอจากการทดลองด้วยหอกลั่นขนาดขยายส่วนที่อัตราการไหลของสารป้อนคงที่ 2.605 กิโลกรัมต่อชั่วโมงโดยเปลี่ยนอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับเป็น 6.22 7.13 8.29 และ 9.83 ตามลำดับ

ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อลดอัตราการไหลของสารป้อนจะทำให้ความบริสุทธิ์ของเบนซีนที่อยู่ในสารป้อนเพิ่มขึ้น และความบริสุทธิ์ของโทลูอีนในผลิตภัณฑ์ยอดหอลดลง เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับค่าเดียวกัน แสดงดังตารางที่ 4.18 อธิบายได้ว่าที่อัตราการไหลของสารป้อนลดลงเป็น 2.605 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เมื่อสารป้อนได้รับความร้อนอัตราการไหลของไอที่เกิดขึ้นจะลดลง ดังนั้นไอจะมีเวลาอยู่ภายในหอกลั่นได้นานขึ้นซึ่งจะเป็นการเพิ่มอัตราการถ่ายโอนความร้อนและมวลสารในวัฏภาคไอและวัฏภาคของเหลวบนพื้นผิวสัมผัสของเบดบรรจุ จึงทำให้ความบริสุทธิ์ของเบนซีนในผลิตภัณฑ์ยอดหอเพิ่มขึ้นสูงกว่าที่อัตราการไหล 3.473 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ส่งผลให้ความบริสุทธิ์ของโทลูอีนในผลิตภัณฑ์ยอดหอจึงได้ไม่สูงเท่าที่ควร เพราะมีปริมาณเบนซีนอยู่ในสารป้อนมากเกินไป จากการทดลองพบว่า

ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการจำลองภาวะการณ์ด้วยโปรแกรม HYSYS ที่อัตราการไหลของสารป้อน 2.605 กิโลกรัมต่อชั่วโมง คืออัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ 9.83 ได้ความบริสุทธิ์ของเบนซีน โทลูอีน และไซลีนที่ผลิตภัณฑ์ยอดหอร้อยละ 5.64 94.16 และ 0.20 โดยน้ำหนักตามลำดับ และความบริสุทธิ์ของเบนซีน โทลูอีน และไซลีนที่ผลิตภัณฑ์ก้นหอร้อยละ 0.00 8.76 และ 91.23 โดยน้ำหนักตามลำดับ (แสดงข้อมูลการทดลองภาคผนวก ช.)

ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทดลองด้วยหอกลั่นขนาดขยายส่วน คืออัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ 7.13 ได้ความบริสุทธิ์ของเบนซีน โทลูอีน และไซลีนที่ผลิตภัณฑ์ยอดหอร้อยละ 6.77 91.01 และ 2.22 โดยน้ำหนักตามลำดับ และความบริสุทธิ์ของเบนซีน โทลูอีน และไซลีนที่ผลิตภัณฑ์ก้นหอร้อยละ 0.00 41.38 และ 58.62 โดยน้ำหนักตามลำดับ (แสดงข้อมูลการทดลองภาคผนวก ฉ.)

ตารางที่ 4.18 เปรียบเทียบข้อมูลการทดลองหอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วนสำหรับกลั่นแยกโทลูอีนอัตราการไหลของสารป้อนระหว่าง 3.473 และ 2.605 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

อัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ	อัตราการไหลของสารป้อน 3.473 กิโลกรัมต่อชั่วโมง องค์ประกอบผลิตภัณฑ์ยอดหอ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)			อัตราการไหลของสารป้อน 2.605 กิโลกรัมต่อชั่วโมง องค์ประกอบผลิตภัณฑ์ยอดหอ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)		
	เบนซีน	โทลูอีน	ไซลีน	เบนซีน	โทลูอีน	ไซลีน
4.42	4.65	87.44	7.91	-	-	-
5.50	5.01	90.33	4.67	-	-	-
6.22	-	-	-	5.85	89.56	4.59
7.13	5.17	90.27	4.56	6.77	91.01	2.22
8.29	-	-	-	7.32	90.27	2.41
9.83	5.53	90.24	4.23	9.26	89.16	1.58

จากการทดลองด้วยหอกลั่นขนาดขยายส่วนเมื่อระบบเข้าสู่สถานะคงตัวทำดุลมวลสารขององค์ประกอบแต่ละชนิดและดุลมวลสารรวมแสดงดังตารางที่ 4.19 จากการทำดุลมวลสารพบว่าในส่วนของกระแสขาเข้าและกระแสขาออกไม่ดุลมวลสารกันอาจเกิดเนื่องมาจาก

1. ความผิดพลาดในการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี
2. การที่สารอะโรมาติกส์เป็นสารระเหยง่ายทำให้ขั้นตอนการเก็บตัวอย่างเพื่อที่จะนำไปวิเคราะห์จึงเกิดความผิดพลาดได้
3. ในการทดลองหอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วนระบบที่เก็บตัวอย่างสำหรับที่จะนำไปวิเคราะห์ในส่วนของผลิตภัณฑ์ก้นหอยังไม่ดีเท่าที่ควร
4. ระบบอาจจะไม่อยู่ในสถานะคงตัวอย่างแท้จริง

ตารางที่ 4.19 ข้อมูลแสดงการทำดุลมวลสารสำหรับกลั่นแยกโทลูอีนจากการทดลองหอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วน ที่อัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ 6.22 7.13 8.29 และ9.83

อัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ	ดุลมวลสาร (หน่วย : กิโลกรัมต่อชั่วโมง)							
	กระแสขาเข้า				กระแสขาออก			
	เบนซีน	โทลูอีน	ไซลีน	รวม	เบนซีน	โทลูอีน	ไซลีน	รวม
6.22	0.089	1.561	0.955	2.605	0.091 (+2.25)	1.824 (+16.85)	0.689 (-27.85)	2.604 (-0.04)
7.13	0.089	1.561	0.955	2.605	0.094 (+5.62)	1.767 (+13.20)	0.743 (-22.20)	2.604 (-0.04)
8.29	0.089	1.561	0.955	2.605	0.089 (0.00)	1.663 (+6.53)	0.853 (-10.68)	2.605 (0.00)
9.83	0.089	1.561	0.955	2.605	0.096 (+7.87)	1.598 (+2.37)	0.910 (-4.71)	2.604 (-0.04)

หมายเหตุ : ร้อยละความคลาดเคลื่อน (ในวงเล็บ) คิดเปรียบเทียบกับกระแสขาเข้า

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5
สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากงานวิจัยเรื่อง "การแยกสารอะโรมาติกส์จากไพโรไลซิสแก๊สโซลีนโดยการสกัดด้วยตัวทำละลาย" (สมพงษ์, 2539) เพื่อแยกสารอะโรมาติกส์ได้แก่ เบนซีน โทลูอีน และไซลีนสำหรับใช้เป็นวัตถุดิบมูลฐานในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ศึกษาในเครื่องสกัดแบบจานหมุนระบบป้อนต่อเนื่องโดยใช้สารป้อนเป็นไพโรไลซิสแก๊สโซลีนและซัลโฟเลนเป็นตัวทำละลายในการสกัด จากภาวะที่เหมาะสมคือ อัตราการไหลของตัวทำละลาย 200 กรัมต่อนาที อัตราการไหลของสารป้อน 60 กรัมต่อนาทีคิดเป็นอัตราส่วนสารป้อนต่อตัวทำละลาย 1:3.33 โดยน้ำหนัก ความเร็วรอบมอเตอร์ 600 รอบต่อนาที จากการทดลองพบว่าสามารถสกัดสารอะโรมาติกส์ได้ร้อยละ 96 โดยน้ำหนัก และในส่วนที่สกัดได้มีสารอะโรมาติกส์และสารนอน-อะโรมาติกส์อยู่ร้อยละ 95.42 และ 4.58 โดยน้ำหนักตามลำดับ สำหรับงานวิจัยครั้งนี้เป็นการทำงานวิจัยอย่างต่อเนื่อง เพื่อศึกษาการออกแบบและสร้างหอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วนสำหรับการแยกเบนซีน โทลูอีน และไซลีนจากไพโรไลซิสแก๊สโซลีน โดยใช้ข้อมูลการจำลองภาวะการณ์ในหอกลั่นแบบเบดบรรจุด้วยโปรแกรม HYSYS เพื่อกลั่นแยก เบนซีน โทลูอีน และไซลีนแต่ละชนิดให้มีความบริสุทธิ์สูง

หอกลั่นแบบเบดบรรจุที่ได้ออกแบบมีข้อมูลแสดงดังนี้

1. หอกลั่นแบบเบดบรรจุ มีจำนวนชั้นทางทฤษฎี 12 ชั้น (นับตั้งแต่ชั้นที่ 1 ถึง เครื่องต้มซ้ำ) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.0 ซม. หนา 3.0 มม. ความสูงของเบดบรรจุ 183 ซม. ความสูงเทียบเท่าหนึ่งชั้นทางทฤษฎี 16.6 ซม.

2. เครื่องควบแน่น เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อ ชนิดแผ่นยึดท่ออยู่กับที่ แบบหนึ่งทางเดินเชลล์และสองทางเดินท่อ แบ่งเป็น 2 ส่วนดังนี้

   2.1 เครื่องควบแน่นบางส่วน เส้นผ่านศูนย์กลางด้านเชลล์ 17 ซม. ท่อขนาด 1.59 ซม. ความยาว 60 ซม. 48 ท่อ

   2.2 เครื่องควบแน่นทั้งหมด เส้นผ่านศูนย์กลางด้านเชลล์ 27 ซม.ท่อขนาด 1.91 ซม. ความยาว 80 ซม. 82 ท่อ

3. เครื่องต้มซ้ำ เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อ ชนิดแผ่นยึดท่ออยู่กับที่แบบหนึ่งทางเดินเชลล์และหนึ่งทางเดินท่อ เส้นผ่านศูนย์กลางด้านเชลล์ 28.0 ซม.ท่อขนาด 2.54 ซม.ความยาว 80 ซม. 52 ท่อ

หอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วนที่ถูกออกแบบขึ้นมามีระบบให้ความร้อนในส่วนของเครื่องต้มซ้ำ โดยใช้น้ำมันให้ความร้อนควบคุมอุณหภูมิในส่วนก้นหอด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิแบบดิจิตอล ขนาดของหอกลั่นที่ออกแบบสามารถรองรับสารป้อนด้วยอัตราการไหล 4.0 ลิตรต่อชั่วโมง หรือ 3.506 กิโลกรัมต่อชั่วโมง นำส่วนที่สกัดได้ (สมพงษ์, 2539) ในเครื่องสกัดแบบจานหมุนมาเป็นสารป้อน ซึ่งมีปริมาณของสารอะโรมาติกส์และสารนอน-อะโรมาติกส์คิดเป็นร้อยละ 95.42 และ 4.58 โดยน้ำหนักตามลำดับ แต่เนื่องจากตัวทำละลายซัลโฟเลนมีปริมาณไม่เพียงพอที่ใช้ในการสกัดสารอะโรมาติกส์ออกจากไพโรไลซิสแก๊สโซลีน ดังนั้นจึงขอความอนุเคราะห์สารอะโรมาติกส์ส่วนที่สกัดได้จาก บริษัท อะโรเมติกส์ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน) มาผสมกับเบนซีนบริสุทธิ์ ไซลีนบริสุทธิ์ ในอัตราส่วน 1 : 1 : 0.5 ตามลำดับ เพื่อให้ได้สารป้อนที่มีองค์ประกอบใกล้เคียงกับส่วนที่สกัดได้ นำสารป้อนมาทดลองที่ภาวะต่างๆ ในหอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วนให้สอดคล้องกับการจำลองภาวะการณ์ด้วยโปรแกรม HYSYS แล้วเปรียบเทียบความบริสุทธิ์ของสารอะโรมาติกส์ที่กลั่นแยกได้จากทั้งสองวิธี ในการแยกสารเบนซีน โทลูอีน และไซลีนออกจากกันจำเป็นต้องใช้หอกลั่นอย่างน้อยสองหอโดยแบ่งออกเป็น 1.หอกลั่นสำหรับกลั่นแยกเบนซีน 2.หอกลั่นสำหรับกลั่นแยกโทลูอีน เพื่อเป็นการประหยัดงบประมาณการลงทุนที่จะสร้างหอกลั่นขึ้นมาอีกหนึ่งหอสำหรับกลั่นแยกโทลูอีน จึงใช้หอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วนสำหรับกลั่นแยกเบนซีนที่ออกแบบและสร้างไว้แล้วมาทำการทดลอง โดยนำผลิตภัณฑ์ก้นหอที่ได้มาจากหอกลั่นสำหรับกลั่นแยกเบนซีนมาเป็นสารป้อนเพื่อใช้ในการกลั่นแยกโทลูอีน ตัวแปรที่ศึกษาได้แก่ อัตราการไหลของสารป้อน และอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ จากโปรแกรม HYSYS ให้อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ยอดหอคงที่แล้วปรับอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ แต่จากการทดลองด้วยหอกลั่นขนาดขยายส่วนไม่สามารถปรับอัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ยอดหอให้สอดคล้องกับโปรแกรม HYSYS ได้แต่สามารถปรับอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับให้สอดคล้องกับโปรแกรม HYSYS

จากผลการศึกษาอัตราการไหลของสารป้อนพบว่า เมื่ออัตราการไหลของสารป้อนลดลงจะทำให้ความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ยอดหอเพิ่มขึ้น เนื่องจากว่าไอที่เกิดขึ้นจะมีเวลาอยู่ภายในหอกลั่นได้นานซึ่งเป็นการเพิ่มอัตราการถ่ายโอนความร้อนและมวลสารในวัฏภาคไอและวัฏภาคของเหลวบนพื้นผิวสัมผัสของเบดบรรจุให้ดีขึ้น

จากผลการศึกษาอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับพบว่า เมื่ออัตราส่วนการป้อนย้อนกลับเพิ่มขึ้นความบริสุทธิ์ของสารระเหยง่ายในส่วนของผลิตภัณฑ์ยอดหอเพิ่มขึ้น เนื่องจากว่าการเพิ่มอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับจะเป็นการเพิ่มอัตราการถ่ายโอนความร้อนและมวลสารในวัฏภาคไอและวัฏภาคของเหลวบนพื้นผิวสัมผัสของเบดบรรจุ

สำหรับการทดลองในหอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วนสำหรับกลั่นแยกโทลูอีน พบว่าความบริสุทธิ์ของ โทลูอีนในส่วนของผลิตภัณฑ์ยอดหอได้ไม่สูงมากเท่าที่ควร เนื่องจากสารป้อนที่ใช้ในการทดลองมีปริมาณของสารเบนซีนอยู่มาก จึงทำให้มีสารเบนซีนออกมาในผลิตภัณฑ์ยอดหอด้วย

จากการเปรียบเทียบความบริสุทธิ์ของสารอะโรมาติกส์ที่กลั่นแยกได้ โดยการจำลองภาวะการณ์ด้วยโปรแกรม HYSYS กับหอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วนที่ภาวะเดียวกัน พบว่าความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ยอดหอที่ได้จากโปรแกรม HYSYS มีค่าสูงกว่าหอกลั่นขนาดขยายส่วน เหตุผลแสดงดังตารางต่อไปนี้

การจำลองภาวะการณ์ด้วยโปรแกรม HYSYS	หอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วน
ผลิตภัณฑ์ยอดหอที่กลั่นได้และถูกป้อนกลับไปภายในหอกลั่นจะไปเคลือบที่ผิวของเบดบรรจุ ได้หมดครบทุกเบดที่บรรจุอยู่ภายในหอกลั่น จะไม่เกิดปรากฏการณ์ Channelling วัฏภาคไอกับวัฏภาคของเหลวสัมผัสกันบนผิวของเบดบรรจุเป็นอย่างดี อีกทั้งความหนาของฟิล์มที่ไปเคลือบบนผิวของเบดบรรจุจะหนาเท่ากันทุกเบดโดยถูกคำนวณไว้แล้วในทางทฤษฎี ดังนั้นถ้าเปรียบเทียบอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับที่ภาวะเดียวกันกับการทดลองจริง ความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ยอดหอที่ได้จากทางทฤษฎีมักมีค่าสูงกว่าของจริงเสมอ	ผลิตภัณฑ์ยอดหอที่กลั่นได้และถูกป้อนกลับไปภายในหอกลั่นจะไปเคลือบที่ผิวของเบดบรรจุได้ไม่หมดทุกเบดที่บรรจุอยู่ภายในหอกลั่น อาจเกิดปรากฏการณ์ Channelling ทำให้วัฏภาคไอกับวัฏภาคของเหลวสัมผัสกันบนผิวของเบดบรรจุได้บางส่วน อีกทั้งความหนาของฟิล์มที่ไปเคลือบบนผิวของเบดบรรจุมีความหนาไม่เท่ากับทางทฤษฎี และหนาไม่เท่ากันทุกเบด ความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ยอดหอที่ได้มักมีค่าต่ำกว่าจากทางทฤษฎีเสมอ

การทดลองหอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วนสำหรับกลั่นแยกเบนซีน

ภาวะที่เหมาะสมในการกลั่นแยกเบนซีนคือ อัตราการไหลของสารป้อน 3.0 ลิตรต่อชั่วโมง หรือ 2.630 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ 9.83 ได้ความบริสุทธิ์ของเบนซีน โทลูอีน และไซลีนในผลิตภัณฑ์ยอดหอร้อยละ 99.42 0.58 และ 0.00 โดยน้ำหนักตามลำดับ มีเบนซีน โทลูอีน และไซลีนเหลือในผลิตภัณฑ์ก้นหอร้อยละ 32.17 45.56 และ 22.27 โดยน้ำหนักตามลำดับ ประสิทธิภาพรวมของหอกลั่นสำหรับกลั่นแยกเบนซีนคิดเป็น 93.37 %

การทดลองหอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วนสำหรับกลั่นแยกโทลูอีน

ภาวะที่เหมาะสมในการกลั่นแยกโทลูอีนคือ อัตราการไหลของสารป้อน 3.0 ลิตรต่อชั่วโมง หรือ 2.605 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ 7.13 ได้ความบริสุทธิ์ของ เบนซีน โทลูอีน และไซลีนในผลิตภัณฑ์ยอดหอร้อยละ 6.77 91.01 และ 2.22 โดยน้ำหนักตามลำดับ มีเบนซีน โทลูอีนและไซลีนเหลือในผลิตภัณฑ์ก้นหอร้อยละ 0.00 41.38 และ 58.62 โดยน้ำหนักตามลำดับ ประสิทธิภาพรวมของหอกลั่นสำหรับกลั่นแยกโทลูอีนคิดเป็น 68.11 %

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรออกแบบและติดตั้งเครื่องวัดอัตราการไหลของสารป้อน โดยควรจะวัดอัตราการไหลของสารป้อนตรงตำแหน่งก่อนเข้าเครื่องควบแน่นบางส่วน เพราะว่าสารป้อนหลังออกจากเครื่องควบแน่นบางส่วนแล้วบางครั้งจะได้รับความร้อนกลายเป็นไอบางส่วนและเกิดฟองอากาศทำให้ไปขัดขวางการทำงานของลูกลอยจึงเกิดความผิดพลาดในการอ่านระดับของอัตราการไหล

2. ควรจะเลือกซื้อเครื่องวัดอัตราการไหลที่มีขนาดสเกลละเอียดในการอ่านค่าจะทำให้ความผิดพลาดในการวัดอัตราการไหลน้อยลง เพราะว่าในการทดลองใช้อัตราการไหลที่น้อยมาก

3. เครื่องต้มซ้ำที่ในการทดลองหอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วนเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อ ชนิดแผ่นยึดท่ออยู่กับที่ในแนวดิ่ง แบบหนึ่งทางเดินเชลล์และหนึ่งทางเดินท่อ ซึ่งเป็นระบบที่ทำให้เก็บตัวอย่างผลิตภัณฑ์ก้นหอสำหรับนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบต่างๆ ยังไม่ดีมีความคลาดเคลื่อนสูง ควรที่จะเปลี่ยนระบบเป็นเครื่องต้มซ้ำแบบมาตรฐานหรือแบบการต้มน้ำ (Kettle type) ซึ่งเป็นระบบที่จะทำให้สามารถเก็บตัวอย่างผลิตภัณฑ์ก้นหอสำหรับนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบต่างๆ มีความเคลื่อนน้อยลง

4. เนื่องจากเวลาที่ปล่อยให้ระบบเข้าสู่สถานะคงตัวน้อยเกินไป ส่งผลให้ระบบอาจจะไม่อยู่ในสถานะคงตัวอย่างแท้จริงการทำดุลมวลสารจึงมีค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนมาก

5. ระบบที่ให้ความร้อนแก่เครื่องต้มซ้ำเป็นน้ำมันให้ความร้อนซึ่งจัดว่ายังไม่ดีพอ จึงทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการให้ออกทางยอดหอยังคงตกค้างอยู่ในส่วนผลิตภัณ์ก้นหอในปริมาณที่มาก ควรที่จะเปลี่ยนระบบการให้ความร้อน เป็นขดลวดให้ความร้อนที่มีโลหะปกคลุมขดลวดเพื่อป้องการมิให้ขดลวดสัมผัสกับสารป้อนโดยตรงแทนการใช้น้ำมันให้ความร้อน

6. เนื่องจากสารอะโรมาติกส์เป็นสารที่ระเหยง่ายและเป็นอันตรายอย่างร้ายแรงเมื่อได้รับการสัมผัสหรือสูดดมเข้าสู่ร่างกาย จึงควรหลีกเลี่ยงโดยการใช้หน้ากากป้องกันสารพิษเพื่อความปลอดภัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กัญจนา บุณยเกียรติ. การคำนวณขั้นต้นในวิชาวิศวกรรมเคมี. 3,000 เล่ม. พิมพ์ครั้งที่ 3. โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2536.

บริษัท อะโรเมติกส์ (ประเทศไทย) จำกัด (มหาชน). รายงานประจำปี.1-59., 2539.

ปฏิพัทธ์ ฉายาพันธุ์. การผลิตสารเบนซีน โทลูอีน และไซลีนจากคอนเดนเสต โดยกระบวนการแพลทฟอร์มมิง. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,2536.

ปิยะสาร ประเสริฐธรรม. หลักการออกแบบเครื่องมือแยกสาร. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2530.

พรสวรรค์ พรมมาตย์. อะโรมาไทเซชันของของเหลวแก๊สธรรมชาติโดยตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดแพลทินัมโด๊ปด้วยฟลูออไรด์. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.

วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล. อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในอุตสาหกรรม.1,000 เล่ม.พิมพ์ครั้งที่ 1. บริษัท ส.เอเซียเพรส (1989) จำกัด : 2536.

วีรพจน์ ลือประสิทธิ์สกุล. วิศวกรรมการกลั่น จากห้องทดลองถึงโรงงาน. 1,000 เล่ม. พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักพิมพ์โครงการสนับสนุนเทคนิคอุตสาหกรรม, 2538.

สมพงษ์ พรพิสุทธิมาศ. การแยกสารอะโรมาติกส์จากไพโรไลซิสแก๊สโซลีนโดยการสกัดด้วยตัวทำละลาย. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.

ภาษาอังกฤษ

Bailes, P.J., Hanson, C., Hughes, M.A., and Pratt, M.W.T.Extraction, liquid-liquid. In J.J. Mcketta (ed.), Unit operations handbook: Vol.1 mass transfer.(1993) pp.582-687.New York: Marcel Dekker

B.Demirel, W.H Wiser, A.G.Oblad, W.Zmierczak and J.Shabtai. Production of High Octane Gasoline Component by Hydroprocessing of Coal-Derived Aromatic Hydrocarbon. Fuel, 77(1998): 301-311.

Cines, M.R. Extractive Distillation, United States Patent 4,053,369: 1977.

Cheng and W.L. Luyben, Ind. Eng. Chem. Process Des. & Devel. 24(1985): 707.

Ernest E. Ludwig. Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants, Vol.3.2nd edition. 1983, pp.1-200.

E.C. Haun, M.W. Golem, P.P. Piotrowski and S. Sapuntzakis, The Modern Aromatics Complex and Revamp Options for Existing Plants. presented at the 1988 UOP Technology Conference.

Hyprotech Ltd. HYSIM User's Guide. Canada: 1993.

Lee, F.M.; Coomb, D.M. Two-Liquid-Phase Extractive Distillation for Aromatics Recovery. Ind.Eng.Chem.Res. 26 (1987): 3, 564-573.

Lee, F. M.; Coomb, D. M. Two-Liquid-Phase Extractive Distillation for Upgrading the Octane Number of the Catalytically Cracked Gasoline. Ind.Eng.Chem.Res. 26(1988): 26, 118-123.

Lindstrom, M., and William, R. Sulfolanes and sulfones. Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology. 9(1980): 961-968.

Perry, R.H., and D.W. Green (editors). Chemical Engineers Handbook, 7th edition, McGraw-Hill, 1997.

Reissinger, K. H., and Schroter. J. Selection criteria for liquid-liquid extractors. Chemical Engineering. 85(1978): 25, 109-118.

R.K. Sinnott. Chemical Engineering Vol.6. 4th edition.: Pergamon press, 1993.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

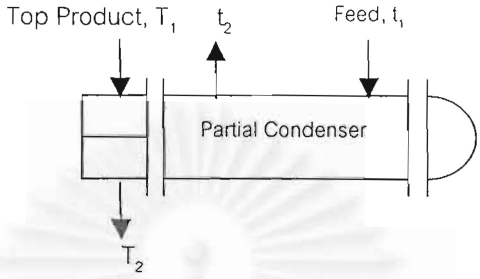
ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ตัวอย่างการคำนวณ

1. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนบางส่วน (R.K. Sinnott, 1993)



ของไหลในท่อ (ผลิตภัณฑ์ยอดหอ)

อุณหภูมิขาเข้า	=	81	^{o}C	
อุณหภูมิขาออก	=	78	^{o}C	
อัตราการไหล	=	9	kg/hr	(ไอ)
	=	12	litre/hr	(ไอ)

ของไหลในเชลล์ (สารป้อน)

อุณหภูมิขาเข้า	=	27	^{o}C	
อุณหภูมิขาออก	=	77.91	^{o}C	
อัตราการไหล	=	3.5	kg/hr	(ของเหลว)
	=	4.0	litre/hr	(ของเหลว)

ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของผลิตภัณฑ์ยอดหอ(เบนซีน) = 90 kcal/kg

สมมุติ เครื่องควบแน่นบางส่วน

ควบแน่นเป็นของเหลวบางส่วน = 11% = 0.99 kg/hr

ไอบางส่วนที่ไม่ได้ควบแน่น = 89% = 8.01 kg/hr

Heat-Duty = 0.99×90 = 89.10 kcal/hr

= 103.53 Watt

คำนวณอุณหภูมิที่ทางออกของไหลในเชลล์

$$Q = mC_p(t_2 - t_1) \qquad \text{กำหนด} \quad C_p = 0.5 \text{ kcal/kg.}^{\circ}\text{C}$$

$$t_2 = \frac{89.10}{3.5 \times 0.5} + 27 \qquad = 77.91 \ ^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T_{ln} = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \frac{(T_1 - t_2)}{(T_2 - t_1)}} = \frac{(81 - 77.91) - (78 - 27)}{\ln \frac{(81 - 77.91)}{(78 - 27)}} = 17.08$$

$$S = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} = \frac{77.91 - 27}{81 - 27} = 0.94$$

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} = \frac{81 - 78}{77.91 - 27} = 0.06$$

$$\Delta T_m = F_t \Delta T_{ln}$$

จากรูปที่ ก.1 จะได้ว่า

F_t = 0.95

ΔT_m = 0.95x17.08 = 16.23 $^{\circ}$C

ตารางที่ ก.1 แสดงคุณสมบัติทางกายภาพของของไหลทางด้านเชลล์และทางด้านท่อ

ของไหลด้านท่อ	ขาเข้า	เฉลี่ย	ขาออก	หน่วย
อุณหภูมิ (T)	81	79.5	78	$^{\circ}$C
ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (C_p)	2.00	1.95	1.90	kJ/kg.K
ค่าการนำความร้อน (k)	0.12	0.13	0.13	W/m.K
ความหนาแน่น (ρ)	800	804	808	kg/m^3
ความหนืด (μ)	0.26	0.28	0.30	mNs/m^2

ของไหลด้านเชลล์	ขาเข้า	เฉลี่ย	ขาออก	หน่วย
อุณหภูมิ (T)	27	52.46	77.91	$^{\circ}$C
ความจุความร้อนจำเพาะ (C_p)	1.70	1.81	1.92	kJ/kg.K
ความนำความร้อน (k)	0.14	0.13	0.12	W/m.K
ความหนาแน่น (ρ)	870	838	805	kg/m^3
ความหนืด (μ)	0.55	0.43	0.30	mNs/m^2

สมมุติ ให้สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวมมีค่าเท่ากับ = 14 W/m^2.K

เลือกใช้จำนวนเที่ยวการไหลในท่อ 2 เที่ยว และจำนวนเที่ยวการไหลในเชลล์ 1 เที่ยว

(1 Shell pass and 2 Tube pass)

พื้นที่ถ่ายโอนความร้อน

$$Q = U_0 A_0 \Delta T_m$$

$$A_0 = \frac{103.53}{14 \times 16.23} = 0.46 \text{ m}^2$$

การจัดเรียงท่อและกำหนดขนาดด้านท่อ

เส้นผ่านศูนย์กลางด้านนอก (d_0) = 15.88 มิลลิเมตร

เส้นผ่านศูนย์กลางด้านใน (d_i) = 14.68 มิลลิเมตร

ความยาว = 0.60 เมตร

เรียงท่อเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า ความยาวของด้านหรือพิทซ์ (Pitch), P_t = 1.25x15.88

= 19.85 มิลลิเมตร

จำนวนของท่อที่ใช้ = $\dfrac{0.46}{\pi \times 0.01588 \times 0.6}$ = 16 ท่อ

พื้นที่ต่อเที่ยวการไหล = $\dfrac{16}{2} \times \dfrac{\pi \times (0.01468)^2}{4}$ = 0.00135 m^2

กำหนดขนาดด้านเชลล์

จากตารางที่ ก.4 สำหรับการไหลในท่อ 2 เที่ยว

$$K_1 = 0.249$$

$$n_1 = 2.207$$

$$D_b = d_0 \left(\frac{N_t}{K_1} \right)^{1/n_1}$$

$$D_b = 15.88 \times \left(\frac{16}{0.249} \right)^{1/2.207}$$

= 105 มิลลิเมตร

สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่นยึดท่ออยู่กับที่จากรูปที่ ก.2 ; จะได้ว่า

Shell clearance = 10 มิลลิเมตร

เส้นผ่านศูนย์กลางเชลล์ด้านใน (D_s) = 105 + 10 = 115 มิลลิเมตร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนด้านท่อ

Ge, mass velocity $= \dfrac{9}{3600 \times 0.00135} =$ 1.85 kg/sec.m2

Re $= \dfrac{d_i \times Ge}{\mu} = \dfrac{14.68 \times 10^{-3} \times 1.85}{0.28 \times 10^{-3}} =$ 97

Pr $= \dfrac{C_p \times \mu}{k} = \dfrac{1.95 \times 10^3 \times 0.28 \times 10^{-3}}{0.125} =$ 4.37

L/d_i = 600/14.68 = 40.87

จากรูปที่ ก.3 ; จะได้ j_h = 2.4×10^{-2}

Nu $= j_h \times \mathrm{Re} \times \mathrm{Pr}^{1/3} \times \left(\dfrac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14} =$ $2.4 \times 10^{-2} \times 97 \times (4.37)^{1/3} \times 1$ = 3.81

hi $= \dfrac{Nu \times k}{d_i} = \dfrac{3.81 \times 0.125}{14.68 \times 10^{-3}} =$ 32.44 $W/m^2.K$

การคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนด้านเชลล์

แผ่นกั้นวางห่างกัน(Baffle spacing), l_B = Ds x 0.4 = 46 มิลลิเมตร

$$A_s = \frac{(P_t - d_0) D_s l_B}{P_t} = \frac{(19.85 - 15.88) \times 115 \times 46}{19.85} = 1058 \ mm^2$$

$= 1.058 \times 10^{-3}$ m^2

$$d_e = \frac{1.10(P_t^2 - 0.917 d_0^2)}{d_0} = \frac{1.10 \times (19.85^2 - 0.917 \times 15.88^2)}{15.88} = 11.28 \ mm$$

อัตราการไหลเชิงปริมาตรของของไหลด้านเชลล์ $= \dfrac{3.5}{3600 \times 838} = 1.16 \times 10^{-6}$ m^3/sec

ความเร็วของของไหลด้านเชลล์ $= \dfrac{1.16 \times 10^{-6}}{1.058 \times 10^{-3}} = 1.10 \times 10^{-3}$ m/sec

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho deu}{\mu} = \frac{838 \times 11.28 \times 10^{-3} \times 1.10 \times 10^{-3}}{0.43 \times 10^{-3}} = 24.18$$

$$\mathrm{Pr} = \frac{C_p \mu}{k} = \frac{1.81 \times 10^3 \times 0.43 \times 10^{-3}}{0.13} = 6.0$$

เลือกใช้แผ่นกั้นรูปเสี้ยวของวงกลม (Segmental Baffle) ซึ่งมีพื้นที่ส่วนเปิด 25% จากรูปที่ ก.4 ; จะได้ว่า j_h = 0.08

$$h_s = \frac{j_h \mathrm{Re} \mathrm{Pr}^{1/3} k}{de} = \frac{0.08 \times 24.18 \times 6^{1/3} \times 0.13}{11.28 \times 10^{-3}} = 40.51 \ W/m^2K$$

<u>การคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวม</u>

$$\frac{1}{U_0} = \frac{1}{h_s} + \frac{1}{h_s dirty} + \frac{d_0 \ln(d_0 / d_i)}{2k_w} + \frac{d_0}{d_i}\left(\frac{1}{h_i dirty} + \frac{1}{h_i}\right)$$

$$= \frac{1}{40.51} + 1.8\times10^{-4} + \frac{15.88\times10^{-3}\times\ln(15.88/14.68)}{2\times16} + \frac{15.88}{14.68}\times\left(8.8\times10^{-5} + \frac{1}{32.44}\right)$$

$U_0 = 14.76$ W/m^{2}K

<u>ตรวจสอบค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวมที่คำนวณได้เปรียบเทียบกับค่าที่สมมุติไว้</u>

$$0\langle\left|\frac{U_{0,Calculation} - U_{0,Assume}}{U_{0,Assume}}\right|\times100\langle30\%$$

$$0\langle\left|\frac{14.76-14}{14}\right|\times100\langle30\% = 5.43\%$$

เนื่องจากค่าสัมประสิทธิการถ่ายโอนความร้อนรวมที่คำนวณได้จากทฤษฎีเท่ากับ 14.76 W/m^{2}K ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่สมมุติ 14.00 W/m^{2}K พบว่าค่าความผิดพลาดอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ คิดเป็นร้อยละ 5.43 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่คำนวณได้นั้นถูกต้องตามเงื่อนไขเกี่ยวกับการออกแบบกระบวนการทั้งหมด ดังนั้นดำเนินการออกแบบรายละเอียดของชิ้นส่วนต่างๆ ต่อไปนี้ได้โดยอาศัยข้อมูลจากตารางที่ ก.2 และตารางที่ ก.3 ดังต่อไปนี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนบางส่วนที่ได้จากการคำนวณ

ข้อมูลทางทฤษฎีที่คำนวณได้	รายละเอียด
ชนิด	เชลล์และท่อ ชนิดแผ่นยึดท่ออยู่กับที่
พื้นที่ถ่ายโอนความร้อน	0.46 m^2
จำนวนเที่ยวการไหล	1 เที่ยวในเชลล์ 2 เที่ยวในท่อ
วัสดุและสัดส่วนของท่อถ่ายโอนความร้อน	เหล็กกล้าไร้สนิม เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 5/8 in (15.88 mm) ความยาว 60 cm
วิธีวางเรียงท่อและจำนวนท่อ	วางเรียงรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าระยะพิทช์เท่ากับ 19.85 mm จำนวนทั้งหมด 16 ท่อ
เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเชลล์	115 mm

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนบางส่วนที่นำไปออกแบบสร้าง

ข้อมูลที่นำไปออกแบบ	รายละเอียด
ชนิด	เชลล์และท่อ ชนิดแผ่นยึดท่ออยู่กับที่
ออกแบบประสิทธิภาพ	40%
พื้นที่ถ่ายโอนความร้อน	0.46/0.4 = 1.15 m^2
จำนวนเที่ยวการไหล	1 เที่ยวในเชลล์ 2 เที่ยวในท่อ
วัสดุและสัดส่วนของท่อถ่ายโอนความร้อน	เหล็กกล้าไร้สนิม เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 5/8 in (15.88 mm) ความยาว 60 cm
วิธีวางเรียงท่อและจำนวนท่อ	วางเรียงรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าระยะพิทช์เท่ากับ 19.85 mm จำนวนทั้งหมด 39 ท่อ
เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของเชลล์	167 mm

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

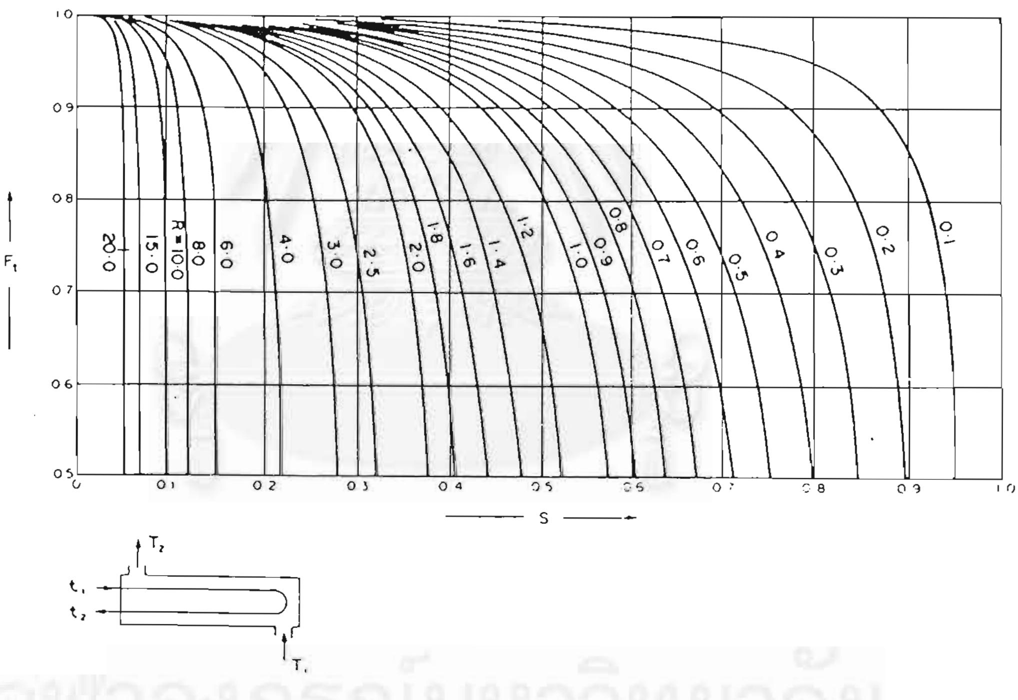
ตารางที่ ก.4 Constant for use in estimate of the bundle and shell Diameter

Triangular pitch, P_t = 1.25d_o

No. passes	1	2	4	6	8
K1	0.319	0.249	0.175	0.0743	0.0365
n1	2.142	2.207	2.285	2.499	2.675

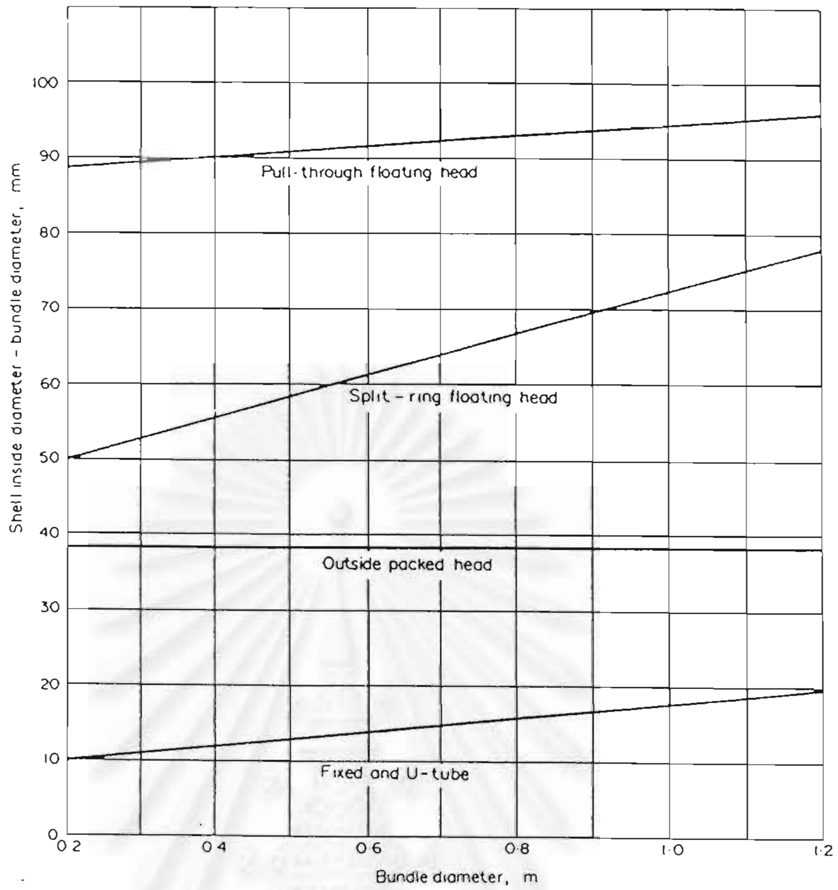
Square pitch, Pt = 1.25d_o

No. passes	1	2	4	6	8
K1	0.215	0.156	0.158	0.0402	0.0331
n1	2.207	2.291	2.263	2.617	2.643



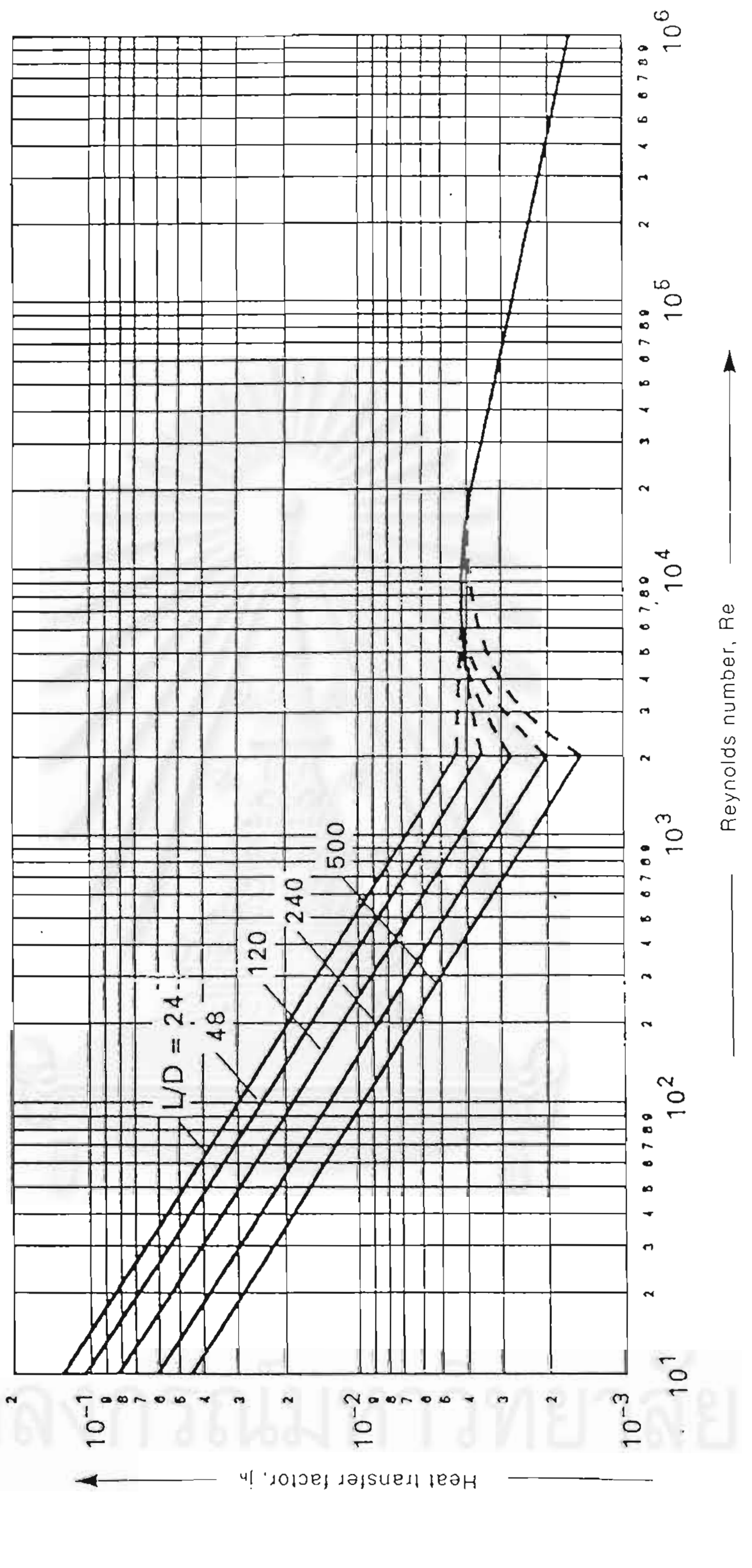
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ก.1 Temperature correction factor: one shell pass; two tube pass (R.K.Sinnott,1993)



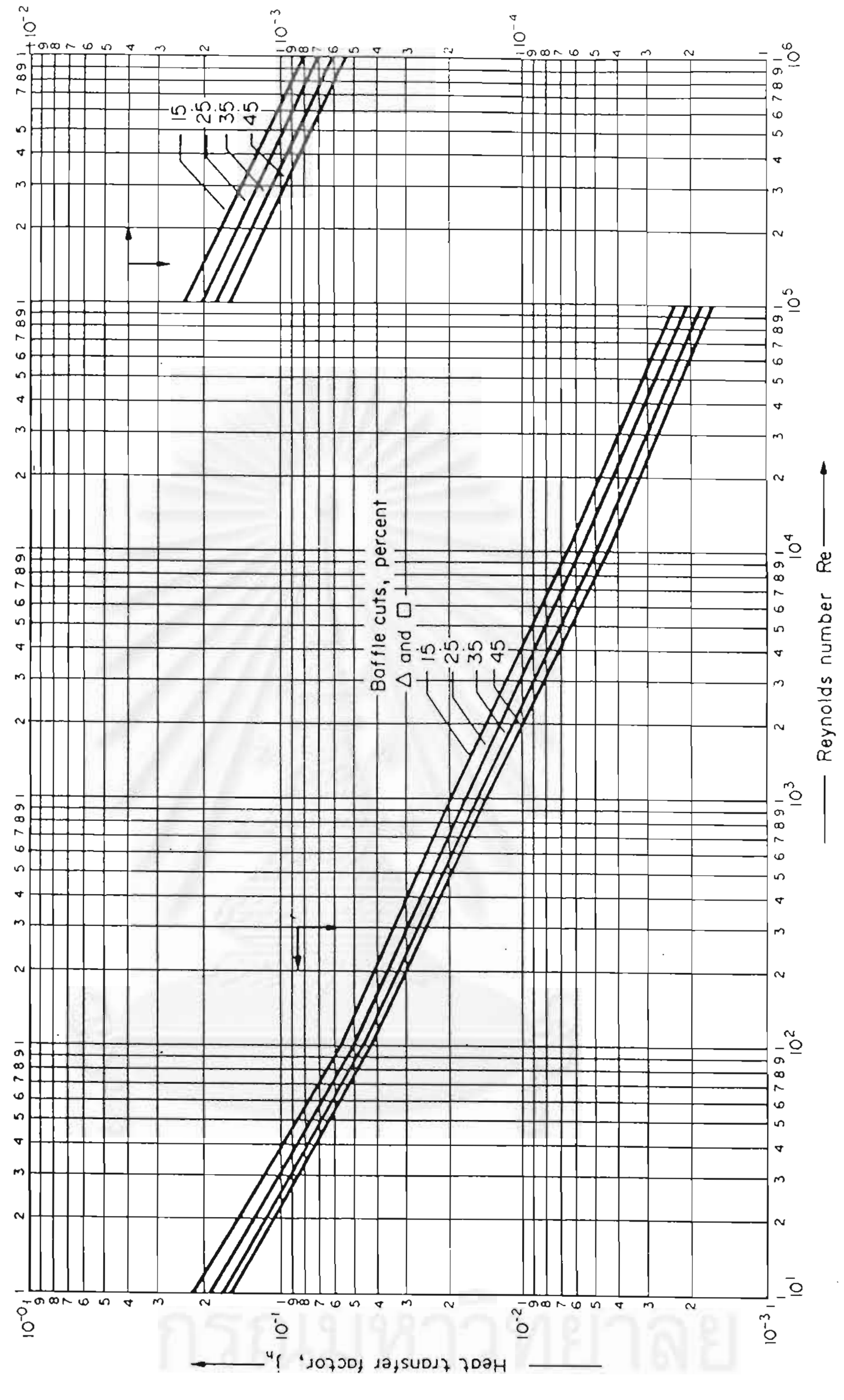
รูปที่ ก.2 Shell-bundle clearance (R.K.Sinnott,1993)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



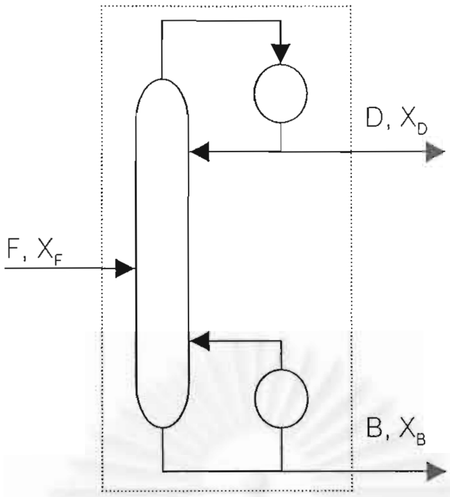
รูปที่ ก.3 Tube-side heat-transfer factor (R.K.Sinnott,1993)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ก.4 Shell-side heat-transfer factors, segmental baffles (R.K.Sinnott,1993)

2. การคำนวณดุลมวลสารรอบหอกลั่น



ตัวอย่างการคำนวณ ดุลมวลสารเมื่อระบบเข้าสู่สถานะคงตัวอยู่หอกลั่นขนาดขยายส่วนสำหรับกลั่นแยกเบนซีนที่อัตราการไหลของสารป้อน 4.0 ลิตรต่อชั่วโมง หรือ 3.506 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ยอดหอ 2.40 ลิตรต่อชั่วโมง หรือ 2.085 กิโลกรัมต่อชั่วโมง อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ก้นหอ 1.60 ลิตรต่อชั่วโมง หรือ 1.421 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ 4.42 จะได้ดังนี้

องค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก		
	สารป้อน	ผลิตภัณฑ์ยอดหอ	ผลิตภัณฑ์ก้นหอ
เบนซีน	59.46	95.13	27.89
โทลูอีน	29.06	4.78	40.00
ไซลีน	11.48	0.09	32.11
รวม	100.00	100.00	100.00

Overall Benzene balance:

Input = Output

$(F)(X_F) = (D)(X_D) + (B)(X_B)$

แทนค่า

$$3.506 \times 0.5946 = 2.085 \times 0.9513 + 1.421 \times 0.2789$$

2.085 = 2.380

Overall Toluene balance:

$$\text{Input} = \text{Output}$$

$$(F)(X_F) = (D)(X_D) + (B)(X_B)$$

แทนค่า

$$3.506 \times 0.2906 = 2.085 \times 0.0478 + 1.421 \times 0.400$$

$$1.019 = 0.668$$

Overall Xylene balance:

$$\text{Input} = \text{Output}$$

$$(F)(X_F) = (D)(X_D) + (B)(X_B)$$

แทนค่า

$$3.506 \times 0.1148 = 2.085 \times 0.0009 + 1.421 \times 0.3211$$

$$0.402 = 0.458$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างโครมาโทแกรมจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือแก๊สโครมาโทกราฟี

1. ตัวอย่างโครมาโทแกรมจากการทดลองในเครื่องสกัดแบบจานหมุนในระบบป้อนต่อเนื่อง (สมพงษ์, 2539)

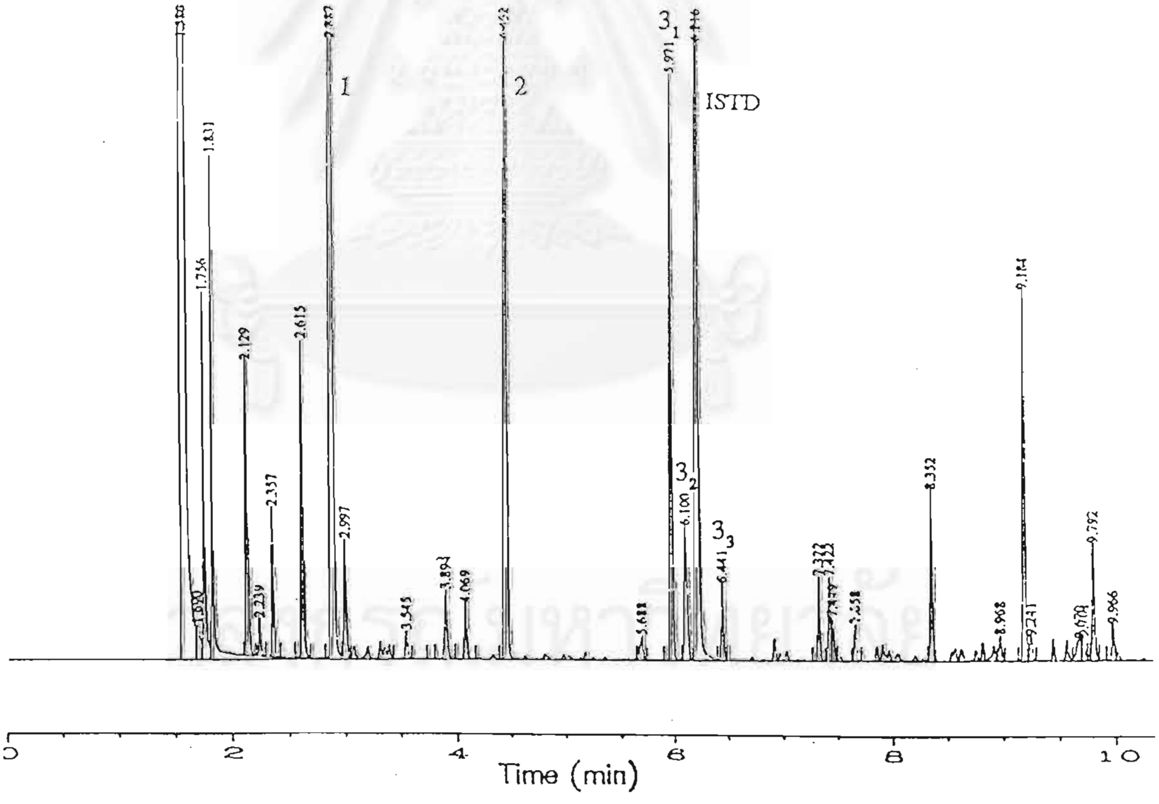
ตัวอย่างโครมาโทแกรมของสารป้อน ส่วนที่สกัดได้ และส่วนราฟฟิเนต

พีกที่ 1 เบนซีน

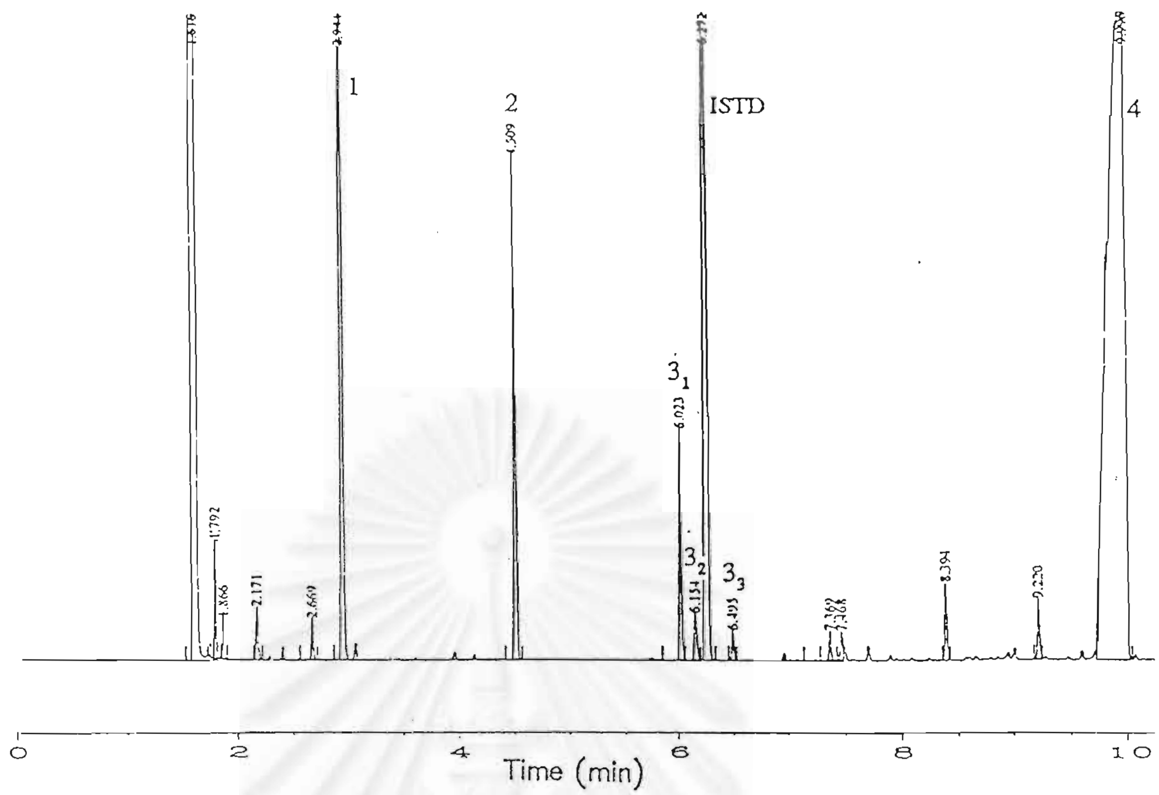
2 โทลูอีน

3 ไซลีน

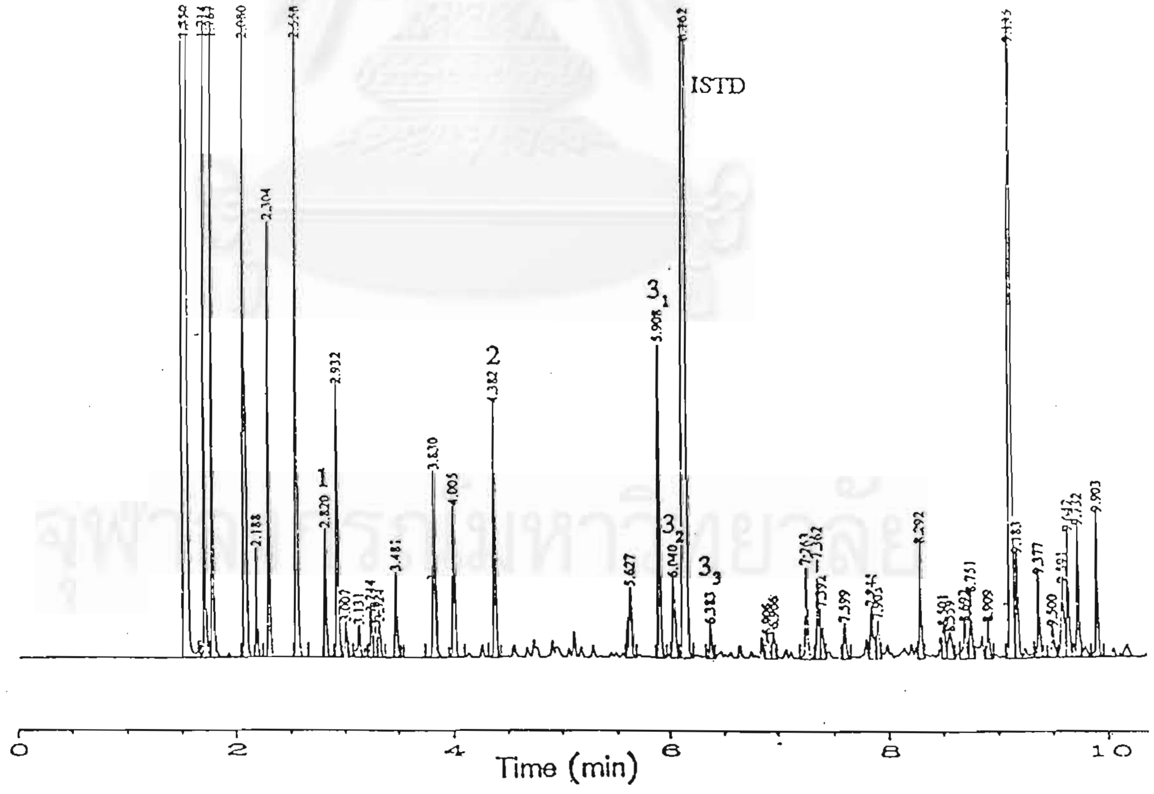
4 ซัลโฟเลน



รูปที่ ข 1. โครมาโทแกรมของไพโรไลซิสแก๊สโซลีนที่ใช้เป็นสารป้อนในเครื่องสกัดแบบจานหมุน

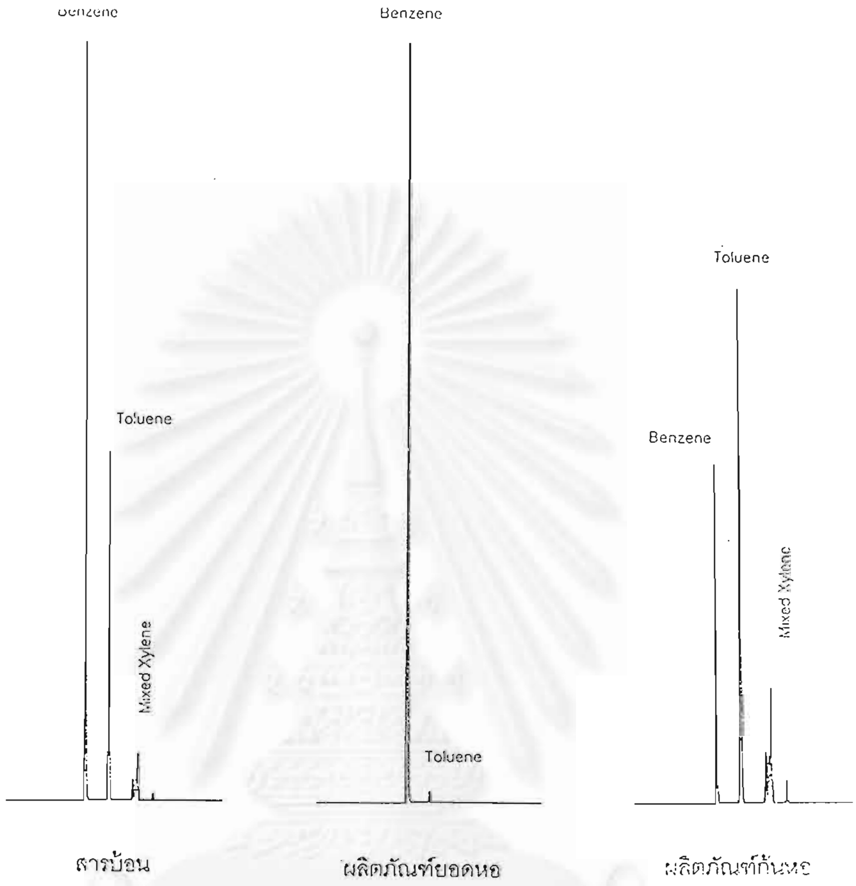


รูปที่ ข 2. โครมาโทแกรมของส่วนที่สกัดได้



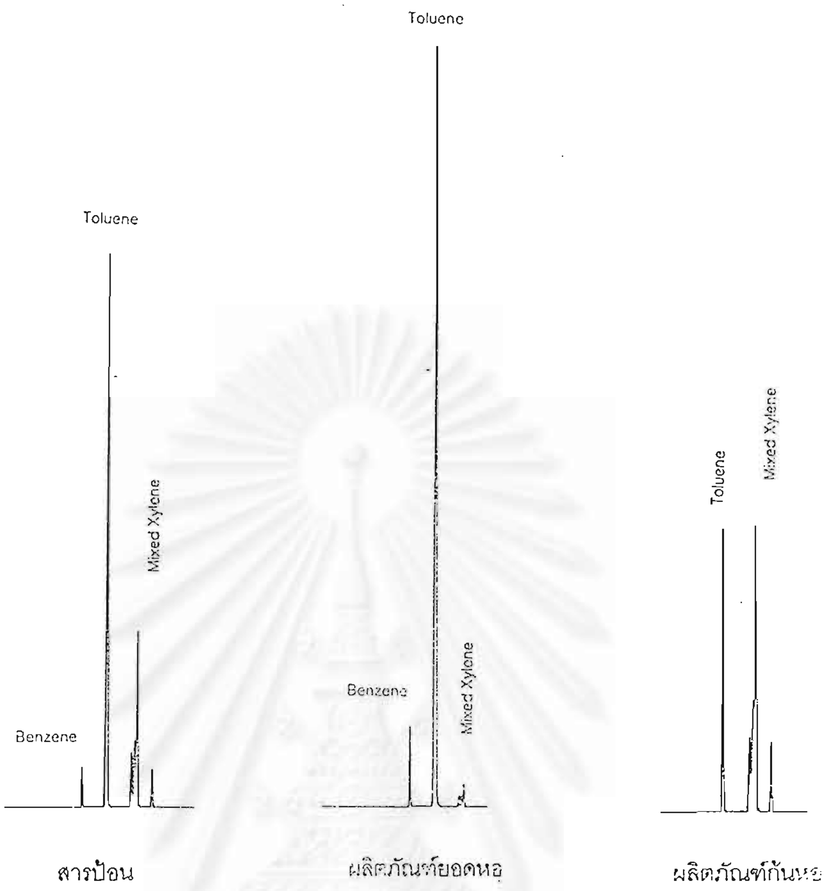
รูปที่ ข 3. โครมาโทแกรมของส่วนราฟฟิเนต

2. ตัวอย่างโครมาโทแกรมจากการทดลองหอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วน



รูปที่ ข.4 โครมาโทแกรมของสารป้อน ผลิตภัณฑ์ยอดหอ และผลิตภัณฑ์ก้นหอจากการทดลองหอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วนสำหรับกลั่นแยกเบนซีน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ข.5 โครมาโทแกรมของสารป้อน ผลิตภัณฑ์ยอดหอ และผลิตภัณฑ์ก้นหอจากการทดลองหอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วนสำหรับกลั่นแยกโทลูอีน

ภาคผนวก ค

ข้อมูลการทดลองในหอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วนสำหรับกลั่นแยกเบนซีน

1. อัตราการไหลของสารป้อน = 4.0 ลิตรต่อชั่วโมง

ให้อัตราการไหลของสารป้อนคงที่ตลอดการทดลอง

อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม = 23 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิของน้ำมันให้ความร้อน = 125 องศาเซลเซียส

1.1 อัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ = 4.42

อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ยอดหอ = 2.40 ลิตรต่อชั่วโมง

อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ก้นหอ = 1.60 ลิตรต่อชั่วโมง

ตารางที่ ค.1 ข้อมูลแสดงองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) และการทำดุลมวลสารที่ระบบเข้าสู่สถานะคงตัวเมื่อเวลา 40 นาที

Component	Feed	Bottom	Mass Balance (kg/h)	
			Input	Output
Benzene	59.46	27.89	2.085	2.380
Toluene	29.06	40.00	1.019	0.668
Xylene	11.48	32.11	0.402	0.458
Total	100.00	100.00	3.506	3.506

	Total Reflux Ratio		
Time (min.)	Benzene	Toluene	Xylene
10	92.56	7.00	0.42
20	94.27	5.50	0.21

ตารางที่ ค.1 (ต่อ)

Partial Reflux Ratio			
Time (min.)	Benzene	Toluene	Xylene
10	95.33	4.63	0.04
20	95.80	4.16	0.04
30	96.22	3.78	0.00
40	95.13	4.78	0.09

ตารางที่ ค.2 ข้อมูลแสดงอุณหภูมิภายในระบบ (องศาเซลเซียส)

Total Reflux Ratio						
Time (min.)	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
10	70	78	88	79	93	93
20	71	78	85	78	93	95

Partial Reflux Ratio						
Time (min.)	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
10	39	77	86	77	92	95
20	48	77	84	77	92	96
30	53	78	84	77	93	95
40	58	77	84	77	92	95

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.2 อัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ = 5.50

อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ยอดหอ = 2.00 ลิตรต่อชั่วโมง

อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ก้นหอ = 2.00 ลิตรต่อชั่วโมง

ตารางที่ ค.3 ข้อมูลแสดงองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) และการทำดุลมวลสารที่ระบบเข้าสู่สถานะคงตัวเมื่อเวลา 40 นาที

Component	Feed	Bottom	Mass Balance (kg/h)	
			Input	Output
Benzene	59.46	27.31	2.085	2.204
Toluene	29.06	40.01	1.019	0.725
Xylene	11.48	32.68	0.402	0.573
Total	100	100	3.506	3.502

	Total Reflux Ratio		
Time (min.)	Benzene	Toluene	Xylene
10	97.61	2.37	0.02
20	97.94	2.04	0.02

	Partial Reflux Ratio		
Time (min.)	Benzene	Toluene	Xylene
10	98.02	1.98	0.00
20	98.23	1.77	0.00
30	98.22	1.78	0.00
40	98.42	1.58	0.00

ตารางที่ ค.4 ข้อมูลแสดงอุณหภูมิภายในระบบ (องศาเซลเซียส)

	Total Reflux Ratio					
Time (min.)	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
10	73	77	84	77	92	95
20	74	77	85	77	93	94

	Partial Reflux Ratio					
Time (min.)	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
10	43	77	85	77	91	94
20	56	77	85	77	91	94
30	55	77	85	77	91	94
40	54	77	84	77	92	95

1.3 อัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ = 7.13

อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ยอดหอ = 1.60 ลิตรต่อชั่วโมง

อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ก้นหอ = 2.40 ลิตรต่อชั่วโมง

ตารางที่ ค.5 ข้อมูลแสดงองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) และการทำดุลมวลสารที่ระบบเข้าสู่สถานะคงตัวเมื่อเวลา 40 นาที

Component	Feed	Bottom	Mass Balance (kg/h)	
			Input	Output
Benzene	59.46	27.27	2.085	1.959
Toluene	29.06	40.07	1.019	0.856
Xylene	11.48	32.66	0.402	0.687
Total	100	100	3.506	3.502

ตารางที่ ค.5 (ต่อ)

	Total Reflux Ratio		
Time (min.)	Benzene	Toluene	Xylene
10	98.62	1.36	0.02
20	98.71	1.27	0.02

	Partial Reflux Ratio		
Time (min.)	Benzene	Toluene	Xylene
10	98.77	1.21	0.02
20	98.77	1.21	0.02
30	98.76	1.24	0.00
40	98.79	1.21	0.00

ตารางที่ ค.6 ข้อมูลแสดงอุณหภูมิภายในระบบ (องศาเซลเซียส)

	Total Reflux Ratio					
Time (min.)	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
10	72	77	83	77	92	95
20	71	77	83	77	91	95

	Partial Reflux Ratio					
Time (min.)	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
10	52	77	85	77	92	95
20	55	77	85	77	92	95
30	57	77	85	77	92	95
40	54	77	84	77	92	95

1.4 อัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ = 9.83

อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ยอดหอ = 1.20 ลิตรต่อชั่วโมง

อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ก้นหอ = 2.80 ลิตรต่อชั่วโมง

ตารางที่ ค.7 ข้อมูลแสดงองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) และการทำดุลมวลสารที่ระบบเข้าสู่สถานะคงตัวเมื่อเวลา 40 นาที

Component	Feed	Bottom	Mass Balance (kg/h)	
			Input	Output
Benzene	59.46	30.65	2.085	1.792
Toluene	29.06	38.31	1.019	0.948
Xylene	11.48	31.04	0.402	0.762
Total	100	100	3.506	3.502

Total Reflux Ratio

Time (min.)	Benzene	Toluene	Xylene
10	98.86	1.11	0.03
20	98.93	1.04	0.03

Partial Reflux Ratio

Time (min.)	Benzene	Toluene	Xylene
10	99.15	0.85	0.00
20	99.17	0.83	0.00
30	98.89	1.11	0.00
40	98.83	1.17	0.00

ตารางที่ ค.8 ข้อมูลแสดงอุณหภูมิภายในระบบ (องศาเซลเซียส)

Total Reflux Ratio

Time (min.)	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
10	71	77	85	77	92	95
20	73	77	85	77	91	94

Partial Reflux Ratio

Time (min.)	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
10	52	77	84	77	92	95
20	53	77	85	77	92	95
30	56	77	85	77	91	95
40	54	77	85	77	92	95

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง

ข้อมูลการทดลองในหอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วนสำหรับกลั่นแยกเบนซีน

1. อัตราการไหลของสารป้อน = 3.0 ลิตรต่อชั่วโมง

ให้อัตราการไหลของสารป้อนคงที่ตลอดการทดลอง

อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม = 26 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิของน้ำมันให้ความร้อน = 125 องศาเซลเซียส

1.1 อัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ = 6.22

อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ยอดหอ = 1.80 ลิตรต่อชั่วโมง

อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ก้นหอ = 1.20 ลิตรต่อชั่วโมง

ตารางที่ ง.1 ข้อมูลแสดงองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) และการทำดุลมวลสารที่ระบบเข้าสู่สถานะคงตัวเมื่อเวลา 40 นาที

Component	Feed	Bottom	Mass Balance (kg/h)	
			Input	Output
Benzene	59.46	27.13	1.564	1.833
Toluene	29.06	40.02	0.764	0.451
Xylene	11.48	32.85	0.302	0.346
Total	100	100	2.630	2.630

	Total Reflux Ratio		
Time (min.)	Benzene	Toluene	Xylene
10	92.83	7.17	0.00
20	93.96	6.04	0.00

ตารางที่ ง.1 (ต่อ)

Partial Reflux Ratio			
Time (min.)	Benzene	Toluene	Xylene
10	95.25	4.75	0.00
20	96.24	3.76	0.00
30	97.35	2.65	0.00
40	98.08	1.92	0.00

ตารางที่ ง.2 ข้อมูลแสดงอุณหภูมิภายในระบบ (องศาเซลเซียส)

Total Reflux Ratio						
Time (min.)	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
10	69	79	87	79	94	93
20	70	78	87	78	98	99

Partial Reflux Ratio						
Time (min.)	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
10	40	78	98	77	98	101
20	50	78	97	76	97	102
30	53	77	97	76	97	102
40	55	77	97	76	97	102

1.2 อัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ = 7.13

อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ยอดหอ = 1.60 ลิตรต่อชั่วโมง

อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ก้นหอ = 1.40 ลิตรต่อชั่วโมง

ตารางที่ ง.3 ข้อมูลแสดงองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) และการทำดุลมวลสารที่ระบบเข้าสู่สถานะคงตัวเมื่อเวลา 40 นาที

Component	Feed	Bottom	Mass Balance (kg/h)	
			Input	Output
Benzene	59.46	27.30	1.564	1.717
Toluene	29.06	39.80	0.764	0.509
Xylene	11.48	32.90	0.302	0.404
Total	100	100	2.630	2.630

Total Reflux Ratio

Time (min.)	Benzene	Toluene	Xylene
10	98.52	1.48	0.00
20	98.85	1.15	0.00

Partial Reflux Ratio

Time (min.)	Benzene	Toluene	Xylene
10	99.01	0.99	0.00
20	99.07	0.93	0.00
30	98.82	1.18	0.00
40	99.05	1.47	0.00

ตารางที่ ง.4 ข้อมูลแสดงอุณหภูมิภายในระบบ (องศาเซลเซียส)

	Total Reflux Ratio					
Time (min.)	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
10	65	77	97	77	97	102
20	67	77	98	77	98	102

	Partial Reflux Ratio					
Time (min.)	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
10	43	77	97	77	97	102
20	54	77	97	78	97	102
30	57	78	98	78	98	102
40	60	78	99	78	99	103

1.3 อัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ = 8.29

อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ยอดหอ = 1.40 ลิตรต่อชั่วโมง

อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ก้นหอ = 1.60 ลิตรต่อชั่วโมง

ตารางที่ ง.5 ข้อมูลแสดงองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) และการทำดุลมวลสารที่ระบบเข้าสู่สถานะคงตัวเมื่อเวลา 40 นาที

Component	Feed	Bottom	Mass Balance (kg/h)	
			Input	Output
Benzene	59.46	30.65	1.564	1.647
Toluene	29.06	38.11	0.764	0.544
Xylene	11.48	31.24	0.302	0.438
Total	100	100	2.630	2.629

ตารางที่ ง.5 (ต่อ)

Time (min.)	Total Reflux Ratio		
	Benzene	Toluene	Xylene
10	98.57	1.43	0.00
20	98.70	1.30	0.00

Time (min.)	Partial Reflux Ratio		
	Benzene	Toluene	Xylene
10	98.93	1.07	0.00
20	99.12	0.88	0.00
30	99.19	0.81	0.00
40	99.22	0.78	0.00

ตารางที่ ง.6 ข้อมูลแสดงอุณหภูมิภายในระบบ (องศาเซลเซียส)

Time (min.)	Total Reflux Ratio					
	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
10	67	78	89	78	99	104
20	68	78	88	78	99	104

Time (min.)	Partial Reflux Ratio					
	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
10	52	78	88	78	98	103
20	55	78	88	78	97	103
30	57	78	88	78	97	102
40	58	78	88	78	96	102

1.4	อัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ	=	9.83	
	อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ยอดหอ	=	1.20	ลิตรต่อชั่วโมง
	อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ก้นหอ	=	1.80	ลิตรต่อชั่วโมง

ตารางที่ ง.7 ข้อมูลแสดงองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) และการทำดุลมวลสารที่ระบบเข้าสู่สถานะคงตัวเมื่อเวลา 40 นาที

Component	Feed	Bottom	Mass Balance (kg/h)	
			Input	Output
Benzene	59.46	32.17	1.564	1.553
Toluene	29.06	45.56	0.764	0.725
Xylene	11.48	22.27	0.302	0.351
Total	100	100	2.630	2.629

Total Reflux Ratio

Time (min.)	Benzene	Toluene	Xylene
10	99.36	0.64	0.00
20	99.47	0.53	0.00

Partial Reflux Ratio

Time (min.)	Benzene	Toluene	Xylene
10	99.45	0.55	0.00
20	99.36	0.64	0.00
30	99.40	0.60	0.00
40	99.42	0.58	0.00

ตารางที่ ง.8 ข้อมูลแสดงอุณหภูมิภายในระบบ (องศาเซลเซียส)

	Total Reflux Ratio					
Time (min.)	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
10	68	78	88	78	97	102
20	70	78	87	78	98	102

	Partial Reflux Ratio					
Time (min.)	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
10	52	79	89	78	97	101
20	53	78	90	77	97	102
30	56	78	88	78	97	102
40	58	78	88	78	97	102

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ

ข้อมูลการทดลองในหอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วนสำหรับกลั่นแยกโทลูอีน

1. อัตราการไหลของสารป้อน = 4.0 ลิตรต่อชั่วโมง

ให้อัตราการไหลของสารป้อนคงที่ตลอดการทดลอง

อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม = 28 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิของน้ำมันให้ความร้อน = 160 องศาเซลเซียส

1.1 อัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ = 4.42

อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ยอดหอ = 2.40 ลิตรต่อชั่วโมง

อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ก้นหอ = 1.60 ลิตรต่อชั่วโมง

ตารางที่ จ.1 ข้อมูลแสดงองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) และการทำดุลมวลสารที่ระบบเข้าสู่สถานะคงตัวเมื่อเวลา 40 นาที

Component	Feed	Bottom	Mass Balance (kg/h)	
			Input	Output
Benzene	3.38	0.00	0.117	0.097
Toluene	59.94	28.43	2.082	2.217
Xylene	36.68	71.57	1.274	1.159
Total	100	100	3.473	3.473

	Total Reflux Ratio		
Time (min.)	Benzene	Toluene	Xylene
10	6.23	80.82	12.95
20	4.22	81.02	14.76

ตารางที่ จ.1 (ต่อ)

	Partial Reflux Ratio		
Time (min.)	Benzene	Toluene	Xylene
10	3.59	80.47	15.93
20	3.86	83.00	13.13
30	4.22	85.53	10.25
40	4.65	87.44	7.91

ตารางที่ จ.2 ข้อมูลแสดงอุณหภูมิภายในระบบ (องศาเซลเซียส)

	Total Reflux Ratio					
Time (min.)	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
10	48	108	114	109	123	120
20	51	109	119	109	128	127

	Partial Reflux Ratio					
Time (min.)	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
10	57	108	120	109	130	138
20	58	109	119	109	130	137
30	60	109	120	109	130	139
40	60	109	120	109	130	139

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.2 อัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ = 5.50

อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ยอดหอ = 2.00 ลิตรต่อชั่วโมง

อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ก้นหอ = 2.00 ลิตรต่อชั่วโมง

ตารางที่ จ.3 ข้อมูลแสดงองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) และการทำดุลมวลสารที่ระบบเข้าสู่สถานะคงตัวเมื่อเวลา 40 นาที

Component	Feed	Bottom	Mass Balance (kg/h)	
			Input	Output
Benzene	3.38	0.00	0.117	0.087
Toluene	59.94	27.67	2.082	2.049
Xylene	36.68	72.33	1.274	1.337
Total	100	100	3.473	3.473

	Total Reflux Ratio		
Time (min.)	Benzene	Toluene	Xylene
10	5.05	89.35	5.60
20	5.13	90.27	4.60

	Partial Reflux Ratio		
Time (min.)	Benzene	Toluene	Xylene
10	5.26	90.55	4.09
20	5.21	90.56	4.22
30	5.23	90.41	4.36
40	5.01	90.33	4.67

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ.4 ข้อมูลแสดงอุณหภูมิภายในระบบ (องศาเซลเซียส)

Total Reflux Ratio

Time (min.)	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
10	84	109	120	109	131	138
20	79	109	120	109	130	139

Partial Reflux Ratio

Time (min.)	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
10	57	109	120	109	130	138
20	61	109	121	109	131	138
30	63	109	122	109	130	138
40	62	109	122	109	131	138

1.3 อัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ = 7.13

อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ยอดหอ = 1.60 ลิตรต่อชั่วโมง

อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ก้นหอ = 2.40 ลิตรต่อชั่วโมง

ตารางที่ จ.5 ข้อมูลแสดงองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) และการทำดุลมวลสารที่ระบบเข้าสู่สถานะคงตัวเมื่อเวลา 40 นาที

Component	Feed	Bottom	Mass Balance (kg/h)	
			Input	Output
Benzene	3.38	0.19	0.117	0.076
Toluene	59.94	29.62	2.082	1.871
Xylene	36.68	70.19	1.274	1.526
Total	100	100	3.473	3.473

ตารางที่ จ.5 (ต่อ)

	Total Reflux Ratio		
Time (min.)	Benzene	Toluene	Xylene
10	5.03	90.59	4.38
20	5.12	91.15	3.73

	Partial Reflux Ratio		
Time (min.)	Benzene	Toluene	Xylene
10	5.43	91.04	3.53
20	5.35	90.95	3.70
30	5.33	90.62	4.05
40	5.17	90.27	4.56

ตารางที่ จ.6 ข้อมูลแสดงอุณหภูมิภายในระบบ (องศาเซลเซียส)

	Total Reflux Ratio					
Time (min.)	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
10	87	109	122	109	131	138
20	80	109	122	109	131	138

	Partial Reflux Ratio					
Time (min.)	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
10	59	109	121	109	131	138
20	63	109	121	109	131	138
30	61	109	121	109	131	138
40	62	109	122	109	132	138

1.4 อัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ = 9.83

อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ยอดหอ = 1.20 ลิตรต่อชั่วโมง

อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ก้นหอ = 2.80 ลิตรต่อชั่วโมง

ตารางที่ จ.7 ข้อมูลแสดงองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) และการทำดุลมวลสารที่ระบบเข้าสู่สถานะคงตัวเมื่อเวลา 40 นาที

Component	Feed	Bottom	Mass Balance (kg/h)	
			Input	Output
Benzene	3.38	0.21	0.117	0.063
Toluene	59.94	31.75	2.082	1.712
Xylene	36.68	68.04	1.274	1.698
Total	100	100	3.473	3.473

Total Reflux Ratio

Time (min.)	Benzene	Toluene	Xylene
10	5.03	90.64	4.33
20	4.98	90.97	4.06

Partial Reflux Ratio

Time (min.)	Benzene	Toluene	Xylene
10	5.15	90.73	4.12
20	5.42	90.59	3.99
30	5.53	90.50	3.97
40	5.53	90.24	4.23

ตารางที่ จ.8 ข้อมูลแสดงอุณหภูมิภายในระบบ (องศาเซลเซียส)

	Total Reflux Ratio					
Time (min.)	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
10	78	109	123	109	132	139
20	79	109	123	109	132	139

	Partial Reflux Ratio					
Time (min.)	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
10	59	109	122	109	131	138
20	61	109	122	109	131	138
30	62	109	122	109	131	138
40	60	109	122	109	131	138

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ฉ

ข้อมูลการทดลองในหอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วนสำหรับกลั่นแยกโทลูอีน

1. อัตราการไหลของสารป้อน = 3.0 ลิตรต่อชั่วโมง

ให้อัตราการไหลของสารป้อนคงที่ตลอดการทดลอง

อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม = 30 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิของน้ำมันให้ความร้อน = 160 องศาเซลเซียส

1.1 อัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ = 6.22

อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ยอดหอ = 1.80 ลิตรต่อชั่วโมง

อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ก้นหอ = 1.20 ลิตรต่อชั่วโมง

ตารางที่ ฉ.1 ข้อมูลแสดงองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) และการทำดุลมวลสารที่ระบบเข้าสู่สถานะคงตัวเมื่อเวลา 40 นาที

Component	Feed	Bottom	Mass Balance (kg/h)	
			Input	Output
Benzene	3.38	0.00	0.089	0.091
Toluene	59.94	40.75	1.561	1.824
Xylene	36.68	59.25	0.955	0.689
Total	100	100	2.605	2.604

	Total Reflux Ratio		
Time (min.)	Benzene	Toluene	Xylene
10	6.27	82.74	10.99
20	3.73	82.89	13.38

ตารางที่ ฉ.1 (ต่อ)

	Partial Reflux Ratio		
Time (min.)	Benzene	Toluene	Xylene
10	3.41	83.08	13.51
20	4.03	85.53	10.45
30	4.87	87.81	7.32
40	5.85	89.56	4.59

ตารางที่ ฉ.2 ข้อมูลแสดงอุณหภูมิภายในระบบ (องศาเซลเซียส)

	Total Reflux Ratio					
Time (min.)	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
10	49	108	117	108	117	119
20	51	109	123	109	123	125

	Partial Reflux Ratio					
Time (min.)	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
10	57	109	123	108	123	127
20	58	108	121	109	121	132
30	60	109	121	109	121	132
40	61	109	121	109	121	129

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.2 อัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ = 7.13

อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ยอดหอ = 1.60 ลิตรต่อชั่วโมง

อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ก้นหอ = 1.40 ลิตรต่อชั่วโมง

ตารางที่ ฉ.3 ข้อมูลแสดงองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) และการทำดุลมวลสารที่ระบบเข้าสู่สถานะคงตัวเมื่อเวลา 40 นาที

Component	Feed	Bottom	Mass Balance (kg/h)	
			Input	Output
Benzene	3.38	0.00	0.089	0.094
Toluene	59.94	41.38	1.561	1.767
Xylene	36.68	58.62	0.955	0.743
Total	100	100	2.605	2.604

Total Reflux Ratio

Time (min.)	Benzene	Toluene	Xylene
10	5.65	90.81	3.54
20	5.83	91.13	3.04

Partial Reflux Ratio

Time (min.)	Benzene	Toluene	Xylene
10	6.00	91.28	2.72
20	6.07	91.39	2.54
30	6.26	91.33	2.42
40	6.77	91.01	2.22

ตารางที่ ฉ.4 ข้อมูลแสดงอุณหภูมิภายในระบบ (องศาเซลเซียส)

	Total Reflux Ratio					
Time (min.)	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
10	81	109	121	109	128	131
20	89	109	121	109	128	131

	Partial Reflux Ratio					
Time (min.)	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
10	57	109	122	109	128	129
20	60	109	123	109	128	129
30	61	109	122	109	128	129
40	63	109	121	109	128	132

1.3 อัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ = 8.29

อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ยอดหอ = 1.40 ลิตรต่อชั่วโมง

อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ก้นหอ = 1.60 ลิตรต่อชั่วโมง

ตารางที่ ฉ.5 ข้อมูลแสดงองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) และการทำดุลมวลสารที่ระบบเข้าสู่สถานะคงตัวเมื่อเวลา 40 นาที

Component	Feed	Bottom	Mass Balance (kg/h)	
			Input	Output
Benzene	3.38	0.00	0.089	0.089
Toluene	59.94	40.70	1.561	1.663
Xylene	36.68	59.30	0.955	0.853
Total	100	100	2.605	2.605

ตารางที่ ฉ.5 (ต่อ)

Total Reflux Ratio			
Time (min.)	Benzene	Toluene	Xylene
10	7.25	90.96	1.79
20	7.52	90.80	1.68

Partial Reflux Ratio			
Time (min.)	Benzene	Toluene	Xylene
10	7.99	90.32	1.69
20	7.99	90.29	1.73
30	7.44	90.37	2.19
40	7.32	90.27	2.41

ตารางที่ ฉ.6 ข้อมูลแสดงอุณหภูมิภายในระบบ (องศาเซลเซียส)

Total Reflux Ratio						
Time (min.)	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
10	83	108	120	109	128	132
20	86	109	121	109	128	132

Partial Reflux Ratio						
Time (min.)	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
10	61	109	122	109	127	131
20	65	109	123	109	128	128
30	64	109	123	109	128	128
40	62	109	122	109	128	129

1.4	อัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ	=	9.83	
	อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ยอดหอ	=	1.20	ลิตรต่อชั่วโมง
	อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ก้นหอ	=	1.60	ลิตรต่อชั่วโมง

ตารางที่ ฉ.7 ข้อมูลแสดงองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้ (ร้อยละโดยน้ำหนัก) และการทำดุลมวลสารที่ระบบเข้าสู่สถานะคงตัวเมื่อเวลา 40 นาที

Component	Feed	Bottom	Mass Balance (kg/h)	
			Input	Output
Benzene	3.38	0.00	0.089	0.096
Toluene	59.94	42.81	1.561	1.598
Xylene	36.68	57.19	0.955	0.910
Total	100	100	2.605	2.604

Total Reflux Ratio

Time (min.)	Benzene	Toluene	Xylene
10	8.63	89.00	2.38
20	8.33	89.94	1.72

Partial Reflux Ratio

Time (min.)	Benzene	Toluene	Xylene
10	8.99	89.47	1.53
20	9.21	89.27	1.52
30	9.22	89.19	1.59
40	9.26	89.16	1.58

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ฉ.8 ข้อมูลแสดงอุณหภูมิภายในระบบ (องศาเซลเซียส)

	Total Reflux Ratio					
Time (min.)	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
10	86	108	120	109	128	131
20	87	109	120	109	127	132

	Partial Reflux Ratio					
Time (min.)	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
10	59	109	121	109	127	131
20	61	109	120	109	127	131
30	62	109	120	109	127	131
40	60	109	120	109	127	131

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ช

1. ข้อมูลการจำลองภาวะการณ์หอกลั่นแบบเบดบรรจุด้วยโปรแกรม HYSYS เพื่อกลั่นแยกเบนซีน

กระแส	หน่วย	
	ลิตรต่อชั่วโมง	กิโลกรัมต่อชั่วโมง
สารป้อน	4.00	3.506
ผลิตภัณฑ์ยอดหอ	2.40	2.085
ผลิตภัณฑ์ก้นหอ	1.60	1.421

จากโปรแกรม HYSYS ให้อัตราการไหลของสารป้อน อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ยอดหอคงที่ตลอดการจำลองภาวะการณ์ที่ 3.506 และ 2.085 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ตามลำดับ แล้วปรับอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ

อัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ	องค์ประกอบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)					
	ผลิตภัณฑ์ยอดหอ			ผลิตภัณฑ์ก้นหอ		
	เบนซีน	โทลูอีน	ไซลีน	เบนซีน	โทลูอีน	ไซลีน
4.42	98.89	1.11	0.00	1.61	70.07	28.32
5.50	99.06	0.94	0.00	1.36	70.32	28.32
7.13	99.21	0.79	0.00	1.15	70.53	28.32
9.83	99.33	0.67	0.00	0.98	70.70	28.32

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2. ข้อมูลการจำลองภาวะการณ์หอกลั่นแบบเบดบรรจุด้วยโปรแกรม HYSYS เพื่อกลั่นแยกเบนซีน

กระแส	หน่วย	
	ลิตรต่อชั่วโมง	กิโลกรัมต่อชั่วโมง
สารป้อน	3.00	2.630
ผลิตภัณฑ์ยอดหอ	1.80	1.564
ผลิตภัณฑ์ก้นหอ	1.20	1.066

จากโปรแกรม HYSYS ให้อัตราการไหลของสารป้อน อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ยอดหอคงที่ตลอดการจำลองภาวะการณ์ที่ 2.630 และ 1.564 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ตามลำดับ แล้วปรับอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ

อัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ	องค์ประกอบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)					
	ผลิตภัณฑ์ยอดหอ			ผลิตภัณฑ์ก้นหอ		
	เบนซีน	โทลูอีน	ไซลีน	เบนซีน	โทลูอีน	ไซลีน
6.22	99.14	0.86	0.00	1.26	70.42	28.32
7.13	99.21	0.79	0.00	1.15	70.53	28.32
8.29	99.28	0.72	0.00	1.06	70.62	28.32
9.83	99.33	0.67	0.00	0.97	70.71	28.32

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3. ข้อมูลการจำลองภาวะการณ์หอกลั่นแบบเบดบรรจุด้วยโปรแกรม HYSYS เพื่อกลั่นแยกโทลูอีน

กระแส	หน่วย	
	ลิตรต่อชั่วโมง	กิโลกรัมต่อชั่วโมง
สารป้อน	4.00	3.473
ผลิตภัณฑ์ยอดหอ	2.40	2.081
ผลิตภัณฑ์ก้นหอ	1.60	1.392

จากโปรแกรม HYSYS ให้อัตราการไหลของสารป้อน อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ยอดหอคงที่ตลอดการจำลองภาวะการณ์ที่ 3.473 และ 2.081 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ตามลำดับ แล้วปรับอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ

อัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ	องค์ประกอบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)					
	ผลิตภัณฑ์ยอดหอ			ผลิตภัณฑ์ก้นหอ		
	เบนซีน	โทลูอีน	ไซลีน	เบนซีน	โทลูอีน	ไซลีน
4.42	5.64	93.87	0.49	0.01	9.21	90.78
5.50	5.64	94.00	0.36	0.00	9.03	90.97
7.13	5.64	94.09	0.27	0.00	8.89	91.11
9.83	5.64	94.16	0.20	0.00	8.79	91.21

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4. ข้อมูลการจำลองภาวะการณ์หอกลั่นแบบเบดบรรจุด้วยโปรแกรม HYSYS เพื่อกลั่นแยกโทลูอีน

กระแส	หน่วย	
	ลิตรต่อชั่วโมง	กิโลกรัมต่อชั่วโมง
สารป้อน	3.00	2.605
ผลิตภัณฑ์ยอดหอ	1.80	1.561
ผลิตภัณฑ์ก้นหอ	1.20	1.044

จากโปรแกรม HYSYS ให้อัตราการไหลของสารป้อน อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์ยอดหอคงที่ตลอดการจำลองภาวะการณ์ที่ 2.605 และ 1.561 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ตามลำดับ แล้วปรับอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ

อัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ	องค์ประกอบ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)					
	ผลิตภัณฑ์ยอดหอ			ผลิตภัณฑ์ก้นหอ		
	เบนซีน	โทลูอีน	ไซลีน	เบนซีน	โทลูอีน	ไซลีน
6.22	5.64	94.05	0.31	0.01	8.93	91.06
7.13	5.64	94.09	0.27	0.00	8.87	91.13
8.29	5.64	94.13	0.23	0.00	8.81	91.19
9.83	5.64	94.16	0.20	0.00	8.76	91.24

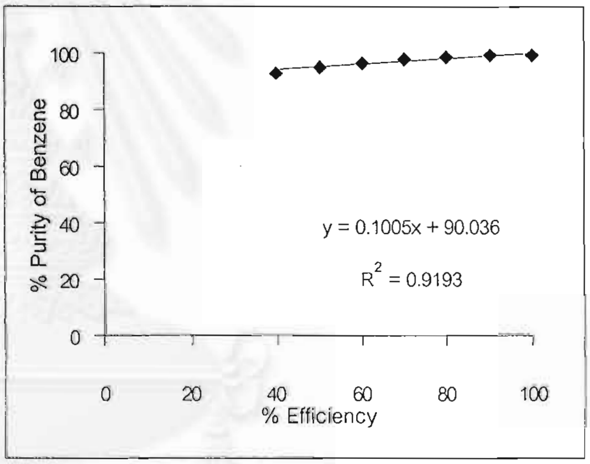
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ซ

การปรับเทียบค่าประสิทธิภาพรวมของหอกลั่นแบบเบดบรรจุที่ประมวลผลจากโปรแกรมจำลองภาวะการณ์ HYSYS กับค่าความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ยอดหอที่ได้จากการทดลองหอกลั่นขนาดขยายส่วน

1. นำข้อมูลที่ได้จากการจำลองภาวะการณ์ด้วยโปรแกรม HYSYS สำหรับหอกลั่นแยกเบนซีนที่ภาวะเหมาะสม อัตราการไหลของสารป้อน 3.0 ลิตรต่อชั่วโมง หรือ 2.630 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ 9.83 มาปรับเทียบค่าเพื่อหาประสิทธิภาพรวมของหอกลั่นขนาดขยายส่วนสำหรับกลั่นแยกเบนซีนแสดงได้ดังรูปที่ ซ.1 โดยที่ได้ความบริสุทธิ์ของเบนซีนที่ผลิตภัณฑ์ยอดหอร้อยละ 99.42 โดยน้ำหนัก

From HYSYS	
% Efficiency	% Purity of top product
40	99.11
50	95.16
60	96.67
70	97.75
80	98.49
90	98.99
100	99.33



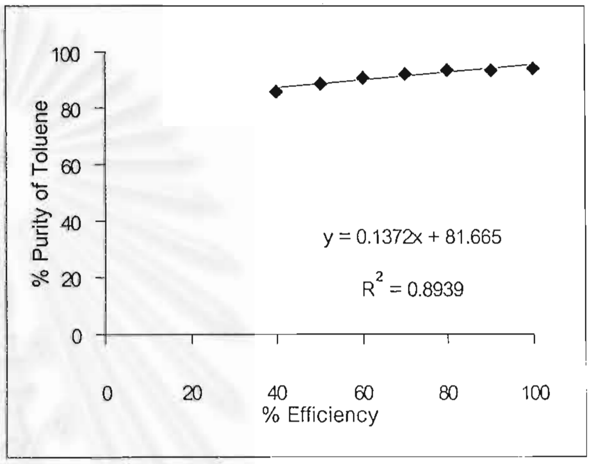
รูปที่ ซ.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของหอกลั่นกับความบริสุทธิ์ที่ภาวะเหมาะสมสำหรับปรับเทียบค่าเพื่อหาประสิทธิภาพรวมของหอกลั่นขนาดขยายส่วนสำหรับกลั่นแยกเบนซีน

คิดประสิทธิภาพรวมของหอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วนได้ดังนี้

$y = 0.1005x + 90.036$ ดังนั้น $\text{Efficiency} = \left(\frac{99.42 - 90.036}{0.1005}\right) \times 100 = 93.37\ \%$

2. นำข้อมูลที่ได้จากการจำลองภาวะการณ์ด้วยโปรแกรม HYSYS สำหรับหอกลั่นแยกโทลูอีนที่ภาวะเหมาะสม อัตราการไหลของสารป้อน 3.0 ลิตรต่อชั่วโมง หรือ 2.605 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และอัตราส่วนการป้อนย้อนกลับ 7.13 มาปรับเทียบค่าเพื่อหาประสิทธิภาพรวมของหอกลั่นขนาดขยายส่วนสำหรับกลั่นแยกโทลูอีนแสดงได้ดังรูปที่ ซ.2 โดยที่ได้ความบริสุทธิ์ของโทลูอีนที่ผลิตภัณฑ์ยอดหอร้อยละ 99.42 โดยน้ำหนัก

From HYSYS	
% Efficiency	% Purity of top product
40	85.67
50	88.65
60	90.84
70	92.35
80	93.32
90	93.88
100	94.16



รูปที่ ซ.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพของหอกลั่นกับความบริสุทธิ์ที่ภาวะเหมาะสมสำหรับปรับเทียบค่าเพื่อหาประสิทธิภาพรวมของหอกลั่นขนาดขยายส่วนสำหรับกลั่นแยกโทลูอีน

คิดประสิทธิภาพรวมของหอกลั่นแบบเบดบรรจุขนาดขยายส่วนได้ดังนี้

$y = 0.1372x + 81.665$ ดังนั้น Efficiency = $\left(\frac{91.01-81.665}{0.1372}\right)\times 100$ = 68.11 %

ประวัติผู้เขียน

นายอภิสิทธิ์ ทัศนา เกิดเมื่อวันที่ 18 เมษายน พ.ศ.2516 อ.เมือง จ.พิษณุโลก สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีทางเชื้อเพลิง ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2539 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2540

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย