การจำลองกระบวนการแยกอากาศแบบไครโอเจนิก

ชาคริต วัชระดนัย
สรวิชญ์ เตชะธาดามิตร์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

การจำลองกระบวนการแยกอากาศแบบไครโอเจนิก

ชาคริต วัชระดนัย

สรวิชญ์ เตชะธาดามิตร์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SIMULATION OF CRYOGENIC AIR SEPARATION PROCESS

CHAKRID WATCHARADANAI

SORAWIT TECHATHADAMIT

THIS THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS

FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF CHEMICAL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	การจำลองกระบวนการแยกอากาศแบบไครโอเจนิก
โดย	นายชาคริต วัชระดนัย
	นายสรวิชญ์ เตชะธาดามิตร์
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ. ดร. ดวงกมล ณ ระนอง
	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รศ. ดร. ดวงกมล ณ ระนอง)

.....กรรมการ

(รศ. ดร. เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์)

.....กรรมการ

(ผศ. ดร. ญาณีพร พัชรวรโชติ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	การจำลองกระบวนการแยกอากาศแบบไครโอเจนิก
โดย	นายชาคริต วัชระดนัย
	นายสรวิชญ์ เตชะธามิตร์
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ปีการศึกษา	2558
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ. ดร. ดวงกมล ณ ระนอง

บทคัดย่อ

แก๊สอุตสาหกรรมอย่างไนโตรเจน ออกซิเจน และอาร์กอน ถูกใช้งานเป็นอย่างมากในอุตสาหกรรมหลายประเภท โดยได้มาจากการแยกอากาศที่มีหลายวิธีและวิธีที่มีการใช้มากที่สุดคือวิธีแบบไครโอเจนิก การผลิตแก๊สอุตสาหกรรมข้างต้นให้มีความบริสุทธิ์สูงเพื่อใช้งานในภาคอุตสาหกรรมเป็นสิ่งที่มีความจำเป็น งานศึกษานี้จึงจำลองการแยกอากาศแบบไครโอเจนิกโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยจำลองให้มีผลิตภัณฑ์ได้แก่ ไนโตรเจน ออกซิเจน และอาร์กอน และนำแบบจำลองการแยกอากาศมาศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยศึกษาด้านค่าอัตราส่วนป้อนกลับ และอัตราการไหลของของเสีย โดยการเปลี่ยนค่าตัวแปรดังกล่าวในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ผลจากการศึกษาได้จำลองกระบวนการแยกอากาศได้ไนโตรเจนความบริสุทธิ์ 99.3 เปอร์เซ็นต์ ที่ผลผลิต 89.51 เปอร์เซ็นต์ ออกซิเจนความบริสุทธิ์ 99.7 เปอร์เซ็นต์ ที่ผลผลิต 95.70 เปอร์เซ็นต์ และอาร์กอนความบริสุทธิ์ 99.9 เปอร์เซ็นต์ ที่ผลผลิต 80.34 เปอร์เซ็นต์ โดยได้ผลผลิตผลิตภัณฑ์โดยรวมที่ 90.72 เปอร์เซ็นต์ และพบว่า ค่าอัตราส่วนป้อนกลับและปริมาณของเสีย มีผลต่อความบริสุทธิ์ของสารผลิตภัณฑ์ที่ได้ โดยค่าอัตราส่วนป้อนกลับที่เหมาะสมจะส่งผลให้ได้ความบริสุทธิ์ของสารผลิตภัณฑ์ไนโตรเจนและออกซิเจนสูงสุด และค่าอัตราส่วนป้อนกลับที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ความบริสุทธิ์ของอาร์กอนที่ได้สูงขึ้นด้วย ส่วนอัตราการไหลของของเสียที่เหมาะสมจะส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์ไนโตรเจนและออกซิเจนที่ความบริสุทธิ์สูงสุดและลดปริมาณของเสียที่ต้องปล่อยลงไปได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Report title	Simulation of cryogenic air separation process
By	Chakrid Watcharadanai
	Sorawit Techathadamit
Degree	Bachelor of engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2015
Project advisor	Assoc. Prof. Dr. Duangkamol Na-Ranong

Abstract

Nitrogen, oxygen and argon are industrial gases used in wide range of industries and can be produced by many air separation methods. The most used common produce method is cryogenic air separation. Then production of high purity nitrogen, oxygen and argon gas is necessary. This work simulate cryogenic air separation that separate air into three products include nitrogen, oxygen and argon using computer program then vary reflux ratio and waste flow rate parameters that effect purity of products on computer program. The results able to simulate air separation process with nitrogen purity 99.3% and 89.51% yield, oxygen purity 99.7% and 95.70%, argon purity 99.9% and 80.34% yield, overall product 90.72% yield. Moreover, reflux ratio and waste flow rate parameters effect purity of products. Appropriate reflux ratio results in highest purity of nitrogen and oxygen and higher reflux ratio results in higher purity of argon. Appropriate waste flow rate results in highest purity of nitrogen and oxygen and reduce discharge amount of waste.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำปริญญานิพนธ์เล่มนี้ขอขอบคุณ รศ. ดร. ดวงกมล ณ ระนอง อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ที่ได้ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหา ตลอดจนประสบการณ์ในการทำปริญญานิพนธ์เป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณ รศ. ดร. เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์ และ ผศ. ดร. ญาณีพร พัชรวรโชติ กรรมการสอบหัวข้อและโครงร่างวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำและข้อชี้แนะในการทำปริญญานิพนธ์

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ครูอาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนและถ่ายทอดความรู้ประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

ชาคริต วัชระดนัย

สรวิชญ์ เตชะธาดามิตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ II

กิตติกรรมประกาศ III

สารบัญ IV

สารบัญรูป VI

สารบัญตาราง VII

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ 1

1.2 วัตถุประสงค์ 1

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย 1

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 1

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ 2

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การแยกอากาศ 3

2.1.1 การแยกอากาศแบบเมมเบรน 3

2.1.2 การแยกอากาศแบบ Pressure Swing Adsorption (PSA) 3

2.1.3 การแยกอากาศแบบ Vacuum Pressure Swing Adsorption (VPSA) 4

2.1.4 การแยกอากาศแบบการกลั่นไครโอเจนิก 4

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 6

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน

3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการจำลอง 8

3.2 การจำลองกระบวนการแยกอากาศแบบไครโอเจนิก 8

3.2.1 การกำหนดคุณสมบัติ 8

3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการแยกอากาศ 9

3.2.3 รูปแบบกระบวนการ 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลลัพธ์การจำลองกระบวนการแยกอากาศ 12

4.1.1 แผนภาพและคำอธิบายกระบวนการแยกอากาศ 12

4.1.2 รายละเอียดอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการ 13

4.1.3 ตารางสมดุลมวลสารและความร้อน 16

4.1.4 ความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์และผลผลิตที่ได้ 18

4.2 ผลกระทบของปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการ 19

4.2.1 ผลของอัตราส่วนป้อนกลับที่มีต่อความบริสุทธิ์ของสาร 19

4.2.2 ผลของอัตราการไหลของของเสียที่มีต่อความบริสุทธิ์ของสาร 21

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง 22

บรรณานุกรม 23

ภาคผนวก 24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ 4.1 รายละเอียดของอุปกรณ์ 14

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติของสารในสาย POST-COMP, PRE-HPC, POST-HPC N_2, PRE-LPC N_2 16

ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติของสารในสาย POST-HPC O_2, PRE-LPC O_2, PRE-LPC AIR, AIR 17

ตารางที่ 4.4 คุณสมบัติของสารในสาย AR, CO_2, H_2O, N_2, O_2, WASTE 18

ตารางที่ 4.5 แสดงความบริสุทธิ์และผลผลิตของผลิตภัณฑ์ที่ได้ 18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ 2.1 การแยกอากาศแบบการกลั่นไครโอเจนิก 5

รูปที่ 2.2 แผนภูมิกระบวนการ (Process flow diagram) ของหน่วยแยกอากาศ 6

รูปที่ 3.1 แผนภูมิการไหล (Block flow diagram) ของกระบวนการแยกอากาศ 10

รูปที่ 3.2 แผนภูมิกระบวนการ (Process flow diagram) ของกระบวนการแยกอากาศ 10

รูปที่ 4.1 แผนภาพกระบวนการแยกอากาศโดยวิธีไครโอเจนิกจากการจำลอง 12

รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ที่ได้เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนป้อนกลับ 19

รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความบริสุทธิ์ของอาร์กอนที่ได้เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนป้อนกลับ 20

รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ที่ได้เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการไหล 21
ของเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันมีการใช้งานแก๊สอุตสาหกรรม อย่างไนโตรเจน ออกซิเจน และอาร์กอน เป็นอย่างมากในอุตสาหกรรมต่างๆ ทั้งยังมีแนวโน้มใช้งานมากขึ้นในทุกปี เนื่องมาจากการขยายตัวของอุตสาหกรรม แก๊สอุตสาหกรรมข้างต้นได้มาจากการแยกอากาศที่มีหลายวิธีและวิธีที่มีการใช้มากที่สุดคือ วิธีแบบไครโอเจนิก ซึ่งวิธีแบบไครโอเจนิกเป็นวิธีที่สามารถผลิตไนโตรเจนความบริสุทธิ์สูงปริมาณมากและเหมาะสมกับกำลังการผลิตหลายขนาด งานวิจัยนี้จึงทำการจำลองแยกอากาศแบบไครโอเจนิกโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สร้างแบบจำลองออกมาเพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาการจำลองรวมถึงปรับปรุงกระบวนการและศึกษาปัจจัยบางปัจจัยที่ส่งผลต่อความบริสุทธิ์ของสารผลิตภัณฑ์คือ ไนโตรเจน ออกซิเจน และอาร์กอนที่ได้ซึ่งได้แก่ ผลของอัตราส่วนป้อนกลับ และผลของอัตราการไหลของของเสียที่มีต่อความบริสุทธิ์ของสารผลิตภัณฑ์

1.2 วัตถุประสงค์

ศึกษาการจำลองกระบวนการแยกอากาศแบบไครโอเจนิกให้ได้ไนโตรเจน ออกซิเจน และอาร์กอน และศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความบริสุทธิ์ของไนโตรเจน ออกซิเจน และอาร์กอน อย่างค่าอัตราส่วนป้อนกลับ และอัตราการไหลของของเสีย เพื่อเป็นแนวทางที่เป็นประโยชน์ต่อการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สอุตสาหกรรม

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ศึกษาการจำลองการแยกอากาศแบบไครโอเจนิกให้ได้ไนโตรเจน ออกซิเจน และอาร์กอน โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สร้างแบบจำลองการแยกอากาศออกมา และใช้แบบจำลองที่ได้ศึกษาปัจจัยด้านค่าอัตราส่วนป้อนกลับ และอัตราการไหลของของเสียในกระบวนการการผลิตที่ส่งผลต่อความบริสุทธิ์ของไนโตรเจน ออกซิเจน และไนโตรเจน

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้แบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่

1. การจำลองการแยกอากาศแบบไครโอเจนิกโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลองให้มีผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ไนโตรเจน ออกซิเจน และอาร์กอน
2. นำแบบจำลองการแยกอากาศมาศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ที่ได้โดยศึกษาด้านค่าอัตราส่วนป้อนกลับ และอัตราการไหลของของเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

สามารถนำผลการศึกษาที่ได้ไปใช้ปรับปรุงกระบวนการแยกอากาศให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นในแง่ความบริสุทธิ์ของสารผลิตภัณฑ์คือ ไนโตรเจน ออกซิเจน และอาร์กอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การแยกอากาศ [1]

โรงแยกอากาศทำการแยกอากาศออกเป็นองค์ประกอบหลักๆคือ ไนโตรเจน ออกซิเจน และอาร์กอน การเลือกแบบโรงแยกอากาศจะพิจารณาจากผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ กำลังการผลิต และความบริสุทธิ์ โดยกระบวนการแยกอากาศมีหลายกระบวนการ ได้แก่ เมมเบรน Pressure Swing Adsorption (PSA) และ Vacuum Pressure Swing Adsorption (VPSA) ซึ่งโดยปกติกระบวนการทั้งสามข้างต้นใช้แยกองค์ประกอบเดียวจากอากาศ ทั้งนี้กระบวนการแยกแบบการกลั่นไครโอเจนิกเป็นกระบวนการที่มีการใช้มากที่สุด

กระบวนการแยกอากาศมีหลายกระบวนการได้แก่

2.1.1 การแยกอากาศแบบเมมเบรน

การแยกอากาศแบบนี้จะแยกไนโตรเจนจากอากาศโดยการซึมผ่านแบบเลือกผ่านผนังเมมเบรน เยื่อเมมเบรนจะให้แก๊สออกซิเจน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ ผ่านผนังได้เนื่องจากแก๊สเหล่าสามารถซึมผ่านผนังได้รวดเร็วกว่าแก๊สไนโตรเจน

เมมเบรนแยกอากาศออกเป็น 2 สาย สายหนึ่งคือ สายซึมผ่าน ประกอบด้วย ออกซิเจน คาร์บอนไดออกไซด์ และไอน้ำ ส่วนอีกสายหนึ่งคือ สายผลิตภัณฑ์ ประกอบด้วย ไนโตรเจนความดันสูง ในส่วนของแก๊สที่ซึมผ่านผนังเมมเบรนจะถูกระบายออกสู่บรรยากาศและไนโตรเจนจะผ่านเมมเบรนออกไปเป็นผลิตภัณฑ์

ความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์สามารถปรับได้โดยเปลี่ยนเงื่อนไขปฏิบัติการ เมื่ออัตราการไหลของไนโตรเจนลดลง ความบริสุทธิ์ของไนโตรเจนจะเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของไนโตรเจน ความบริสุทธิ์ของไนโตรเจนจะลดลง

2.1.2 การแยกอากาศแบบ Pressure Swing Adsorption (PSA)

การแยกแก๊สแบบนี้ใช้แยกแก๊สบางชนิดจากแก๊สผสมโดยอาศัยความต่างของแก๊สในด้านคุณสมบัติความดันและความเกี่ยวข้องกับวัสดุตัวดูดซับของแก๊ส โดยการแยกแก๊สดังกล่าวกระทำที่อุณหภูมิบรรยากาศ

วัสดุดูดซับ เช่น ซีโอไลต์ ถูกใช้เป็นโมเลกุล่าร์ ซีฟ โดยดูดซับแก๊สที่ความดันสูง กระบวนการจึงเปลี่ยนเป็นความดันต่ำเพื่อคายซับวัสดุที่ถูกดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแยกแก๊สจะอาศัยว่าที่ความดันสูง แก๊สจะถูกดูดซับ ยิ่งความดันสูงแก๊สจะยิ่งถูกดูดซับมากและเมื่อความดันลดลงแก๊สจะถูกคายซับ กระบวนการแยกแก๊สนี้สามารถใช้แยกแก๊สจากแก๊สผสมได้เพราะแก๊สต่างชนิดกันจะถูกดูดติดที่พื้นผิวของของแข็งที่ต่างกันได้มากหรือน้อยแตกต่างกัน

2.1.3 การแยกอากาศแบบ Vacuum Pressure Swing Adsorption (VPSA)

การแยกแก๊สแบบนี้เป็นอีกรูปแบบหนึ่งของแบบ Pressure Swing Adsorption (PSA) โดยจะใช้เครื่องเป่าอากาศแทนเครื่องอัดอากาศในการป้อนอากาศเข้าสู่ระบบและแก๊สที่ถูกทำให้บริสุทธิ์แล้วจะถูกเก็บโดยใช้เครื่องเป่าสุญญากาศในการคายซับภาชนะตัวดูดซับ

ระบบการแยกอากาศนี้จะประกอบไปด้วยเครื่องเป่าอากาศ เครื่องเป่าสุญญากาศในกรณีสองเบดเท่านั้น หนึ่งหรือสองภาชนะตัวดูดซับ ถังออกซิเจน วาล์ว และการควบคุมโดยคอมพิวเตอร์

ในระบบหนึ่งเบด เครื่องเป่าอากาศดูดอากาศมา บีบอัด และส่งต่อไปยังภาชนะบรรจุตัวดูดซับเพื่อกำจัดสิ่งสกปรก จะทำให้ได้ออกซิเจนบริสุทธิ์ที่ 90 ถึง 94 เปอร์เซ็นต์เป็นผลิตภัณฑ์ ตัวดูดซับคืนสภาพโดยเครื่องเป่าอากาศเอาแก๊สออกโดยลดความดันในภาชนะ แก๊สของเสียอย่างไนโตรเจน น้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ จะถูกปล่อยออกสู่อากาศ ระบบการแยกอากาศนี้จะรวมถังความดันต่ำเพื่อป้อนออกซิเจนอย่างต่อเนื่องเนื่องจากออกซิเจนไม่ได้ผลิตในช่วงคืนสภาพของตัวดูดซับ

ส่วนระบบสองเบดใช้กระบวนการดูดซับเหมือนกัน อาศัยการเปลี่ยนของความดันจากเหนือหนึ่งบรรยากาศไปยังความดันต่ำกว่าบรรยากาศ (สุญญากาศ) โดยแต่ละเบดจะสลับกันดูดซับและคายซับอย่างต่อเนื่อง เมื่อเบดหนึ่งดูดซับของเสียจากออกซิเจน อีกเบดหนึ่งจะคืนสภาพตัวดูดซับ ดังนั้น เบดจะสลับกันผลิตออกซิเจนสู่ถังเก็บผลิตภัณฑ์เพื่อให้มีใช้โดยตลอดที่ความดันและความบริสุทธิ์คงที่

2.1.4 การแยกอากาศแบบการกลั่นไครโอเจนิก

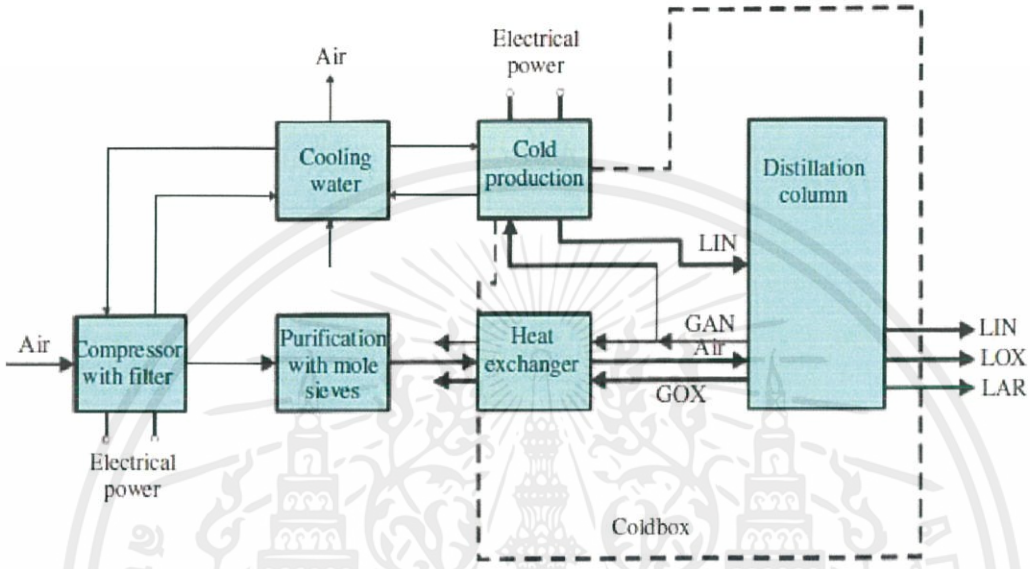
การแยกอากาศแบบนี้ใช้ผลิตแก๊สไนโตรเจน ออกซิเจน และอาร์กอน ที่มีความบริสุทธิ์สูง รวมถึงแก๊สหายากอย่างนีออน คริปตอน และซีนอน

กระบวนการหลักในการแยกอากาศแบบนี้ ได้แก่

1. บีบอัดอากาศและกรองอากาศ
2. กำจัดสิ่งปนเปื้อนในอากาศอย่างไอน้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ และอื่นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ทำความเย็นให้อากาศ
4. การหล่อเย็นของเครื่องบีบอัดอากาศและอุปกรณ์อื่นด้วยน้ำเย็น
5. การแยกอากาศออกเป็นแก๊สหลายชนิด
6. กล่องความเย็น (Cold box)

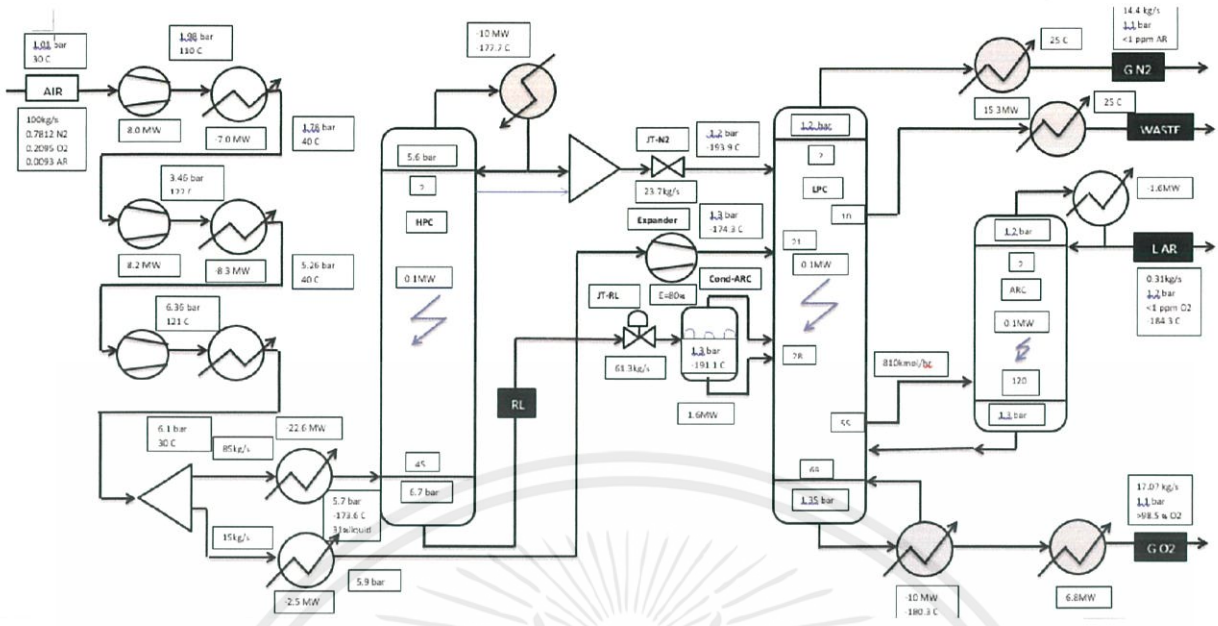


รูปที่ 2.1 การแยกอากาศแบบการกลั่นไครโอเจนิก

กระบวนการแยกอากาศเริ่มด้วยการบีบอัดอากาศที่กรองแล้ว ความดันในการบีบอัดอากาศทั่วไปอยู่ที่ 5 ถึง 10 บาร์เกจ จากนั้นอากาศจึงผ่านโมเลกุล่าร์ ซีฟ เบด ที่จะกำจัดไอน้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นสารที่อาจจะเกิดการแข็งตัวและอุดตันอุปกรณ์ในกระบวนการ หลังจากนั้นอากาศจะผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและทำความเย็นโดยแลกเปลี่ยนความร้อนกับสายผลิตภัณฑ์ที่มีความเย็นจัด อากาศส่วนหนึ่งจะถูกแยกเป็นออกซิเจนที่หอกลั่นความดันต่ำ และอากาศอีกส่วนหนึ่งจะถูกกลั่นแยกออกเป็นไนโตรเจนบริสุทธิ์ในหอกลั่นความดันสูง อากาศส่วนหนึ่งที่ไม่ได้ถูกแยกจะออกจากหอกลั่นความดันต่ำเป็นของเสีย

เพราะจุดเดือดของอาร์กอนอยู่ระหว่างออกซิเจนและไนโตรเจน อาร์กอนจึงรวมตัวที่บริเวณส่วนล่างของหอกลั่นความดันต่ำ บริเวณที่อาร์กอนรวมตัวมากที่สุดจะถูกดึงไปยังหอกลั่นอีกหอกลั่นที่จะกลั่นจนได้อาร์กอนความบริสุทธิ์ที่ต้องการส่วนของเหลวจะถูกส่งกลับไปยังจุดเดิมของหอกลั่นความดันต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แผนภูมิกระบวนการ (Process flow diagram) ของหน่วยแยกอากาศ (ที่มา: H.Kooijman (2006))

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Sher shah Amarkhail [2] ศึกษาอธิบายกระบวนการแยกอากาศรวมถึงเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและการกลั่นแบบไครโอเจนิก โดยได้สร้างแบบจำลองแอสเพนพลัสของกระบวนการแยกอากาศแบบไครโอเจนิกออกเป็นไนโตรเจน ออกซิเจน และอาร์กอน วิเคราะห์อิทธิพลของตัวแปรต่างๆต่อประสิทธิภาพการกลั่น ผลการศึกษาได้สร้างกระบวนการแยกอากาศที่อัตราการไหลของอากาศ 6,048.9 กิโลโมลต่อชั่วโมง ออกเป็นไนโตรเจนความบริสุทธิ์ 99 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหล 4,761.98 กิโลโมลต่อชั่วโมง ออกซิเจนความบริสุทธิ์ 99 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหล 1,242.77 กิโลโมลต่อชั่วโมง และอาร์กอนความบริสุทธิ์ 99.99 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหล 44.15 กิโลโมลต่อชั่วโมง โดยออกแบบกระบวนการแยกอากาศเป็นหอกลั่น 4 หอกลั่น ทั้งนี้ผลการศึกษาทางเทอร์โมไดนามิกพบว่าการแยกอาร์กอนออกจากออกซิเจนใช้ชั้นของหอกลั่นและค่าอัตราส่วนป้อนกลับมาก

Deepak Kumar Bhunya [3] ศึกษาการจำลองหน่วยแยกอากาศแบบไครโอเจนิกของโรงงานเหล็ก Rourkela โดยใช้โปรแกรมแอสเพนไฮซิส การศึกษาจำลองทั้งสภาวะคงตัวและไดนามิก รวมถึงศึกษาประสิทธิภาพของโรงงาน การใช้พลังงาน ความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ และพฤติกรรมของตัวแปรกระบวนการเมื่อเทียบกับเวลาและการป้อน ผลการศึกษาได้สร้างกระบวนการแยกอากาศที่อัตราการไหลเข้าของอากาศ 4,521 กิโลโมลต่อชั่วโมง ความดัน 101.3 กิโลปาสคาล อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส ออกเป็นไนโตรเจนความบริสุทธิ์ 99.15 เปอร์เซ็นต์ ที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการไหล 3,553 กิโลโมลต่อชั่วโมง ออกซิเจนความบริสุทธิ์ 98.89% ที่อัตราการไหล 943.1 กิโลโมลต่อชั่วโมง และอาร์กอนความบริสุทธิ์ 100 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราการไหล 16.90 กิโลโมลต่อชั่วโมง ทั้งนี้พบว่ามีการใช้พลังงาน 0.44501 กิโลวัตต์ต่อกิโลกรัมต่อชั่วโมงของออกซิเจน และการกู้คืนของโรงงานอยู่ที่ 99.562 เปอร์เซ็นต์ อิงออกซิเจนในสภาวะคงตัว

Adam Ahmed Abdalla Mustafa และคณะ [4] ศึกษาจำลองกระบวนการ วิเคราะห์ผลของการเปลี่ยนค่าตัวแปร และประเมินความสามารถของกระบวนการ ผลการศึกษาพบว่ากระบวนการแยกอากาศแบบไครโอเจนิกเป็นกระบวนการที่ใช้มากที่สุดเนื่องจากสามารถผลิตไนโตรเจนความบริสุทธิ์สูงได้ ทั้งนี้การเพิ่มอัตราส่วนป้อนกลับในหอกลั่นและการเพิ่มชั้นของหอกลั่นจะช่วยเพิ่มความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการจำลอง

ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการจำลองกระบวนการแยกอากาศทั้งหมด โดยใช้โปรแกรมที่สามารถใช้ในงานทางวิศวกรรมเคมีและสามารถใช้ในการจำลองกระบวนการผลิตได้ นอกจากนี้ยังสามารถใช้ในงานอื่นๆเป็นต้นว่า ใช้เป็นเครื่องมือสำหรับจำลองทางวิศวกรรมปฏิกิริยา ออกแบบและคำนวณขนาดของรีแอคเตอร์ (reactor) คาดการณ์การเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยา ทำความเข้าใจพฤติกรรมสมดุลปฏิกิริยา

3.2 การจำลองกระบวนการแยกอากาศแบบไครโอเจนิก

3.2.1 การกำหนดคุณสมบัติ

- การกำหนดองค์ประกอบของอากาศที่ใช้ป้อนกระบวนการผลิต ได้แก่

ไนโตรเจนคิดเป็น 76.5 เปอร์เซ็นต์ของอากาศ

ออกซิเจนคิดเป็น 20.5 เปอร์เซ็นต์ของอากาศ

อาร์กอนคิดเป็น 1 เปอร์เซ็นต์ของอากาศ

ไอน้ำคิดเป็น 1 เปอร์เซ็นต์ของอากาศ

คาร์บอนไดออกไซด์คิดเป็น 1 เปอร์เซ็นต์ของอากาศ

- การกำหนดคุณสมบัติของสายป้อนโดยมี

อัตราการไหลที่ 420 กิโลโมลต่อชั่วโมง

ความดันที่ 1.01 บาร์

อุณหภูมิที่ 30 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการแยกอากาศ

เครื่องอัดอากาศ (Compressor)

ทำหน้าที่ในการดูดอากาศเพิ่มความดัน โดยอากาศที่ถูกส่งมาจะถูกอัดให้มีความดันสูงเพื่อให้เหมาะแก่การกลั่นแยกต่อไป

เครื่องทำความเย็น (Cooler)

ทำหน้าที่ลดอุณหภูมิของอากาศหลังออกจากเครื่องอัดอากาศให้มีอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อกระบวนการแยกอากาศต่อไป

เครื่องดูดซับ (Adsorber)

เป็นอุปกรณ์ที่กำจัดมลทินที่เป็นแก๊สออกซึ่งก็คือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำออกจากกระบวนการโดยใช้ตัวดูดซับที่มีรูพรุน โดยจะกำจัดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกก่อน แล้วตามด้วยน้ำ เนื่องจากสารทั้งสองเมื่อผ่านการทำความเย็นติดลบมากๆ จะกลายสถานะเป็นของแข็งอุดตันท่อได้

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger)

เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างอากาศกับผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการแยกอากาศโดยการแลกเปลี่ยนความร้อนจะทำให้อากาศมีอุณหภูมิลดต่ำลงจนเหมาะสมในการแยกต่อไป

หอกลั่นแยก (Distillation Column)

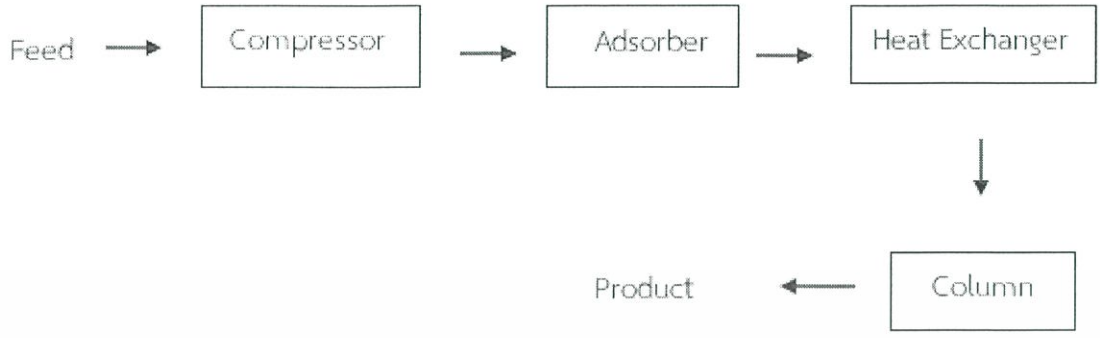
ทำหน้าที่ในกลั่นแยกอากาศออกเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ไนโตรเจน ออกซิเจน และอาร์กอน โดยใช้หอกลั่นแยกอากาศ 2 หอ คือ หอกลั่นความดันสูงมี 45 ชั้นและหอกลั่นความดันต่ำมี 69 ชั้น ส่วนการแยกอาร์กอนจะใช้หอกลั่นแยกอาร์กอนอีกหอหนึ่ง อุณหภูมิ ความดัน และอัตราส่วนป้อนกลับที่เหมาะสมจะส่งผลให้ได้ความบริสุทธิ์สารผลิตภัณฑ์ที่สูง

เครื่องลดความดันอากาศ (Expander)

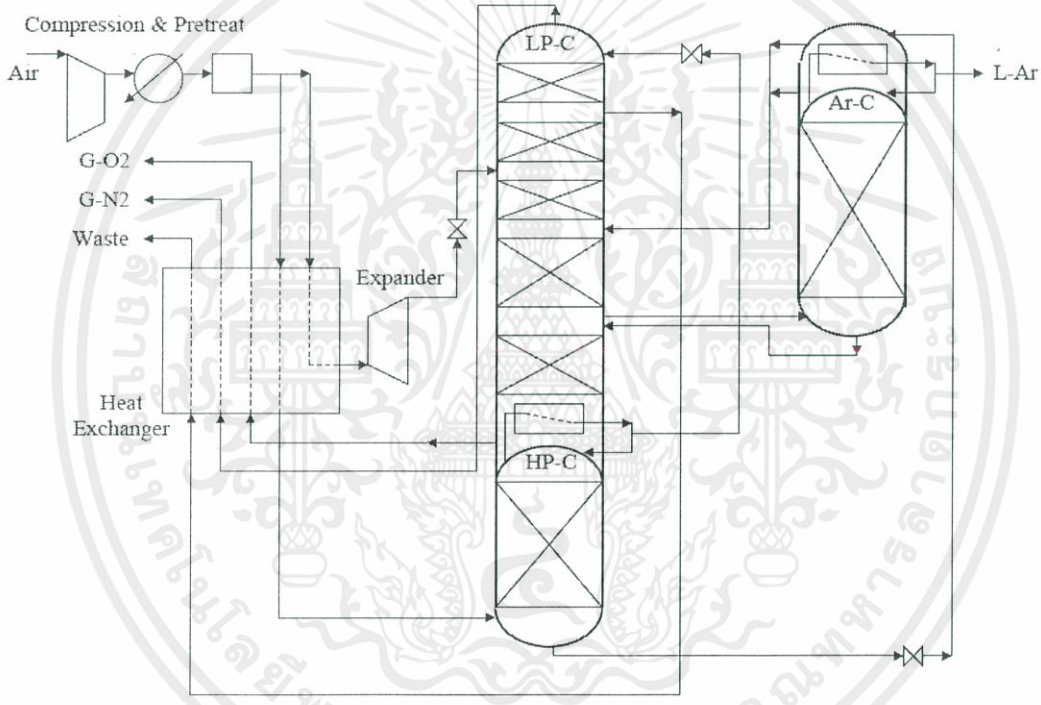
ทำหน้าที่ลดความดันของอากาศที่ส่งเข้าสู่หอกลั่นความดันต่ำ ซึ่งในการลดความดันของอากาศจะส่งผลให้อุณหภูมิลดลงด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 รูปแบบกระบวนการ



รูปที่ 3.1 แผนภูมิการไหล (Block flow diagram) ของกระบวนการแยกอากาศ



รูปที่ 3.2 แผนภูมิกระบวนการ (Process flow diagram) ของกระบวนการแยกอากาศ

อัดอากาศ

อากาศหลังจากผ่านตัวกรองอากาศจะเข้าสู่เครื่องอัดอากาศ (Air compressor) เพื่อเพิ่มความดันของอากาศให้สูงประมาณ 6 บาร์

ลดอุณหภูมิของอากาศ

อากาศเมื่อออกจากเครื่องอัดอากาศจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น ดังนั้นจึงต้องทำการลดอุณหภูมิลงเหลือประมาณ 30 องศาเซลเซียส โดยผ่านเครื่องทำความเย็น (After cooler)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำอากาศให้บริสุทธิ์

อากาศที่ผ่านขั้นตอนการลดอุณหภูมิก็จะเข้าสู่ขั้นตอนการทำอากาศให้บริสุทธิ์ (Purification) อากาศจะเข้าหอดูดซับ (Molecular sieve adsorber) เพื่อแยกไอน้ำและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากอากาศ เพื่อให้ได้อากาศที่บริสุทธิ์เข้าสู่หน่วยทำอากาศเหลว

ลดอุณหภูมิของอากาศที่ไครโอเจนิก

อากาศที่บริสุทธิ์ออกจากหอดูดซับและแลกเปลี่ยนความร้อนกับผลิตภัณฑ์แก๊สไนโตรเจน ออกซิเจน และแก๊สทิ้ง ในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger) จนทำให้อุณหภูมิอากาศบริสุทธิ์ลดเหลือประมาณ -170 องศาเซลเซียส จากนั้นจึงจะเข้าสู่หอกลั่นเพื่อทำการแยกองค์ประกอบหลักๆ คือ ออกซิเจน ไนโตรเจน และอาร์กอน ต่อไป

การแยกไนโตรเจนและออกซิเจนออกจากอากาศ

จากนั้นอากาศบริสุทธิ์เหลวที่มีอุณหภูมิประมาณ -170 องศาเซลเซียส ความดันประมาณ 6 บาร์ จะเข้าสู่หอกลั่นความดันสูง ซึ่งจะแยกอากาศออกได้เป็นไนโตรเจนและออกซิเจน ซึ่งทั้งคู่จะถูกลดความดันก่อนส่งต่อไปยังหอกลั่นความดันต่ำที่ความดันประมาณ 1.2 บาร์ และมีอุณหภูมิประมาณ -185 องศาเซลเซียส ที่หอกลั่นความดันต่ำนี้จะทำการแยกแก๊สอีกครั้งจนได้ไนโตรเจนและออกซิเจนที่มีความบริสุทธิ์สูง

การแยกอาร์กอนออกจากออกซิเจน

แก๊สที่มีองค์ประกอบของออกซิเจนและอาร์กอนจากหอกลั่นความดันต่ำจะถูกส่งไปหอกลั่นอาร์กอนซึ่งจะแยกอาร์กอนออกจากออกซิเจนเป็นผลิตภัณฑ์ต่อไป

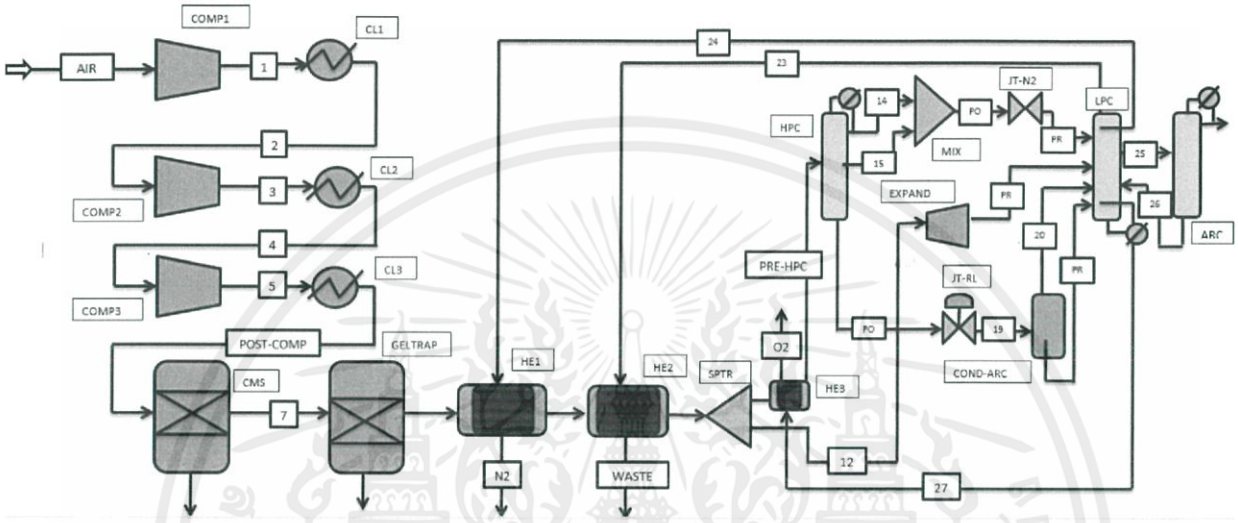
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 ผลลัพธ์การจำลองกระบวนการแยกอากาศ

4.1.1 แผนภาพและคำอธิบายกระบวนการแยกอากาศ



รูปที่ 4.1 แผนภาพกระบวนการแยกอากาศโดยวิธีไครโอเจนิกจากการจำลอง

อุปกรณ์หลักประกอบด้วย

-เครื่องอัดอากาศ (COMP1, COMP2, COM3)

-เครื่องลดอุณหภูมิ (CL1, CL2, CL3)

-หอดูดซับ (CMS, GELTRAP)

-เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (HE1, HE2, HE3)

-เครื่องลดความดัน (EXPAND)

-หอกลั่น (HPC, LPC, ARC)

คำอธิบายกระบวนการ (Process Description)

อากาศจากบรรยากาศที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ ด้วยอัตราการไหล 12,184.11 กิโลโมลต่อชั่วโมง ผ่านเข้าสู่เครื่องอัดอากาศ 3 ตัว (COMP1, COMP2, COMP3) โดยมีเครื่องทำความเย็นคอยลดอุณหภูมิแต่ละขั้นตอนอัดความดันเพื่อให้ได้ความดัน 6 บาร์ ก่อนที่จะเข้าหอดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์และหอดูดซับน้ำ (CMS, GELTRAP) เพื่อทำอากาศให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริสุทธิ์ จากนั้นจะส่งไปยังเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (HE1, HE2) เพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนกับผลิตภัณฑ์ไนโตรเจนและแก๊สทิ้ง ทำให้อากาศบริสุทธิ์มีความเย็นเป็น -133 องศาเซลเซียส ก่อนจะแยกอากาศบริสุทธิ์เป็นสองสาย โดยสายที่ 11 จะถูกส่งไปแลกเปลี่ยนความร้อนกับผลิตภัณฑ์ออกซิเจนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (HE3) ลดอุณหภูมิอากาศบริสุทธิ์ลงเหลือ -172 องศาเซลเซียส ความดัน 6 บาร์และไปเข้าหอกลั่นความดันสูง (HPC) ความดันปฏิบัติการที่ 5.7 บาร์ภายในหอกลั่น ส่วนสายที่ 12 จะส่งอากาศบริสุทธิ์ที่ -133 องศาเซลเซียส ความดัน 6 บาร์เข้าหอกลั่นความดันต่ำ (LPC) ความดันปฏิบัติการที่ 1.2 บาร์ภายในหอกลั่น ผ่าน expander เพื่อลดความดันขาเข้าเหลือ 1.3 บาร์ต่อไป ในส่วนของหอกลั่นความดันสูงจะกลั่นแยกอากาศโดยส่วนบนของหอกลั่นจะได้เป็นของเหลวที่มีความเข้มข้นของไนโตรเจนสูงส่งผ่านวาล์วลดความดันเหลือ 1.2 บาร์ เข้าสู่หอกลั่นความดันต่ำเพื่อกลั่นแยกต่อไป ส่วนล่างของหอกลั่นความดันสูงได้เป็นของเหลวที่มีความเข้มข้นของออกซิเจนสูงส่งไปยังหอกลั่นความดันต่ำโดยลดความดันผ่านวาล์วเหลือ 1.3 บาร์ เมื่อสารส่งถึงหอกลั่นความดันต่ำ หอกลั่นจะทำการกลั่นแยกโดยส่วนบนของหอกลั่นจะได้ไนโตรเจนความบริสุทธิ์ 99.3% และแก๊สทิ้ง ส่วนล่างหอกลั่นความดันต่ำจะได้ออกซิเจนบริสุทธิ์ 99.7% โดยทั้งผลิตภัณฑ์ไนโตรเจน ออกซิเจน และแก๊สทิ้งที่ได้จะถูกส่งไปแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศบริสุทธิ์ที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (HE1, HE2, HE3) ส่วนอาร์กอนที่มีออกซิเจนผสมอยู่จะถูกส่งไปยังหอกลั่นอาร์กอน (ARC) เพื่อแยกอาร์กอนเหลวความบริสุทธิ์ 99.9% ออกที่ส่วนบนของหอกลั่นไปเป็นผลิตภัณฑ์ต่อไปและส่วนล่างหอกลั่นจะส่งออกซิเจนผสมกลับไปยังหอกลั่นความดันต่ำเพื่อกลั่นแยกต่อไป

4.1.2 รายละเอียดอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 รายละเอียดของอุปกรณ์

อุปกรณ์	ชนิดอุปกรณ์	รายละเอียด
COMP1	Compressor	- Flow rate: 12,184.11 kg/h - Drive power: 296.27 kW - Discharge pressure: 1.96 bar
COMP2	Compressor	- Flow rate: 12,184.11 kg/h - Drive power: 308.48 kW - Discharge pressure: 3.46 bar
COMP3	Compressor	- Flow rate: 12,184.11 kg/h - Drive power: 310.24 kW - Discharge pressure: 6.36 bar
EXPAND	Expander	- Flow rate: 1,789.32 kg/hr - Drive power: -17,031 kW - Discharge pressure: 1.3 bar
JT-N2	Valve	- Flow rate: 9,987.96 kg/hr - Outlet pressure: 1.2 bar
JT-RL	Valve	- Flow rate: 151.54 kg/hr - Outlet pressure: 1.3 bar
CL1	Cooler	- Outlet temperature: 40 °C - Outlet pressure: 1.78 bar - Duty: -262.81 kW
CL2	Cooler	- Outlet temperature: 40 °C - Outlet pressure: 3.26 bar - Duty: -309.83 kW
CL3	Cooler	- Outlet temperature: 30 °C - Outlet pressure: 6.10 bar - Duty: -367.29 kW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์	ชนิดอุปกรณ์	รายละเอียด
HE1	Heat Exchanger	- Flow direction: counter current - Hot stream outlet temperature: -123 °C - Duty: 521.09 kW
HE2	Heat Exchanger	- Flow direction: counter current - Hot stream outlet temperature: -133 °C - Duty: 35.29 kW
HE3	Heat Exchanger	- Flow direction: counter current - Hot stream outlet temperature: -172 °C - Duty: 122.23 kW
CMS	Absorber	- Inlet flow rate: 12,184.11 kg/hr - Air outlet flow rate: 12,002.97 kg/hr
GELTRAP	Absorber	- Inlet flow rate: 12,184.11 kg/hr - Air outlet flow rate: 11,928.82 kg/hr
HPC	Distillation column	- Tray style: sieve tray - Reflux ratio: 0.55 - Number of stages: 45 - Feed stage: 45 - Pressure : 5.7 bar
LPC	Distillation column	- Tray style: sieve tray - Reflux ratio: 5 - Number of stages: 69 - Feed stage: 2, 21, 28 and 55 - Pressure : 1.2 bar
ARC	Distillation column	- Tray style: sieve tray - Reflux ratio: 17.79 - Number of stages: 120 - Feed stage: 120 - Pressure : 1.2 bar

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์	ชนิดอุปกรณ์	รายละเอียด
COND-ARC	Flash drum column	- Outlet temperature: -191.1 °C - Outlet pressure: 1.3 bar - Heat duty: - 1.53 kW

4.1.3 ตารางสมดุลมวลสารและความร้อน

ตารางที่ 4.2 คุณสมบัติของสารในสาย POST-COMP, PRE-HPC, POST-HPC N_2, PRE-LPC N_2

Heat and Material Balance Table					
Stream ID		POST-COMP	PRE-HPC	POST-HPC N_2	PRE-LPC N_2
Temperature	C	30.0	-172.0	-175.3	-192.4
Pressure	bar	6.10	6.10	5.70	1.20
Vapor Frac		0.996	1.000	< 0.001	0.178
Mole Flow	kmol/hr	420.000	350.003	345.000	345.000
Mass Flow	kg/hr	12184.115	10139.497	9987.959	9987.959
Volume Flow	cum/hr	1723.194	415.179	12.926	337.046
Enthralpy	MMBtu/hr	-2.509	-1.998	-3.656	-3.656
Mole Flow	kmol/hr				
N_2		321.174	272.998	270.681	270.681
O_2		86.478	73.506	70.906	70.906
AR		4.116	3.499	3.412	3.412
H2O		4.116			
CO_2		4.116			
Mole Frac					
N_2		0.765	0.780	0.785	0.785
O_2		0.206	0.210	0.206	0.206
AR		0.010	0.010	0.010	0.010
H_2O		0.010			
CO_2		0.010			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 คุณสมบัติของสารในสาย POST-HPC O_2, PRE-LPC O_2, PRE-LPC AIR, AIR

Heat and Material Balance Table					
Stream ID		POST-HPC O_2	PRE-LPC O_2	PRE-LPC AIR	AIR
Temperature	C	-171.5	-191.1	-171.3	30.0
Pressure	bar	5.70	1.30	1.30	1.01
Vapor Frac		0.000	0.000	1.000	1.000
Mole Flow	kmol/hr	5.003	5.003	61.765	420.000
Mass Flow	kg/hr	151.538	151.538	1789.323	12184.115
Volume Flow	cum/hr	0.173	0.155	391.378	10441.456
Enthralpy	MMBtu/hr	-0.054	-0.060	-0.337	-2.424
Mole Flow	kmol/hr				
N_2		2.317	2.317	48.176	321.174
O_2		2.600	2.600	12.972	86.478
AR		0.086	0.086	0.617	4.116
H_2O					4.116
CO_2					4.116
Mole Frac					
N_2		0.463	0.463	0.780	0.765
O_2		0.520	0.520	0.210	0.206
AR		0.017	0.017	0.010	0.010
H_2O					0.010
CO_2					0.010

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 คุณสมบัติของสารในสาย AR, CO_2, H_2O, N_2, O_2, WASTE

Heat and Material Balance Table							
Stream ID		AR	CO_2	H_2O	N_2	O_2	WASTE
Temperature	C	-184.3	30.0	30.0	27.9	-181.5	-193.4
Pressure	bar	1.20	6.10	6.10	1.20	1.20	1.20
Vapor Frac		0.000	1.000	0.000	1.000	0.792	0.594
Mole Flow	kmol/hr	3.314	4.116	4.116	287.494	82.76	38.200
Mass Flow	kg/hr	132.386	181.144	74.151	8062.973	2650.000	1083.462
Volume Flow	cum/hr	0.096	16.460	0.075	5993.548	402.322	120.186
Enthralpy	MMBtu/hr	-0.034	-1.535	-1.121	0.020	-0.586	-0.316
Mole Flow	kmol/hr						
N_2					285.548	trace	35.626
O_2		< 0.001			1.754	82.539	2.186
AR		3.314			0.192	0.222	0.389
H_2O				4.116			
CO_2			4.116				
Mole Frac							
N_2					0.993	trace	0.933
O_2		56 PPM			0.006	0.997	0.057
AR		1.000			668 PPM	0.003	0.01
H_2O				1.000			
CO_2			1.000				

4.1.4 ความบริสุทธิ์และผลผลิตของผลิตภัณฑ์ที่ได้

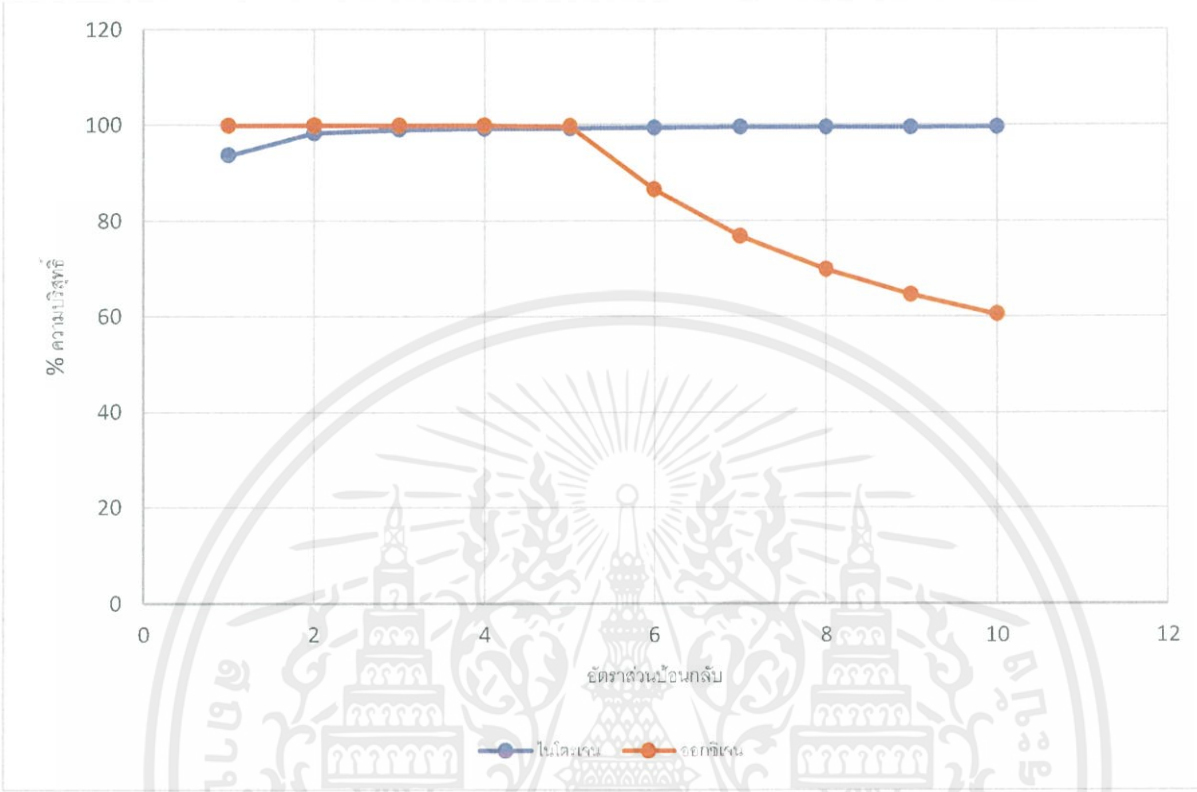
ตารางที่ 4.5 แสดงความบริสุทธิ์และผลผลิตของผลิตภัณฑ์ที่ได้

	ไนโตรเจน	ออกซิเจน	อาร์กอน	ผลิตภัณฑ์โดยรวม
ความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์	99.3%	99.7%	99.9%	-
อัตราการไหลโดยโมลขาเข้า (กิโลโมลต่อชั่วโมง)	321.17	86.48	4.12	411.77
อัตราการไหลโดยโมลขาออก (กิโลโมลต่อชั่วโมง)	287.49	82.76	3.31	373.56
ผลผลิต	89.51%	95.70%	80.34%	90.72%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลกระทบของปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการ

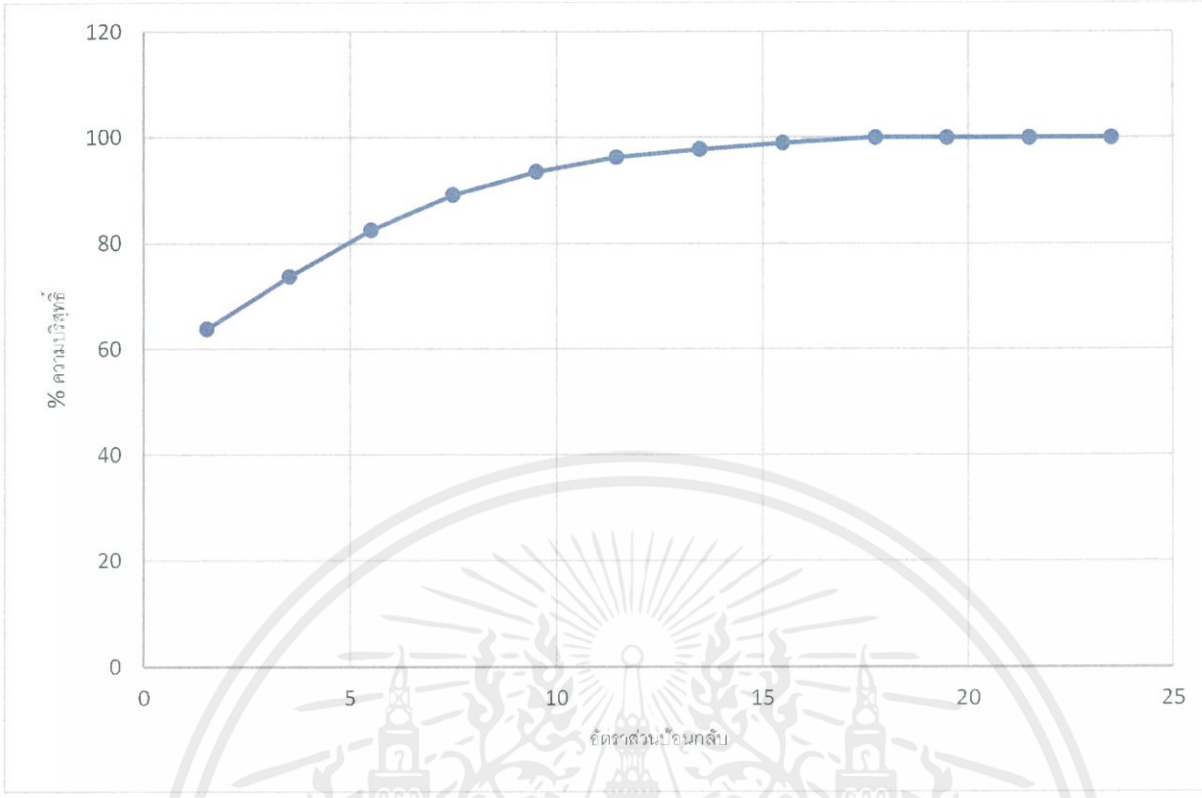
4.2.1 ผลของอัตราส่วนป้อนกลับที่มีต่อความบริสุทธิ์ของสาร



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ที่ได้เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนป้อนกลับ

จากรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าการปรับค่าอัตราส่วนป้อนกลับเหมาะสมจะส่งผลให้ได้ความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์สูงสุดโดยเมื่อปรับค่าอัตราส่วนป้อนกลับของหอกลั่นความดันต่ำที่ 5 จะส่งผลให้ได้ความบริสุทธิ์ของทั้งไนโตรเจนและออกซิเจนสูงสุดที่ 99.3 เปอร์เซ็นต์ และ 99.7 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

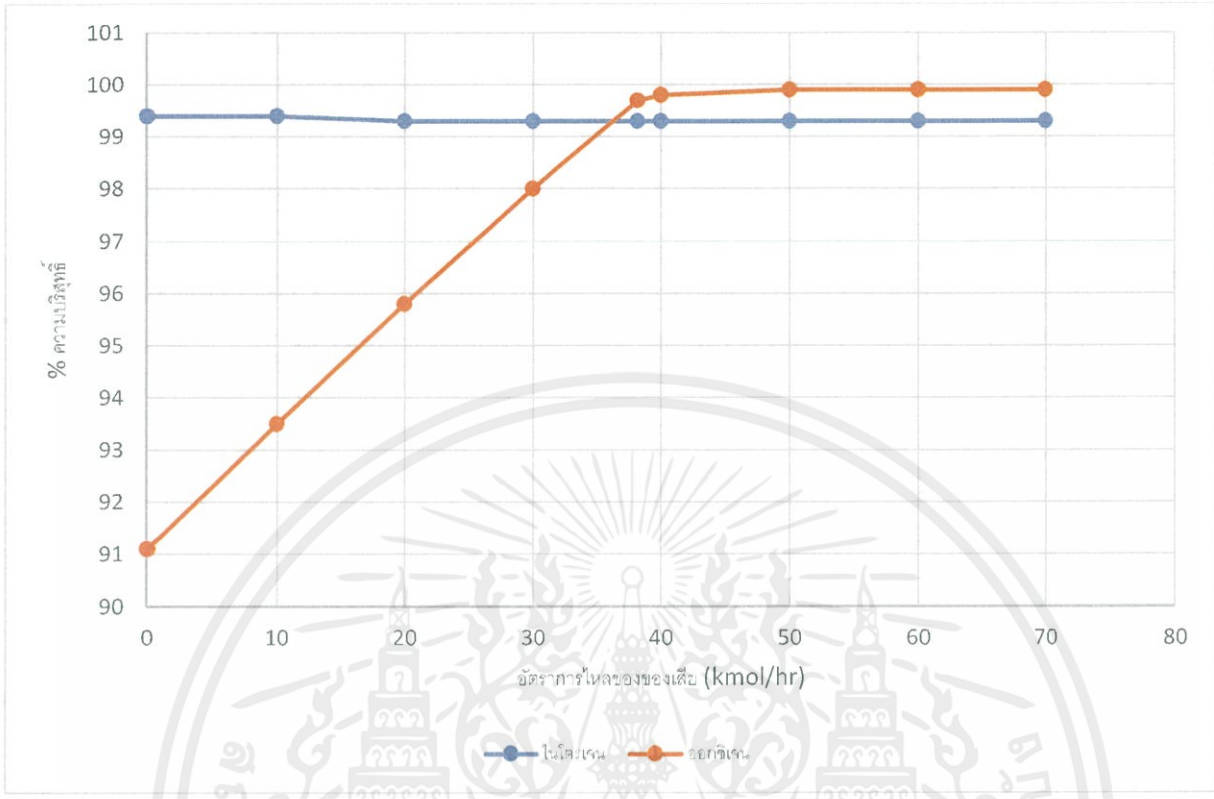


รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความบริสุทธิ์ของอาร์กอนที่ได้เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนป้อนกลับ

จากรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าเมื่อปรับค่าอัตราส่วนป้อนกลับของหอกลั่นอาร์กอน (ARC) ให้สูงขึ้นจะส่งผลให้ความบริสุทธิ์ของอาร์กอนสูงขึ้นด้วย โดยเมื่อหอกลั่นอาร์กอนมีค่าอัตราส่วนป้อนกลับที่ 17.79 จะส่งผลให้อาร์กอนมีความบริสุทธิ์ถึง 99.99 เปอร์เซ็นต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ผลของอัตราการไหลของของเสียที่มีต่อความบริสุทธิ์ของสาร



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ที่ได้เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าอัตราการไหลของเสีย

จากรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราการไหลของของเสีย ที่หอกลั่นความดันต่ำมากขึ้น จะส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์มากขึ้นด้วย โดยเมื่ออัตราการไหลของของเสียอยู่ที่ 38.2 กิโลโมลต่อชั่วโมง จะได้เปอร์เซ็นต์ความบริสุทธิ์ของไนโตรเจนและออกซิเจนที่ 99.3 เปอร์เซ็นต์ และ 99.7 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตจากกระบวนการแยกอากาศที่จำลองได้พบว่า ค่าอัตราส่วนป้อนกลับและปริมาณของเสีย มีผลต่อความบริสุทธิ์ของสารผลิตภัณฑ์ที่ได้ โดยค่าอัตราส่วนป้อนกลับที่เหมาะสมจะส่งผลให้ได้ความบริสุทธิ์ของสารผลิตภัณฑ์ไนโตรเจนและออกซิเจนสูงสุด และ ค่าอัตราส่วนป้อนกลับที่สูงขึ้นจะส่งผลให้ความบริสุทธิ์ของอาร์กอนที่ได้สูงขึ้นด้วย ส่วนอัตราการไหลของของเสียที่เหมาะสมจะส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์ไนโตรเจนและออกซิเจนที่ความบริสุทธิ์สูงสุดและลดปริมาณของเสียที่ต้องปล่อยลงไปได้ ทั้งนี้ควรมีการทดลองปรับค่าตัวแปร คือ ค่าอัตราส่วนป้อนกลับและปริมาณของเสีย ในกระบวนการผลิตจริงเพื่อเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

[1] Aprilia Jaya. "Air Separation Units (Enigineering Design Guideline)." [Online]. Available: http://kolmetz.com/pdf/EDG/ENGINEERING_DESIGN_GUIDELINE_Air_Separation_Units_Rev01web.pdf. 2013.

[2] Sher shah Amarkhail. 2009. "Air Separation." Diploma Project, Kabul Polytechnic University and Slovak University of Technology.

[3] Deepak Kumar Bhunya. 2014. "Simulation Study of Cryogenic Air Separation Unit Using Aspen Hysys at Rourkela Steel Plant." Master's Thesis of National Institute of Technology Rourkela.

[4] Adam Ahmed Abdalla Mustafa, Alhassan Abdalrhman Hassan Abdalla, Ehab Mustafa Abdalgader Mohammed. 2014. "Simulation and Analysis of Cryogenic Air Separation Process (case study Khartoum Refinery Company)." Bachelor's Thesis of Sudan University of Science and Technology.

[5] Royal Society of Chemistry. "Nitrogen." [Online]. Available: http://www.rsc.org/periodic-table/element/7/nitrogen. 2017.

[6] Royal Society of Chemistry. "Oxygen." [Online]. Available: http://www.rsc.org/periodic-table/element/8/oxygen. 2017.

[7] Royal Society of Chemistry. "Argon." [Online]. Available: http://www.rsc.org/periodic-table/element/18/argon. 2017.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไนโตรเจน (Nitrogen) [5]

เป็นสารที่ใช้ทำปุ๋ย กรดไนตริก ไนลอน สีย้อม และระเบิด เมื่อไนโตรเจนทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนได้แอมโมเนีย นอกจากนี้แก๊สไนโตรเจนยังใช้รักษาอาหารและในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ระหว่างการผลิตทรานซิสเตอร์และไดโอด ส่วนไนโตรเจนเหลวใช้เป็นสารทำความเย็นทางการแพทย์ ใช้แช่แข็งอาหารเพื่อรักษาสี รสชาติ และความชุ่มชื้น

คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี

สัญลักษณ์	: N
สถานที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส	: แก๊ส
จุดหลอมเหลว	: -210.0 องศาเซลเซียส
จุดเดือด	: -195.795 องศาเซลเซียส
ความหนาแน่น	: 0.001145 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
ลักษณะทางกายภาพ	: แก๊สไร้สี ไร้กลิ่น
ปริมาณในธรรมชาติ	: มี 78 เปอร์เซ็นต์ของอากาศโดยปริมาตร
มวลอะตอม	: 14.007

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกซิเจน (Oxygen) [6]

แก๊สออกซิเจนมีการใช้งานทางการค้าในอุตสาหกรรมเหล็ก การเชื่อมและการตัดโลหะ ใช้ผลิตสารเคมีในวงกว้างรวมถึงกรดไนตริก ไฮโดรเจนเพอร์ร็อกไซด์ อีพ็อกซีอีเทนที่ใช้สารต้านการแข็งตัว โพลีเอสเทอร์ และคลอโรอีเทน นอกจากนี้ยังมีการใช้งานเพิ่มขึ้นในด้านการบำบัดของเสียจากอุตสาหกรรม

คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี

สัญลักษณ์	: O
สถานที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส	: แก๊ส
จุดหลอมเหลว	: -218.79 องศาเซลเซียส
จุดเดือด	: -182.962 องศาเซลเซียส
ความหนาแน่น	: 0.001308 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
ลักษณะทางกายภาพ	: แก๊สไร้สี ไร้กลิ่น
ปริมาณในธรรมชาติ	: มี 21 เปอร์เซ็นต์ของอากาศโดยปริมาตร
มวลอะตอม	: 15.999

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อาร์กอน (Argon) [7]

อาร์กอนใช้สร้างบรรยากาศเฉื่อย อาทิสำหรับการผลิตไทเทเนียม สำหรับปกป้องบริเวณที่มีการเชื่อม นอกจากนี้ใช้ในหลอดไส้เพื่อหยุดออกซิเจนไม่ให้กร่อนไส้ ใช้ในหลอดฟลูออเรสเซนต์ หลอดไฟพลังงานต่ำ และในยางรถยนต์เพื่อปกป้องยาง

คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมี

สัญลักษณ์	: Ar
สถานที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส	: แก๊ส
จุดหลอมเหลว	: -189.34 องศาเซลเซียส
จุดเดือด	: -185.848 องศาเซลเซียส
ความหนาแน่น	: 0.001633 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
ลักษณะทางกายภาพ	: แก๊สเฉื่อยไร้สี ไร้กลิ่น
ปริมาณในธรรมชาติ	: มี 0.94 เปอร์เซ็นต์ของอากาศโดยปริมาตร
มวลอะตอม	: 39.948

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้