หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

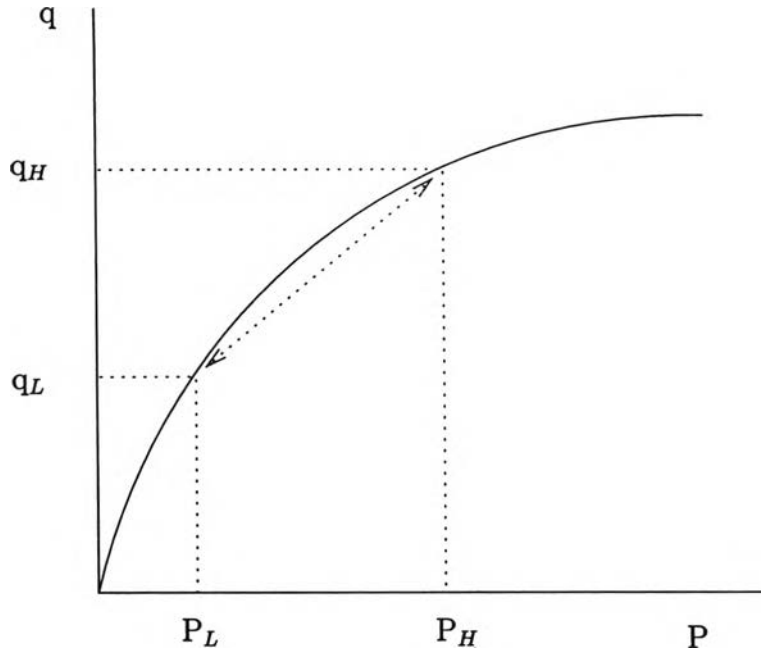
การดูดซับแบบความดันสลับ

กระบวนการดูดซับ เป็นกระบวนการที่ใช้แยกของไหลผสมเนื้อเดียวทั้งที่เป็นแก๊สและของเหลว สำหรับการแยกของไหลที่เป็นแก๊ส สามารถแบ่งออกเป็น การกำจัดสารเจือปน (Purification) เช่น การกำจัดความชื้น การกำจัดสารเจือปนในแก๊สไฮโดรเจน เป็นต้น และ การแยกแก๊สผสม (Bulk separation) เช่น การแยกอากาศเพื่อผลิตแก๊สออกซิเจนหรือแก๊สไนโตรเจน เป็นต้น [1]

กระบวนการดูดซับเป็นการแยกองค์ประกอบของสารในของไหลผสม ให้อยู่บนผิวของตัวดูดซับเป็นการชั่วคราว ดังนั้นจึงจำเป็นต้องไล่องค์ประกอบดังกล่าวออกจากผิวของตัวดูดซับ เพื่อให้ตัวดูดซับสามารถใช้งานได้ต่อไปอีก ซึ่งการไล่องค์ประกอบดังกล่าวสามารถดำเนินการได้หลายลักษณะเช่น การดูดซับแบบความดันสลับ (Pressure swing adsorption) การดูดซับแบบอุณหภูมิสลับ (Thermal swing adsorption) เป็นต้น [2]

2.1 กระบวนการดูดซับแบบความดันสลับ

ในกระบวนการดูดซับแบบความดันสลับ แก๊สผสมจะถูกแยกออกได้ดียิ่งขึ้นด้วยการดูดซับเมื่อความดันของระบบมีค่าสูง และเมื่อความดันของระบบลดลง องค์ประกอบที่อยู่บนผิวของตัวดูดซับซึ่งมีปริมาณสูงกว่าปริมาณที่สมดุลกับความเข้มข้นในวัฏภาคแก๊ส ณ บริเวณนั้นก็จะถูกคายการดูดซับออกมา [1, 2, 13] ดังนั้นการดำเนินการจะเกิดขึ้นระหว่างความดันสูงและความดันต่ำที่กำหนดไว้ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 กระบวนการดูดซับแบบความดันสลับได้ถูกนำมาใช้งานในอุตสาหกรรมเป็นครั้งแรกประมาณปี ค.ศ. 1960 เพื่อใช้ในการแยกความชื้นออกจากอากาศ หอดูดซับความชื้นแบบความดันสลับซึ่งนิยมใช้แพร่



รูปที่ 2.1: รูปแสดงการดำเนินการแบบความดันสลับบนสมดุลการดูดซับ

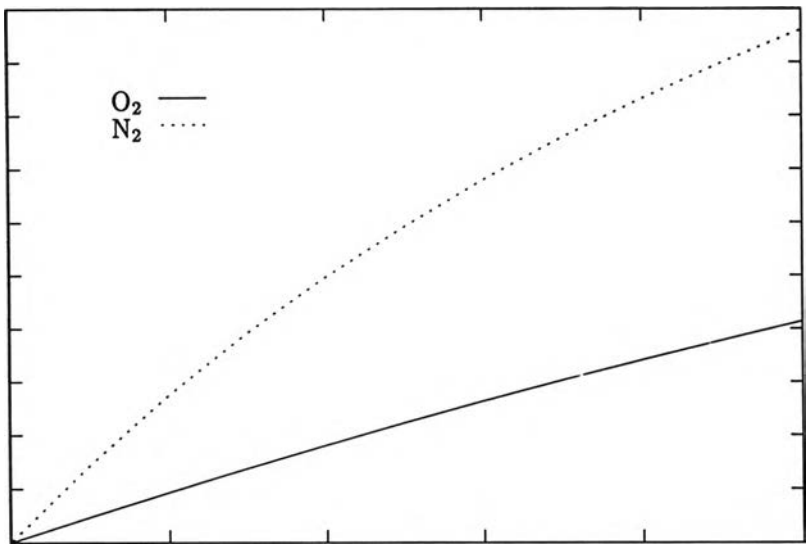
หลายในอุตสาหกรรม มีลักษณะเป็นหอดูดซับ 2 หอ การทำงานของหอดูดซับจะสลับกันทำงานโดยในขณะที่หอดูดซับหอแรกดำเนินการผลิตผลิตภัณฑ์ หอดูดซับหอที่สองก็จะถูกดำเนินการฟื้นฟูสภาพของตัวดูดซับ ซึ่งทำให้ดำเนินการผลิตได้อย่างต่อเนื่อง ตัวดูดซับที่นิยมใช้คือ ซิลิการ์เจล (Silica gel) อลูมินา (Alumina) และซีโอไลต์ (Zeolite) ต่อมาได้มีการวิจัยและพัฒนากระบวนการดูดซับแบบความดันสลับ เพื่อให้สามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมอื่นๆ ได้ เช่น [1] การแยกอากาศเพื่อผลิตแก๊สออกซิเจนหรือแก๊สไนโตรเจน การผลิตแก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์ เป็นต้น

2.2 การแยกอากาศโดยกระบวนการดูดซับแบบความดันสลับ

การแยกอากาศโดยกระบวนการดูดซับแบบความดันสลับสามารถแบ่งเป็น 2 แบบ [2] ตามชนิดของตัวดูดซับที่ใช้ คือ

2.2.1 ตัวดูดซับชนิดซีโอไลต์

สำหรับกระบวนการนี้ โมเลกุลของแก๊สไนโตรเจนจะถูกดูดซับได้ดีกว่าแก๊สออกซิเจนที่สภาวะสมดุล ดังรูปที่ 2.2 ตัวดูดซับที่ใช้ ได้แก่ ซีโอไลต์ชนิด 5A หรือ 13X ระบบนี้มีตั้งแต่ที่ใช้งานในอุตสาหกรรมขนาดเล็กจนถึงขนาดใหญ่ ระบบที่ใช้ในอุตสาหกรรมขนาด



รูปที่ 2.2: แสดงลักษณะทั่วไปของสมดุลการดูดซับของแก๊สออกซิเจนและไนโตรเจนบนตัวดูดซับซีโอไลต์

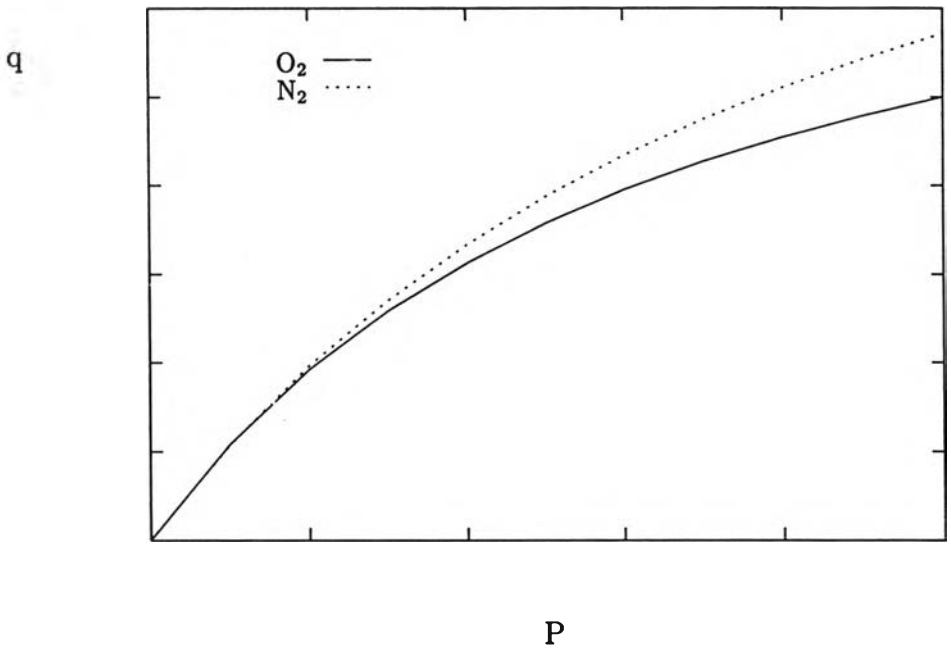
เล็กจะเป็นแบบหอดูดซับเดี่ยวหรือหอดูดซับคู่ ผลิตภัณฑ์ที่ความดันสูงที่ได้จากกระบวนการนี้คือแก๊สออกซิเจน ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับใช้ในการผลิตแก๊สออกซิเจนเป็นผลิตภัณฑ์หลักมากกว่าแก๊สไนโตรเจน

2.2.2 ตัวดูดซับชนิดคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีบ

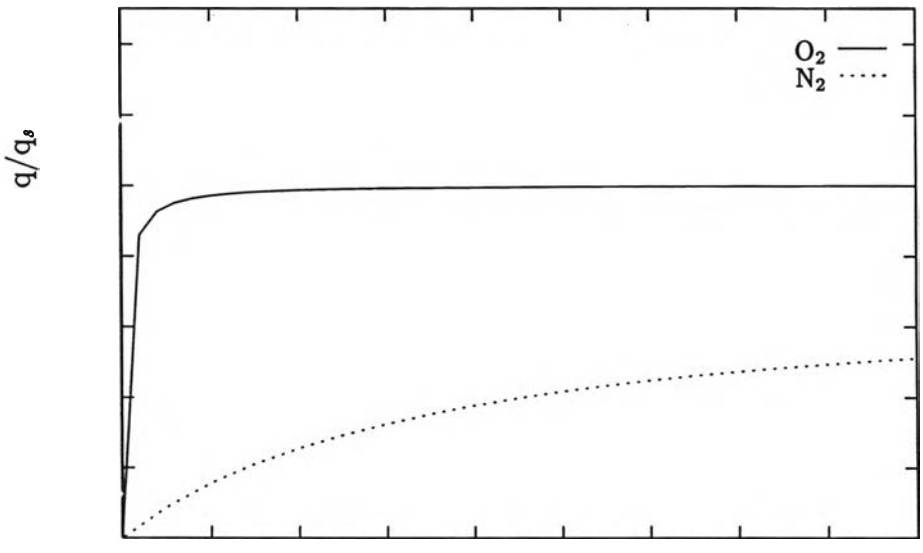
รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะทั่วไปของสมดุลการดูดซับของแก๊สออกซิเจนและไนโตรเจน ซึ่งจะเห็นว่าสมดุลการดูดซับของสารทั้งสองชนิดแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และจากรูปที่ 2.4 ซึ่งแสดงอัตราการดูดซับของแก๊สออกซิเจนและไนโตรเจน โมเลกุลของแก๊สออกซิเจนจะแพร่เข้าไปในโพรงของตัวดูดซับและถูกดูดซับได้เร็วกว่าโมเลกุลของแก๊สไนโตรเจน ดังนั้นกระบวนการนี้จึงเหมาะที่จะใช้ในการผลิตแก๊สไนโตรเจนเป็นผลิตภัณฑ์หลัก

2.3 ขั้นตอนดำเนินงานพื้นฐานของกระบวนการดูดซับแบบความดันสลับ

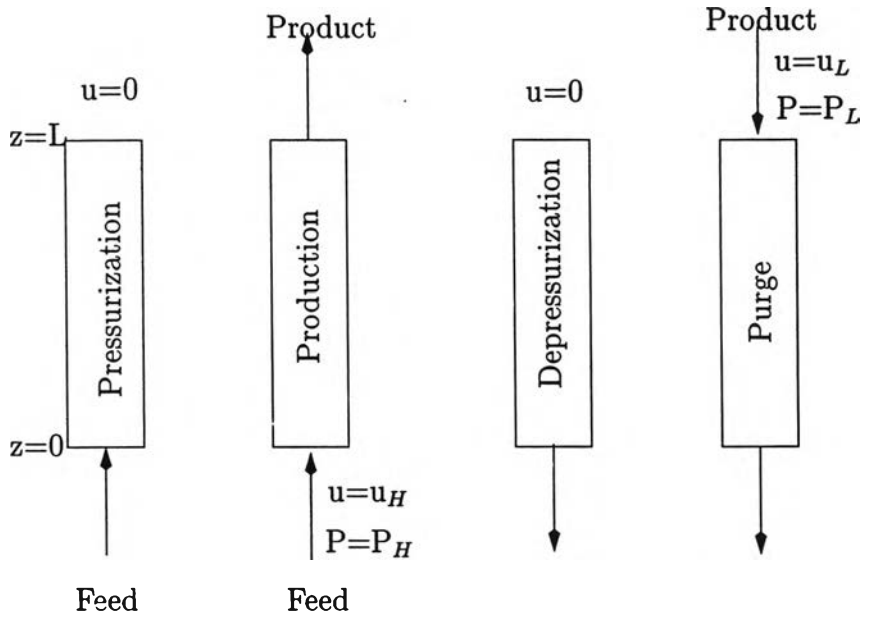
ขั้นตอนการดำเนินการแบบพื้นฐาน เป็นขั้นตอนการดำเนินการที่ถูกออกแบบมาใช้สำหรับการกำจัดความชื้นในอากาศ [1, 2] ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.3: แสดงลักษณะทั่วไปของสมดุลการดูดซับของแก๊สออกซิเจนและไนโตรเจน บนคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีบ



รูปที่ 2.4: แสดงลักษณะของอัตราการดูดซับของแก๊สออกซิเจนและไนโตรเจน บนคาร์บอนโมเลกุลาร์ซีบ



รูปที่ 2.5: แสดงขั้นตอนการดำเนินการแบบพื้นฐานของกระบวนการดูดซับแบบบความดันสลับ

1. การเพิ่มความดัน (Pressurization) เป็นการเพิ่มความดันภายในหอดูดซับ โดยการอัดแก๊สผสมเข้าไปในหอดูดซับ ซึ่งในสภาวะความดันสูงจะทำให้การดูดซับเกิดขึ้นได้ดียิ่งขึ้น

2. การดูดซับ (Adsorption) แก๊สผสมจะถูกป้อนที่ความดันสูง และปล่อยให้ผลิตภัณฑ์ไหลออกอีกทางด้านหนึ่ง ดังนั้นส่วนผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีองค์ประกอบของแก๊สที่ไม่ถูกดูดซับเป็นส่วนมาก

3. การลดความดัน (Blowdown) เป็นการปล่อยแก๊สที่อยู่ในหอดูดซับออกทางด้านเดียวกับที่ป้อนแก๊สผสมเข้าไป ความดันภายในหอดูดซับจะลดลงซึ่งจะทำให้คายปริมาณการดูดซับที่เกินกว่าสมดุลออกจากตัวดูดซับ

4. การชะล้าง (Purge) เป็นการป้อนผลิตภัณฑ์ส่วนหนึ่งเข้าสู่หอดูดซับที่ความดันต่ำในลักษณะไหลกลับ เพื่อไล่องค์ประกอบที่ยังคงเหลืออยู่บนผิวของตัวดูดซับออกไป เพื่อให้ตัวดูดซับอยู่ในสภาพที่พร้อมใช้งานต่อไป

2.4 ขั้นตอนดำเนินการที่ใช้ในอุตสาหกรรม

เนื่องจากขั้นตอนการดำเนินการแบบพื้นฐานถูกพัฒนาขึ้นมา เพื่อใช้สำหรับกำจัดความชื้นในอากาศ ดังนั้นเมื่อนำไปใช้กับกระบวนการแยกแก๊สผสมอื่นๆ มักจะพบข้อจำกัดในเรื่องของสมรรถนะของกระบวนการ กำลังการผลิต และประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ดังนั้นเมื่อมีการพัฒนากระบวนการเพื่อใช้สำหรับการแยกแก๊สผสมชนิดอื่นๆ จึงมักจะมีการเพิ่มหรือดัดแปลงขั้นตอนดำเนินงานจาก 4 ขั้นตอนพื้นฐานเดิม [1, 14, 15] เช่น การลดความดันแบบเพิ่มผลผลิต การเพิ่มความดันด้วยผลิตภัณฑ์ เป็นต้น

2.4.1 การเพิ่มความดันของหอดูดซับ

ในยุคเริ่มต้นของการพัฒนากระบวนการดูดซับแบบความดันสลับเพิ่มความดันของหอดูดซับด้วยแก๊สผสม แต่การเพิ่มความดันด้วยวิธีดังกล่าวจะต้องใช้พลังงานจำนวนมาก ในการอัดแก๊สเข้าสู่หอดูดซับเพื่อให้ได้ความดันที่ต้องการ การใช้แก๊สผลิตภัณฑ์ซึ่งมีความดันสูงอยู่แล้วสำหรับเพิ่มความดันในการดำเนินการภายหลัง จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่นำมาใช้กัน ซึ่งช่วยให้ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของกระบวนการสูงขึ้น โดยจะอัดแก๊สผลิตภัณฑ์เข้าทางด้านเดียวกับที่แก๊สผลิตภัณฑ์ออกจากหอดูดซับ

แต่อย่างไรก็ตาม การใช้แก๊สผลิตภัณฑ์ในการเพิ่มความดันเป็นการสิ้นเปลืองผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้จากกระบวนการ ดังนั้นจึงมักจะเลือกการเพิ่มความดันทั้งสองแบบในกระบวนการ โดยเริ่มต้นด้วยการเพิ่มความดันด้วยแก๊สผลิตภัณฑ์ทางด้านทางออกของผลิตภัณฑ์ และตามด้วยการเพิ่มความดันด้วยแก๊สผสมทางด้านที่ป้อนแก๊สผสมเข้าสู่หอดูดซับ ซึ่งวิธีการดังกล่าวนิยมใช้กันมากในเชิงอุตสาหกรรม [10]

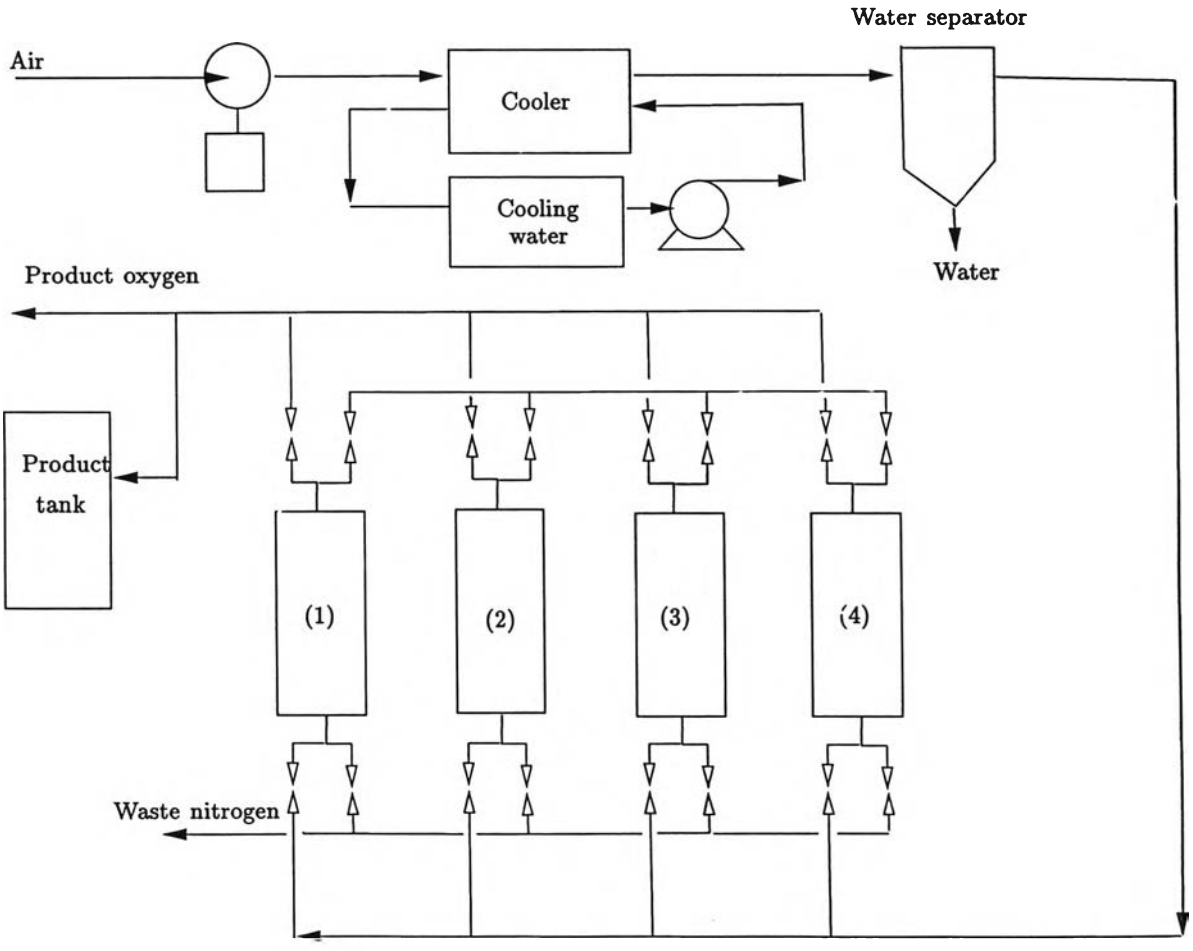
2.4.2 การลดความดันของหอดูดซับ

การลดความดันของหอดูดซับในยุคเริ่มต้นของกระบวนการดูดซับแบบความดันสลับ เป็นลดความดันแบบปล่อยทิ้ง คือปล่อยแก๊สออกจากหอดูดซับทางด้านที่ป้อนแก๊สผสมเข้าไป การลดความดันด้วยวิธีดังกล่าว เป็นการช่วยให้องค์ประกอบถูกดูดซับอยู่บนพื้นผิวของตัวดูดซับถูกคายการดูดซับออกมา แต่ก็เป็นการสูญเสียพลังงานโดยเปล่าประโยชน์เช่นกัน การลดความดันแบบเพิ่มผลผลิตจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่นำมาใช้กัน โดยปล่อยแก๊สออกทางด้าน

เดียวกับแก๊สผลิตภัณฑ์ แก๊สที่ปล่อยออกมาจึงเป็นแก๊สผลิตภัณฑ์ ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการชะล้างหรือการเพิ่มความดันให้กับหอดูดซับข้างเคียงได้ เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้พลังงานของกระบวนการได้อีกวิธีหนึ่ง

อย่างไรก็ตามกระบวนการที่ใช้กันในอุตสาหกรรมมักจะใช้การลดความดันทั้งสองลักษณะ โดยเริ่มด้วยการลดความดันแบบเพิ่มผลผลิตแล้วจึงตามด้วยการลดความดันแบบปล่อยทิ้ง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้พลังงานของกระบวนการ [10, 1]

สำหรับกระบวนการแยกอากาศโดยกระบวนการดูดซับแบบความดันสลับนั้น ได้มีการพัฒนาวิธีที่ใช้ในการเพิ่มc]tลดความดันของหอดูดซับเช่นกัน ในที่นี้จะขอยกตัวอย่างของกระบวนการแยกอากาศเพื่อผลิตแก๊สออกซิเจนซึ่งใช้ในเชิงอุตสาหกรรม โดยมีการใช้หอดูดซับ 4 หอ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ต่อเนื่องดังรูปที่ 2.6 จากรูปที่ 2.7ในขณะหอดูดซับหอแรกดำเนินการ



รูปที่ 2.6: รูปแสดงกระบวนการแยกอากาศเพื่อผลิตแก๊สออกซิเจน โดยใช้หอดูดซับ 4 หอ

ดูดซับ หอดูดซับที่เหลือก็จะอยู่ในขั้นตอนการดำเนินการต่างๆกัน คือ การเพิ่มความดัน

การลดความดัน การชะล้าง กระบวนการจะดำเนินการระหว่างความดันสองค่า คือความดันสูงและความดันต่ำ หลังจากที่หอดูดซับหอแรกสิ้นสุดการดูดซับแล้ว หอดูดซับแรกซึ่งมีความดันสูงจะถูกต่อเข้ากับหอดูดซับหอที่สอง เพื่อทำให้ความดันของหอดูดซับทั้งสองเท่ากัน ดังนั้นแก๊สออกซิเจนจากหอดูดซับแรกจะถูกใช้ในการเพิ่มความดันให้กับหอดูดซับหอที่สอง เมื่อความดันเท่ากันแล้วหอดูดซับทั้งสองจะถูกแยกออกจากกัน และหอดูดซับหอที่สามจะถูกต่อเข้ากับหอดูดซับหอแรกแทน เพื่อใช้แก๊สผลิตภัณฑ์จากหอดูดซับหอแรกมาชะล้างหอดูดซับหอที่สาม เมื่อความดันของหอดูดซับแรกลดลงถึงระดับที่ต้องการ หอดูดซับ

Adsorber No.

(1)	AD			CD12	CD13	CD13	BD	PG41	PP41	PP21	FP	
(2)	BD	PG32	PP32	PP12	FP		AD			CD21	CD24	CD24
(3)	CD34	CD32	CD32	BD	PG13	PP13	PP43	FP		AD		
(4)	PP34	FP		AD			CD43	CD41	CD41	BD	PG24	PP24

รูปที่ 2.7: รูปแสดงแผนผังการดำเนินการของแต่ละหอดูดซับ ในการกระบวนการแยกอากาศเพื่อผลิตแก๊สออกซิเจน โดยใช้หอดูดซับ 4 หอ

แรกและหอดูดซับที่สามจะถูกตัดขาดจากกัน จากนั้นหอดูดซับหอแรกจะทำการลดความดันโดยปล่อยแก๊สทิ้งทางด้านล่างจนถึงระดับความดันต่ำ แล้วดำเนินการชะล้างโดยใช้แก๊สผลิตภัณฑ์จากหอดูดซับที่สี่ จากนั้นจึงดำเนินการเพิ่มความดันโดยต่อเชื่อมกับหอดูดซับหอที่สี่และหอดูดซับที่สองตามลำดับ แล้วจึงดำเนินการเพิ่มความดันด้วยอากาศต่อไป ส่วนการดำเนินการของหอดูดซับอื่นๆ จะเป็นเช่นเดียวกับหอดูดซับแรก แต่เวลาที่จะดำเนินการจะเหลื่อมกันดังรูปที่ 2.7 การดำเนินการดังกล่าวเป็นเพียงตัวอย่างหนึ่งที่ใช้กันในอุตสาหกรรมเท่านั้น ซึ่งจะเห็นว่ามีการใช้พลังงานอย่างคุ้มค่า