

## บทที่ 3

# การจำลองกระบวนการแยกอากาศ

### 3.1 แบบจำลองคณิตศาสตร์

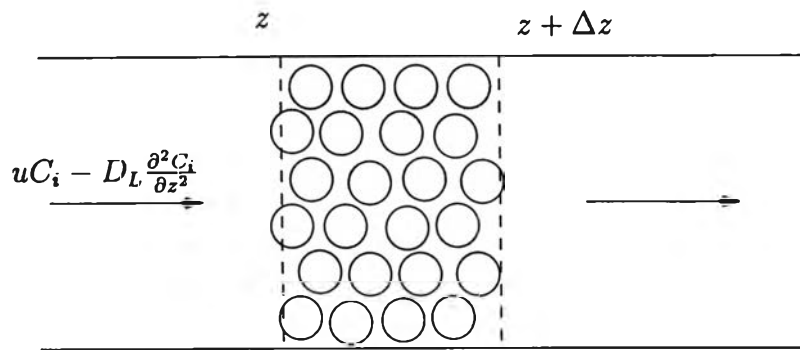
กระบวนการดูดซับเกิดขึ้นภายในหอดูดซับ ซึ่งสามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ภายใต้สมมติฐานต่างๆ ต่อไปดังนี้

1. พฤติกรรมของแก๊สเป็นแบบอุดมคติ (Ideal gas)
2. การถ่ายเทความร้อนภายในเบดมีอย่างพอเพียง ทำให้อุณหภูมิภายในหอดูดซับไม่เปลี่ยนแปลง (Isothermal process)
3. รูปแบบการไหลเป็นแบบกระจายตามแนวแกน (Dispersional plug flow)
4. ความดันที่แตกต่างภายในเบดสอดคล้องกับสมการของเออร์เกน (Ergun's equation)
5. อัตราการดูดซับสูงอย่างเพียงพอ ทำให้เกิดสมดุลการดูดซับในทันทีทันใด
6. สมดุลการดูดซับเป็นแบบแลงเมียร์ชนิด 2 องค์ประกอบ (Binary Langmuir isotherm)
7. การเพิ่มความดันและลดความดันเป็นแบบเชิงเส้น

เมื่อพิจารณาส่วยย่อยของหอดูดซับดังรูปที่ 3.1 และจากสมมติฐานข้างต้น สามารถเขียนสมการดุลมวลสารของส่วนย่อยดังกล่าว สำหรับแต่ละองค์ประกอบได้ดังนี้

ดุลมวลสารของแก๊สออกซิเจน

$$- \epsilon D_L \frac{\partial^2 P_y}{\partial z^2} + \epsilon \frac{\partial u P_y}{\partial z} + \epsilon \frac{\partial P_y}{\partial t} + (1 - \epsilon) RT \frac{\partial q_a}{\partial t} = 0 \quad (3.1)$$



รูปที่ 3.1: รูปแสดงภาคตัดขวางของหอดูดซับ

ดุลมวลสารของแก๊สไนโตรเจน

$$-\epsilon D_L \frac{\partial^2 P(1-y)}{\partial z^2} + \epsilon \frac{\partial u P(1-y)}{\partial z} + \epsilon \frac{\partial P(1-y)}{\partial t} + (1-\epsilon) RT \frac{\partial q_b}{\partial t} = 0 \quad (3.2)$$

สมดุลการดูดซับแบบแลงเมียร์

สำหรับแก๊สออกซิเจน

$$q_O = \frac{q_{O,s} b_O P y}{1 + b_O P y + b_N P(1-y)} \quad (3.3)$$

สำหรับแก๊สไนโตรเจน

$$q_N = \frac{q_{N,s} b_N P(1-y)}{1 + b_O P y + b_N P(1-y)} \quad (3.4)$$

ความดันที่แตกต่างกัน (Pressure drop) ภายในหอดูดซับสามารถอธิบายโดยสมการของเออร์เกน

$$-\frac{dp}{dz} = \frac{150(1-\epsilon)^2 \mu u}{d_p^2 \epsilon^3} + \frac{1.75 \rho (1-\epsilon) u^2}{\epsilon^3 d_p} \quad (3.5)$$

สัมประสิทธิ์การกระจายตามแนวแกน คำนวณจาก

$$D_L = 0.75 D_{ON} + \frac{0.5 d_p u}{1 + 0.95 D_{ON} / u d_p} \quad (3.6)$$

ค่า  $D_{ON}$  เป็นสัมประสิทธิ์การแพร่ของแก๊สออกซิเจนและแก๊สไนโตรเจน รายละเอียดในการคำนวณแสดงไว้ในภาคผนวก

เนื่องจากกระบวนการดูดซับแบบความดันสลับเป็นการดำเนินการเป็นรอบ ดังนั้นเงื่อนไขเริ่มต้นของแต่ละขั้นตอนการดำเนินการก็คือ สภาวะสุดท้ายของขั้นตอนการดำเนินการที่

ผ่านมา แต่ในการเริ่มคำนวณเริ่มแรกจะเริ่มต้นที่ขั้นตอนการเพิ่มความดัน และเงื่อนไขเริ่มต้นไม่มีผลต่อพฤติกรรมของหอยดูดซับที่สภาวะคงตัว ดังนั้นจึงสมมติให้เงื่อนไขเริ่มต้นของการคำนวณในรอบแรก คือเริ่มจากภายในหอยดูดซับเต็มไปด้วยแก๊สออกซิเจนที่ความดันต่ำ นั่นคือ  $y(z, 0)=1$  และ  $P(z, 0)=P_L$  ส่วนภาวะขอบเขตของสมการ ขึ้นกับการดำเนินการในแต่ละขั้นตอนดังนี้

การเพิ่มความดันด้วยแก๊สผลิตภัณฑ์

$$\frac{\partial y_0}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0 \quad (3.7)$$

$$y_0(L, t) = y_p \quad (3.8)$$

$$P(L, t) = P_o + \alpha t \quad (3.9)$$

การเพิ่มความดันด้วยแก๊สผสม

$$y_0(0, t) = y_f \quad (3.10)$$

$$P(0, t) = P_o + \alpha t \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial y_0}{\partial z} \Big|_{z=L} = 0 \quad (3.12)$$

การดูดซับ

$$y_0(0, t) = y_f \quad (3.13)$$

$$Pv(0, t) = P_H u_H \quad (3.14)$$

$$P(L, t) = P_H \quad (3.15)$$

การลดความดันแบบเพิ่มผลผลิต

$$\frac{\partial y_0}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0 \quad (3.16)$$

$$P(L, t) = P_o - \alpha t \quad (3.17)$$

การลดความดันแบบปล่อยทิ้ง

$$\frac{\partial y_0}{\partial z} \Big|_{z=L} = 0 \quad (3.18)$$

$$P(0, t) = P_o - \alpha t \quad (3.19)$$

การชะล้าง

$$y_0(L, t) = y_p \quad (3.20)$$

$$P(0, t) = P_L \quad (3.21)$$

$$Pv(L, t) = P_L v_L \quad (3.22)$$

### 3.2 การหาคำตอบของสมการแบบจำลอง

แบบจำลองการดูดซับแบบความดันสลับที่จะใช้ในงานวิจัยนี้เป็นสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial differential equations) อันดับสองและเป็นสมการแบบพาราโบลิก (Parabolic) โดยมีตัวแปรอิสระที่เกี่ยวข้องคือ เวลาและตำแหน่งในหลอดดูดซับ วิธีที่ใช้ในการแก้สมการเชิงอนุพันธ์อันดับสองมีด้วยกันหลายวิธี [16, 17] ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นสองวิธีใหญ่ๆ คือ การหาคำตอบเชิงวิเคราะห์ (Analytical method) และการหาคำตอบเชิงตัวเลข (Numerical method)

การหาคำตอบเชิงวิเคราะห์เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมาก โดยเฉพาะในกรณีที่สมการไม่ค่อยยุ่งยากมากนัก เนื่องจากคำตอบที่ได้จากวิธีนี้มีความถูกต้อง การแก้สมการด้วยวิธีนี้ไม่สามารถใช้แก้ระบบสมการที่แต่ละ สมการสัมพันธ์ต่อกันและกัน ดังนั้นวิธีนี้จึงไม่เหมาะที่จะใช้ในการศึกษาครั้งนี้

เนื่องจากแบบจำลองกระบวนการดูดซับมีความซับซ้อนมาก การหาคำตอบจึงเลือกใช้วิธีหาคำตอบเชิงตัวเลขมาใช้ในการหาคำตอบของสมการ วิธีที่นิยมใช้กันได้แก่ ไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (Finite difference) เป็นการหาคำตอบโดยการประมาณค่าอนุพันธ์ด้วยผลต่างสมการเชิงอนุพันธ์แต่ละสมการจะเปลี่ยนรูปลงกลายเป็นชุดสมการพีชคณิต ซึ่งง่ายต่อการหาคำตอบเชิงตัวเลข

การแก้สมการแบบไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ [17] สามารถแก้สมการได้โดยวิธีเอ็กซพลิซิท (Explicit method) เป็นการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยโดยตัวแปรที่ไม่ทราบค่าจะสามารถคำนวณได้โดยตรงจากค่าภาวะเริ่มต้นและภาวะขอบเขต ทำให้สามารถใช้ค่าที่คำนวณได้คำนวณต่อไปที่เวลาถัดไป วิธีนี้มีข้อดีคือง่ายและใช้เวลาในการคำนวณไม่มาก แต่มีข้อเสียคือถ้าแบ่งช่วงของตัวแปรไม่เหมาะคำตอบที่ได้จะไม่เสถียร (Instability) และไม่ได้คำตอบ

ที่ถูกต้อง ดังนั้นจึงได้มีการหาวิธีที่จะช่วยให้คำตอบที่ได้มีความเสถียร วิธีดังกล่าวเรียกว่าวิธีอิมพลิต (Implicit method) วิธีนี้เป็นการแก้สมการโดยต้องคำนวณตัวแปรที่ไม่ทราบค่าที่เวลาปัจจุบันไปพร้อมกันกับที่เวลาถัดไป ซึ่งทำให้การคำนวณต้องคำนวณแบบระบบสมการ การคำนวณจะใช้เวลาเพิ่มขึ้นแต่ให้คำตอบที่มีความเสถียรมากกว่าวิธีเอ็กซ์พลิต

นอกจากวิธีที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว ยังมีอีกวิธีหนึ่งซึ่งนิยมใช้กันมากในการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยโดยเฉพาะสมการที่มีตัวแปรอิสระเวลาเข้ามาเกี่ยวข้อง [17] วิธีนี้เป็นการแก้สมการโดยการประมาณค่าอนุพันธ์ที่เทียบกับระยะทางด้วยการแบ่งระยะทางที่จะพิจารณานั้นเป็นช่วงๆ (Spatial discretization) การทำเช่นนี้จะทำให้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยลดรูปเป็นสมการเชิงอนุพันธ์สามัญ ซึ่งสามารถหาคำตอบเชิงตัวเลขได้ง่ายกว่า และมีโปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้ในการหาคำตอบสมการเชิงอนุพันธ์สามัญอยู่แล้ว วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมมากในการใช้ศึกษาแบบจำลองกระบวนการดูดซับแบบความดันสลับ เนื่องจากช่วยลดเวลาในการหาคำตอบของสมการได้อย่างมาก โดยประมาณค่าอนุพันธ์ที่เทียบกับระยะทางด้วยไฟไนดิเพอร์เรนซ์

การหาคำตอบของสมการเชิงอนุพันธ์สามัญสามารถทำได้หลายวิธี [18] เช่น วิธีการของออยเลอร์ (Euler's method) วิธีการของรุงก์กัตตา (Runge Gatta's method) วิธีการของอาดัมส์ (Adams' method) และวิธีการของเกียร์ (Gear's method) เป็นต้น วิธีการของออยเลอร์ เป็นวิธีที่ง่ายที่สุดในการหาคำตอบของสมการเชิงอนุพันธ์สามัญ เป็นการหาคำตอบโดยใช้เงื่อนไขเริ่มต้นในการคำนวณคำตอบที่เวลาถัดไป จากสมการเชิงอนุพันธ์สามัญและเงื่อนไขเริ่มต้น

$$x' = f(t, x), x(t_0) = x_0 \quad (3.23)$$

และจากอนุกรมเทเลอร์ (Taylor series)

$$x_{k+1} = x_k + x'_k h + x''_k \frac{h^2}{2} + x'''_k \frac{h^3}{6} + \dots \quad (3.24)$$

ถ้าต้องการหาคำตอบของสมการเชิงอนุพันธ์ในช่วง  $t = t_0$  ถึง  $t = T$  จากวิธีการของออยเลอร์สามารถประมาณคำตอบ  $x_{k+1}$  ที่เวลา  $t_{k+1}$  ได้ก็ต่อเมื่อทราบค่าคำตอบ  $x_k$  ที่เวลา  $t_k$  โดยตัดพจน์ตั้งแต่อนุพันธ์อันดับสองของอนุกรมเทเลอร์ออกไป แล้วจัดรูปใหม่จะได้

$$x_{k+1} = x_k + h x'_k \quad (3.25)$$

โดย  $h$  เป็นช่วงเวลาย่อย (Step size) ที่เลือกในการหาคำตอบซึ่งมีค่าเท่ากับ  $t_{k+1} - t_k$  จะเห็นได้ว่าการคำนวณหาคำตอบโดยวิธีการของออยเลอร์ดังกล่าว จะต้องทราบค่าของคำตอบที่เวลาก่อนหน้านั้นหนึ่งค่า แล้วจึงคำนวณคำตอบที่เวลาถัดไป เพื่อให้ได้คำตอบที่มีความใกล้เคียงคำตอบที่แท้จริง ดังนั้นจะต้องแบ่งช่วงเวลาย่อยในการหาคำตอบเป็นจำนวนมาก นั่นคือใช้ค่า  $h$  น้อยๆ และคำตอบที่ได้คำนวณจากค่าอนุพันธ์อันดับหนึ่งเท่านั้น ความถูกต้องแม่นยำของคำตอบจึงมีน้อย วิธีการของรุงก์กัตตา เป็นวิธีที่คล้ายคลึงกับวิธีการของออยเลอร์แต่มีการใช้ค่าอนุพันธ์อันดับสูงกว่ามาคำนวณหาคำตอบ ในที่นี้จะขอยกตัวอย่างในกรณีที่ใช้อนุพันธ์อันดับสองในการคำนวณหาคำตอบ นั่นคือคำตอบของสมการเชิงอนุพันธ์ที่เวลา  $t_{k+1}$  สามารถคำนวณได้จาก

$$x_{k+1} = x_k + h_k x'_k + \frac{h^2}{2} x''_k + \frac{h^2}{6} x'''_k + \frac{h^2}{8} x''''_k \quad (3.26)$$

วิธีการของออยเลอร์และรุงก์กัตตา เป็นวิธีการที่ใช้คำตอบที่เวลาก่อนหน้าเพียงขั้นเดียวมาคำนวณคำตอบในขั้นถัดไป (One step method) ซึ่งสามารถที่จะเลือกแบ่งช่วงเวลาย่อยในการหาคำตอบแตกต่างกันได้ตามความเหมาะสม

วิธีการของอาดัมส์ เป็นวิธีการซึ่งมีพื้นฐานในการคำนวณคำตอบจากอนุกรมเทเลอร์ เช่นเดียวกันกับวิธีการของรุงก์กัตตา แต่จะต่างกันตรงที่มีการนำค่าคำตอบที่ได้ไปตรวจสอบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนตามต้องการหรือไม่ ในกรณีที่คำตอบมีความคลาดเคลื่อนสูงกว่าที่ต้องการ จะต้องคำนวณคำตอบใหม่โดยลดช่วงเวลาย่อยในการหาคำตอบลง ดังนั้นวิธีการของอาดัมส์จึงไม่ต้องกำหนดช่วงเวลาย่อยในการหาคำตอบ แต่ต้องกำหนดค่าความคลาดเคลื่อนที่ต้องการ

เนื่องจากระบบสมการเชิงอนุพันธ์สามัญที่ได้จากการแปลงสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยข้างต้นเป็นระบบสมการไม่เชิงเส้น นอกจากนี้แล้วเมื่อมีการป้อนแก๊สผสมเข้าสู่หอดูดซับซึ่งเต็มไปด้วยแก๊สผลิตภัณฑ์ จะเกิดความแตกต่างกันระหว่างความเข้มข้นของแก๊สทั้งสองชนิดภายในหอดูดซับ และบริเวณดังกล่าวจะเคลื่อนที่ภายในหอดูดซับในระหว่างการดำเนินการในขั้นตอนต่างๆ จะเห็นว่าที่บริเวณดังกล่าวความเข้มข้นของแก๊สจะเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด ทำให้การหาคำตอบด้วยวิธีต่างๆ ไปดังที่กล่าวมาแล้วทำได้ยาก วิธีการที่จะใช้หาคำตอบจะต้องเป็นวิธีที่มีความเสถียร มิฉะนั้นแล้วคำตอบที่ได้จะผิดพลาด หรือไม่สามารหาคำตอบได้ [8]

วิธีการที่เหมาะสมในการหาคำตอบของระบบสมการเชิงอนุพันธ์สามัญที่มีลักษณะดังกล่าว ได้แก่วิธีการหาคำตอบของเกียร์ [18] ซึ่งมีวิธีการหาคำตอบคล้ายคลึงกับวิธีการของอาดัมส์ คือสามารถปรับช่วงเวลาย่อยในการหาคำตอบได้ นอกจากนี้แล้วยังสามารถลดหรือเพิ่มอันดับของอนุพันธ์ที่ใช้ในการคำนวณคำตอบ เพื่อให้คำตอบที่ได้มีความคลาดเคลื่อนตามที่กำหนด

จากสมการที่ 3.1 จัดรูปสมการใหม่ และแทนค่าสมดุลการดูดซับ (สมการที่ 3.3) ลงในสมการ ดังนั้นจะได้

$$\begin{aligned} P[1 + a_1 \{(1 - y)(a_2 + a_4P) + y(a_3 + a_5P)\}] \frac{\partial y}{\partial t} + a_1 y(1 - y)(a_2 - a_3) \frac{\partial P}{\partial t} \\ = PD_L \frac{\partial^2 y}{\partial z^2} + 2D_L \frac{\partial P}{\partial z} \frac{\partial y}{\partial z} - uP \frac{\partial y}{\partial z} \end{aligned} \quad (3.27)$$

นำสมการที่ 3.2 รวมเข้ากับสมการที่ 3.1 และจัดรูปสมการใหม่ และแทนค่าสมดุลการดูดซับ (สมการที่ 3.3 และ 3.4) ลงในสมการ จะได้

$$\begin{aligned} a_1 P \{a_2 - a_3 + (a_4 - a_5)P\} \frac{\partial y}{\partial t} + [1 + a_1 \{(a_2 y + (1 - y)a_3)\}] \frac{\partial P}{\partial t} \\ = PD_L \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} - u \frac{\partial P}{\partial z} - P \frac{\partial u}{\partial z} \end{aligned} \quad (3.28)$$

โดยที่

$$a_1 = \frac{RT(1 - \epsilon)}{\epsilon(1 + b_O P y + b_N P(1 - y))^2}$$

$$a_2 = b_O q_{O,s}$$

$$a_3 = b_N q_{N,s}$$

$$a_4 = b_O b_N q_{O,s}$$

$$a_5 = b_O b_N q_{N,s}$$

ความเร็วของของไหลในหลอดดูดซับคำนวณจากสมการที่ 3.5 โดยจัดรูปใหม่ดังนี้

$$u > 0$$

$$u = \frac{\frac{-150(1-\epsilon)^2 \mu}{d_p^2 \epsilon^3} + \left[ \left( \frac{-150(1-\epsilon)^2 \mu}{d_p^2 \epsilon^3} \right)^2 - 4 \left( \frac{1.75(1-\epsilon)PM}{RT d_p \epsilon^3} \right) \frac{\partial P}{\partial z} \right]^{1/2}}{2 \left( \frac{1.75(1-\epsilon)PM}{RT d_p \epsilon^3} \right)} \quad (3.29)$$

$u < 0$

$$u = \frac{\frac{-150(1-\epsilon)^2\mu}{d_p^2\epsilon^3} - \left[ \left( \frac{-150(1-\epsilon)^2\mu}{d_p^2\epsilon^3} \right)^2 + 4 \left( \frac{1.75(1-\epsilon)PM}{RTd_p\epsilon^3} \right) \frac{\partial P}{\partial z} \right]^{1/2}}{2 \left( \frac{1.75(1-\epsilon)PM}{RTd_p\epsilon^3} \right)} \quad (3.30)$$

เมื่อแบ่งความยาวของหลอดขับออกเป็นส่วนย่อยๆ  $m$  กิริติ และประมาณค่าอนุพันธ์เทียบกับระยะทางในสมการที่ 3.27 และ 3.28 ด้วยไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (รายละเอียดในการประมาณค่าแสดงไว้ในภาคผนวก) แต่ละกิริติจะประกอบด้วยชุดสมการดังนี้

$$A_i \frac{\partial y_i}{\partial t} + B_i \frac{\partial P_i}{\partial t} = E_i \quad (3.31)$$

$$C_i \frac{\partial y_i}{\partial t} + D_i \frac{\partial P_i}{\partial t} = F_i \quad (3.32)$$

และกำหนดให้

$$A_i = P_i [1 + a_1 \{(1 - y_i)(a_2 + a_4 P_i) + y_i(a_3 + a_5 P_i)\}] \quad (3.33)$$

$$B_i = [1 + a_1 \{(a_2 y_i + (1 - y_i)a_3)\}] \quad (3.34)$$

$$C_i = a_1 P_i \{a_2 - a_3 + (a_4 - a_5) P_i\} \quad (3.35)$$

$$D_i = [1 + a_1 \{(a_2 y_i + (1 - y_i)a_3)\}] \quad (3.36)$$

$$E_i = P_i D_L \left( \frac{y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}}{d^2} \right) + 2D_L \left( \frac{P_i - P_{i-1}}{d} \right) \left( \frac{y_i - y_{i-1}}{d} \right) - u_i P_i \left( \frac{y_i - y_{i-1}}{d} \right) \quad (3.37)$$

$$F_i = P_i D_L \left( \frac{P_{i+1} - 2P_i + P_{i-1}}{d^2} \right) - u_i \left( \frac{P_i - P_{i-1}}{d} \right) - P_i \left( \frac{u_i - u_{i-1}}{d} \right) \quad (3.38)$$

ดังนั้นจะได้ระบบสมการเชิงอนุพันธ์สามัญจำนวน  $2m$  สมการดังนี้

$$WY' = G \quad (3.39)$$



โดยที่

$$W = \begin{bmatrix} A_1 & & 0 & B_1 & & 0 \\ & \ddots & & & \ddots & \\ & & A_i & & B_i & \\ & & & \ddots & & \\ 0 & & & A_m & 0 & B_m \\ C_1 & & & 0 & D_1 & 0 \\ & \ddots & & & \ddots & \\ & & C_i & & D_i & \\ & & & \ddots & & \\ 0 & & & C_m & 0 & D_m \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

$$Y' = \begin{bmatrix} \frac{\partial y_1}{\partial t} \\ \frac{\partial y_2}{\partial t} \\ \frac{\partial y_3}{\partial t} \\ \vdots \\ \frac{\partial y_m}{\partial t} \\ \frac{\partial P_1}{\partial t} \\ \frac{\partial P_2}{\partial t} \\ \frac{\partial P_3}{\partial t} \\ \vdots \\ \frac{\partial P_m}{\partial t} \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

$$G = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ \vdots \\ E_m \\ F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ \vdots \\ F_m \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

### 3.3 การทดสอบแบบจำลองคณิตศาสตร์

ในการหาคำตอบของระบบสมการดังกล่าว สามารถทำได้โดยเขียนเป็นฟังก์ชันในโปรแกรม MATLAB แล้วจึงใช้ฟังก์ชันภายในโปรแกรม MATLAB หาคำตอบของระบบสมการเชิงอนุพันธ์สามัญ โดยกำหนดค่าเริ่มต้นขององค์ประกอบและความดันภายในหลอดขับ กำหนด

จำนวนกริด (Grid) ภายในหอดูดซับเป็น 61 กริด และความคลาดเคลื่อน (Tolerance) เท่ากับ  $1 \times 10^{-6}$  ซึ่งเป็นค่าที่ทำให้ความผิดพลาดอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ดังตารางที่ 3.1 และ 3.2 ซึ่งค่าดังกล่าวเป็นค่าที่เหมาะสมจะใช้ในการคำนวณต่อไป เนื่องจากกระบวนการ

ตารางที่ 3.1: ตารางแสดงความผิดพลาดของดุลมวลสารของหอดูดซับ ในแต่ละขั้นตอนการดำเนินการ เมื่อใช้จำนวนกริดต่าง และค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ  $1 \times 10^{-6}$

ขั้นตอนการดำเนินการ	ความผิดพลาด(%)							
	N=21		N=41		N=61		N=81	
	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
การเพิ่มความดัน								
• ด้วยแก๊สผลิตภัณฑ์	5.82	6.77	2.25	2.34	0.75	0.91	0.70	0.89
• ด้วยแก๊สผสม	6.56	6.77	3.55	4.34	1.05	1.10	0.99	1.07
การผลิต	5.22	6.63	4.55	4.34	0.95	1.12	0.94	0.98
การลดความดัน								
• แบบเพิ่มผลผลิต	7.82	9.77	5.11	7.42	1.08	1.21	1.03	1.11
• แบบปล่อยทิ้ง	5.12	6.65	3.21	3.48	1.01	1.13	0.99	1.03
การชะล้าง	5.13	5.27	1.55	1.34	0.50	0.61	0.40	0.56

การดูดซับแบบความดันสลับมีขั้นตอนการดำเนินการเป็นรอบๆ ดังนั้นการคำนวณจะสิ้นสุดเมื่อกระบวนการเข้าสู่สภาวะคงตัว (Cyclic steady state) นั่นคือ เศษส่วนโมลของแก๊สออกซิเจน และความดันภายในหอดูดซับ ณ สภาวะสุดท้ายของทุกขั้นตอนการดำเนินการของรอบปัจจุบันกับรอบก่อนหน้า มีขนาดของความแตกต่าง ( $e_{css}$ ) ไม่เกิน  $1 \times 10^{-6}$  กำหนดให้  $Y_n$  เป็นเวกเตอร์ซึ่งประกอบด้วยเศษส่วนโมลของแก๊สออกซิเจน และความดันภายในหอดูดซับ ณ สภาวะสุดท้ายของทุกขั้นตอนในรอบการดำเนินการที่  $n$  ดังนั้น

$$\bar{e} = Y_n - Y_{n-1} \quad (3.43)$$

$$e_{css} = \bar{e}\bar{e}^T \quad (3.44)$$

เศษส่วนโมลของแก๊สออกซิเจนในผลิตภัณฑ์

$$y_p = \frac{N_{AD,out} + N_{CD,out}}{N_{AD,out} + N_{CD,out} + M_{AD,out} + M_{CD,out}} \quad (3.45)$$

ตารางที่ 3.2: ตารางแสดงความผิดพลาดของดุลมวลสารของหอดูดซับ ในแต่ละขั้นตอนการดำเนินการ เมื่อใช้ค่าความคลาดเคลื่อนต่างๆ และจำนวนกริดเท่ากับ 61 กริด

ขั้นตอนการดำเนินการ	ความผิดพลาด(%)					
	ความคลาดเคลื่อน $1 \times 10^{-5}$		ความคลาดเคลื่อน $1 \times 10^{-6}$		ความคลาดเคลื่อน $1 \times 10^{-7}$	
	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
การเพิ่มความดัน						
• ด้วยแก๊สผลิตภัณฑ์	5.45	7.54	0.75	0.91	0.65	0.93
• ด้วยแก๊สผสม	4.85	5.24	1.05	1.10	0.88	0.92
การผลิต	3.75	6.84	0.95	1.12	0.84	0.97
การลดความดัน						
• แบบเพิ่มผลผลิต	3.81	6.72	1.08	1.21	0.91	1.02
• แบบปล่อยทิ้ง	5.01	6.38	1.01	1.13	0.92	0.98
การชะล้าง	3.44	5.94	0.50	0.61	0.31	0.56

สัดส่วนการแยกกลับมาของแก๊สผลิตภัณฑ์ (Product recovery)

$$R_p = \frac{N_{AD,out} + N_{CD,out} - N_{PG,in} - N_{PP,in}}{N_{AD,in} + N_{FP,in}} \quad (3.46)$$

การทดสอบแบบจำลองของกระบวนการ สามารถกระทำได้โดยเปรียบเทียบกับผลงานวิจัยที่ผ่านมา [7] จากตารางที่ 3.3 เป็นผลการคำนวณเศษส่วนโมลของผลิตภัณฑ์และสัดส่วนการแยกกลับมาของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่ได้ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองแล้ว พบว่าค่าความผิดพลาดอยู่ในช่วงไม่มากนัก เนื่องจากแบบจำลองกระบวนการพัฒนาขึ้นมาจาก

ตารางที่ 3.3: แสดงผลการคำนวณจากแบบจำลองเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

$P_H$ (bar)	$P_H/P_L$	$Q_H$ (STP L/min)	$y_p$		$R_p$	
			การทดลอง	การคำนวณ	การทดลอง	การคำนวณ
3.085	6.476	2.342	0.9972	0.9921	0.1017	0.0835
3.133	7.695	2.342	0.9974	0.9928	0.1838	0.1645
3.122	12.360	2.333	0.9975	0.9940	0.2870	0.2633
3.029	23.540	2.314	0.9980	0.9945	0.3294	0.3151

สมการดุลมวลสารของหอดูดซับ การตรวจสอบคำตอบที่คำนวณได้ว่ามีความถูกต้องเพียง

ใด สามารถกระทำได้โดยนำค่าตอบเชิงตัวเลขที่คำนวณได้ มาคำนวณคุณมวลสารของหอดูด  
 ซับในแต่ละขั้นตอนของการดำเนินการ โดยคำนวณปริมาณมวลสารเข้าออกหอดูดซับ และ  
 ปริมาณมวลสารที่สะสมอยู่ภายในหอดูดซับ จากผลการคำนวณพบว่าค่าความผิดพลาดสัมบูรณ์  
 ไม่เกิน 1 % ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4: ตารางแสดงความผิดพลาดของคุณมวลสารของหอดูดซับ ในแต่ละขั้นตอนการ  
 ดำเนินการ

ขั้นตอนการดำเนินการ	ความผิดพลาด(%)		
	แก๊สออกซิเจน	แก๊สไนโตรเจน	รวม
การเพิ่มความดัน			
• ด้วยแก๊สผลิตภัณฑ์	0.85	0.99	0.23
• ด้วยแก๊สผสม	0.99	1.02	0.63
การผลิต	0.20	0.45	0.06
การลดความดัน			
• แบบเพิ่มผลผลิต	0.86	0.96	0.65
• แบบปล่อยทิ้ง	0.75	0.87	0.52
การชะล้าง	0.65	0.85	0.32

### 3.4 กรณีที่ใช้ในการศึกษา

กระบวนการที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นกระบวนการแยกอากาศเพื่อผลิตแก๊สออกซิเจน ซึ่งเป็น  
 การแยกแก๊สผสม โดยใช้ซีโอไลต์เป็นหัวดูดซับ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความความเข้มข้นไม่  
 ต่ำกว่า 99 % และการใช้ประโยชน์ของหอดูดซับเป็นไปอย่างสูงสุด ดังนั้นในช่วงการดูดซับ  
 จึงกำหนดให้ความเข้มข้นของแก๊สออกซิเจน ณ ปลายหอดูดซับต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 99  
 ส่วนในขั้นตอนการชะล้างแบ่งออกเป็น 2 กรณี กรณีแรกกำหนดให้ชะล้างด้วยปริมาณผลิต  
 ภัณฑ์คงที่และมากเกินไป และกรณีที่สอง ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในการชะล้างเป็นไปอย่าง  
 พอเหมาะสำหรับแต่ละวิธีที่ใช้ในการเพิ่มหรือลดความดัน ตารางที่ 3.5 เป็นสภาวะและค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองกระบวนการ ขั้นตอนการดำเนินการที่ใช้ในการศึกษานี้ จะ  
 ใช้ขั้นตอนการดำเนินการพื้นฐานของกระบวนการดูดซับแบบความดันสลับเป็นหลัก ดังรูป  
 ที่ 2.5 แล้วจึงแทนที่หรือแทรกวิธีการเพิ่มหรือลดความดันเข้าไปในขั้นตอนดำเนินการ ดัง

ตารางที่ 3.5: แสดงสภาวะที่ใช้ในการจำลอง

สภาวะ	
อุณหภูมิ: $T(K)$	297.15
$P_L(kPa)$	100
$P_H(kPa)$	250
ความพรุนของเบด: $\epsilon$	0.34
ขนาดของตัวดูดซับ: $d_p(m)$	0.0016
ค่าคงที่สมดุลการดูดซับ [19]:	
$q_{O,s} (kmol/m^3)$	
$q_{N,s} (kmol/m^3)$	5.0907
$b_O (kPa^{-1})$	$3.2442 \times 10^{-4}$
$b_N (kPa^{-1})$	$1.2129 \times 10^{-3}$
เวลาที่ใช้ในการเพิ่มความดัน(s)	30
เวลาที่ใช้ในการดูดซับ(s)	20
เวลาที่ใช้ในการลดความดัน(s)	30
เวลาที่ใช้ในการชะล้าง(s)	20
อัตราการเพิ่มและลดความดัน( $kPa/s$ )	5

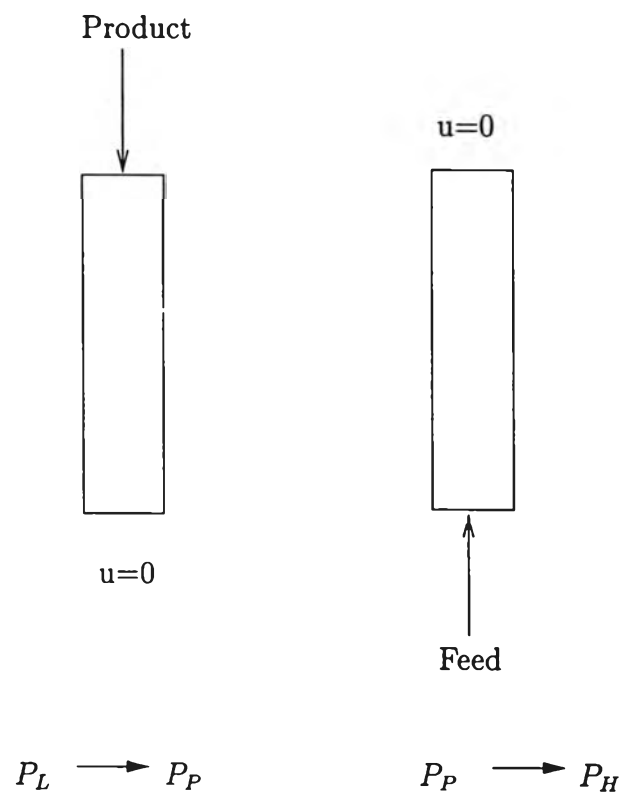
น

#### 3.4.1 วิธีการเพิ่มความดันของหอดูดซับ

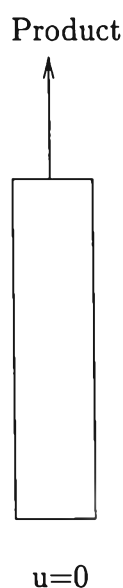
- การเพิ่มความดันด้วยแก๊สผลิตภัณฑ์ เปลี่ยนวิธีการเพิ่มความดันด้วยแก๊สผสมมาเป็นการเพิ่มความดันด้วยแก๊สผลิตภัณฑ์ แก๊สผลิตภัณฑ์จะถูกป้อนเข้าทางด้านบนของหอดูดซับ ซึ่งเป็นทิศตรงกันข้ามกับการเพิ่มความดันด้วยแก๊สผสม ในเวลาเดียวกันวาล์วด้านล่างของหอดูดซับก็จะถูกปิดไว้ ดังรูปที่ 3.2
- การเพิ่มความดันด้วยแก๊สผลิตภัณฑ์และด้วยแก๊สผสมตามลำดับ โดยแทรกขั้นตอนการเพิ่มความดันด้วยแก๊สผลิตภัณฑ์ก่อนที่จะเพิ่มความดันด้วยแก๊สผสม ความดันของหอดูดซับจะเพิ่มขึ้นจาก  $P_L$  เป็น  $P_P$  เมื่อสิ้นสุดขั้นตอนการเพิ่มความดันด้วยแก๊สผลิตภัณฑ์ จากนั้นความดันภายในหอดูดซับก็เพิ่มขึ้นต่อไปด้วยการเพิ่มความดันด้วยแก๊สผสมจนถึง  $P_H$  ซึ่งเป็นความดันที่ใช้ในขั้นตอนการดูดซับ ดังรูปที่ 3.3 ในการศึกษาจะมีการแปรค่า  $P_P$  เพื่อหาค่าที่เหมาะสมในการดำเนินการ



รูปที่ 3.2: รูปแสดงขั้นตอนการเพิ่มความดันด้วยแก๊สผลิตภัณฑ์



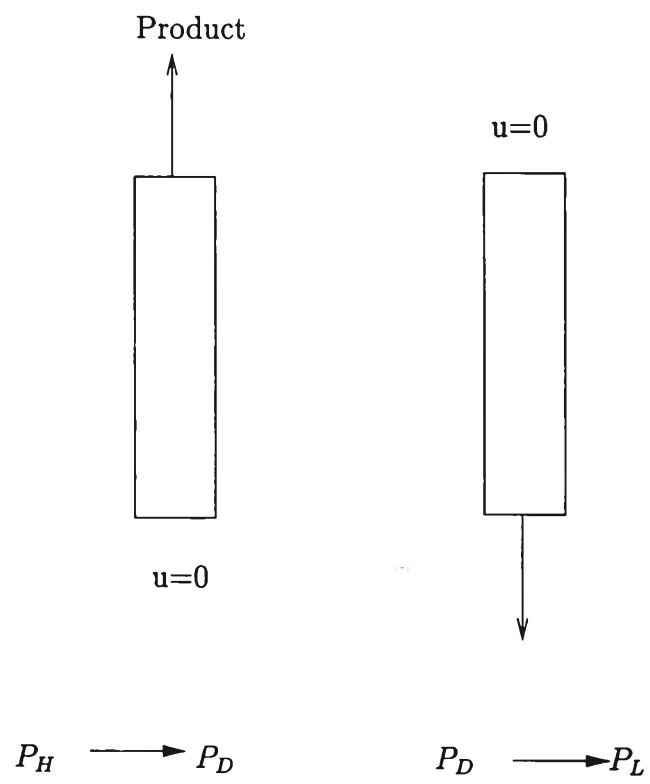
รูปที่ 3.3: รูปแสดงขั้นตอนการเพิ่มความดันด้วยแก๊สผลิตภัณฑ์และแก๊สผสมตามลำดับ



รูปที่ 3.4: รูปแสดงขั้นตอนการลดความดันแบบเพิ่มผลผลิต

### 3.4.2 วิธีการลดความดันของหอดูดซับ

- การลดความดันแบบเพิ่มผลผลิต แทนที่ขั้นตอนการลดความดันแบบปล่อยทิ้งด้วยการลดความดันแบบเพิ่มผลผลิต โดยปิดวาล์วทางด้านล่างของหอดูดซับแล้วปล่อยแก๊สผลิตภัณฑ์ออกทางด้านบนของหอดูดซับ ดังรูปที่ 3.4
- การลดความดันแบบเพิ่มผลผลิตและแบบปล่อยทิ้งตามลำดับ โดยแทรกขั้นตอนการลดความดันแบบเพิ่มผลผลิตไว้ก่อนหน้าที่จะลดความดันแบบปล่อยทิ้ง ความดันภายในหอดูดซับจะลดลงจาก  $P_H$  เป็น  $P_D$  เมื่อสิ้นสุดขั้นตอนการลดความดันแบบเพิ่มผลผลิต จากนั้นความดันภายในหอดูดซับก็จะลดลงอีกจนถึง  $P_L$  เนื่องจากการลดความดันแบบปล่อยทิ้ง ดังรูปที่ 3.5 ในการศึกษาจะมีการแปรค่า  $P_D$  เพื่อหาค่าที่เหมาะสมในการดำเนินการ



รูปที่ 3.5: รูปแสดงขั้นตอนการลดความดันแบบเพิ่มผลผลิตและการลดความดันแบบปล่อยทิ้ง