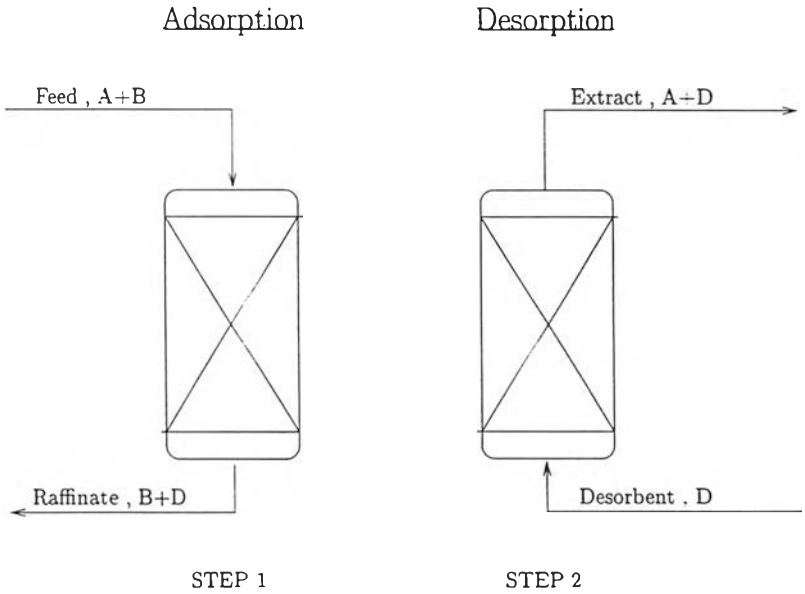
บทที่ 2

การดูดซับบนระบบเบดเคลื่อนที่จริง

เนื่องจากสารประกอบที่ถูกดูดซับจะเกาะติดบนพื้นผิวตัวดูดซับ ภายหลังการดูดซับจึงจำเป็นต้องฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับโดยการชะล้างไล่สารที่ถูกดูดซับออกมา เพื่อให้สามารถใช้งานตัวดูดซับได้ต่อไปอีก ดังนั้นระบบการดูดซับโดยทั่วไปบนระบบเบดนิ่งมักเป็นระบบที่ไม่อาจทำงานได้อย่างต่อเนื่อง การใช้งานระบบเบดเบดนิ่งอย่างต่อเนื่องจะต้องใช้หอดูดซับอย่างน้อย 2 หอดูดซับเพื่อใช้งานสลับกัน จึงสามารถดำเนินการผลิตได้อย่างต่อเนื่อง ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1: แสดงแผนภาพระบบการดูดซับโดยทั่วไป

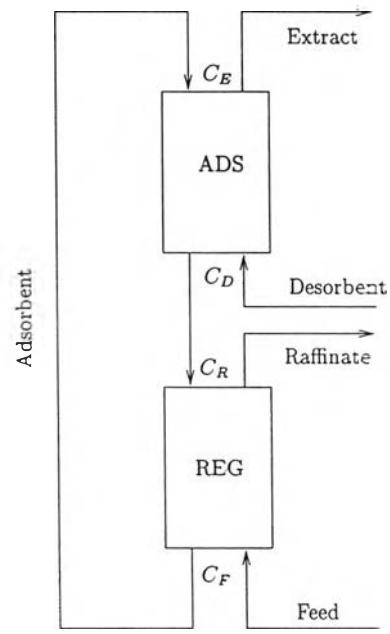
ระบบการดูดซับแบบเคลื่อนที่สวนทางจริงเป็นระบบการดูดซับที่ใช้หอดูดซับเพียงหอเดียว และสามารถดำเนินการผลิตได้อย่างต่อเนื่องโดยการแบ่งหอดูดซับออกเป็นโซนย่อยๆ และแต่ละโซน

ทำหน้าที่แตกต่างกัน เช่น แยกของไหลผสมด้วยการดูดซับ ฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ เป็นต้น ดังนั้นตัวดูดซับจึงต้องเคลื่อนที่จากโซนหนึ่งไปยังโซนอื่นๆอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้แต่ละโซนสามารถดำเนินการตามหน้าที่ได้อย่างต่อเนื่อง การเคลื่อนที่ของตัวดูดซับมักจะเคลื่อนที่สวนทางกับการไหลของของไหล ซึ่งจะได้แรงขับของการถ่ายโอนมวลเฉลี่ยมีค่ามากที่สุด ทำให้สามารถใช้งานตัวดูดซับได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

2.1 การแบ่งโซนในระบบเบดเคลื่อนที่สวนทางจริง

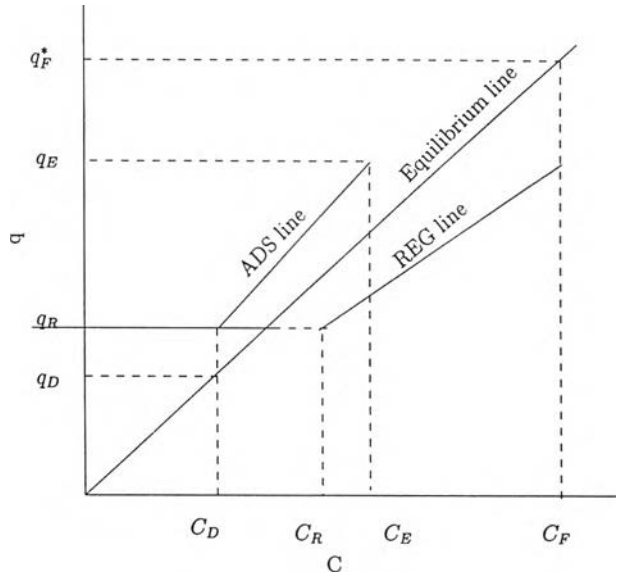
2.1.1 การดูดซับบนระบบเบดเคลื่อนที่สวนทางจริงแบบ 2 โซน

การดูดซับบนระบบเบดเคลื่อนที่สวนทางจริงจำเป็นต้องใช้จำนวนโซนอย่างน้อยที่สุด 2 โซน เพื่อทำหน้าที่แยกสารโดยการดูดซับ และฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับดังรูปที่ 2.2 ระบบเบดเคลื่อนที่สวน



รูปที่ 2.2: แสดงแผนภาพระบบเบดเคลื่อนที่สวนทางจริงแบบ 2 โซน

ทางจริงแบบ 2 โซนนี้เหมาะสำหรับการดูดซับสารเพียงองค์ประกอบเดียว (หรือกลุ่มเดียว) จากของไหลตัวกลางซึ่งไม่ถูกดูดซับหรือถูกดูดซับได้น้อยมาก ดังนั้นตัวดูดซับที่ใช้จะต้องให้ค่าดัชนีการแยกที่สูงมาก เพื่อให้ของไหลตัวกลางซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการถูกดึงออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ราฟฟิเนทที่มีความบริสุทธิ์สูงมากได้โดยใช้ขั้นตอนสมดุลทางทฤษฎีในการแยกจำนวนน้อยๆ ส่วนผลิตภัณฑ์เอ็กซ์



รูปที่ 2.3: แสดงแผนภาพการดำเนินการของ McCabe-Thiele ของระบบเบดเคลื่อนที่สวนทางจริงแบบ 2 โซน (ADS line = เส้นสภาวะดำเนินการของโซนดูดซับสาร ,REG line = เส้นสภาวะดำเนินการของโซนฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ)

แทรกซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ถูกดูดซับไว้มักจะความบริสุทธิ์ได้จำกัด เนื่องจากทุกองค์ประกอบที่ถูกดูดซับไว้ในตัวดูดซับที่ป้อนเข้าสู่โซนฟื้นฟูสภาพจะคายการดูดซับออกมาเป็นผลิตภัณฑ์เอ็กซ์แทรกหมด ดังนั้นถ้าของไหลตัวกลางถูกดูดซับได้จะมีของไหลตัวกลางปนเข้าไปในผลิตภัณฑ์เอ็กซ์แทรกด้วย แผนภาพการดำเนินการของ McCabe-Thiele สำหรับระบบเบดเคลื่อนที่สวนทางจริงแบบ 2 โซน ซึ่งใช้การฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับแบบแทนที่โดยตัวคายการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ และมีสมดุลการดูดซับเป็นแบบเส้นตรงจะเป็นดังรูปที่ 2.3 เส้นสภาวะดำเนินการของโซนดูดซับสารและโซนฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับจะได้จากการทำสมดุลมวลสารดังนี้

การดูดซับสาร

$$q = q_F + (Q_F/S)(c - c_F) \tag{2.1}$$

การฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ

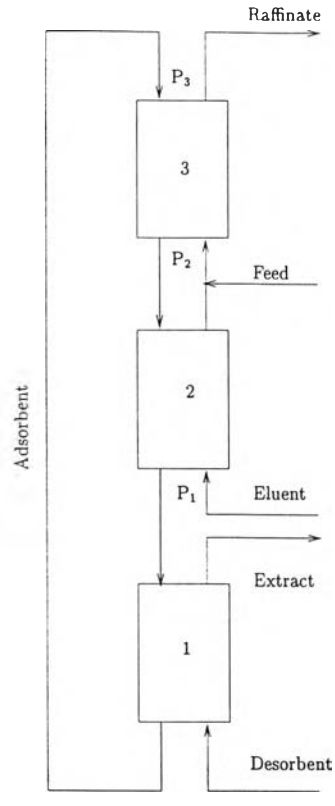
$$q = q_D + (Q_D/S)(c - c_D) \tag{2.2}$$

เพื่อให้ทิศของการถ่ายโอนมวลในแต่ละโซนเป็นไปตามที่ต้องการ ความชันของเส้นสภาวะดำเนินการของโซนดูดซับสารจะต้องต่ำกว่าความชันของเส้นสมดุล ในขณะที่ความชันของเส้นสภาวะดำเนินการ

ของโซนฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับจะต้องสูงกว่าความชันของเส้นสมดุล ดังนั้น $Q_D/S > Q_F/S$ ซึ่งหมายถึงอัตราการไหลของตัวคายการดูดซับจะต้องสูงกว่าอัตราการไหลของสายป้อน นอกจากนี้ $c_D < c_R$ และ $c_D > c_E$ ดังรูป 2.3 ทำให้ความเข้มข้นขององค์ประกอบที่ถูกดูดซับได้ดีในของไหลที่ใช้เป็นตัวคายการดูดซับจะต้องมีค่าต่ำที่สุด ทำให้การนำตัวคายการดูดซับที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่จะต้องผ่านการทำให้บริสุทธิ์มากขึ้นก่อน ดังนั้นการดูดซับบนระบบเบดเคลื่อนที่สวนทางจริงแบบ 2 โซนซึ่งใช้การฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับแบบแทนที่โดยตัวคายการดูดซับ จึงเหมาะสำหรับกรณีที่ตัวคายการดูดซับมีราคาถูกทำให้ไม่จำเป็นต้องติดตั้งระบบนำตัวคายการดูดซับกลับมาใช้ใหม่ ในกรณีที่ไม่สามารถหาตัวคายการดูดซับที่เหมาะสมได้ การฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับโดยวิธีลดความดันหรือเพิ่มอุณหภูมิของโซนฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับอาจมีความเหมาะสมมากกว่า ตัวอย่างการใช้งานจริงการดูดซับบนระบบเบดเคลื่อนที่สวนทางจริงแบบ 2 โซน ได้แก่ การกำจัดความชื้นในอากาศ การกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำทิ้ง และการฟอกสีน้ำตาล เป็นต้น

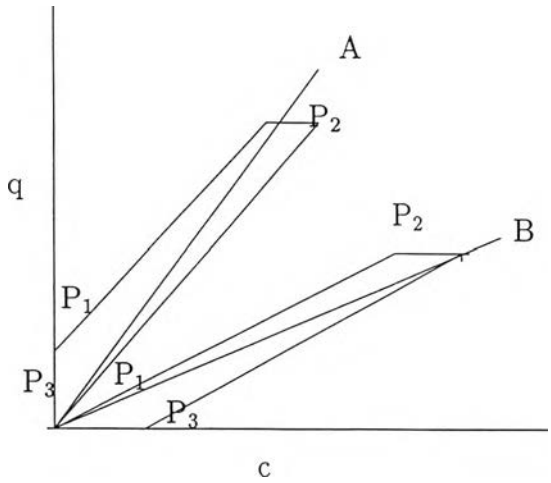
2.1.2 การดูดซับบนบนระบบเบดเคลื่อนที่สวนทางจริงแบบ 3 โซน

ในกรณีที่ต้องการผลิตภัณฑ์ที่มีความบริสุทธิ์ทั้งสองสาย ระบบเบดเคลื่อนที่สวนทางจริงแบบ 2 โซนไม่สามารถทำได้ เนื่องจากทุกองค์ประกอบที่ถูกดูดซับไว้บนตัวดูดซับจะคายการดูดซับออกมาเป็นผลิตภัณฑ์เอ็กซ์แทรกหมดโดยไม่ถูกแยกออกจากกัน ในกรณีที่ต้องการผลิตภัณฑ์เอ็กซ์แทรกที่มีความบริสุทธิ์สูงๆ จะต้องมีการเพิ่มบางโซนเข้าไปเพื่อทำหน้าที่แยกผลิตภัณฑ์เอ็กซ์แทรกให้มีความบริสุทธิ์มากขึ้น ระบบเบดเคลื่อนที่สวนทางจริงแบบ 3 โซน จะแบ่งโซนดูดซับสารออกเป็นสองโซนย่อย เพื่อนำโซนย่อยโซนหนึ่งมาทำหน้าที่แยกผลิตภัณฑ์เอ็กซ์แทรกให้มีความบริสุทธิ์มากขึ้นดังรูปที่ 2.4 โดยสายป้อนจะป้อนเข้าระหว่างโซนย่อยทั้งสอง โซนที่อยู่เหนือสายป้อนตามทิศการไหลของของไหลจะเรียกเป็นโซนที่ 3 ส่วนโซนที่อยู่ใต้สายป้อนจะเรียกว่าเป็นโซนที่ 2 และโซนที่ทำหน้าที่ฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับจะเรียกเป็นโซนที่ 1 ในกรณีที่สายป้อนเป็นของผสมสององค์ประกอบ (A+B) โดยที่องค์ประกอบ A ถูกดูดซับได้ดีกว่าองค์ประกอบ B โซนที่ 1 และ 3 จะทำหน้าที่เหมือนกรณีระบบเบดเคลื่อนที่สวนทางจริงแบบ 2 โซน คือ โซนที่ 3 จะดูดซับองค์ประกอบ



รูปที่ 2.4: แสดงแผนภาพระบบเบดเคลื่อนที่สวนทางจริงแบบ 3 โซน

A ไว้และปล่อยองค์ประกอบ B ออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ราฟฟิเนท ในขณะที่โซนที่ 1 จะทำหน้าที่คาย การดูดซับองค์ประกอบ A ออกมาเป็นผลิตภัณฑ์เอ็กซ์แทรก โซนที่2 ที่เพิ่มเข้ามาจะทำหน้าที่คายการ ดูดซับองค์ประกอบ B ที่ติดมากับตัวดูดซับจากโซนที่ 3 ออกมา องค์ประกอบ B ที่หลุดออกมาจะ ไหลย้อนกลับไปยังโซนที่ 1 อีกครั้ง ดังนั้นในโซนที่ 2 นี้จึงต้องมีการป้อนของไหลซึ่งทำหน้าที่คายการ ดูดซับองค์ประกอบ B และเป็นตัวพาองค์ประกอบ B ไหลย้อนกลับไปยังโซนที่ 1 โดยทั่วไปแล้ว ตัว คายการดูดซับที่ใช้ในโซนที่ 2 จะเป็นชนิดเดียวกับตัวคายการดูดซับที่ใช้ในโซนที่ 1 ตัวดูดซับที่ออก มาจากโซนที่ 2 ซึ่งถูกแยกองค์ประกอบ B ออกไปแล้ว เมื่อป้อนเข้าสู่โซนที่ 1 เพื่อฟื้นฟูสภาพ จะ ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เอ็กซ์แทรกที่มีความบริสุทธิ์มากขึ้น แผนภาพการดำเนินการของ McCabe-Thiele ของระบบเบดเคลื่อนที่สวนทางจริงแบบ 3 โซน เมื่อพิจารณาเฉพาะโซนที่ 2 และโซนที่ 3 จะเป็นดัง รูปที่ 2.5 จากรูปจะเห็นว่าในระบบที่เกิดการแยกได้จริงความชันของเส้นดำเนินการขององค์ประกอบ A จะต้องน้อยกว่าเส้นสมดุลและความชันของเส้นสภาวะกำเนินการขององค์ประกอบ B จะมากกว่า เส้นสมดุลทั้งในโซนที่ 2 และ 3 แต่ความชันของเส้นสภาวะดำเนินการในโซนที่ 3 จะต่ำกว่าในโซน



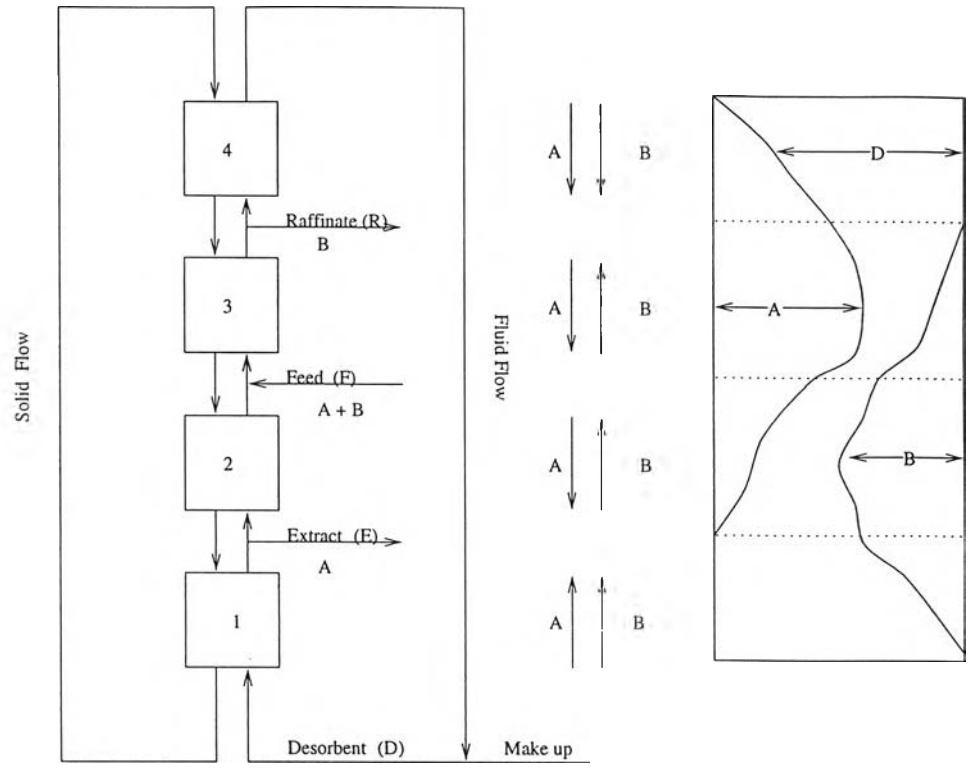
รูปที่ 2.5: แสดงแผนภาพการดำเนินการ McCabe-Thiele ของระบบเบดเคลื่อนที่สวนทางจริงแบบ 3 โซน

ที่ 2 เมื่อพิจารณาความเข้มข้นขององค์ประกอบ A ณ ตำแหน่งที่มีการดึงผลิตภัณฑ์ราฟฟิเนทออก (ตำแหน่ง P_3) และความเข้มข้นขององค์ประกอบ B ณ ตำแหน่งที่มีการดึงผลิตภัณฑ์เอ็กซ์แทรกออก (ตำแหน่ง P_1) สามารถทำให้ความเข้มข้น ณ ตำแหน่งทั้งสองมีค่าเป็นศูนย์ได้ ดังนั้น ระบบเบดเคลื่อนที่สวนทางจริงแบบ 3 โซน จะสามารถแยกองค์ประกอบ A และ B ออกจากกันได้อย่างสมบูรณ์

2.1.3 การดูดซับบนระบบเบดเคลื่อนที่สวนทงจริงแบบ 4 โซน

ระบบเบดเคลื่อนที่สวนทางจริงแบบ 3 โซน แม้ว่าจะสามารถทำให้เกิดการแยกสารออกจากกันโดยสมบูรณ์ได้ แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความเข้มข้นค่อนข้างต่ำ การป้อนตัวคายการดูดซับเข้าไปทั้งในโซนที่ 1 และ 2 ทำให้ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์แทรกมีค่าค่อนข้างต่ำ วิธีการแก้ไขคือใช้ผลิตภัณฑ์เอ็กซ์แทรกบางส่วนเป็นตัวคายการดูดซับในโซนที่ 2 ซึ่งจะช่วยลดปริมาณการใช้ตัวคายการดูดซับลดลง แต่ยังคงมีตัวคายการดูดซับบางส่วนที่ติดไปกับตัวดูดซับที่ออกจากโซนที่ 1 เมื่อตัวดูดซับเหล่านี้ถูกป้อนกลับไปใช้งานใหม่ในโซนที่ 3 จะทำให้ตัวคายการดูดซับที่ติดอยู่หลุดออกมาปนกับผลิตภัณฑ์ราฟฟิเนท ทำให้ผลิตภัณฑ์ราฟฟิเนทเจือจางลง

ระบบเบดเคลื่อนที่สวนทางแบบ 4 โซน จะมีการเพิ่มโซนที่ 4 เข้าไประหว่างโซนที่ 1 และโซนที่ 3 ดังรูป 2.6 โซนที่ 4 ที่เพิ่มเข้ามาจะทำหน้าที่คายการดูดซับตัวคายการดูดซับบางส่วนออกมาเพื่อนำกลับไปผสมกับตัวคายการดูดซับใหม่ เพื่อป้อนเข้าไปในโซนที่ 1 ตัวดูดซับที่ออกจากโซนที่ 4



รูปที่ 2.6: แสดงแผนภาพระบบเบดเคลื่อนที่สวนทางจริงแบบ 4 โซน

จะมีตัวคายการดูดซับเหลืออยู่น้อยกว่าตัวดูดซับที่ออกจากโซนที่ 1 ดังนั้นการป้อนตัวดูดซับจากโซนที่ 4 เข้าไปยังโซนที่ 3 ของระบบเบดเคลื่อนที่สวนทางจริงแบบ 4 โซน จะทำให้ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ราฟฟิเนทมีค่าสูงมากกว่าการป้อนตัวดูดซับจากโซนที่ 1 เข้าสู่โซนที่ 3 โดยตรง ของระบบเบดเคลื่อนที่สวนทางจริงแบบ 3 โซน การคายการดูดซับในโซนที่ 4 จะใช้ผลิตภัณฑ์ราฟฟิเนทเข้าไปแทนที่ ดังนั้นจึงสามารถป้อนผลิตภัณฑ์ราฟฟิเนทบางส่วนที่ออกจากปลายโซนที่ 3 เข้าสู่โซนที่ 4 โดยตรง อย่างไรก็ตามของไหลที่ออกจากปลายโซนที่ 4 ต้องการให้เป็นตัวคายการดูดซับบริสุทธิ์ ดังนั้นหน้าที่จริงของโซนที่ 4 ก็คือการดูดซับองค์ประกอบ B เอาไว้เพื่อให้ได้องค์ประกอบ D ที่บริสุทธิ์ สรุปหน้าที่หลักของทั้ง 4 โซนจะเป็นดังนี้

โซน 1 : คายการดูดซับองค์ประกอบ A
โซน 2 : คายการดูดซับองค์ประกอบ B
โซน 3 : ดูดซับองค์ประกอบ A
โซน 4 : ดูดซับองค์ประกอบ B

ซึ่งลักษณะการกระจายความเข้มข้นที่สภาวะคงตัวของทั้ง 4 โซน และทิศทางการไหลสุทธิของ A และ

B ในทั้ง 4 โซนแสดงไว้ในรูปที่ 2.6 จากหน้าที่ของทั้ง 4 โซน ที่อธิบายไว้ข้างต้น ทำให้สมรรถนะในการแยกสารของระบบเบดเคลื่อนที่สวนทางจริงแบบ 4 โซน จะดีกว่าระบบเบดเคลื่อนที่สวนทางจริงแบบ 3 โซน และ 2 โซน ตามลำดับ

2.2 สภาวะการไหลและแผนภาพการดำเนินการของระบบเบดเคลื่อนที่สวนทางจริงแบบ 4 โซน

2.2.1 ระบบ 2 องค์ประกอบ

พารามิเตอร์หลักที่บอกถึงลักษณะความเข้มข้นที่สภาวะคงตัว ณ โซนที่ j ของการดูดซับแบบไหลสวนทางจริงก็คือ อัตราส่วนอัตราการไหลของสารในทั้ง 2 วัฏภาค (Ruthven, 1989; Ching 1985a) ซึ่งมีนิยามดังนี้

$$\gamma_i^j = \frac{q_i S}{C_i Q j} = \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon}\frac{u_s}{u_j}\frac{q_i}{C_i} \tag{2.3}$$

จากหน้าที่หลักของโซนต่างๆ ในระบบที่ได้จากหัวข้อ ?? การที่จะทำให้องค์ประกอบ A และ B มีทิศการไหลสุทธิดังรูปที่ 2.6 ค่า γ_i^j ในแต่ละโซนจะต้องเป็นไปตามข้อกำหนดดังนี้

โซน 1

$$\gamma_A^1 < 1 \quad , \quad \gamma_B^1 < 1 \tag{2.4}$$

โซน 2

$$\gamma_A^2 > 1 \quad , \quad \gamma_B^2 < 1 \tag{2.5}$$

โซน 3

$$\gamma_A^3 > 1 \quad , \quad \gamma_B^3 > 1 \tag{2.6}$$

โซน 4

$$\gamma_A^4 > 1 \quad , \quad \gamma_B^4 > 1 \tag{2.7}$$

นิยาม m_j คืออัตราส่วนการไหลเชิงปริมาตรปริมาตรในแต่ละโซน

$$m_j = \frac{Q_j}{S} \tag{2.8}$$

เมื่อจัดสมการที่ 2.4-2.7 ให้อยู่ในรูปของ m_j จะได้เป็นสมการดังนี้

โซน 1

$$m_1 > q_A^1/C_A^1 \tag{2.9}$$

โซน 2

$$m_2 < q_B^2/C_B^2 \tag{2.10}$$

$$m_2 > q_A^2/C_A^2 \tag{2.11}$$

โซน 3

$$m_3 < q_B^3/C_B^3 \tag{2.12}$$

$$m_4 > q_A^3/C_A^3 \tag{2.13}$$

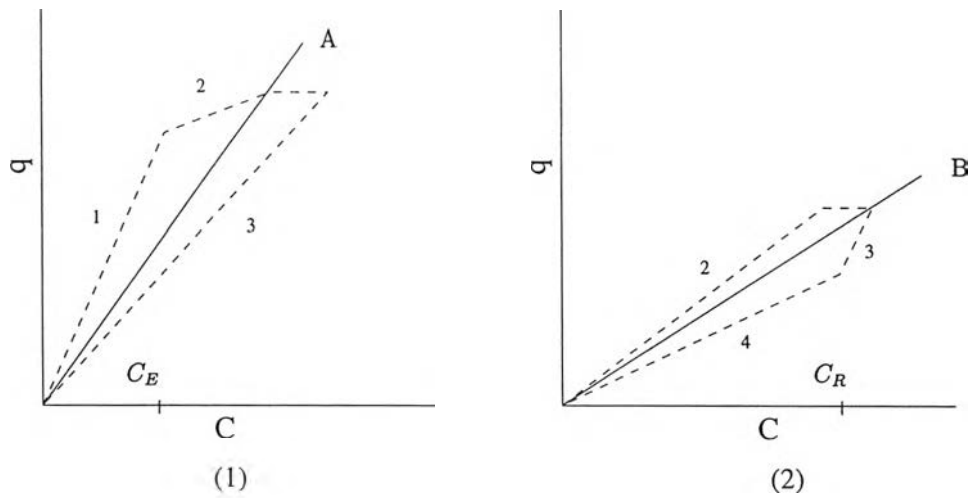
โซน 4

$$m_4 < q_B^4/C_A^4 \tag{2.14}$$

และถ้าพิจารณาเฉพาะโซนที่ 2 และโซนที่ 3 ซึ่งเป็นโซนที่มีบทบาทสำคัญในการแยก m_3 จะต้องมากกว่า m_2 เพื่อที่จะทำให้อัตราการไหลของสายป้อนมีค่าเป็นบวก ดังนั้น

$$q_B^2/C_B^2 < m_2 < m_3 < q_A^3/q_B^3 \tag{2.15}$$

ในกรณีที่สมดุลเป็นแบบเส้นตรงและสภาวะดำเนินการทำที่อุณหภูมิคงที่ เส้นสมดุลในทั้ง 4 โซนจะเหมือนกัน แผนภาพการดำเนินการของ McCabe-Thiele จะเป็นดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7: แผนภาพ Mccabe Thile ของ (1) องค์ประกอบ A (2) องค์ประกอบ B

2.2.2 ระบบหลายองค์ประกอบ

การแยกสารโดยการดูดซับสำหรับของผสมหลายองค์ประกอบ ก็จะอาศัยแนวความคิดเดียวกับการกลั่นระบบหลายองค์ประกอบ (Mazzotti, 1994) ซึ่งแนวคิดนี้จะจัดเรียงสารที่ต้องการแยกตามลำดับความสามารถในการดูดซับ แล้วใช้สององค์ประกอบที่ต้องการแยกออกจากกันซึ่งมีลำดับความสามารถในการดูดซับถัดกันเป็นตัวแทนของผลิตภัณฑ์ทั้งสองสายที่แยกได้ วิธีนี้ทำให้สามารถลดรูปจากการแยกโดยการดูดซับแบบหลายองค์ประกอบ มาเป็นการแยกสารโดยการดูดซับแบบสององค์ประกอบได้ พิจารณาระบบที่มีองค์ประกอบทั้งหมด NC องค์ประกอบ และใช้ตัวคายการดูดซับที่มีค่าความสามารถในการดูดซับแบบต่างๆ องค์ประกอบในสายป้อนทั้งหมด $NC-1$ องค์ประกอบ

ตารางที่ 2.1: ลำดับความสามารถในการดูดซับของสารในระบบการดูดซับหลายองค์ประกอบ

ชนิดตัวดูดซับ	ลำดับของตัวดูดซับ	องค์ประกอบใน E	องค์ประกอบใน R	sk-wk
อ่อนสุด	D = 1	2,..., wk	sk,..., NC	1
อ่อนปานกลาง	1 < D < wk	1,...D-1,D+1,...wk	sk,..., NC	1
ปานกลาง	wk < D < sk	1,..., wk	sk,..., NC	2
แรงปานกลาง	sk < D < NC	1,..., wk	sk,..., D-1, D+1,..., NC	1
แรงสุด	D = NC	1,..., wk	sk,..., NC-1	1

D = ตัวคายการดูดซับ, wk = องค์ประกอบตัวแทนผลิตภัณฑ์ราฟฟิเนท, sk = องค์ประกอบตัวแทนผลิตภัณฑ์เอ็กซ์แทรก

จะมีการกระจายอยู่ในผลิตภัณฑ์เอ็กซ์แทรก และผลิตภัณฑ์ราฟฟิเนท ดังตารางที่ 2.1 ดังนั้นสมการที่ 2.9 ถึงสมการที่ 2.14 เมื่อนำมาใช้กับระบบหลายองค์ประกอบจะได้ดังนี้

โซน 1

$$m_1 > q_i^1/C_i^1 \qquad i \in E \cup R \tag{2.16}$$

โซน 2

$$m_2 < q_i^2/C_i^2 \qquad i \in E \tag{2.17}$$

$$m_2 > q_i^2/C_i^2 \qquad i \in R \tag{2.18}$$

โซน 3

$$m_3 < q_i^3/C_i^3 \qquad i \in E \tag{2.19}$$

$$m_3 > q_i^3/C_i^3 \qquad i \in R \tag{2.20}$$

โซน 4

$$m_4 < q_i^4/C_i^4 \qquad i \in E \cup R \tag{2.21}$$

2.3 สมดุลการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่

2.3.1 สมดุลการดูดซับแบบเป็นเส้นตรง

กรณีของสมดุลการดูดซับแบบเป็นเส้นตรง

$$\frac{q_i}{C_i} = K_i = Constant \tag{2.22}$$

ค่า m_j จะไม่ขึ้นกับโปรไฟล์ความเข้มข้นที่เกิดขึ้นในแต่ละโซน นั่นหมายความว่าค่า m_j ในทุกโซนไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นขององค์ประกอบต่างๆ ในสายป้อน ชนิดของตัวคายการดูดซับ และค่า m_jของโซนอื่นๆ นั่นคือเมื่อทราบองค์ประกอบที่ต้องการแยกจะสามารถหาค่า $m_j(j = 1, ..., 4)$ ได้ทันที และเมื่อพิจารณาจากสมการที่ 2.9 ถึงสมการที่ 2.21 จะเห็นว่าระบบที่มีสมดุลแบบเส้นตรงจะสามารถทำให้เกิดการแยกอย่างสมบูรณ์ได้เสมอ เนื่องจากว่า $K_B < K_A$ จึงหาค่า m_j ใดๆ ที่ทำให้

$m_1 > K_A > m_2 > K_B$ ซึ่งทำให้ E มีค่าเป็นบวกและ

$m_3 > K_A > m_2 > K_B$ ซึ่งทำให้ F มีค่าเป็นบวกและ

$m_3 > K_A > m_4 > K_B$ ซึ่งทำให้ R มีค่าเป็นบวก

โดย m_j ที่เหมาะสมที่สุดซึ่งจะให้ค่า m_F/m_D สูงที่สุดก็คือที่

$$m_1 = m_3 = K_A$$

$$m_2 = m_4 = K_B$$

ซึ่งจะได้

$$m_F/m_D = \frac{m_3 - m_2}{m_1 - m_4} = \frac{K_A - K_B}{K_A - K_B} = 1$$

และ

$$C_A^E = \frac{C_A^F(m_3 - m_2)}{m_1 - m_2} = C_A^F$$

$$C_B^R = \frac{C_B^F(m_3 - m_2)}{m_1 - m_2} = C_B^F$$

นั่นคือ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีความเข้มข้นสูงสุดเท่ากับในสายป้อน คำตอบเชิงวิเคราะห์สำหรับระบบที่สมดุลเป็นแบบเส้นตรงถูกนำเสนอในหลายๆบทความทั้งในกรณีที่แบบจำลองคิดทั้งความต้านทานการ

ถ่ายโอนมวลสารและการแพร่ในแนวแกน (Ching and Ruthven, 1985a,b) หรือกรณีที่ไม่คิดทั้งความต้านทานการถ่ายโอนมวลสารและการแพร่ในแนวแกน (Zong and Guiochon, 1996)

2.3.2 สมดุลการดูดซับแบบไม่เป็นเส้นตรง

ในกรณีของระบบที่มีหลายองค์ประกอบที่ถูกดูดซับ โดยทั่วไปจะเกิดการแข่งขันการดูดซับระหว่างองค์ประกอบ ทำให้ q_i ขึ้นอยู่กับค่า C_i ขององค์ประกอบต่างๆในระบบ ทำให้สมดุลการดูดซับที่ได้ไม่เป็นเส้นตรง มีสมการสมดุลมากมายที่ถูกนำเสนอขึ้นมาแต่ที่ถูกนำมาใช้มากที่สุดก็คือสมดุลแบบแลงเมียร์หลายองค์ประกอบ (Charton ,1994)

$$q_i = \frac{q_{si} K_i C_i}{1 + \sum_{j=1}^{NC} K_j C_j} \tag{2.23}$$

สมดุลแบบนี้ไม่เป็นไปตาม Gibbs ไอโซเทิร์ม ยกเว้นเมื่อ q_{si} ของทุกองค์ประกอบมีค่าเท่ากัน สมการสมดุลข้างต้นเรียกว่า constant selectivity nonstoichiometric Langmuir isotherm (LNS)สมดุลชนิดนี้จะขึ้นกับทั้งค่าเศษส่วนโมลของแต่ละองค์ประกอบ (y_i) และค่าความเข้มข้นรวมของระบบ (C_T) แต่ถ้าหากว่า q_{si} ของทุกองค์ประกอบมีค่าเท่ากัน และค่า K_i มีค่าสูงมากๆ สมการที่ 2.23 จะลดรูปเป็น

$$q_i = \frac{q_s K_i C_i}{\sum_{j=1}^{NC} K_j C_j} \tag{2.24}$$

สมการที่ 2.24 นี้เรียกว่า constant selectivity stoichiometric Langmuir isotherm (LS) สมดุลชนิดนี้จะไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นรวมของระบบ และปริมาณการดูดซับรวมของระบบจะมีค่าเท่ากับค่าการดูดซับสูงสุด (q_s) อยู่เสมอ

$$\sum_{i=1}^{NC} q_i = \sum_{i=1}^{NC} \left(\frac{q_s K_i yi}{\sum_{j=1}^{NC} K_j yj} \right) = q_s \sum_{i=1}^{NC} \left(\frac{K_i yi}{\sum_{j=1}^{NC} K_j yj} \right) = q_s \tag{2.25}$$

เมื่อระบบมีสมดุลเป็นแบบสมการ 2.23 หรือ 2.24 ค่า q_i/C_i จะขึ้นอยู่กับลักษณะการกระจายความเข้มข้นที่เกิดขึ้นในแต่ละโซน ดังนั้นการหาค่า m_j ในแต่ละโซนจะต้องทราบโปรไฟล์ความเข้มข้นที่เกิดขึ้นก่อน แต่ลักษณะการกระจายความเข้มข้นที่เกิดขึ้นในแต่ละโซนจะขึ้นอยู่กับค่าความเข้มข้นของแต่ละองค์ประกอบในสายป้อน และ m_j ในแต่ละโซน ดังนั้นจึงไม่มีคำตอบโดยทั่วไป (gen-

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

eral solution) เหมือนกับกรณีของสมดุลเป็นแบบเส้นตรง การหาค่า m_i จะอาศัยการแก้ระบบสมการดุลมวลสารของทั้ง 4 โซน ซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดภายหลัง แต่สำหรับระบบที่สารป้อนมี 2 องค์ประกอบ สมดุลเป็นไปตามสมการ 2.24 และตัวคายการดูดซับมีค่า K_D อยู่ระหว่างองค์ประกอบที่ต้องการแยก ($K_A > K_D > K_B$) จะสามารถนำเอาทฤษฎีสมดุลมาใช้ในการหาคำตอบทั่วไปของ m_j ได้ (Mayyotti, 1994)

2.4 บทบาทของตัวคายการดูดซับ

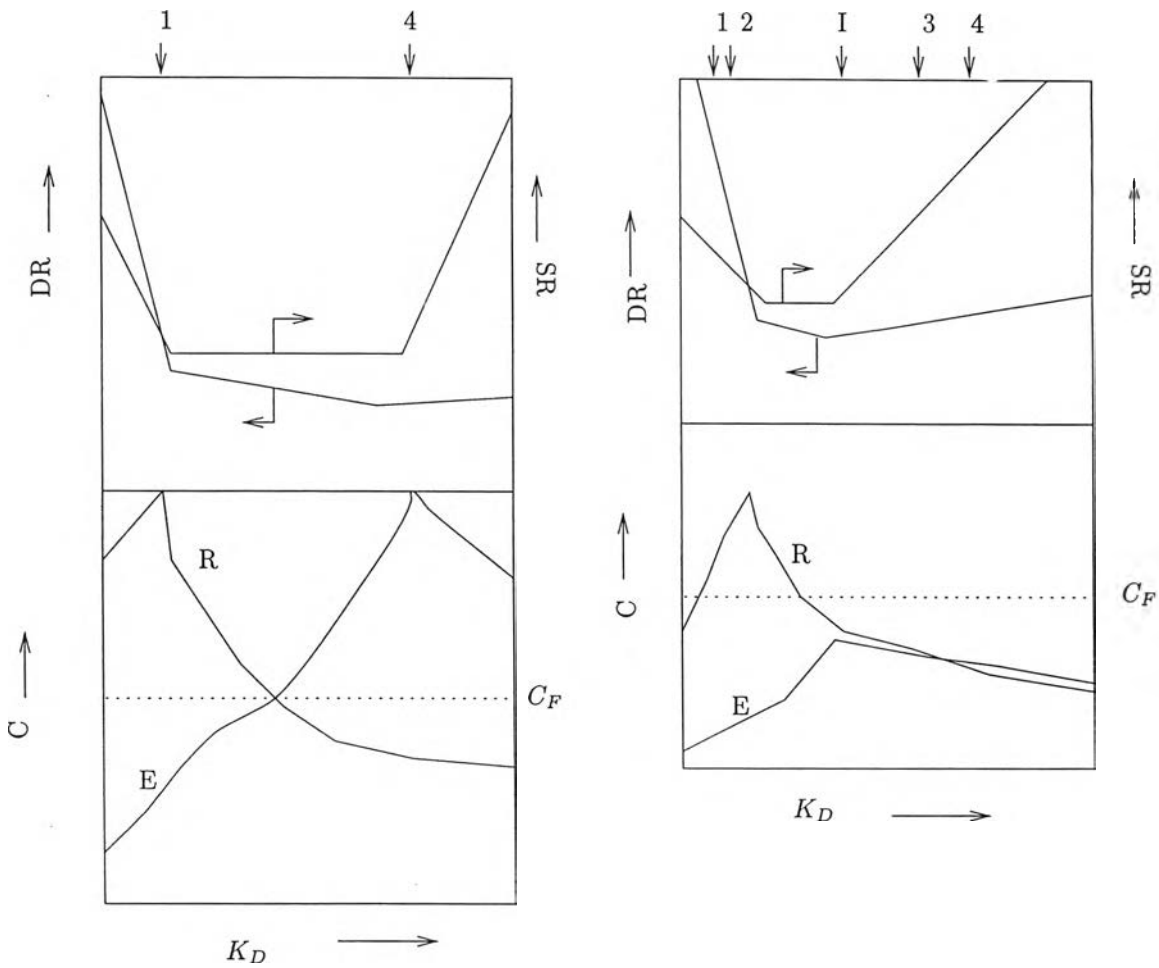
การแยกสารบนระบบ SMB จะอาศัยหลักของโครมาโตรกราฟฟีแบบแทนที่ (Displacement chromatography) ซึ่งตัวคายการดูดซับจะทำหน้าที่อยู่ 2 อย่าง คือ

- แทนที่องค์ประกอบอื่นๆ ที่ถูกดูดซับอยู่ก่อน ทำให้องค์ประกอบเหล่านั้นหลุดออกจากตัวดูดซับ
- เข้าไปเจือจางความเข้มข้นขององค์ประกอบอื่นๆ ในวัฏภาคของของไหล สมดุลการดูดซับขององค์ประกอบดังกล่าวจึงลดลง

ดังนั้นค่าความสามารถในการดูดซับของตัวคายการดูดซับ จึงมีผลต่อสมรรถนะของการแยกเป็นอย่างมาก ในระบบเบดนิ่ง ตัวคายการดูดซับที่เหมาะสมที่สุดจะต้องมีความสามารถในการดูดซับอยู่ระหว่างองค์ประกอบที่ต้องการแยก (Morbidelli 1985) นั่นคือ $K_i < K_D < K_{i+1}$ เมื่อ j คือองค์ประกอบหลักที่ต้องการแยก สำหรับระบบ TMB บทบาทของตัวคายการการดูดซับจะเป็นดังรูป 2.8 นั่นคือ ตัวคายการดูดซับที่เหมาะสมที่สุดควรจะมี $K_i < K_D < K_{i+1}$ เหมือนกรณีเบดนิ่ง ซึ่งจะให้ค่าความเข้มข้นของ E และ R สูง เท่ากับ C_F แต่ถ้าหากต้องการตัวใดตัวหนึ่งมีค่าความเข้มข้นสูงมากเป็นพิเศษควรจะใช้ตัวคายการดูดซับที่มีค่า K_D เท่ากับค่า K ขององค์ประกอบนั้นๆ

2.5 เงื่อนไขของสภาวะการไหลที่ทำให้เกิดการแยกโดยสมบูรณ์

รูปที่ 2.9 แสดงถึงลักษณะการกระจายความเข้มข้นภายในหอดูดซับสำหรับระบบ TMB เมื่อเกิดการแยกโดยสมบูรณ์ (Zhong, 1996) โดยโซนที่ 1 และ 4 จะมีแต่ตัวคายการดูดซับอยู่โซนที่ 2 จะมีเฉพาะองค์ประกอบที่จะมีอยู่ในผลิตภัณฑ์เอ็กซ์แทรก และโซนที่ 3 จะมีเฉพาะองค์ประกอบที่มี



(1)

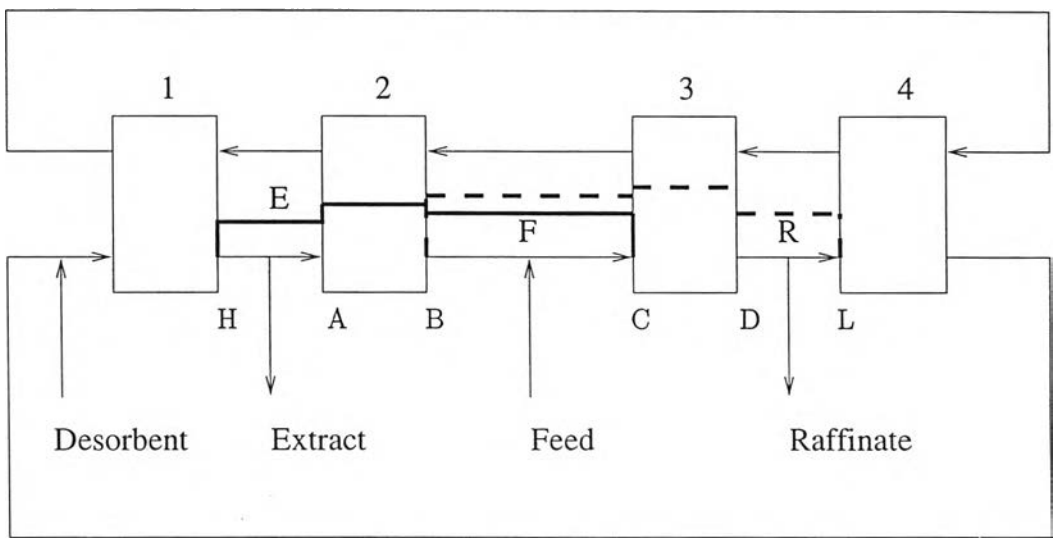
รูปที่ 2.8: ผลของตัวคายการดูดซับต่ออัตราการไหลของตัวดูดซับและตัวคายการดูดซับ (1)กรณีที่เป็นของผสมสององค์ประกอบ (3)กรณีที่เป็นของผสมหลายองค์ประกอบ (SR = ปริมาณของตัวคายการดูดซับที่ต้องใช้ DR = ปริมาณตัวคายการดูดซับที่ต้องใช้

อยู่ในผลิตภัณฑ์ราฟฟิเนท ดังนั้นจากสมการที่ 2.16 ถึงสมการที่ 2.21 จะสามารถหาค่า m_1 และ m_4 ที่ทำให้เกิดการแยกโดยสมบูรณ์ได้ดังนี้

$$m_1 > \frac{q_{s,ss}K_{ss}}{1 + K_D C_T} \tag{2.26}$$

$$m_4 < \frac{q_{s,ss}K_{ww}}{1 + K_D C_T} \tag{2.27}$$

เมื่อ ss คือ องค์ประกอบที่มีค่าดัชนีการแยกมากที่สุดในสายป้อน ww คือ องค์ประกอบที่มีค่าดัชนีการแยกน้อยที่สุดในสายป้อน ส่วน m_2 และ m_3 จะหาได้หลังจากที่ทราบค่า $y_i^2, i \in E$ และ $y_i^3, i \in R$ ก่อน ซึ่งการหาค่า y_i^2 และ y_i^3 นี้จะได้จากการทำการดุลมวลของระบบ TMB ในรูป 2.9 ดังนี้



รูปที่ 2.9: ลักษณะการกระจายความเข้มข้นที่สภาวะคงตัวในระบบ TMB เมื่อเกิดการแยกโดยสมบูรณ์ ขององค์ประกอบที่ถูกดูดซับได้มากกว่า(เส้นทึบ) และองค์ระกอบที่ถูกดูดซับได้น้อยกว่า(เส้นประ)

ดุลมวลสารรวม ณ แต่ละจุดที่มีการกระจายการไหล

$$m_D = m_1 - m_4 \tag{2.28}$$

$$m_E = m_1 - m_2 \tag{2.29}$$

$$m_F = m_3 - m_2 \tag{2.30}$$

$$m_R = m_3 - m_4 \tag{2.31}$$

ดุลมวลสารในผลิตภัณฑ์เอ็กซ์แทรก, $i \in E$

ดุลมวลสารรวมขององค์ประกอบ i

$$m_F y_i^F = m_E y_i^E \tag{2.32}$$

ดุลมวลสารย่อย ณ จุด H

$$y_i^E = \frac{\beta_i \phi_i^{ES}}{m_1} \tag{2.33}$$

ดุลมวลสารย่อย ณ จุด A

$$y_i^E - y_i^2 = \frac{\beta_i (\phi_i^{ES} - \phi_i^2)}{m_2} \tag{2.34}$$

ดุลมวลสารในผลิตภัณฑ์ราฟฟิเนท, $i \in R$

ดุลมวลสารรวมขององค์ประกอบ i

$$m_F y_i^F = m_R y_i^R \tag{2.35}$$

ดุลมวลสารย่อย ณ จุด L

$$y_i^R = \frac{\beta_i \phi_i^{RS}}{m_4} \tag{2.36}$$

ดุลมวลสารย่อย ณ จุด D

$$y_i^R - y_i^3 = \frac{\beta_i (\phi_i^{RS} - \phi_i^3)}{m_3} \tag{2.37}$$

สมการที่ 2.28 - 2.37 ทั้งหมด 4+3(NC-1) สมการ เมื่อรวมสมการสมดุลของแต่ละองค์ประกอบในโซนที่ 2 และ 3 อีก NC-1 สมการจะทำให้ มีชุดสมการทั้งหมด 4NC สมการ โดยมีตัวไม่ทราบค่า 4NC+4 ตัว (8 ตัวสำหรับ $m_1, m_2, m_3, m_4, m_D, m_E, m_F, m_R$ และ 4(NC-1) ตัว สำหรับ y_i กับ ϕ_i ในทั้ง 4 โซน) ดังนั้น ถ้ากำหนดค่าให้กับตัวไม่ทราบค่าอีก 4 ตัว จะสามารถแก้ชุดของสมการข้างต้นได้ ค่า m_1 และ m_4 สามารถกำหนดได้ทันทีโดยอาศัยสมการที่ 2.26 และสมการที่ 2.27 ดังนั้นจะต้องสุ่มค่า m_2 และ m_3 ขึ้นมา เพื่อแก้ระบบสมการข้างต้น แล้วอาศัยสมการ 2.16 ถึงสมการ 2.21 ในการเช็คความถูกต้องของค่า m_2, m_3 ที่สุ่มขึ้นมา

2.6 ความต้านทานการถ่ายโอนมวลและการแพร่ในแนวแกน

ผลของความต้านทานการถ่ายโอนมวลและการแพร่ในแนวแกนจทำให้สมรรถนะในการแยกของหอดูดซับลดลง พิจารณารูปที่ 2.9 ซึ่งเป็นลักษณะการกระจายความเข้มข้นของระบบ TMB แบบอุดมคติ (ไม่มีความต้านทานการถ่ายโอนมวลและการแพร่ในแนวแกน) ลักษณะการกระจายความเข้มข้นที่ได้จะมีความไม่ต่อเนื่องเกิดขึ้นที่ปลายทั้ง 2 ข้างของแต่ละโซน แต่เมื่อเป็นระบบจริง ความต้านทานการถ่ายโอนมวลและการแพร่ในแนวแกนจะทำให้ปลายทั้ง 2 ด้านเกิดการแผ่ออกไปเป็นหางยาวๆ ซึ่งถ้าหากว่ามีความต้านทานการถ่ายโอนมวลและการแพร่ในแนวแกนที่สูงมาก หางของลักษณะการกระจายความเข้มข้นจะยาวข้ามไปยังโซนถัดไปได้ ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความบริสุทธิ์ต่ำลง ในการออกแบบจึงต้องเผื่อความยาวที่เกินมานี้ด้วย ซึ่งถ้าหากลักษณะการดำเนินการเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง ก็จะใช้แนวคิดของความยาวของหอดูดซับที่ไม่ถูกใช้งาน, LUB (length of unused bed) แต่ถ้าเป็นลักษณะการดำเนินการแบบเนื่อง ก็จะอาศัยแนวความคิด ของความสูงเทียบเท่าขั้นตอนสมดุลตามทฤษฎี, H' (Height equivalent to theoretical plate) หรือจำนวนขั้นตอนสมดุล, N' มาใช้ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่าง H' กับความต้านทานการถ่ายโอนมวล และการแพร่ในแนวแกน (Ruthven, 1984) เป็นไปดังสมการ

$$\frac{H'}{L} = \frac{1}{N'} = \frac{ln\gamma}{\gamma - 1}\left(\frac{1}{Pe_L} + \frac{1}{St_L}\right) \tag{2.38}$$

ซึ่งถ้าเป็นกรณีที่ $St_L >> Pe_L$ จะได้

$$\frac{H'}{L} = \frac{1}{N'} = \frac{ln\gamma}{(\gamma - 1)Pe_L} \tag{2.39}$$

ในกรณีระบบมีสมการการดูดซับแบบเส้นตรง สมการของ Kremser สามารถประมาณค่าความเข้มข้นไร้หน่วยที่ทางออก, $\phi_L = C_L/C_O$, ได้จากแบบจำลองแบบขั้นตอนสมดุล (Equilibrium stage model) ของระบบที่มีการไหลสวนทางดังนี้

$$\phi_L = \frac{\gamma - 1}{\gamma^{N'+1} - 1} \tag{2.40}$$

ค่า ϕ_L นี้ขึ้นอยู่กับทั้งค่า γ และค่า N' ซึ่ง ณ จุดที่ $\gamma \to 1$

$$\lim_{\gamma \to 1} \phi_L = \frac{1}{N' + 1} \tag{2.41}$$

นั่นคือ ค่า ϕ_L แปรผกผันกับจำนวนขั้นตอนสมดุล ซึ่งถ้าหากต้องการให้ $\phi_L \to 0$ N' จะต้อง $\to \infty$ นั่นคือ ถ้าต้องการความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ยิ่งมาก ยิ่งต้องใช้ค่า N' ที่มากขึ้น จากสมการ ?? ค่า N' ที่ได้จะขึ้นอยู่กับ γ และ Pe_L ดังนั้นการปรับค่า N' สามารถทำได้โดย

- เปลี่ยนค่า m_j ซึ่งมีผลทำให้ γ และ Pe_L เปลี่ยนทั้งคู่
- เปลี่ยนชนิดของตัวคายการดูดซับ ซึ่งทำให้ γ และ Pe_L เปลี่ยนทั้งคู่
- เปลี่ยนความยาวโซน ซึ่งทำให้ Pe_L ของโซนนั้นๆ เปลี่ยนไป
- เปลี่ยนชนิดของตัวดูดซับ ซึ่งทำให้ γ เปลี่ยน

ในงานวิจัยนี้จะใช้ทั้ง 4 วิธีในการศึกษาผลของการแพร่ในแนวแกนต่อความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ที่ได้