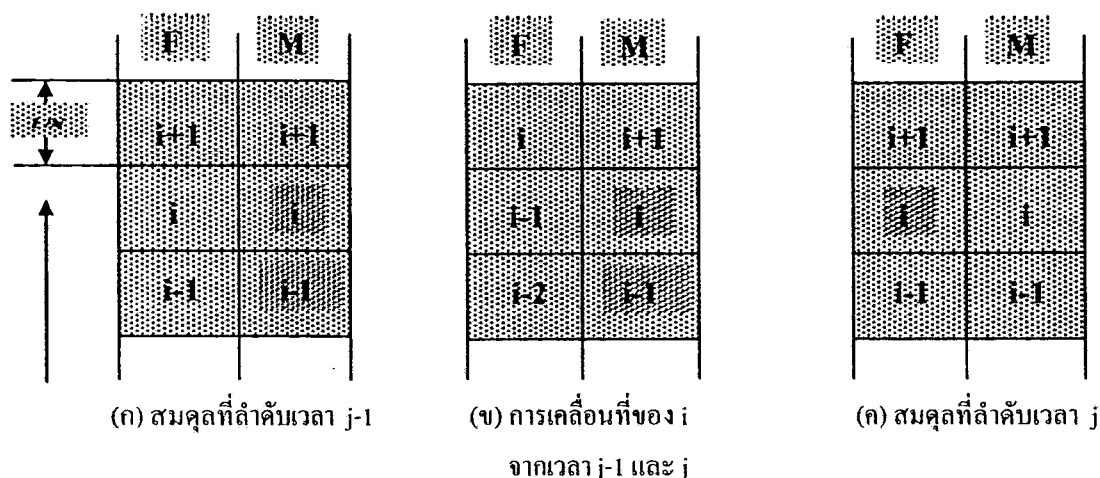


กราฟทำนายผล การสกัดไอออนโลหะ

สาระสำคัญที่จะอธิบายในบทนี้คือวิธีการสร้างกราฟอย่างง่ายเพื่อคำนวณจำนวนขั้นตอน (จำนวนหอสกัดที่ใช้) และทำนายผลของการสกัด ซึ่งหมายถึงค่าที่จะนำไปสู่การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การสกัด หรือเปอร์เซ็นต์การนำกลับ เวลาที่ใช้ (หรือจำนวนรอบการทำงาน) เป็นต้น จากการสกัดไอออนโลหะผ่านระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง โดยประยุกต์หลักการของ McCabe-Thiele ที่ใช้การลากเส้นกราฟทำนายผลจากระบบการกลั่น (distillation system) หรือผลจากระบบการสกัด (extraction system) และอาศัยตัวอย่างที่พัฒนาโดย กลุ่มของ Grevillot จากประเทศฝรั่งเศส รวมทั้งกลุ่มของ Chen จากประเทศสหรัฐอเมริกา ที่ใช้การคำนวณโดยการสร้างกราฟทำนายผลการสกัดโปรตีนผ่านระบบปรับทิศทางด้วยเครื่องอัดสูบล (parametric pumping) และกลุ่มของ Patthaveekongka จากประเทศไทยที่ใช้การลากเส้นกราฟคำนวณหาผลการสกัดไอออนโลหะผ่านระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง (hollow fiber supported liquid membrane)

6.1 การสร้างสมการสมดุลการถ่ายเทมวลของไอออนโลหะผ่านระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

การศึกษามวลการไหลในท่อของ Chen และคณะก่อให้เกิดแนวความคิดใหม่ที่น่าไปประยุกต์ใช้กับกระบวนการสกัดแยกไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง หากพิจารณาจากรูปแบบขั้นตอนสมดุลการถ่ายเทมวลโดยการแบ่งมอดูลเส้นใยกลวงให้เป็นส่วนย่อยขนาดเล็ก (stage) จำนวน “N” ส่วน ซึ่งแต่ละส่วนจะมีขนาดเท่าๆ กัน เท่ากับ “L/N” โดยที่ “L” คือ ความยาวของมอดูลเส้นใยกลวง แต่ละขั้นตอนจะแทนด้วย (i, j) โดยที่ “i” คือ เลขที่ของลำดับส่วนย่อย (stage number) และ “j” คือ เลขที่ของระยะเวลาการกระจัด (displacement time) รูปที่ 6.1 แสดงรูปแบบสมดุลการเคลื่อนที่ของ i จากเวลา j-1 (ก) และ j (ค)



รูปที่ 6.1 รูปแบบสมดุลการเคลื่อนที่ของ i ระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อน (F) และวัฏภาคเชื้อแผ่นเหลว (M) จากเวลา $j-1$ และ j

กระบวนการเริ่มต้นจากสมดุลที่เวลา $(j-1)$ ดังรูปที่ 6.1 (ก) ซึ่งได้แสดงส่วนย่อยขนาดเล็ก (stage) ในวัฏภาคสารละลายป้อนและวัฏภาคเชื้อแผ่นเหลวในภาวะสมดุลซึ่งกันและกัน ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าความเข้มข้นของไอออนโลหะในวัฏภาคสารละลายป้อนและวัฏภาคเชื้อแผ่นเหลวสมดุลกัน จากที่กล่าวแล้วว่าวัฏภาคเชื้อแผ่นเหลวเกิดจากการตรึงสารสกัดที่ละลายอยู่ในสารละลายอินทรีย์ในรูปอนุภาคของเส้นใยกลวง ดังนั้นวัฏภาคเชื้อแผ่นเหลวจึงเป็นวัฏภาคที่ไม่มีการเคลื่อนที่ (stationary phase) ขณะที่วัฏภาคสารละลายป้อนเป็นวัฏภาคที่เคลื่อนที่ (mobile phase) เพราะไหลเข้าเส้นใยกลวงตลอดเวลา ตำแหน่งต่างๆ ในรูปที่ 6.1 (ก) ขั้นที่ $(j-1)$ จะเปลี่ยนไปรูปที่ 6.1 (ข) ซึ่งเป็นขั้นชั่วคราว (instantaneous step) สารละลายป้อนจากตำแหน่งที่ $(i-2)$ จะไหลเข้าแทนที่ตำแหน่ง $(i-1)$ และสารละลายป้อนจากตำแหน่ง $(i-1)$ เดิมจะไหลไปตำแหน่ง (i) พร้อมกับที่สารละลายป้อนจากตำแหน่ง (i) เดิมไหลไปแทนที่ตำแหน่ง $(i+1)$ ตามลำดับ นั่นคือ ทุกตำแหน่งจะเคลื่อนไปข้างหน้า 1 ขั้น

หากกำหนดให้ $y(i, j)$ เป็นความเข้มข้นของไอออนโลหะในวัฏภาคสารละลายป้อนที่ตำแหน่ง (i, j) และ $x(i, j)$ เป็นความเข้มข้นของไอออนโลหะนั้นในวัฏภาคเชื้อแผ่นเหลวที่ตำแหน่ง (i, j) จากรูปที่ 6.1 ไอออนของโลหะในวัฏภาคสารละลายป้อนที่มีความเข้มข้น $y(i-1, j-1)$ จากตำแหน่งเดิม คือ “ $i-1$ ” จะเคลื่อนผ่านขั้นชั่วคราวเข้าสู่สมดุลที่ตำแหน่งใหม่ “ i ” ที่เวลา j

สมมูลมวลของไอออนโลหะในองค์ประกอบแต่ละส่วนที่ตำแหน่ง “i” และ “j” เขียนเป็นสมการดังนี้

$$V_F y(i-1, j-1) + V_N x(i, j-1) = V_F y(i, j) + V_N x(i, j) \quad (6.1)$$

V_F และ V_N เป็นปริมาตรของวัฏภาคสารละลายป้อนและวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวต่อหนึ่ง stage ตามลำดับ สมมติฐานที่กำหนด ได้แก่

(ก) การกระจายตัวของไอออนโลหะระหว่างวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว เขียนในรูปความสัมพันธ์เชิงเส้นได้ว่า

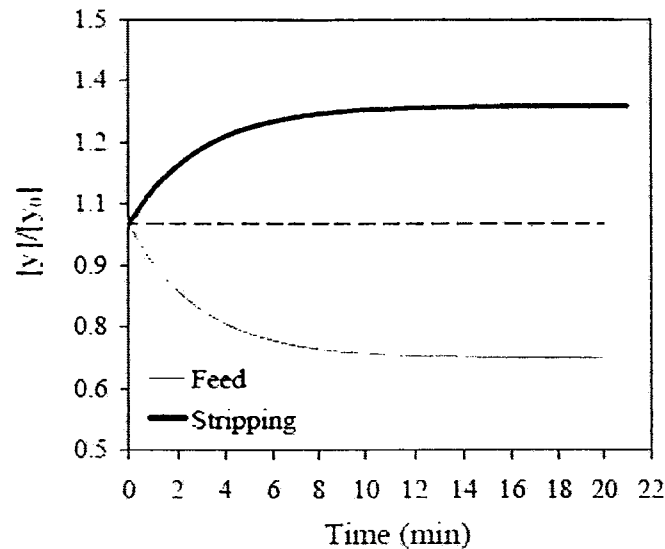
$$x(i, j) = ky(i, j) \quad (6.2)$$

(ข) ปริมาตรของส่วนย่อยของวัฏภาคสารละลายป้อนไม่จำเป็นต้องเท่ากับปริมาตรของส่วนย่อยของวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว

(ค) ปฏิริยาที่ผิวสัมผัสทั้งสองด้านของวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวเกิดขึ้นเร็วมาก ดังนั้นการเข้าสู่สมดุลของส่วนย่อยแต่ละส่วนจึงเร็วมาก

(ง) ค่าความต้านทานการถ่ายเทมวลน้อยมากจนสามารถละทิ้งได้ ซึ่งเป็นตามกฎหมายของเฮนรี (Henry's law) ที่ความเข้มข้นต่ำ

ค่าความต่างศักย์ของความเป็นกรด-เบสที่ผิวสัมผัสทั้งสองด้านของเยื่อแผ่นเหลวทำให้เกิดการถ่ายเทไอออนโลหะ ค่าความเป็นกรด-เบสของเยื่อแผ่นเหลวที่ตำแหน่งของการถ่ายเทมวลรวมสุทธิ (net mass transfer) มีค่าเป็นศูนย์ คือไม่เกิดการถ่ายเทมวลของไอออนระหว่างสารละลายป้อนและสารละลายน้ำกลับ เรียกว่า ไอโซอิเล็กทริกพอยต์ (isoelectric point, I_p) ตัวอย่างการสกัดไอออนซีเรียมโดยกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลาง ไอออนซีเรียมที่ละลายอยู่ในวัฏภาคสารละลายป้อนมีค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ pH_1 จะทำปฏิกิริยากับสารสกัดไตรนอร์มอลออกทิลเอมีน ได้สารประกอบเชิงซ้อนในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวซึ่งจะทำปฏิกิริยากับวัฏภาคสารละลายน้ำกลับและเกิดการนำกลับไอออนซีเรียมไปยัง วัฏภาคสารละลายน้ำกลับที่มีค่าความเป็นกรด-เบสเท่ากับ pH_2 ค่าไอโซอิเล็กทริกพอยต์ของไอออนซีเรียม (I_{Ce}) ของในระบบนี้มีค่าเท่ากับ 5.84 และ $pH_2 < I_{Ce} < pH_1$ อัตราส่วนความเข้มข้น (concentration ratio) ของไอออนซีเรียมในวัฏภาคสารละลายป้อนและวัฏภาคสารละลายน้ำกลับแสดงในรูปที่ 6.2



รูปที่ 6.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของความเข้มข้นของไอออนซีเรียม
ในวิทยาศาสตร์ละลายป้อนและวิทยาศาสตร์ละลายนำกลับกับเวลาการสกัด

6.2 กราฟทำนายผลการสกัดไอออนโลหะด้วยกระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่น เหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงสำหรับระบบ 1 มอดูล

Patthaveekongka และคณะ ประยุกต์วิธีการสร้างกราฟจากงานของ Chen และคณะ โดยนำข้อมูลการสกัดไอออนโลหะผ่านระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวงมาสร้างกราฟการลากเส้นสมดุล (equilibrium line) เส้นปฏิบัติการ (operating line) และการกำหนดพิกัด (co-ordinate) สามารถอธิบายได้ดังนี้

6.2.1 การสร้างเส้นสมดุล

1. จากการปฏิบัติการแบบกะ แปลค่าความเข้มข้นของสารสกัดในวิทยาศาสตร์เยื่อแผ่นเหลว จากนั้นวิเคราะห์ความเข้มข้นของไอออนโลหะในวิทยาศาสตร์ละลายป้อนและในวิทยาศาสตร์ละลายนำกลับที่ภาวะคงตัว (steady state) เพื่อคำนวณค่าความเข้มข้นของไอออนโลหะในวิทยาศาสตร์ละลายเยื่อแผ่นเหลวด้วยสมการดุลมวลสารดังนี้

$$y_{F,i}V_{F,i} - y_{S,i}V_{S,i} = x_{M,i}V_{M,i} \quad (6.3)$$

y_F คือ ความเข้มข้นของไอออนโลหะในวิทยาศาสตร์ละลายป้อน

y_S คือ ความเข้มข้นของไอออนโลหะในวิทยาศาสตร์ละลายนำกลับ

x_M คือ ความเข้มข้นของไอออนโลหะในวิทยาศาสตร์ละลายเยื่อแผ่นเหลว

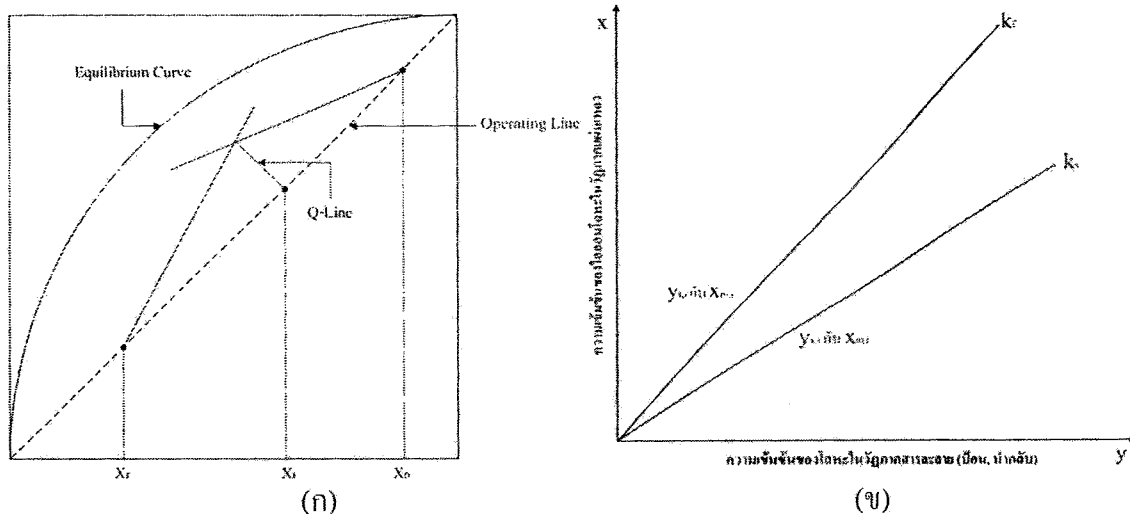
เมื่อ i คือ จำนวนครั้งของการปฏิบัติการ ($i = 1, 2, 3, \dots, n$)

2. สร้างตารางค่าความเข้มข้นของไอออนโลหะในวัฏภาคทั้งสามที่แปรค่าความเข้มข้นของสารสกัด n ครั้ง ($y_{F,i}, x_{M,i}, y_{S,i}$) เพื่อการสร้างกราฟต่อไป

3. สร้างกราฟเส้นสมดุล โดยให้แกนตั้งเป็นค่าความเข้มข้นของไอออนโลหะในวัฏภาคสารละลายเยื่อแผ่นเหลวและแกนแนวนอนเป็นค่าความเข้มข้นของไอออนโลหะในวัฏภาคสารละลายป้อนหรือสารละลายนำกลับ ดังรูปที่ 6.3 (ข)

โดยทั่วไปเส้นสมดุลจาก McCabe-Thiele จะเป็นเส้นโค้ง แต่เส้นสมดุลในกรณีนี้จะเป็นเส้นตรง เพราะเป็นการสกัดไอออนโลหะที่มีความเข้มข้นต่ำมากในระดับ ppm ถึง ppb หรือ ppt ซึ่งเป็นส่วนที่อยู่ใกล้จุดเริ่มต้น (original point) ของเส้นสมดุลตาม McCabe-Thiele (k_F เป็นเส้นสมดุลของการสกัดที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง $y_{F,i}$ กับ $x_{M,i}$ ส่วน k_S เป็นเส้นสมดุลของการนำกลับที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง $y_{S,i}$ กับ $x_{M,i}$)

ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างไอออนโลหะในวัฏภาคสารละลายเยื่อแผ่นเหลวกับวัฏภาคสารละลายป้อนหรือวัฏภาคสารละลายนำกลับนั้นจึงเป็นตามสมมติฐานดังสมการที่ (6.2)



รูปที่ 6.3 เปรียบเทียบเส้นสมดุล (ก) จากหลักการ McCabe-Thiele และ (ข) จากการสกัดไอออนโลหะด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นไขกวาง

6.2.2 การสร้างเส้นปฏิบัติการ

หาสมการสมดุลมวลสารของไอออนโลหะในวิทยาศาสตร์ละลายป้อน วิทยาศาสตร์ละลายเยื่อแผ่นเหลว และวิทยาศาสตร์ละลายนำกลับจากแบบจำลองดังรูปที่ 6.4 เพื่อสร้างเส้นปฏิบัติการของการสกัดและการนำกลับตามลำดับ

F	M	S
$i+1$	$i+1$	$i+1$
i	i	i
$i-1$	$i-1$	$i-1$

i คือ เลขที่ของลำดับส่วนย่อย

j คือ เลขที่ของระยะเวลาการกระจัด

รูปที่ 6.4 แบบจำลองส่วนย่อยของการถ่ายเทมวลของไอออนโลหะในวิทยาศาสตร์ละลายป้อน วิทยาศาสตร์ละลายเยื่อแผ่นเหลวและวิทยาศาสตร์ละลายนำกลับของระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง

ทำนองเดียวกับรูปแบบสมดุลในรูปที่ 6.1 สมการสมดุลการถ่ายเทมวลของไอออนโลหะในวิทยาศาสตร์ทั้งสามที่แต่ละส่วนในตำแหน่ง “ i ” และ “ j ” จากรูปที่ 6.4 เขียนได้ดังนี้

$$V_{aq}Y_{aq(i-1,j-1)} + V_M X_M = V_{aq}Y_{aq(i,j)} + V_M X_{M(i,j)} \quad (6.4)$$

V_{aq} คือ ปริมาตรของวิทยาศาสตร์ละลายป้อน (V_F) หรือปริมาตรของวิทยาศาสตร์ละลายนำกลับ (V_S)

จากสมการที่ (6.4) จัดสมการใหม่จะได้ความสัมพันธ์ของเส้นปฏิบัติการของการสกัด ดังนี้

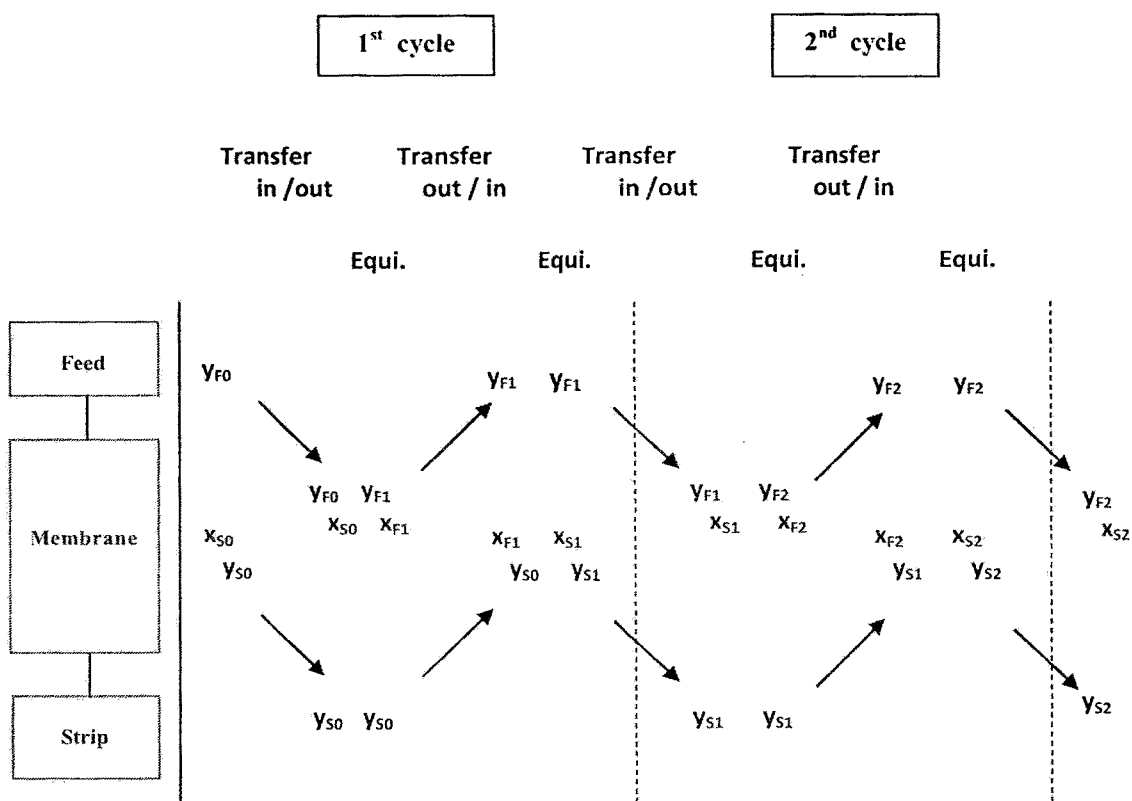
$$X_{M(i,j)} = \left(-\frac{V_F}{V_M}\right) Y_{F(i,j)} + \left(-\frac{V_F}{V_M}\right) Y_{F(i-1,j-1)} + X_{M(i,j-1)} \quad (6.5)$$

เนื่องจากทราบค่า $y_{F(i-1,j-1)}$ และ $x_{M(i,j-1)}$ จึงสามารถสร้างเส้นปฏิบัติการของการสกัดที่มีความชันเท่ากับ $-V_F/V_M$

ทำนองเดียวกันสามารถสร้างเส้นปฏิบัติการของการนำกลับโดยมีความชันเท่ากับ $-V_s / V_M$ และถ้า V_s เท่ากับ V_F เส้นปฏิบัติการของการนำกลับจะขนานกับเส้นปฏิบัติการของการสกัด

6.2.3 การกำหนดพิกัด

รูปที่ 6.7 แสดงแผนผังการถ่ายเทไอออนโลหะที่ต้องการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง 1 มอดูล เมื่อวัฏภาคสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลผ่านมอดูล 2 รอบ



รูปที่ 6.7 การถ่ายเทไอออนโลหะในการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลวง 1 มอดูล เมื่อวัฏภาคสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลผ่านมอดูล 2 รอบ

จากรูปที่ 6.7 ไอออนโลหะความเข้มข้น y_{F0} ที่อยู่ในวัฏภาคสารละลายป้อนจะไหลเข้าท่อของเส้นใยกลวงและแพร่เข้าวัฏภาคสารละลายเยื่อแผ่นเหลวเพื่อเกิดปฏิกิริยาการสกัดกับสารสกัด เมื่อเวลาผ่านไปจะเริ่มมีไอออนโลหะความเข้มข้น x_{S0} ในวัฏภาคสารละลายเยื่อแผ่นเหลวชั่วขณะ (instantaneous) และเป็น y_{F1} และ x_{F1} ที่สมดุล ในขณะเดียวกันวัฏภาคสารละลายนำกลับซึ่งมีไอออนโลหะความเข้มข้น y_{S0} จะไหลสวนทางเข้าชั้นเปลือกของเส้นใยกลวง ส่วนสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาการสกัดในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวจะทำปฏิกิริยานำกลับกับสารละลาย

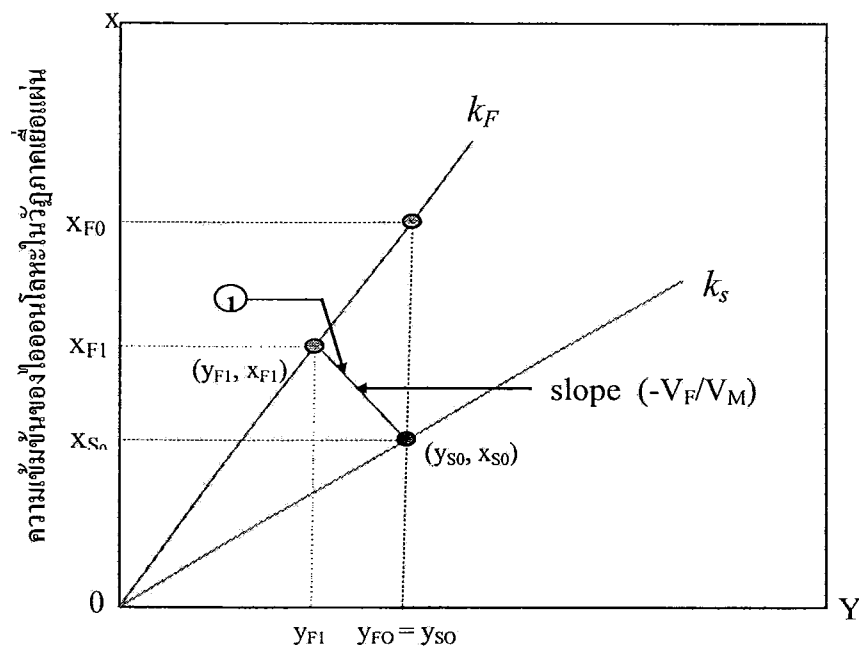
นำกลับเป็น y_{S0} และ x_{F1} ชั่วขณะ และเป็น y_{S1} และ x_{S1} ที่สมดุล ซึ่งถือเป็น 1 รอบ ของปฏิบัติการ และพร้อมที่จะเริ่มการสกัดรอบต่อไป ซึ่งขั้นตอนเหมือนเดิมดังที่ได้กล่าว ในที่สุดจะเป็น y_{S2} และ x_{S2} ที่รอบที่สองของการปฏิบัติการ

พิกัด (y_{F1}, x_{F1}) และ (y_{F2}, x_{F2}) จะอยู่บนเส้นสมดุลของการสกัดพิกัด (y_{S0}, x_{S0}) , (y_{S1}, x_{S1}) และ (y_{S2}, x_{S2}) จะอยู่บนเส้นสมดุลของการนำกลับ

6.2.4 การลากเส้นกราฟ

ในส่วนนี้จะอธิบายการลากเส้นกราฟการสกัดแบบกะด้วย 1 นอดูล จนถึงภาวะสมดุล ดังนี้

1. ให้ความเข้มข้นของไอออนโลหะในวัฏภาคสารละลาย (ป้อน, นำกลับ) อยู่ในแนวแกนนอน และความเข้มข้นของไอออนโลหะในวัฏภาคสารละลายเยื่อแผ่นเหลวอยู่ในแนวแกนตั้ง ดังรูปที่ 6.8 กำหนดให้ y_{F0} เท่ากับ y_{S0} แล้วลากเส้นจาก y_{F0} ไปตัดกับเส้นสมดุล k_S และ k_F ตามลำดับ จากตำแหน่งที่เป็นจุดตัดทั้งสองจุดนี้ ลากเส้นในแนวนอนไปตัดกับแกนตั้ง จะได้ค่าความเข้มข้นของไอออนโลหะในวัฏภาคสารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่จุดสมดุล x_{S0} กับ x_{F0}

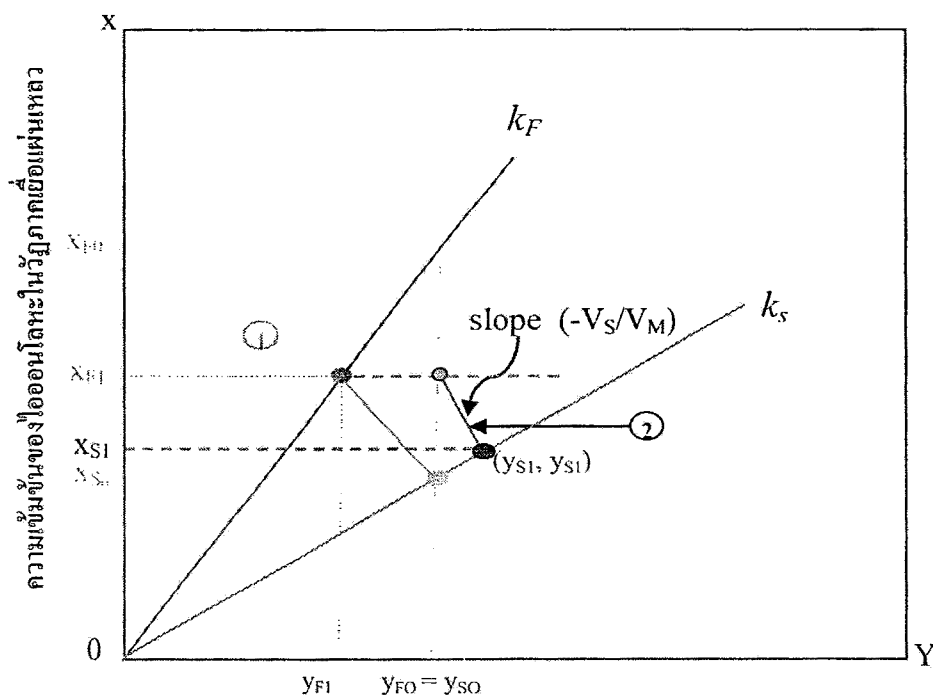


ความเข้มข้นของไอออนโลหะในวัฏภาคสารละลาย (ป้อน, นำกลับ)

รูปที่ 6.8 เส้นปฏิบัติการของวัฏภาคสารละลายป้อนกับวัฏภาคสารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่มีค่าความชัน $-V_F/V_M$

2. จากพิกัด (y_{s0}, x_{s0}) ลากเส้นตรงหมายเลข (1) ซึ่งมีค่าความชัน $(-V_F/V_M)$ ไปยังเส้นสมมูล k_F ที่พิกัด (y_{F1}, x_{F1}) ซึ่งความหมายทางกายภาพ x_{F1} คือ ความเข้มข้นของไอออนโลหะในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวจากปฏิกิริยาการสกัดที่สภาวะสมดุล

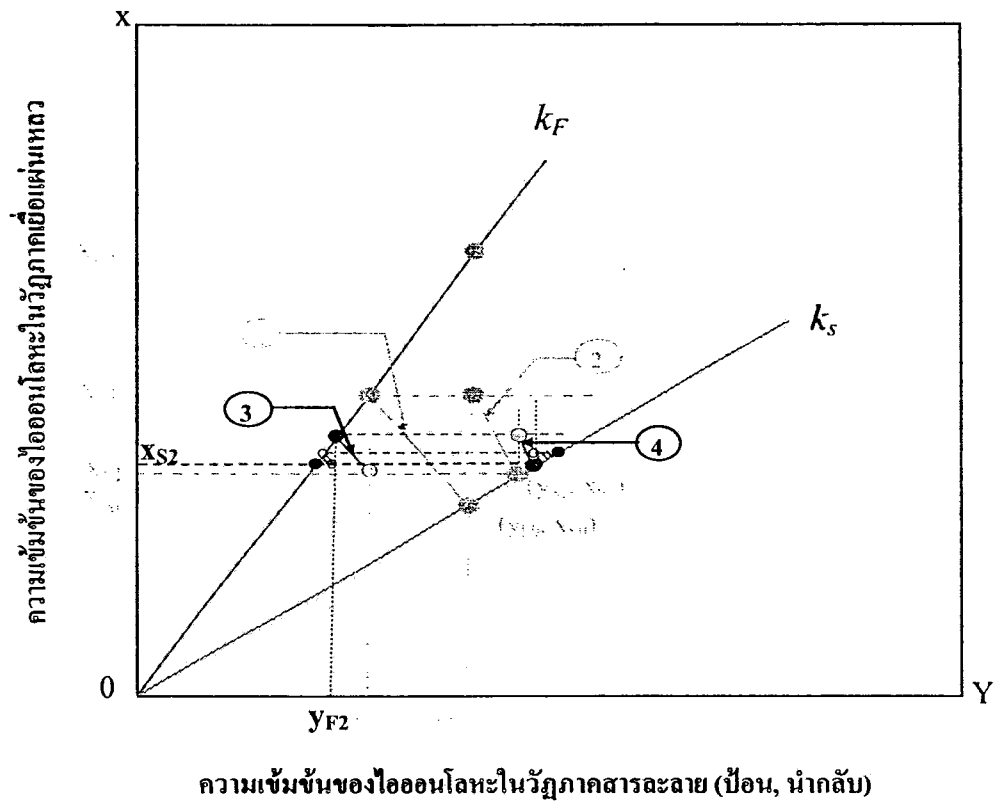
3. จากพิกัด (y_{F1}, x_{F1}) ในรูปที่ 6.9 ลากเส้นขนานกับแนวแกนอนตัดกับเส้นที่ลากขึ้นในแนวตั้งจากพิกัด (y_{F0}, x_{F0}) หรือ พิกัด (y_{s0}, x_{s0}) ที่จุดตัดนี้ค่าความเข้มข้นของไอออนโลหะในวัฏภาคสารละลายนำกลับเท่ากับ y_{s0} จากนั้นลากเส้นตรงหมายเลข (2) ที่มีค่าความชัน $(-V_S/V_M)$ ไปตัดกับเส้นสมมูล k_S ที่พิกัด (y_{S1}, x_{S1}) ซึ่งคือกราฟของการสกัด 1 รอบ



ความเข้มข้นของไอออนโลหะในวัฏภาคสารละลาย(ป้อน, นำกลับ)

รูปที่ 6.9 เส้นปฏิบัติการของวัฏภาคสารละลายนำกลับกับวัฏภาคสารละลายเยื่อแผ่นเหลวที่มีค่าความชัน $-V_S/V_M$

4. ในทำนองเดียวกันสามารถลากเส้นกราฟของการสกัดรอบที่สองได้ เส้นปฏิบัติการที่ลากขึ้นมาใหม่ในรอบนี้คือหมายเลข (3) และ (4) ดังรูปที่ 6.10 จากนั้นดำเนินการตามขั้นตอนต่างๆ ถึงรอบที่ n พิกัดบนเส้นสมมูล k_F จะเคลื่อนที่ลงไปตามแนวเส้น ส่วนพิกัดบนเส้นสมมูล k_S จะเคลื่อนที่ขึ้นไปตามแนวเส้น



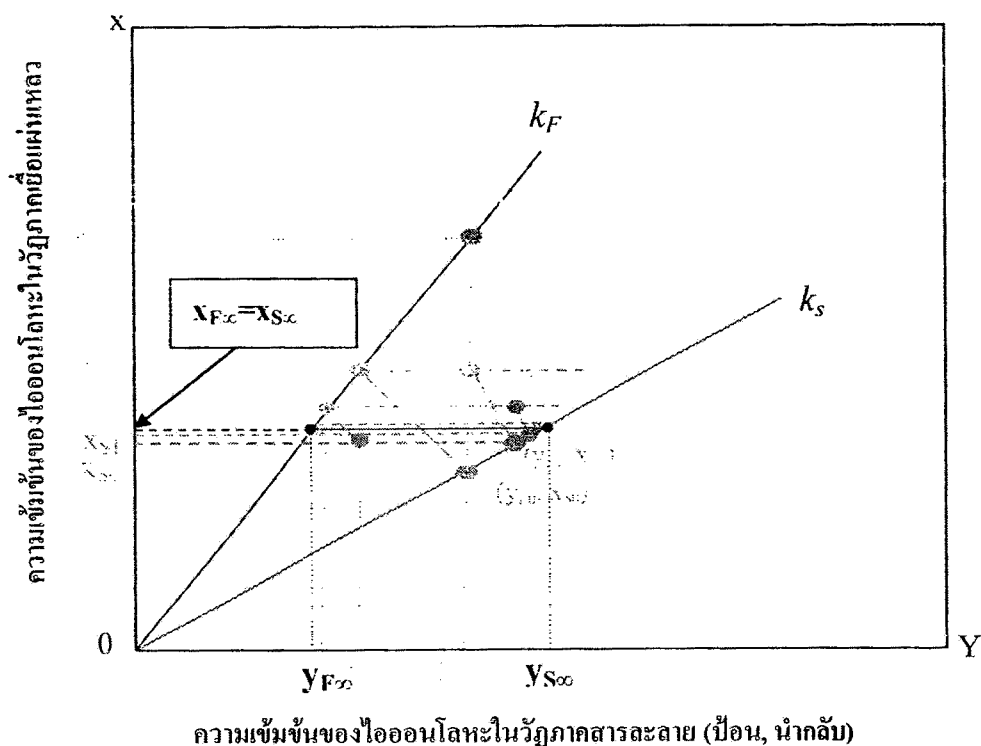
รูปที่ 6.10 เส้นปฏิบัติการของการสกัดจำนวน n รอบ

5. เมื่อถึงภาวะคงตัวความเข้มข้นของไอโอดีนในวัฏภาคสารละลายป้อนจะคงที่เท่ากับ $y_{F\infty}$ และในวัฏภาคสารละลายนำกลับเท่ากับ $y_{S\infty}$ ดังรูปที่ 6.11 วัฏภาคสารละลายเยื่อแผ่นเหลวจะมีความเข้มข้นของไอโอดีนคงที่และอยู่ในสมดุลกับทั้งวัฏภาคสารละลายป้อนและวัฏภาคสารละลายนำกลับ ซึ่งแสดงจากเส้นเชื่อมในแนวนานกับแกนอนระหว่าง $y_{F\infty}$ และ $y_{S\infty}$ และแทนความหมายของกระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นไขกอลง 1 มอดูล

ที่สถานะอยู่ตัวนี้วัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวจะมีองค์ประกอบของไอโอดีนคงตัวและอยู่ในสมดุลกับทั้งสารละลายป้อนที่มีค่าความเข้มข้นเท่ากับ $[y_F]_{\infty}$ และสารละลายนำกลับที่ความเข้มข้นเท่ากับ $[y_S]_{\infty}$ ดังสมการที่ (6.1) และหากอาศัยสมการที่ (6.2) ก็จะสามารถแสดงได้ว่า

$$x = k_F[y_F]_{\infty} = k_S[y_S]_{\infty} \quad (6.6)$$

ดังนั้นหากลากเส้นเชื่อมต่อระหว่างจุดที่ความเข้มข้นของไอโอดีนเท่ากับ $[y_F]_{\infty}$ และ $[y_S]_{\infty}$ แล้วจะได้เส้นขนานกับแกน y นั้นเอง



รูปที่ 6.11 กราฟของการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พยางด้วยเส้นใยกลาง 1 มอดูล ที่ภาวะคงตัว

6.3 กราฟทำนายผลการสกัดไอออนโลหะด้วยกระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พยางด้วยเส้นใยกลางสำหรับระบบ 2 มอดูล

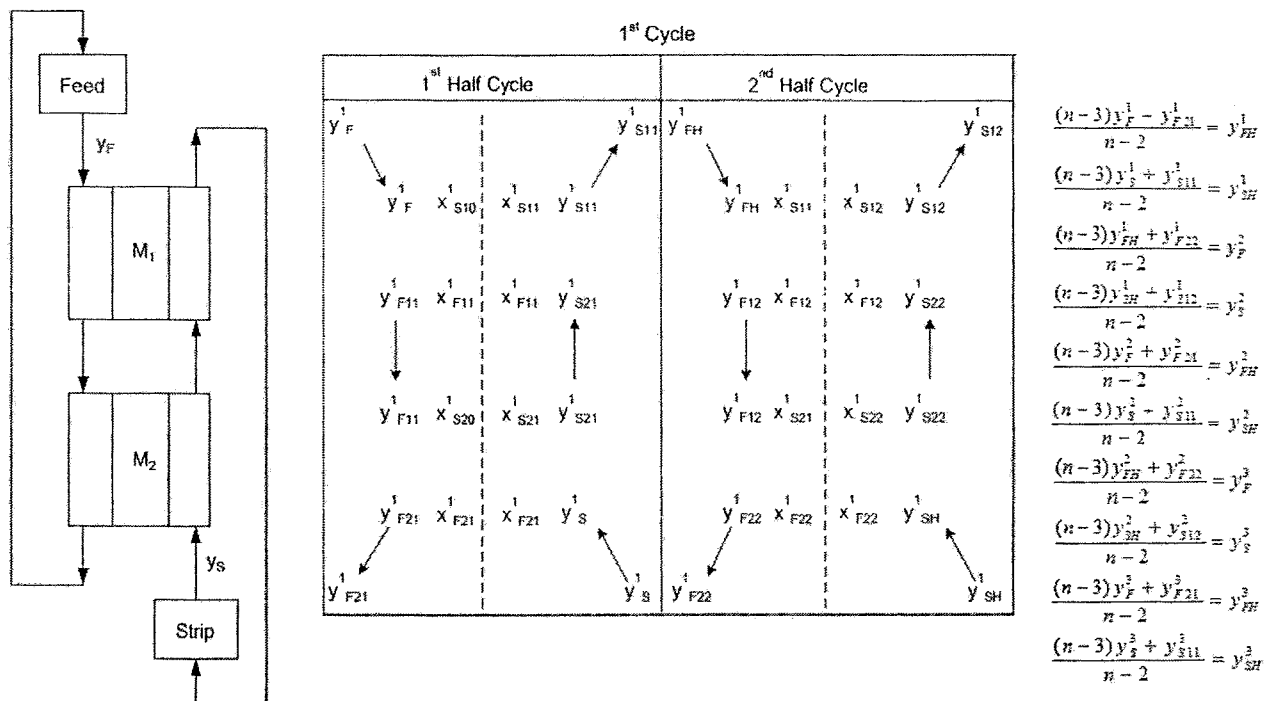
สำหรับระบบสองหอสกัดกระบวนการประกอบด้วย หอสกัดสองหอต่อเนื่องกัน ดังรูปที่ 4.2 และมีถังพัก 2 ถังสำหรับสารละลายป้อนคือ ถังพักถังแรกจะมีท่อต่อให้สารละลายป้อนไหลเข้าเส้นใยกลางซึ่งบรรจุอยู่ในหอสกัดแรก จากนั้นก็จะมีท่อต่อระหว่างหอสกัดแรกและหอสกัดที่ 2 สารละลายป้อนเมื่อไหลผ่านหอที่ 2 แล้วจะไหลลงไปสู่ถังพักที่ 2 ในทำนองเดียวกันในส่วนที่เป็นสารละลายน้ำกลับก็จะประกอบด้วย 2 ถังพัก สารละลายน้ำกลับในถังพักแรกจะไหลเข้าสู่หอสกัดที่ 2 (สวนทางกับสารละลายป้อน) จากนั้นเมื่อไหลออกจากหอสกัดที่ 2 ผ่านท่อซึ่งต่อเชื่อมกับหอสกัดที่ 1 และผ่านตลอดจนกระทั่งไหลออกจากหอสกัดที่ 1 (ไหลสวนทางกับสารละลายป้อน) ไปสู่ถังพักที่ 2

6.3.1 การกำหนดพิกัด

ในการอธิบายจังหวะการไหลของทั้งสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับพร้อมทั้งรายละเอียดการเข้าสู่สมดุลของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับเราจะใช้แผนผังที่แสดงในรูปที่ 6.12 กำหนดเลขที่ห้อยและที่แขวนรวมทั้งตัวอักษร F (feed) และ S (strip) มีความหมายดังต่อไปนี้

ความหมายของตัวอักษรและเลขที่แขวนหมายถึงรอบการทำงาน เช่น

F	หมายถึง	ป้อน
S	หมายถึง	นำกลับ
H	หมายถึง	ครึ่งรอบที่สองของการทำงานในแต่ละรอบ
y_F^1	หมายถึง	สารละลายป้อน (y_F) ในรอบการทำงานที่ 1
x_{S12}^1	หมายถึง	สารละลายนำกลับที่อยู่ในเยื่อแผ่นเหลว (x_S) สำหรับ หอสกัด 1 (x_{S1}^1) ในรอบการทำงานครึ่งรอบหลัง ของรอบการทำงานที่ 1 (x_{S12}^1)



รูปที่ 6.12 แผนผังขั้นตอนการสกัดไอออนโลหะด้วยกระบวนการเยื่อแผ่นเหลว
ที่พุงด้วยเส้นใยกลวงระบบสองหอสกัดเมื่อทำงานครบ 1 รอบ

จากรูปที่ 6.12 กำหนดให้ค่า “ k_F ” ของห่อที่ 1 เท่ากับห่อที่ 2 ($k_{F1} = k_{F2}$) และในทำนองเดียวกัน “ k_S ” ของห่อที่ 1 ก็มีค่าเท่ากับค่า “ k_S ” ของห่อที่ 2 ($k_{S1} = k_{S2}$) ด้วยเหตุผลที่ว่าสารสกัด

ที่ใช้ในหอที่ 1 และหอที่ 2 เป็นสารสกัดชนิดเดียวกัน จากนั้นสามารถอธิบายผังของการทำงานได้ว่า สารละลายป้อนในรอบการทำงานที่ 1 (y'_{F1}) จะเข้าไปสู่หอสกัดที่ 1 และจะไปสัมผัสกับสารละลาย น้ำกลับในเยื่อแผ่นเหลวของหอที่ 1 ในครั้งแรกของการทำงาน ณ จุดเริ่มต้น (x'_{S10}) เกิดการ สมดุลใหม่ที่พิกัด (y'_{F11}, x'_{F11})

สารละลายป้อนในหอที่ 1 ในครั้งแรกของการทำงานรอบที่ 1 (y'_{F11}) จะถูกบังคับให้ ไหลอย่างต่อเนื่องไปสู่หอสกัดที่ 2 และไปสัมผัสกับสารละลายน้ำกลับในเยื่อแผ่นเหลวของหอที่ 2 ในครั้งแรกของการทำงาน (x'_{S20}) จากนั้นจะเข้าสู่สมดุลที่พิกัด (y'_{F21}, x'_{F21}) โดยที่สารละลาย ป้อนในหอสกัดที่ 2 ของครั้งแรกในการทำงานรอบที่ 1 จะไหลไปสู่ถังพัก

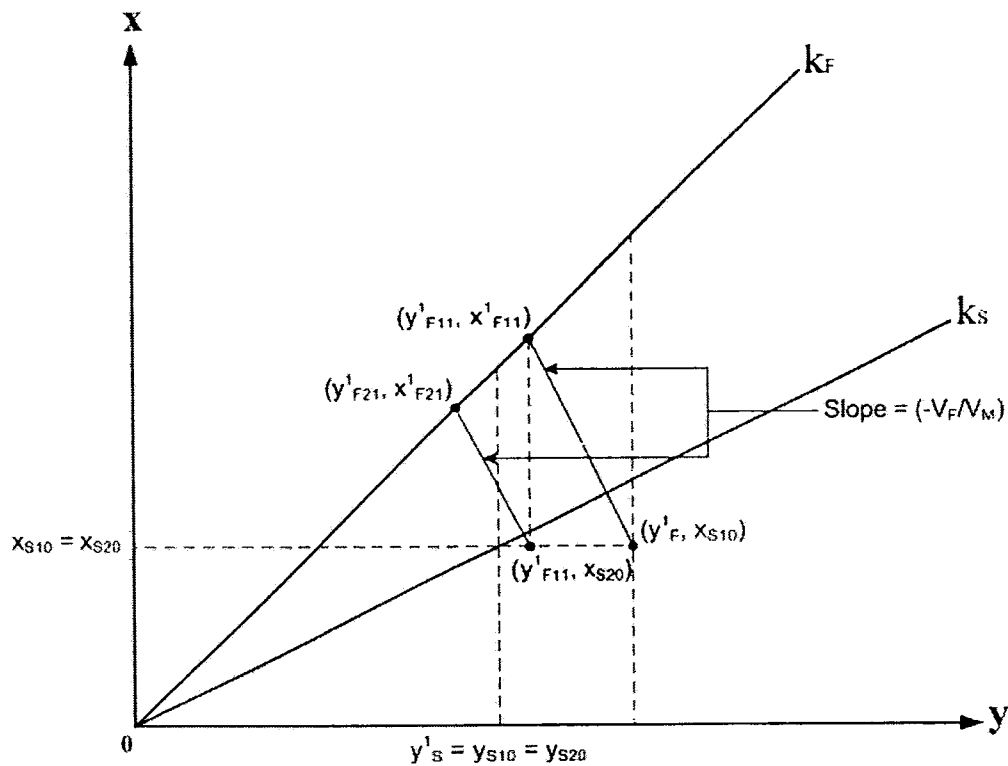
พร้อมกันกับที่สารละลายป้อนไหลจากหอที่ 1 สู่อหอที่ 2 และสู่ถังพัก ในขณะเดียวกัน สารละลายน้ำกลับจากถังพักจะไหลสวนทิศทางจากหอสกัดที่ 2 สู่อหอสกัดที่ 1 และไปสู่ถังพักใน ที่สุด ซึ่งสามารถอธิบายในรูปของพิกัดตามผังการทำงานได้ว่าพิกัดชั่วคราว (y'_{S1}, x'_{F21}) จะเข้าสู่ภาวะ สมดุลที่พิกัด (y'_{S21}, x'_{S21}) ในทำนองเดียวกันพิกัดชั่วคราวของหอสกัดที่ 1 (y'_{S21}, x'_{F11}) ก็จะเข้าสู่ สมดุลที่พิกัด (y'_{S11}, x'_{S11}) โดยที่สารละลายน้ำกลับจากหอที่ 1 ในครั้งแรกของการทำงานรอบที่ 1 (y'_{S11}) จะไหลไปสู่ถังพัก ณ ตำแหน่งนี้ถือว่าการทำงานครบครั้งแรกของรอบการทำงานที่ 1

ในครั้งแรกหลังของการทำงานในรอบที่ 1 สารละลายป้อนจะไหลสู่อหอสกัดที่ 1 ผ่านไปยัง หอสกัดที่ 2 และไปสู่ถังพักของสารละลายป้อนพร้อมๆ กันนั้นสารละลายน้ำกลับจากถังพักจะไหล ย้อนทิศทางกับสารละลายป้อนเข้าสู่หอสกัดที่ 2 สู่อหอสกัดที่ 1 และไปสู่ถังพักสารละลายป้อน ในที่สุด จะเขียนอธิบายในรูปพิกัดชั่วคราวและพิกัดใหม่ได้ดังนี้ พิกัดชั่วคราว (y'_{F11}, x'_{S11}) เกิดเป็น พิกัดใหม่ที่ (y'_{F12}, x'_{F12}) พร้อมกับพิกัดชั่วคราว (y'_{F12}, x'_{S21}) ไปสู่สมดุลที่ (y'_{F22}, x'_{F22}) ในทำนอง เดียวกันทางด้านสารละลายป้อนพิกัดชั่วคราว (y'_{S11}, x'_{F22}) เข้าสู่สมดุลที่พิกัดใหม่ (y'_{S22}, x'_{S22}) และจากพิกัดชั่วคราว (y'_{S22}, x'_{F12}) ไปสู่พิกัดใหม่ที่ (y'_{S12}, x'_{S12}) ณ ตำแหน่งนี้ถือว่าการทำงาน เสร็จสมบูรณ์ครบ 1 รอบ

ในคอลัมน์ขวาสุดของรูปที่ 6.12 เป็นการแสดงการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของสารละลายป้อน และสารละลายน้ำกลับในแต่ละครั้งแรกของการทำงานและครั้งแรกหลังของการทำงาน

6.3.2 การลากเส้นกราฟ

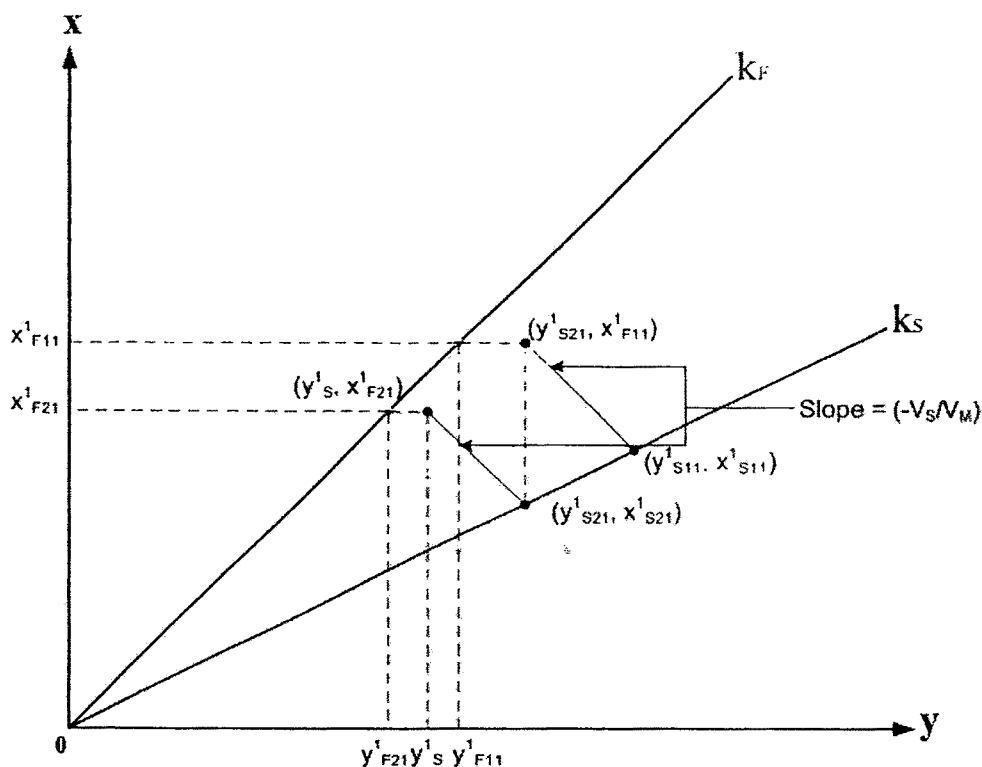
การลากเส้นกราฟสำหรับระบบกะผ่านสองหอสกัด (2 มอดูล) ก็เช่นเดียวกันกับการสกัด ด้วยระบบกะแบบ 1 มอดูล (1 หอ) กล่าวคือกำหนดให้ความเข้มข้นของไอออนโลหะในวัฏภาค สารละลาย (ป้อน, น้ำกลับ) อยู่ในแนวแกนนอนและความเข้มข้นของไอออนโลหะในวัฏภาค สารละลายเยื่อแผ่นเหลวอยู่ในแนวแกนตั้งดังรูปที่ 6.13



รูปที่ 6.13 การลากเส้นปฏิบัติการจากการกำหนดพิกัดสำหรับการทำงานผ่านระบบกะ
ของ 2 หอสกัด สำหรับสารละลายป้อนในครั้งแรกของการทำงานรอบที่ 1

กำหนดให้ “ y'_S ” เท่ากับ “ y_{S10} ” และเท่ากับ “ y_{S20} ” เมื่อลากเส้น ณ จุด “ y'_F ” ในแนวตั้งขึ้นไปตัดกับเส้นที่มาจากจุด “ x_{S10} ” ณ พิกัด (y'_F, x_{S10}) จากนั้นลากเส้นตรงซึ่งมีความชัน $(-V_F/V_M)$ ไปสัมผัสกับเส้นสมมูล “ k_F ” ณ พิกัด (y'_{F11}, x'_{F11}) และจากพิกัดนี้ (เป็นความเข้มข้นในหอสกัด 1) สามารถกำหนดพิกัดชั่วคราวคือ (y'_{F11}, x_{S20}) ซึ่งสามารถลากเส้นตรงด้วยความชัน $(-V_F/V_M)$ ไปสัมผัสกับเส้นสมมูล “ k_F ” ณ พิกัด (y'_{F21}, x'_{F21}) ได้ (เป็นความเข้มข้นในหอสกัด 2) ถือว่าการทำงานครั้งแรกของรอบการทำงานที่ 1 ดังรายละเอียดที่แสดงไว้ในรูปที่ 6.13

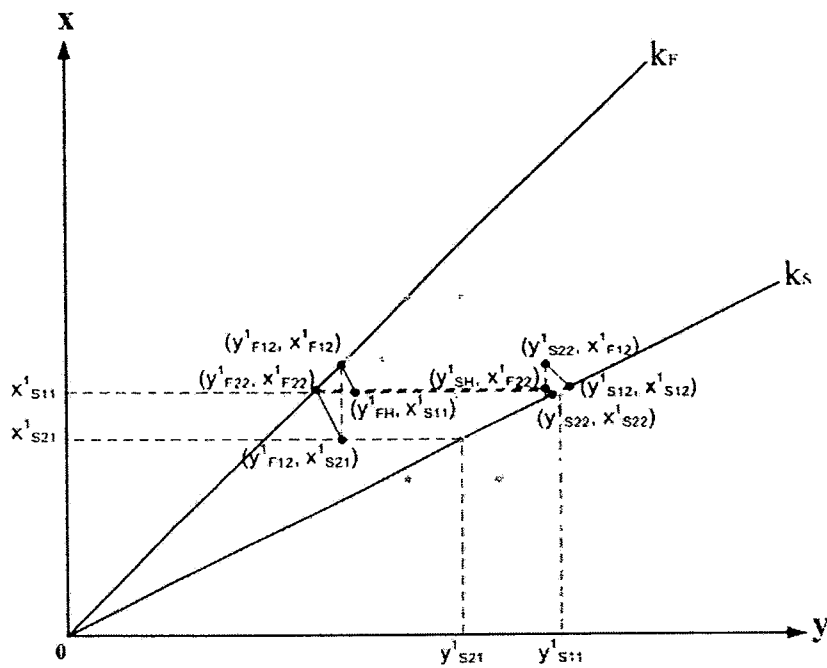
ในการลากเส้นกราฟของการทำงานครั้งหลังของรอบการทำงานที่ 1 สามารถดูรายละเอียดได้จากรูปที่ 6.14



รูปที่ 6.14 การลากเส้นปฏิบัติการจากการกำหนดพิกัดสำหรับการทำงานผ่านระบบกะของ 2 หอสกัด สำหรับสารละลายนำกลับในครั้งแรกของการทำงานรอบที่ 1

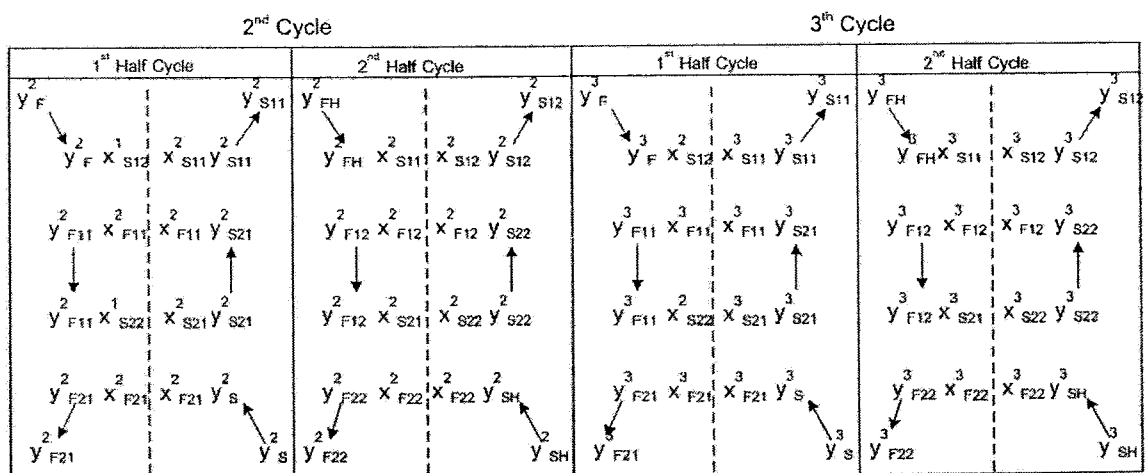
ในส่วนของสารละลายนำกลับซึ่งไหลสวนทิศทางจากพิกัด (y'_{S21}, x'_{F21}) สามารถลากเส้นตรงซึ่งมีค่าความชัน $(-V_S/V_M)$ ไปสัมผัสกับเส้นสมมูล “ k_S ” ณ พิกัดใหม่คือ (y'_{S21}, x'_{S21}) ซึ่งเป็นค่าความเข้มข้นของสารละลายนำกลับในหอสกัดที่ 2 และจากพิกัดนี้เองสามารถกำหนดพิกัดชั่วคราวคือ (y'_{S21}, x'_{F11}) ได้ในทำนองเดียวกัน จากพิกัดดังกล่าวสามารถลากเส้นตรงด้วยค่าความชัน $(-V_S/V_M)$ ไปสัมผัสกับเส้นสมมูล “ k_S ” ณ พิกัด (y'_{S11}, x'_{S11}) ซึ่งเป็นค่าความเข้มข้นของสารละลายนำกลับในหอสกัด 1 เมื่อจบขั้นตอนนี้กราฟที่ได้ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 6.14 กล่าวได้ว่าเป็นการทำงานครบครั้งแรกของรอบการทำงานที่ 1

ในทำนองเดียวกันการทำงานในครั้งรอบหลังก็สามารถลากเส้นและกำหนดค่าพิกัดต่างๆ ดังแสดงรายละเอียดไว้ในรูปที่ 6.15



รูปที่ 6.15 การกำหนดพิกัดและการลากเส้นสมมูลเพื่อแสดงความเข้มข้นของสารละลายป้อน และสารละลายนำกลับในหอสกัดที่ 1 และที่ 2 เมื่อทำงานครบ 1 รอบ

ในการทำงานรอบที่ 2 รอบที่ 3 และรอบต่อไป สามารถเขียนผังของการป้อนสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับได้ดังรายละเอียดที่แสดงไว้ในรูปที่ 6.16

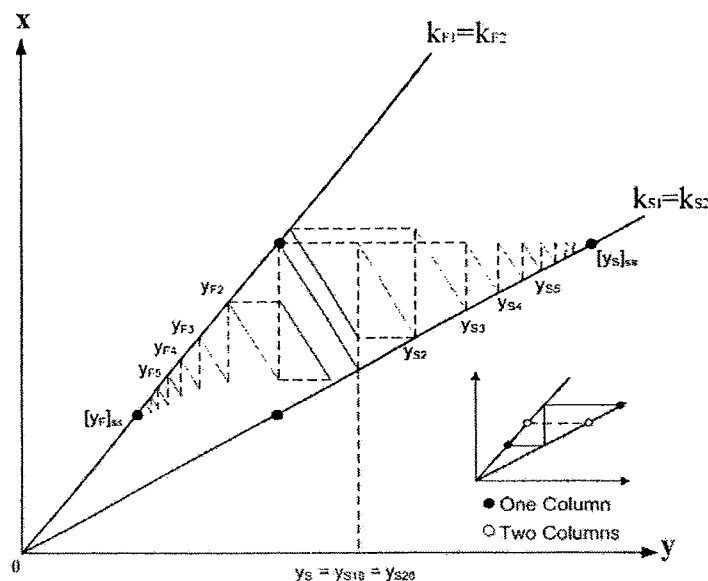


y_{Fij}^k, x_{Sij}^k : F = Feed solution phase, S = Stripping solution phase, k = number of cycle, i = number of column, j = number of half cycle

รูปที่ 6.16 แผนผังขั้นตอนการสกัดไอออนโลหะด้วยกระบวนการเชื่อมแผ่นเหลวที่พุง ด้วยเส้นใยกลางระบบสองหอสกัดเมื่อทำงานในรอบที่ 2 และรอบที่ 3

จากรูปที่ 6.16 พิกัดต่างๆจะสามารถกำหนดได้และสามารถลากเส้นกราฟเพื่อกำหนดค่าความเข้มข้นของไอออนโลหะในตำแหน่งต่างๆ การลากเส้นก็เป็นไปในทำนองเดียวกันกับที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 6.3.1 และหัวข้อ 6.3.2

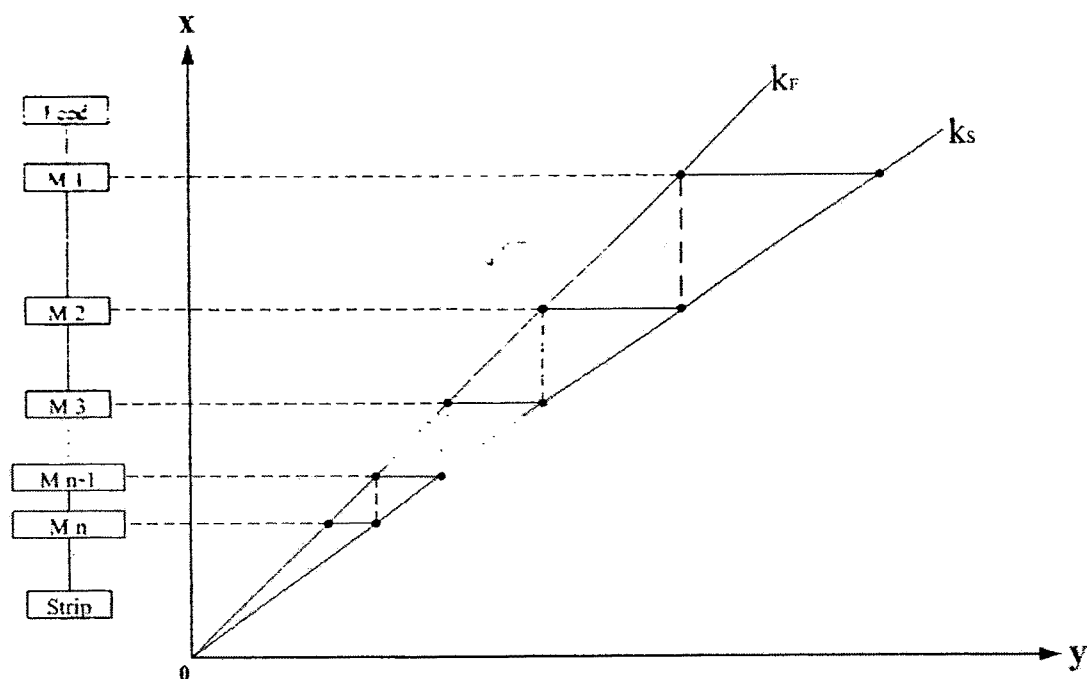
หากการลากเส้นจากพิกัดต่างๆ ตามที่แสดงไว้ในผังของรูปที่ 6.12 และรูปที่ 6.16 แทนการทำงานแต่ละรอบของการป้อนและการนำกลับและเมื่อการทำงานนี้เข้าสู่สภาวะคงตัว (Steady State) กราฟที่ได้จะแสดงเป็นขั้นบันไดซึ่งแต่ละขั้นก็หมายถึง 1 หอสกัด ดังรายละเอียดในรูปที่ 6.17



รูปที่ 6.17 เมื่อการทำงานแบบกะของการสกัดด้วยระบบ 2 หอ เข้าสู่สภาวะคงตัวเส้นกราฟจะแสดงผลอย่างชัดเจนให้เห็นเป็นขั้นบันได 2 ชั้น

6.4 กราฟทำนายผลการสกัดไอออนโลหะแบบกะด้วยกระบวนการสกัดด้วยเยื่อแผ่นเหลวที่พวยด้วยเส้นใยกลวงสำหรับระบบ “n” หอ

การสกัดด้วยระบบกะผ่านจำนวนหลายหอสกัด (n หอสกัด) ซึ่งแต่ละหอสกัดในวัฏภาคของเยื่อแผ่นเหลวเป็นสารสกัดชนิดเดียวกันตลอดทั้งระบบดังนั้นถ้าค่าความชันของเส้นสมมูล “ k_F ” มีค่าเท่ากันตลอด ($k_{F1} = k_{F2} = k_{F3} = \dots = k_{Fn}$) เช่นเดียวกับค่า “ k_S ” ซึ่งต่างก็มีค่าเท่ากัน ($k_{S1} = k_{S2} = k_{S3} = \dots = k_{Sn}$) การสร้างผังก็เป็นไปในทำนองเดียวกันกับที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 6.7 และรูปที่ 6.12 ดังนั้นการลากเส้นกราฟก็สามารถทำได้เช่นเดียวกันกับที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 6.2 และหัวข้อ 6.3 ซึ่งแสดงรายละเอียดของการลากเส้นกราฟไว้ในรูปที่ 6.18



รูปที่ 6.18 การแสดงผลการสักระบบกะด้วยเส้นกราฟผ่านระบบเยื่อแผ่นเหลว
ที่พยุ่งด้วยเส้นใยกลวง “n” หอ

6.5 การสักระบบกะผ่านกระบวนการเยื่อแผ่นเหลวที่พยุ่งด้วยเส้นใยกลวง โดยการทำงานแบบเสริมฤทธิ์ (Synergistic)

ในการสักระบบกะผ่านกระบวนการสักระบบเสริมฤทธิ์นั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น
2 วิธีด้วยกันคือ

6.5.1 การสักระบบเสริมฤทธิ์ชนิดที่มีสารสักระบบมากกว่า 1 ชนิดผสมกัน

ในการทำงานโดยใช้สารสักระบบมากกว่า 1 ชนิดผสมกันนี้ค่า “ k_F ” และค่า “ k_S ” ต่างก็มีค่า
เพียงค่าเดียวซึ่งแสดงถึงผลรวมของค่า “ k_F ” และค่า “ k_S ” ของสารสักระบบแต่ละชนิด ดังนั้นจำนวนหอ
สักระบบที่นำมาใช้ในระบบจะเริ่มต้นตั้งแต่ 1 หอสักระบบขึ้นไปจนถึง “n” หอสักระบบ การลากเส้นกราฟ
เพื่อทำนายผลการสักระบบจึงเป็นไปได้เช่นเดียวกันกับที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 6.2 หัวข้อ 6.3 และ
หัวข้อ 6.4

6.5.2 การสักรัดแบบเสริมฤทธิ์ชนิดที่มีสารสักรัดมากกว่า 1 ชนิดแยกกัน

ในระบบนี้สารสักรัดที่นำมาใช้จะไม่ผสมรวมกัน ดังนั้นจำนวนหอสักรัดก็จะขึ้นอยู่กับจำนวนสารสักรัดที่นำมาใช้กล่าวคือ

(ก) สารสักรัด 2 ชนิดจำนวนหอสักรัดขั้นต่ำที่นำมาใช้จะเป็น 2 หอ 4 หอ 6 หอ หรือจำนวนทวีคูณของจำนวนชนิดของสารสักรัด

(ข) สารสักรัด 3 ชนิดจำนวนหอสักรัดขั้นต่ำที่นำมาใช้จะเป็น 3 หอ 6 หอ 9 หอ หรือจำนวนทวีคูณของจำนวนชนิดของสารสักรัด

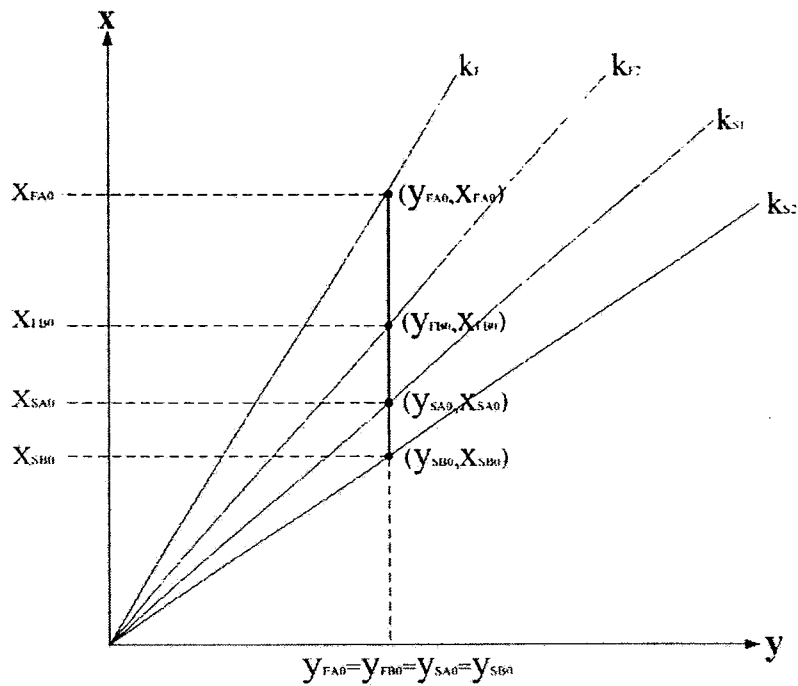
(ค) สารสักรัด n ชนิดจำนวนหอสักรัดขั้นต่ำที่นำมาใช้จะเป็น n หอ $2n$ หอ หรือจำนวนทวีคูณของจำนวนชนิดของสารสักรัด

ในการสักรัดแบบเสริมฤทธิ์ชนิดนี้การลากเส้นกราฟก็ยังคงเป็นไปในทำนองเดียวกันกับที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 6.2 หัวข้อ 6.3 และหัวข้อ 6.4 สิ่งที่แตกต่างกันก็คือจำนวนเส้นสมดุที่เพิ่มขึ้นเท่ากับจำนวนชนิดของสารสักรัด

6.5.3 การกำหนดพิกัดสำหรับการสักรัดด้วยระบบเสริมฤทธิ์ด้วยสารสักรัด 2 ชนิด

และใช้ 2 หอสักรัด

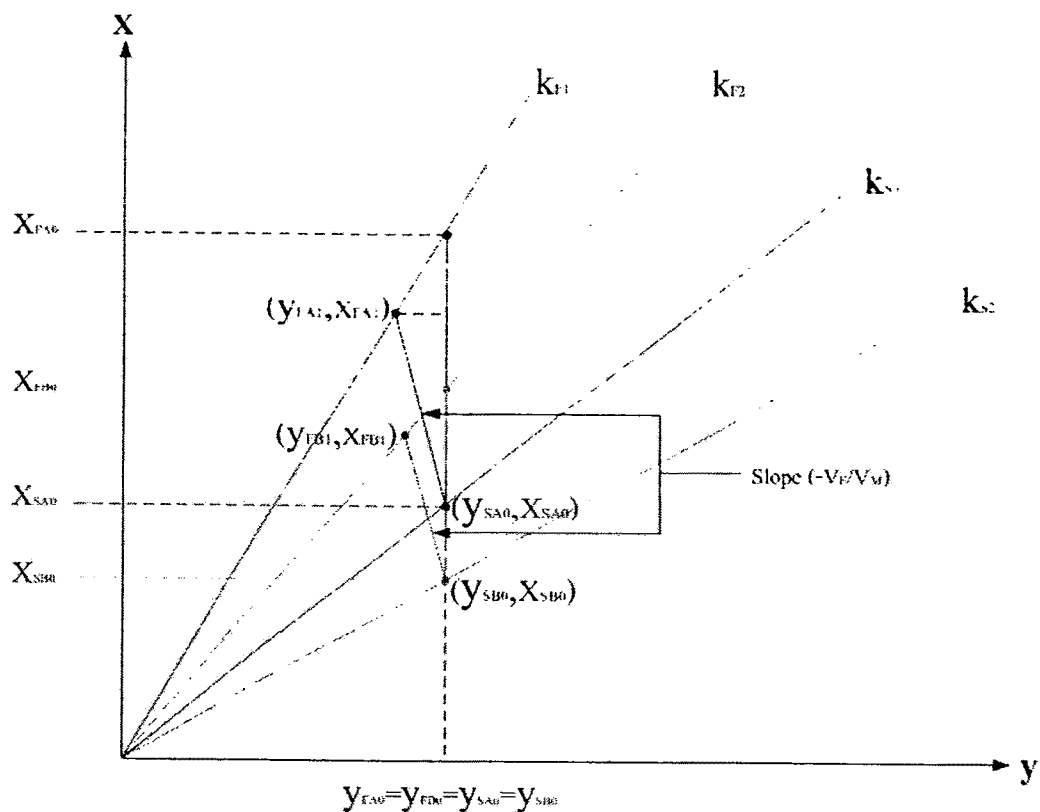
การสร้างผังสามารถเขียนรายละเอียดได้ดังรูปที่ 6.12 และ 6.16 สิ่งที่ต้องระมัดระวังก็คือเส้นสมดุที่เกิดขึ้นจะมีจำนวนทั้งสิ้น 4 เส้น ค่าความชันจะแบ่งได้เป็นคู่ๆดังนี้ “ k_{F1} ” และ “ k_{F2} ” กับค่า “ k_{S1} ” และ “ k_{S2} ” การลากเส้นเชื่อมระหว่างพิกัดชั่วคราวกับพิกัดใหม่เมื่อต่างก็เข้าสู่สมดุ



รูปที่ 6.19 การกำหนดพิกัดเริ่มต้นของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับ
ในการทำงานแบบเสริมฤทธิ์

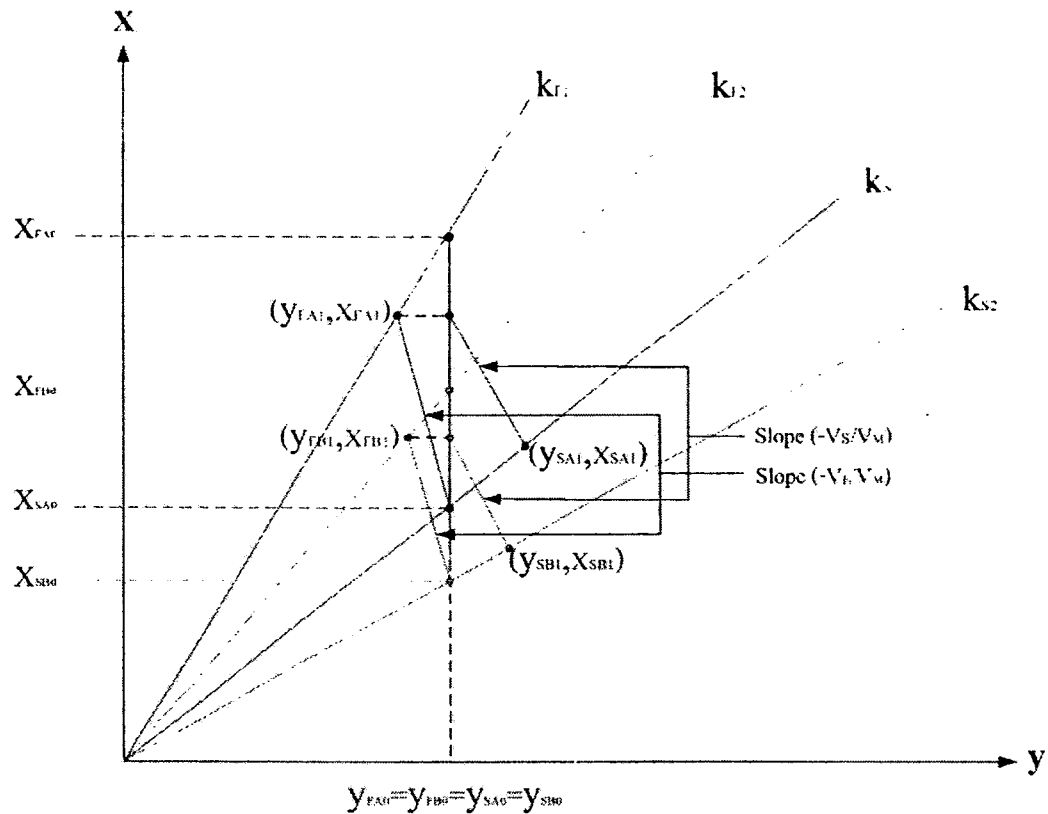
ซึ่งเป็นไปในทำนองเดียวกันกับที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 6.3.1 และหัวข้อ 6.3.2 จากรูปที่ 6.19 จะกำหนดค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายป้อนให้มีค่าเท่ากับสารละลายนำกลับ ดังนั้นรายละเอียดที่แสดงเอาไว้ในรูปที่ 6.19 จึงสามารถอ่านค่าความเข้มข้นของไอออนโลหะ ณ จุดเริ่มต้นในวัฏภาคสารละลายเยื่อแผ่นเหลวได้

เมื่อป้อนสารละลายป้อนเข้าสู่หอสกัดที่ 1 ซึ่งมีค่าความชันเป็น “ k_{F1} ” และ “ k_{S1} ” จากนั้นสารละลายที่มีอยู่เดิมในหอสกัดที่ 1 จะถูกผลักไปสู่หอสกัดที่ 2 ซึ่งมีค่าความชันเป็น “ k_{F2} ” และ “ k_{S2} ” การกำหนดพิกัดและการลากเส้นจากพิกัดชั่วคราวไปสู่พิกัดซึ่งเป็นสมดุลใหม่โดยมีค่าความชันเป็น “ $(-V_F/V_M)$ ” ดังแสดงไว้ในรูปที่ 6.20



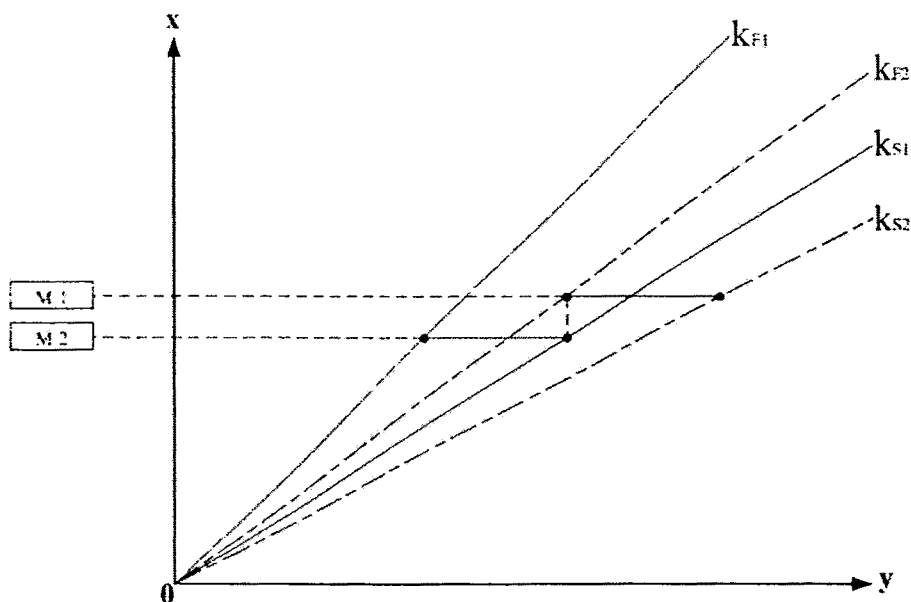
รูปที่ 6.20 การลากเส้นเชื่อมโยงพิกัดต่างๆ ไปยังเส้นสมมูลเมื่อการทำงานโดยสารละลายป้อนผ่านจากหอสกัด 1 ไปสู่หอสกัด 2 ในระบบการสกัดแบบเสริมฤทธิ์

จากรูปที่ 6.20 จะเห็นได้ว่าเมื่อสารละลายป้อนไหลผ่านจากหอที่ 1 ไปสู่หอที่ 2 แล้วค่าความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายป้อนของแต่ละหอสามารถอ่านค่าได้พร้อมกันนั้น พิกัดที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 6.20 ก็พร้อมที่จะรองรับพิกัดใหม่เมื่อมีการป้อนสารละลายนำกลับสวนทิศทางกับสารละลายป้อนและจากจุดนี้เองพิกัดที่เกิดขึ้นใหม่สามารถเชื่อมโยงให้เห็นถึงค่าความเข้มข้นของไอออนโลหะในสารละลายนำกลับซึ่งได้แสดงรายละเอียดไว้ในรูปที่ 6.21



รูปที่ 6.21 การลากเส้นเชื่อมโยงพิกัดเมื่อการทำงานแบบเสริมฤทธิ์ในครั้งแรกของการทำงานรอบที่ 1

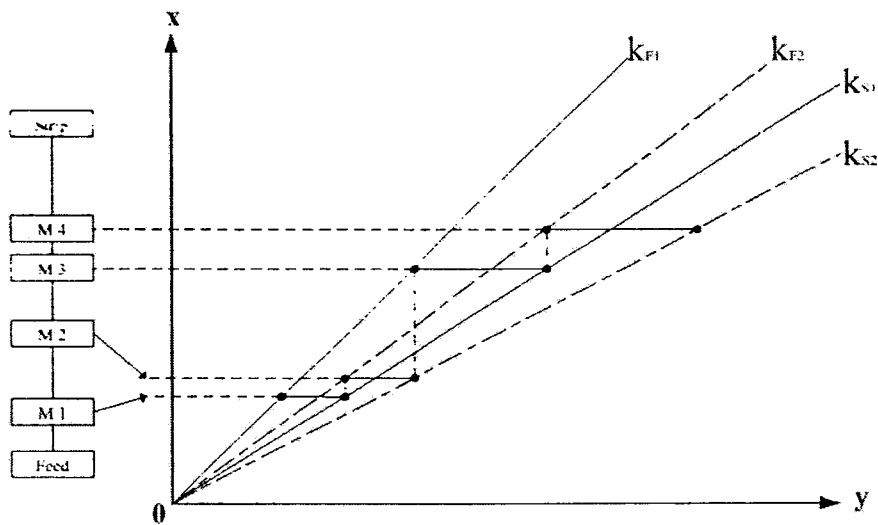
ในทำนองเดียวกันกับที่ได้อธิบายไว้ก่อนหน้านี้ หากการทำงานผ่านไปหลายๆ รอบจนเข้าสู่ภาวะคงตัว (steady state) การลากเส้นที่ลากซ้อนกันไปมา จนท้ายที่สุดจะรวมตัวกันเป็นกระจุก เช่นเดียวกับที่แสดงไว้ในรูปที่ 6.17 แต่เพื่อเป็นการคัดทอนรายละเอียดข้อปลีกย่อย และเพื่อแสดงให้เห็นภาพโดยรวมได้ชัดเจน จึงแสดงผลสรุปของการลากเส้นไว้ในรูปที่ 6.22



รูปที่ 6.22 การลากเส้นผลสรุปเมื่อการทำงานของระบบเชื่อมต่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลาง
ผ่านไปหลายรอบจนเข้าสู่ภาวะคงตัวสำหรับหอสกัดจำนวน 2 หอสกัด

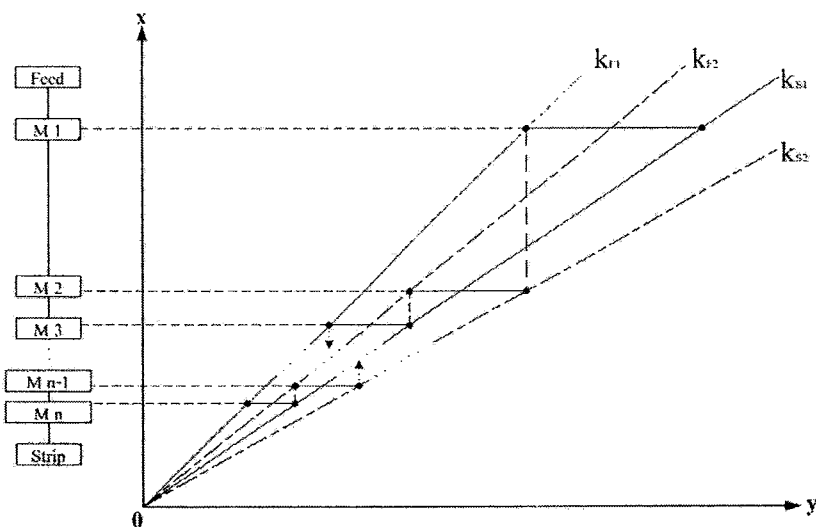
ในกรณีที่จำนวนหอสกัดเพิ่มขึ้นจากเดิม 2 หอสกัด เป็น 4 หอสกัด ขั้นตอนการลากเส้นกราฟก็ยังคงอาศัยหลักการเดิมๆ ดังที่ได้อธิบายผ่านมา แต่เมื่อการทำงานผ่านไป หลายๆ รอบจนเข้าสู่ภาวะคงตัวการลากเส้นกราฟก็จะแสดงให้เห็นเป็นขั้นบันได โดยมีจำนวนขั้น เป็น 4 ซึ่งเท่ากับจำนวนหอสกัดที่ประกอบเป็นอุปกรณ์สำหรับระบบการแยกด้วยเชื่อมต่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลางแบบเสริมฤทธิ์ ดังรายละเอียดที่แสดงไว้ในรูปที่ 6.23

ในกรณีที่ระบบการสกัดไอออนโลหะผ่านเชื่อมต่อแผ่นเหลวที่พุงด้วยเส้นใยกลางในรูปแบบการใช้สารสกัดชนิดเสริมฤทธิ์ (2 ชนิดโดยไม่ผสมปนกัน) และใช้จำนวนหอสกัดทั้งสิ้น จำนวน “ n ” หอดด้วยกัน ในหอสกัดที่ใช้สัญลักษณ์ “ n ” นี้ ถ้าจำนวน “ n ” เป็นเลขคู่ จำนวนหอสกัดที่บรรจุด้วยสารสกัดชนิดที่หนึ่ง ก็จะเท่ากับจำนวนหอสกัดที่บรรจุด้วยสารสกัดชนิดที่สอง



รูปที่ 6.23 การลากเส้นผลสรุปเมื่อการทำงานของระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงผ่านไประอบจนเข้าสู่ภาวะคงตัวสำหรับหอสกัดจำนวน 4 หอสกัด

แต่หากว่า จำนวน “ n ” ที่ใช้เป็นเลขชี้ จำนวนหอสกัดที่บรรจุด้วยสารสกัดชนิดที่หนึ่ง ก็จะมีจำนวนที่มากกว่า จำนวนหอสกัดที่บรรจุด้วยสารสกัดชนิดที่สองไป 1 หอสกัด รูปที่ 6.24 แสดงผลการลากเส้นเป็นขั้นบันไดเพื่อหาค่าการสกัด เมื่อการทำงานผ่านไประอบจนเข้าสู่ภาวะคงตัว ซึ่งบันไดแต่ละขั้นก็หมายถึง หอสกัด 1 หอ



รูปที่ 6.24 การลากเส้นผลสรุปเพื่อหาค่าการสกัดไอออนโลหะเมื่อการทำงานของระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงผ่านไประอบจนเข้าสู่ภาวะคงตัวสำหรับหอสกัดจำนวน “ n ” หอสกัด

แม้ว่าวิธีการของกราฟทำนายผลของการสกัดที่นำเสนอจะอาศัยหลักการเบื้องต้นตามวิธีของ McCabe-Thiele แต่มีความแตกต่างที่เห็นได้อย่างชัดเจนดังนี้

1. ระบบที่ใช้ในวิธีการของ McCabe-Thiele มีเพียง 2 ภูมิภาค คือ ภูมิภาคที่เป็นของเหลว และภูมิภาคที่เป็นไอซึ่งไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน แต่ในระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงนี้ ประกอบด้วย 3 ภูมิภาค ซึ่งไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกัน คือ ภูมิภาคสารละลายป้อน ภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลว และภูมิภาคสารละลายนำกลับ
2. จำนวนเส้นสมดุล (equilibrium line) ที่ใช้ในระบบมีอย่างน้อย 2 เส้น (จะใช้นามากกว่า 2 เส้น ในกรณีที่การทำงานเป็นการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ ดูรายละเอียดในบทที่ 5) ขณะที่วิธีการของ McCabe-Thiele มีเส้นสมดุลที่ใช้ในระบบเพียง 1 เส้น เท่านั้น
3. เส้นสมดุลที่ใช้จะเป็นเส้นตรง (linear) เท่านั้น เพราะการสกัดแยกไอออนโลหะ ผ่านระบบเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวง มีประสิทธิภาพการทำงานสูงสุดเมื่อสกัดไอออนโลหะที่มีความเข้มข้นต่ำระดับ ppm ถึงต่ำมากระดับ ppb หรือ ppt ขณะที่เส้นสมดุลของ McCabe-Thiele ที่ใช้ เป็นเส้นโค้ง ซึ่งเรียกว่า เส้นโค้งสมดุล (equilibrium curve)
4. ทุกจุดสัมผัสบนเส้นสมดุล หมายถึง ค่าการสกัดชั่วคราว (transient value) และสุดท้ายจึงเป็นค่าการสกัดที่คงตัว (steady state value) ขณะที่วิธีการของ McCabe-Thiele ให้เพียงค่าการสกัดที่คงตัว
5. วิธีการนับจำนวนชั้นหรือจำนวนคอลัมน์ของระบบการสกัดผ่านระบบเยื่อแผ่นเหลว ที่พองด้วยเส้นใยกลวงจากการลากเส้นกราฟ แตกต่างจากระบบการกลั่นด้วยวิธีการของ McCabe-Thiele โดยสิ้นเชิง

6.6 การคำนวณโดยอาศัย MATLAB สำหรับการสกัดไอออนโลหะ

ในกรณีที่ต้องลากเส้นกราฟไปหลายๆ รอบวัฏจักรของการทำงานของระบบ โดยเฉพาะในระบบที่ต้องใช้หอสกัดจำนวน “n” หอ การเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยอิงกับโปรแกรม MATLAB ก็จะทำให้สะดวกและง่ายต่อการคำนวณยิ่งๆ ขึ้น ทั้งนี้จากสมการที่ (6.1) และ (6.2) จะสามารถเขียนสมการในรูปของ Matrix ซึ่งเหมาะสมอย่างยิ่งต่อการแก้ปัญหาด้วยโปรแกรม MATLAB

ตัวอย่างกรณีศึกษาที่ 6.1: การสร้างโปรแกรมสำหรับระบบหอสกัด 1 หอ

ขั้นที่ 1 การเขียนคำสั่งเพื่อใช้ใน โปรแกรม MATLAB โดยกำหนดค่าของฟังก์ชันต่างๆ รวมทั้งสมการที่จะต้องใช้ในการคำนวณ ซึ่งสามารถเขียนได้ดังนี้

กำหนดให้อักษรและสัญลักษณ์ต่างๆ ที่ใช้ในโปรแกรมมีความหมายดังต่อไปนี้

Y_f	คือ ความเข้มข้นของไอออนโลหะในวิทยาศาสตร์ละลายป้อน
X_f	คือ ความเข้มข้นของไอออนโลหะในวิทยาศาสตร์เชื่อมแผ่นเหลวบริเวณพื้นที่ผิวสัมผัสกับวิทยาศาสตร์ละลายป้อน
Y_s	คือ ความเข้มข้นของไอออนโลหะในวิทยาศาสตร์ละลายนำกลับ
X_s	คือ ความเข้มข้นของไอออนโลหะในวิทยาศาสตร์เชื่อมแผ่นเหลวบริเวณพื้นที่ผิวสัมผัสกับวิทยาศาสตร์ละลายนำกลับ
k_f	คือ ค่าคงที่สมดุลในการถ่ายโอนมวล
k_s	คือ ค่าคงที่สมดุลในการถ่ายโอนมวล
V_f, V_s	คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารละลายป้อนและสารละลายนำกลับตามลำดับ
V_{in}, V_{st}, V_m	คือ ปริมาตรสุทธิในกระบวนการของสารละลายป้อน สารละลายนำกลับ และสารสกัดตามลำดับ

การเขียนโปรแกรมเริ่มด้วย

```
function F = membrane(x, y, k, V)
% x(1) : Xf(i,j)
% x(2) : Yf(i,j)
% x(3) : Xs(i,j)
% x(4) : Ys(i,j)

% y(1) : Yf(i-1, j-1)
% y(2) : Xf(i, j-1)
% y(3) : Ys(i-1, j-1)
% y(4) : Xs(i, j-1)

F(1) = x(1) + (V(1)/V(3))*x(2) - (V(1)/V(3))*y(1) - y(2);
F(2) = x(1) - k(1)*x(2);
F(3) = x(3) + (V(2)/V(3))*x(4) - (V(2)/V(3))*y(3) - y(4);
F(4) = x(3) - k(2)*x(4);

end
```

ขั้นที่ 2 การกำหนดค่าคงที่ต่างๆ ซึ่งประกอบไปด้วยค่าความเข้มข้นของไอออนโลหะในวัฏภาคสารละลายป้อน วัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว และวัฏภาคสารละลายนำกลับ ณ จุดเริ่มต้น

```
% x(1) : Xf(i,j)
```

```
% x(2) : Yf(i,j)
```

```
% x(3) : Xs(i,j)
```

```
% x(4) : Ys(i,j)
```

```
% y(1) : Yf(i-1, j-1)
```

```
% y(2) : Xf(i, j-1)
```

```
% y(3) : Ys(i-1, j-1)
```

```
% y(4) : Xs(i, j-1)
```

กำหนดค่าจำนวนรอบวัฏจักรของการทำงาน

```
n = 2000;
```

```
% parameters
```

กำหนดค่าคงที่สมดุล (equilibrium constant) ค่าปริมาตรของสารละลายป้อน เยื่อแผ่นเหลว และสารละลายนำกลับ

```
k(1) = 2;
```

```
k(2) = 0.8;
```

```
VfT = 100;
```

```
VsT = 100;
```

```
V(1) = 30; %Vf %cc
```

```
V(2) = 30; %Vs %cc
```

```
V(3) = 1; %Vm %cc
```

```
ys = 10;
```

```
yf = 10;
```

```
y(1) = yf;
```

```
y(2) = k(1)*y(1);
```

```
y(3) = ys;
```

```
y(4) = k(2)*y(3);
```

```
[x F] = fsolve(@(x) membrane(x,y,k,V), [0 0 0 0]);
```

```
yf = ((VfT - V(1))*yf + V(1)*x(2))/VfT;
```

```
ys = ((VsT - V(2))*ys + V(2)*x(4))/VsT
```

```

Xf = -(V(1)/V(3))*x(2) + (V(1)/V(3))*y(1) + x(3);
Yf = yf;
Xs = -(V(2)/V(3))*x(4) + (V(2)/V(3))*y(3) + x(1);
Ys = ys;

[Xf Yf Xs Ys]

for i = 2:n
y(1) = Yf;
y(2) = Xf;
y(3) = Ys;
y(4) = Xs;
[x F] = fsolve(@(x) membrane(x,y,k,V), [0 0 0 0])

yf = ((VfT -V(1))*yf + V(1)*x(2))/VfT;
ys = ((VsT -V(2))*ys + V(2)*x(4))/VsT;

Xf = -(V(1)/V(3))*x(2) + (V(1)/V(3))*y(1) + x(3);
Yf = yf;
Xs = -(V(2)/V(3))*x(4) + (V(2)/V(3))*y(3) + x(1);
Ys = ys;
[Xf Yf Xs Ys]

end

```

ตัวอย่างกรณีศึกษาที่ 6.2: การสร้างโปรแกรมสำหรับระบบหอสกัดตั้งแต่ 2 หอขึ้นไป

ขั้นที่ 1 การเขียนคำสั่งเพื่อใช้ในโปรแกรม MATLAB โดยกำหนดค่าของฟังก์ชันต่างๆ รวมทั้งสมการที่จะต้องใช้ในการคำนวณ ซึ่งสามารถเขียนได้ดังนี้

การกำหนดอักษรและสัญลักษณ์ต่างๆ มีความหมายเช่นเดียวกันกับตัวอย่างกรณีศึกษาที่ 6.1

```

function F=membrane(x, y, k, V, n)
% x(1): Xf(i,j,1)
% x(2): Yf(i,j,1)
% x(3): Xs(i,j,1)
% x(4): Ys(i,j,1)
% ...

```



```
% x(4*n-3) : Xf(i,j,n)
```

```
% x(4*n-2) : Yf(i,j,n)
```

```
% x(4*n-1) : Xs(i,j,n)
```

```
% x(4*n) : Ys(i,j,n)
```

```
% y(1) : Yf(i-1, j-1,1)
```

```
% y(2) : Xf(i, j-1,1)
```

```
% y(3) : Ys(i-1, j-1,1)
```

```
% y(4) : Xs(i, j-1,1)
```

```
% ...
```

```
% y(4*n-3) : Yf(i-1, j-1,n)
```

```
% y(4*n-2) : Xf(i, j-1,n)
```

```
% y(4*n-1) : Ys(i-1, j-1,n)
```

```
% y(4*n) : Xs(i, j-1,n)
```

```
% x(1) : Xf(i,j,1)
```

```
% x(2) : Yf(i,j,1)
```

```
% x(3) : Xs(i,j,1)
```

```
% x(4) : Ys(i,j,1)
```

```
% x(5) : Xf(i,j,2)
```

```
% x(6) : Yf(i,j,2)
```

```
% x(7) : Xs(i,j,2)
```

```
% x(8) : Ys(i,j,2)
```

```
% y(1) : Yf(i-1, j-1,1)
```

```
% y(2) : Xf(i, j-1,1)
```

```
% y(3) : Ys(i-1, j-1,1)
```

```
% y(4) : Xs(i, j-1,1)
```

```
% y(5) : Yf(i-1, j-1,2)
```

```
% y(6) : Xf(i, j-1,2)
```

```
% y(7) : Ys(i-1, j-1,2)
```

```
% y(8) : Xs(i, j-1,2)
```

```
%V(1) Vf %cc
```

```
%V(2) Vs %cc
```

```
%V(3) Vm %cc
```

```
F(1) = V(1)*y(1) + V(3)*y(4) - V(1)*x(2) - V(3)*x(1);
```

$$F(2) = V(2)*x(4) + V(3)*x(3) - V(2)*x(8) - V(3)*x(1);$$

$$F(3) = x(1) - k(1)*x(2);$$

$$F(4) = x(3) - k(2)*x(4);$$

ในกรณีทั่วไป ที่มีจำนวนหอสังเกตตั้งแต่ 2 หอสังเกตขึ้นไป

if (n > 2)

for i = 5:4:4*(n-1)

$$F(i) = V(1)*x(i-3) + V(3)*y(i+3) - V(1)*x(i+1) - V(3)*x(i);$$

$$F(i+1) = V(2)*x(i+3) + V(3)*x(i+2) - V(2)*x(i+4+3) - V(3)*x(i);$$

$$F(i+2) = x(i) - k(1)*x(i+1);$$

$$F(i+3) = x(i+2) - k(2)*x(i+3);$$

end

$$F(4*(n-1)+1) = V(1)*x(4*(n-1)+1-3) + V(3)*y(4*(n-1)+1+3) - V(1)*x(4*(n-1)+1+1) - V(3)*x(4*(n-1)+1);$$

$$F(4*(n-1)+2) = V(2)*x(4*(n-1)+1+3) + V(3)*x(4*(n-1)+1+2) - V(2)*y(4*(n-1)+1+2) - V(3)*x(4*(n-1)+1);$$

$$F(4*(n-1)+3) = x(4*(n-1)+1) - k(1)*x(4*(n-1)+1+1);$$

$$F(4*(n-1)+4) = x(4*(n-1)+1+2) - k(2)*x(4*(n-1)+1+3);$$

end

ขั้นที่ 2 การกำหนดค่าคงที่ต่างๆ ซึ่งประกอบไปด้วยค่าความเข้มข้นของไอออนโลหะใน ภูมิภาค สารละลายป้อน ภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลว และภูมิภาคสารละลายนำกลับ ณ จุดเริ่มต้น

% x(1) : Xf(i,j,1)

% x(2) : Yf(i,j,1)

% x(3) : Xs(i,j,1)

% x(4) : Ys(i,j,1)

% ...

% x(4*n-3) : Xf(i,j,n)

% x(4*n-2) : Yf(i,j,n)

% x(4*n-1) : Xs(i,j,n)

% x(4*n) : Ys(i,j,n)

% y(1) : Yf(i-1, j-1,1)

% y(2) : Xf(i, j-1,1)

% y(3) : Ys(i-1, j-1,1)

```

% y(4) : Xs(i, j-1,1)
% ...
% y(4*n-3) : Yf(i-1, j-1,n)
% y(4*n-2) : Xf(i, j-1,n)*
% y(4*n-1) : Ys(i-1, j-1,n)
% y(4*n) : Xs(i, j-1,n)*

```

การกำหนดจำนวนของหอสกัด

```

n = 2; % no. column
xo = zeros(1,n*4);

```

การหาค่าคงที่สมดุล (equilibrium constant) ค่าปริมาตรของสารละลายป้อน เชื้อแผ่นเหลว และสารละลายนำกลับ

```

% parameters
k(1) = 2;
k(2) = 0.8;
VfT = 100;
VsT = 100;

V(1) = 30; %Vf %cc
V(2) = 30; %Vs %cc
V(3) = 1; %Vm %cc

ys = 10
yf = 10

```

การหาค่า tolerance

```

tol = 1e-8;
y = zeros(1,n*4);

for i = 1:4:4*n
y(i) = yf;
y(i+1) = k(1)*y(i);
y(i+2) = ys;
y(i+3) = k(2)*y(i+2);
end

```

```

[x F] = fsolve(@(x) membrane(x,y,k,V,n), xo);
%X
yf     = ((VfT -V(1))*yf + V(1)*x(4*n-2))/VfT
ys     = ((VsT -V(2))*ys + V(2)*x(4))/VsT
for i   = 1:4:4*n
y(i)    = x(i+1);
y(i+1)  = x(i);
y(i+2)  = x(i+3);
y(i+3)  = x(i+2);
end

y(1)    = yf;
y(4*n-1)= ys;

x1old   = x(2);
x2old   = x(4*n);
[x F]   = fsolve(@(x) membrane(x,y,k,V,n), xo);
%X
yf     = ((VfT -V(1))*yf + V(1)*x(4*n-2))/VfT
ys     = ((VsT -V(2))*ys + V(2)*x(4))/VsT
for i   = 1:4:4*n
y(i)    = x(i+1);
y(i+1)  = x(i);
y(i+2)  = x(i+3);
y(i+3)  = x(i+2);
end
y(1)    = yf;
y(4*n-1)= ys;
e = abs(x(2)-x1old)+abs(x(4*n)-x2old);

while(e > tol)
    x1old = x(2);
    x2old = x(4*n);
    [x F] = fsolve(@(x) membrane(x,y,k,V,n), xo);

    yf     = ((VfT -V(1))*yf + V(1)*x(4*n-2))/VfT
    ys     = ((VsT -V(2))*ys + V(2)*x(4))/VsT
    for i   = 1:4:4*n

```

```

y(i)    = x(i+1);
y(i+1)  = x(i);
y(i+2)  = x(i+3);
y(i+3)  = x(i+2);
end

y(1)    = yf;
y(4*n-1) = ys;

e = abs(x(2)-x1old)+abs(x(4*n)-x2old);
end

yf      = ((VfT - V(1))*yf + V(1)*x(4*n-2))/VfT
ys      = ((VsT - V(2))*ys + V(2)*x(4))/VsT

```

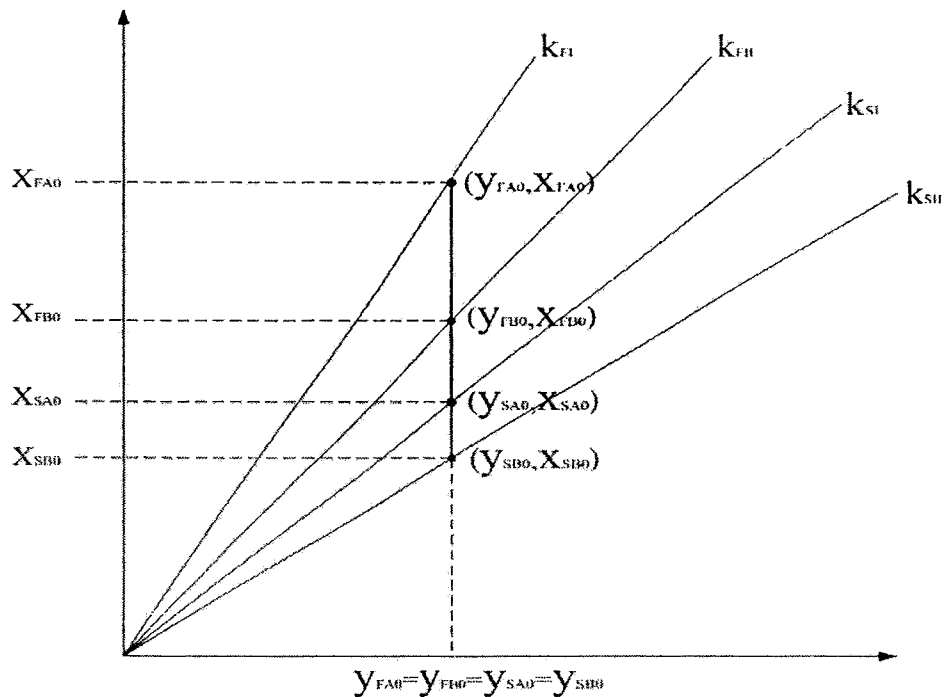
6.7 การสร้างกราฟสำหรับการสกัดแบบเสริมฤทธิ์

ในการสกัดไอออนโลหะผ่านระบบเยื่อแผ่นเหลวแบบเสริมฤทธิ์นี้ ประเด็นสำคัญของระบบอยู่ที่การใช้สารสกัดมากกว่า 1 ชนิด โดยทั่วไปแล้วจะใช้สารสกัด 2 ชนิด แต่ทั้งนี้ก็ไม่มีข้อจำกัดว่าจะต้องเป็น 2 ชนิดเท่านั้นเสมอไป อาจจะใช้มากกว่า 2 ชนิดก็ได้ การใช้สารสกัดแบบเสริมฤทธิ์นี้อาจแบ่งวิธีการใช้ได้เป็น 2 วิธี ด้วยกัน คือ (ก) ผสมกัน และ (ข) แยกกัน

6.7.1 การใช้สารสกัดแบบเสริมฤทธิ์ชนิดผสมกัน ผลของการทำงานไม่เพียงแต่จะเพิ่มประสิทธิภาพของการสกัดเท่านั้น การสร้างกราฟเพื่อทำนายผลก็ง่ายและไม่มีอะไรแตกต่างไปจากวิธีการที่ได้อธิบายมาก่อนหน้านี้แล้ว ไม่ว่าจะเป็นการใช้ระบบหอสกัดเดียวหรือหอสกัดคู่ (สองหอสกัด) หรือมากกว่าสองหอสกัดเป็นหลายหอสกัดก็ตาม เหตุผลก็คือเมื่อสารสกัดมากกว่า 1 ชนิด ผสมกัน เมื่อรวมกันแล้วเกิดเป็นสารสกัดตัวใหม่เพียงชนิดเดียว (ที่รวมเอาสารสกัดต่างๆ เข้าไว้ด้วยกัน) ดังนั้นเส้นสมมูลของสารสกัดแบบเสริมฤทธิ์ชนิดนี้ก็ยังคงมีเพียง 2 เส้น โดยมีค่าความชันเป็น k_f และ k_s ซึ่งหมายถึงค่าสมมูลระหว่างไอออนโลหะในวัฏภาคสารละลายป้อนกับในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลว และค่าสมมูลระหว่างไอออนโลหะในวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวกับในวัฏภาคสารละลายนำกลับตามลำดับ

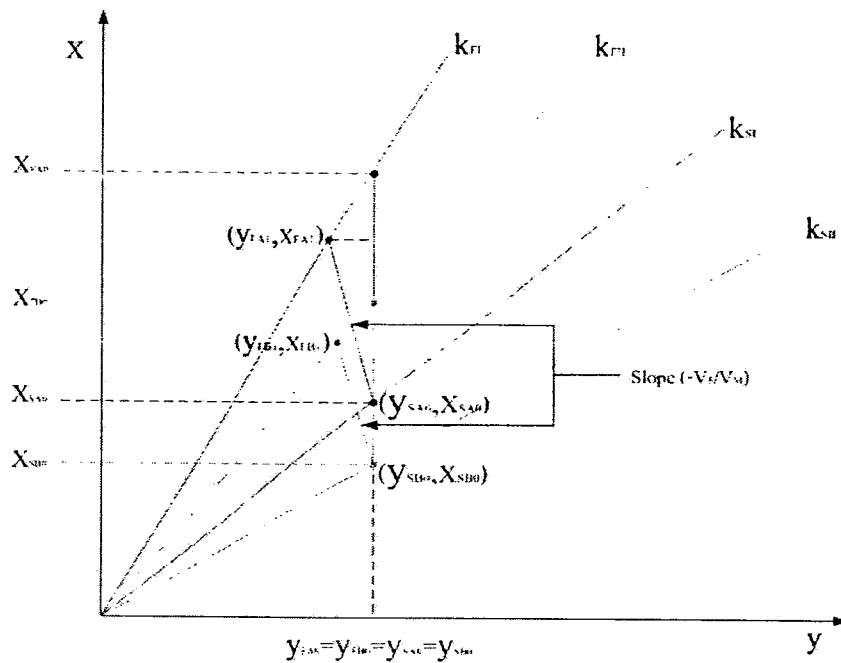
6.7.2 การใช้สารสกัดแบบเสริมฤทธิ์ชนิดแยกกัน การทำงานในระบบนี้จำเป็นต้องใช้หอสกัดอย่างน้อยที่สุดจำนวน 2 หอ สำหรับสารสกัด 2 ชนิด และหากชนิดของสารสกัดเพิ่มเป็น “n” ชนิด จำนวนหอสกัดที่ใช้ในขั้นต่ำสุดจะมีจำนวนเท่ากับ “n” หอ ซึ่งจะเท่ากับชนิดของสารสกัด

นั่นเอง เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจจะนำเสนอด้วยสารสกัด 2 ชนิดก่อน คือสารสกัด “I” และสารสกัด “II” โดยกำหนดให้สารสกัด “I” บรรจุอยู่ในหอสกัดที่ 1 ขณะที่สารสกัด “II” บรรจุอยู่ในหอสกัดที่ 2 จากสารสกัด “I” จะหาเส้นสมมูลได้ 2 เส้นที่มีค่าความชันเป็น k_{FI} และ k_{SI} โดยที่ k_{FI} เป็นค่าความชันของเส้นสมมูลระหว่างไอออนโลหะในวิทยาศาสตร์ละลายป้อนกับวิทยาศาสตร์เชื่อมแผ่นเหลว ขณะที่ k_{SI} เป็นค่าความชันของเส้นสมมูลระหว่างไอออนโลหะในวิทยาศาสตร์เชื่อมแผ่นเหลวกับวิทยาศาสตร์ละลายนำกลับ



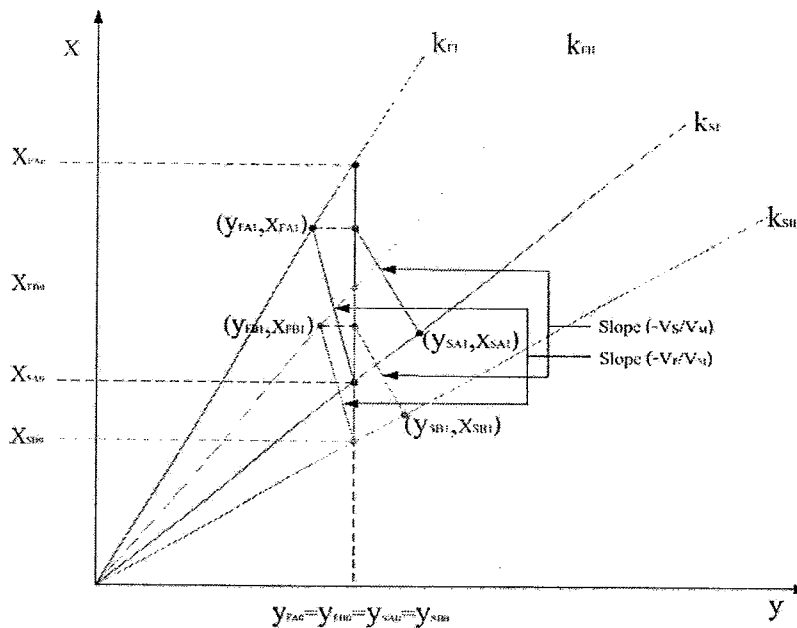
รูปที่ 6.25 การแสดงพิกัดบนเส้นสมมูลของการสกัดแบบเสริมฤทธิ์

และในทำนองเดียวกัน สารสกัด “II” ก็จะมีเส้นสมมูล 2 เส้นที่มีค่าความชันเป็น k_{FII} และ k_{SII} โดยที่ k_{FII} เป็นค่าความชันของเส้นสมมูลระหว่างไอออนโลหะในวิทยาศาสตร์ละลายป้อนกับวิทยาศาสตร์เชื่อมแผ่นเหลว ขณะที่ k_{SII} เป็นค่าความชันของเส้นสมมูลระหว่างไอออนโลหะในวิทยาศาสตร์เชื่อมแผ่นเหลวกับวิทยาศาสตร์ละลายนำกลับ เช่นกัน ณ ขณะนี้จะมีเส้นสมมูล 2 คู่ จำนวน 4 เส้นดังแสดงไว้ใน รูปที่ 6.25 ซึ่งเส้นสมมูลทั้ง 2 คู่ จะวางเหลื่อมกันเห็นได้ชัดเจน นอกจากนี้รายละเอียดในรูปยังแสดงให้เห็นถึงการลากเส้นปฏิบัติการจากพิกัดต่างๆ ไปสัมผัส (หรือชน) กับเส้นสมมูลเมื่อการทำงานครบรอบ 1 วัฏจักร



รูปที่ 6.26 การลากเส้นปฏิบัติการเชื่อมจุดพิศการสกัดแบบเสริมฤทธิ์

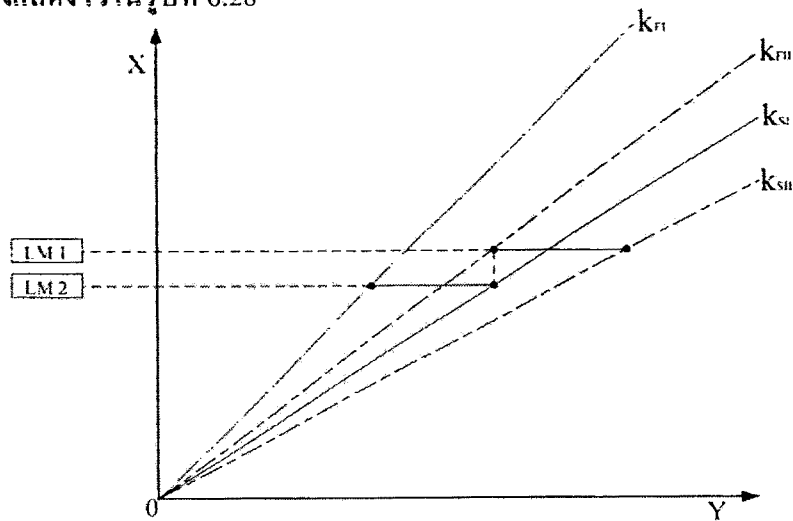
รายละเอียดการลากเส้นกราฟในวัฏจักรแรกของการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ซึ่งมีเส้นสมดุล 4 เส้น แสดงไว้ในรูปที่ 6.20 และรูปที่ 6.21



รูปที่ 6.27 การลากเส้นปฏิบัติการเชื่อมจุดพิศการสกัดแบบเสริมฤทธิ์เมื่อทำงานครบรอบวัฏจักร

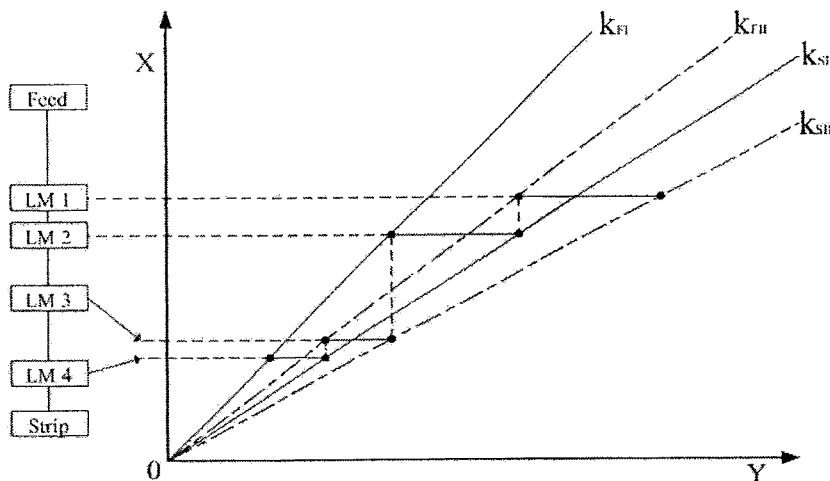
และเมื่อการทำงานของระบบผ่านไปหลายวัฏจักรค่าต่างๆ ของไอออนโลหะจากสารละลายป้อนซึ่งไหลผ่านตลอด 2 หอสกัดและค่าของไอออนโลหะที่สกัดได้และไหลผ่าน 2 หอสกัดด้าน

สารละลายนำกลับมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าการทำงานบรรลุภาวะคงตัวแล้ว การลากเส้นกราฟก็จะได้ผลชัดเจนเป็นขั้นบันได 2 ขั้น ที่เกี่ยวเนื่องและสัมพันธ์กันกับเส้นสมมูลทั้ง 4 เส้น ดังแสดงไว้ในรูปที่ 6.28



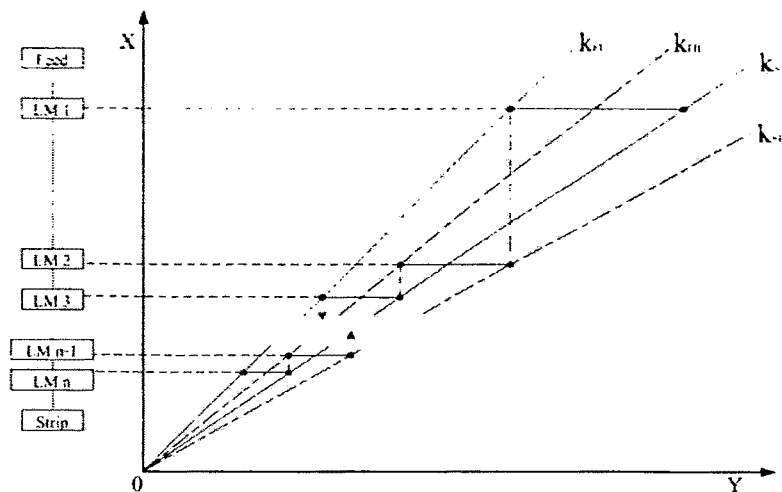
รูปที่ 6.28 การแสดงค่าการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ที่สภาวะคงตัวที่ใช้สารสกัด 2 หอ

ในรูปที่ 6.29 เป็นรูปตัวอย่างที่แสดงถึงการลากเส้นกราฟ โดยใช้หอสกัด จำนวน 4 หอ ผ่านระบบการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ซึ่งมีสารสกัดที่แตกต่างกัน 2 ชนิด



รูปที่ 6.29 การแสดงค่าการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ที่สภาวะคงตัวที่ใช้สารสกัด 4 หอ

ในการทำงานเดียวกันกับวิธีการเดียวกับการสร้างกราฟสำหรับหอสกัด 2 หอผ่านระบบการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ จะสามารถสร้างกราฟเพื่อทำนายค่าการสกัดสำหรับหอสกัด “n” หอผ่านระบบการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ที่ใช้สารสกัด 2 ชนิดดังที่ได้แสดงผลไว้ในรูปที่ 6.30



รูปที่ 6.30 การแสดงค่าการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ที่สภาวะคงตัวที่ใช้สารสกัด “n” หอ

6.8 การคำนวณโดยอาศัย MATLAB สำหรับการสกัดไอออนโลหะแบบเสริมฤทธิ์

ในการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ จำนวนสารสกัดที่ใช้มากกว่า 1 ชนิด ในที่นี้จะใช้สารสกัดจำนวน 2 ชนิดเพื่อเป็นตัวอย่างในการสร้างโปรแกรม ระบบแบบเสริมฤทธิ์สำหรับสารสกัด 2 ชนิดจะต้องเริ่มใช้จำนวนหอสกัดน้อยที่สุด 2 หอ ซึ่งแต่ละหอในภูมิภาคเยื่อแผ่นเหลวจะบรรจุด้วยสารสกัดต่างชนิดกัน ดังนั้นเส้นสมดุล (equilibrium line) จึงมีจำนวนทั้งสิ้น 4 เส้นด้วยกัน การสร้างโปรแกรมก็คล้ายคลึงกันกับในหัวข้อที่ 6.5

ตัวอย่างกรณีศึกษาที่ 6.3: การเขียนโปรแกรมในกรณีทั่วๆ ไปที่ใช้หอสกัดจำนวน 2 หอ และจะเพิ่มหอสกัดทีละ 2 หอเรื่อยไป

ขั้นที่ 1 การเขียนคำสั่งเพื่อใช้ในโปรแกรม MATLAB โดยกำหนดค่าของฟังก์ชันต่างๆ รวมทั้งสมการที่จะต้องใช้ในการคำนวณ ซึ่งสามารถเขียนได้ดังนี้

การกำหนดอักษรและสัญลักษณ์ต่างๆ มีความหมายเช่นเดียวกับตัวอย่างกรณีศึกษาที่ 6.1

```
function F = membrane(x, y, k, V, n)
```

```
% x(1): Xf(i,j,1)
```

```

% x(2) : Yf(i,j,1)
% x(3) : Xs(i,j,1)
% x(4) : Ys(i,j,1)
% ...
% x(4*n-3) : Xf(i,j,n)
% x(4*n-2) : Yf(i,j,n)
% x(4*n-1) : Xs(i,j,n)
% x(4*n) : Ys(i,j,n)

% y(1) : Yf(i-1, j-1,1)
% y(2) : Xf(i, j-1,1)
% y(3) : Ys(i-1, j-1,1)
% y(4) : Xs(i, j-1,1)
% ...
% y(4*n-3) : Yf(i-1, j-1,n)
% y(4*n-2) : Xf(i, j-1,n)
% y(4*n-1) : Ys(i-1, j-1,n)
% y(4*n) : Xs(i, j-1,n)

% x(1) : Xf(i,j,1)
% x(2) : Yf(i,j,1)
% x(3) : Xs(i,j,1)
% x(4) : Ys(i,j,1)
% x(5) : Xf(i,j,2)
% x(6) : Yf(i,j,2)
% x(7) : Xs(i,j,2)
% x(8) : Ys(i,j,2)

% y(1) : Yf(i-1, j-1,1)
% y(2) : Xf(i, j-1,1)
% y(3) : Ys(i-1, j-1,1)
% y(4) : Xs(i, j-1,1)
% y(5) : Yf(i-1, j-1,2)
% y(6) : Xf(i, j-1,2)
% y(7) : Ys(i-1, j-1,2)
% y(8) : Xs(i, j-1,2)

```

```

%V(1) Vf %cc
%V(2) Vs %cc
%V(3) Vm %cc

j=1;

if (mod(j,2)==1)
    k1 = k(1);
    k2 = k(2);
else
    k1 = k(3);
    k2 = k(4);
end
j=j+1;

F(1)=V(1)*y(1)+V(3)*y(4)-V(1)*x(2)-V(3)*x(1);
F(2)=V(2)*x(4)+V(3)*x(3)-V(2)*x(8)-V(3)*x(1);
F(3)=x(1)-k1*x(2);
F(4)=x(3)-k2*x(4);

if (n > 2)
    for i = 5:4*(n-1)

        if (mod(j,2)==1)
            k1=k(1);
            k2=k(2);
        else
            k1=k(3);
            k2=k(4);
        end
        j=j+1;

        F(i) =V(1)*x(i-3)+V(3)*y(i+3)-V(1)*x(i+1)-V(3)*x(i);
        F(i+1)=V(2)*x(i+3)+V(3)*x(i+2)-V(2)*x(i+4+3)-V(3)*x(i);
        F(i+2)=x(i)-k1*x(i+1);
        F(i+3)=x(i+2)-k2*x(i+3);
    end

    if (mod(j,2)==1)
        k1=k(1);

```

```

    k2=k(2);
else
    k1=k(3);
    k2=k(4);
end

F(4*(n-1)+1) = V(1)*x(4*(n-1)+1-3) + V(3)*y(4*(n-1)+1+3) - V(1)*x(4*(n-1)+1-1) -
V(3)*x(4*(n-1)+1);
F(4*(n-1)+2) = V(2)*x(4*(n-1)+1+3) + V(3)*x(4*(n-1)+1+2) - V(2)*y(4*(n-1)+1+2) -
V(3)*x(4*(n-1)+1);
F(4*(n-1)+3) = x(4*(n-1)+1) - k1*x(4*(n-1)+1+1);
F(4*(n-1)+4) = x(4*(n-1)+1+2) - k2*x(4*(n-1)+1+3);

end

```

ขั้นที่ 2 การกำหนดค่าคงที่ต่างๆ ซึ่งประกอบไปด้วย ค่าความเข้มข้นของไอออนโลหะในวิฤภาค สารละลายป้อน วิฤภาคเยื่อแผ่นเหลว และวิฤภาคสารละลายนำกลับ ณ จุดเริ่มต้น

```

% x(1) : Xf(i,j,1)
% x(2) : Yf(i,j,1)
% x(3) : Xs(i,j,1)
% x(4) : Ys(i,j,1)
% ...
% x(4*n-3) : Xf(i,j,n)
% x(4*n-2) : Yf(i,j,n)
% x(4*n-1) : Xs(i,j,n)
% x(4*n) : Ys(i,j,n)

% y(1) : Yf(i-1, j-1,1)
% y(2) : Xf(i, j-1,1)
% y(3) : Ys(i-1, j-1,1)
% y(4) : Xs(i, j-1,1)
% ...
% y(4*n-3) : Yf(i-1, j-1,n)
% y(4*n-2) : Xf(i, j-1,n)*
% y(4*n-1) : Ys(i-1, j-1,n)
% y(4*n) : Xs(i, j-1,n)*

```

ในตัวอย่างนี้กำหนดให้จำนวนหอสกัดที่ใช้ คือ 4 หอสกัด

```
n = 4; % no. column
xo = zeros(1,n*4);
```

การกำหนดค่าคงที่สมดุล (equilibrium constant) ค่าปริมาตรของสารละลายป้อน เยื่อแผ่นเหลว และสารละลายนำกลับ

```
%parameters

k(1) = 2;
k(2) = 0.8;
k(3) = 1.0;
k(4) = 0.2;
VfT = 100;
VsT = 100;

V(1) = 30; %Vf %cc
V(2) = 30; %Vs %cc
V(3) = 1; %Vm %cc

ys = 10
yf = 10
```

การกำหนดค่า tolerance

```
tol = 1e-8;
y = zeros(1,n*4);

for i = 1:4:4*n
y(i) = yf;
y(i+1) = k(1)*y(i);
y(i+2) = ys;
y(i+3) = k(2)*y(i+2);
end

[x F] = fsolve(@(x) membrane(x,y,k,V,n), xo);
%X
```

```

yf    = ((VfT -V(1))*yf + V(1)*x(4*n-2))/VfT
ys    = ((VsT -V(2))*ys + V(2)*x(4))/VsT
for i  = 1:4:4*n
y(i)   = x(i+1);
y(i+1) = x(i);
y(i+2) = x(i+3);
y(i+3) = x(i+2);
end

y(1)   = yf;
y(4*n-1)=ys;
x1old  = x(2);
x2old  = x(4*n);
[x F]  = fsolve(@(x) membrane(x,y,k,V,n), xo);
%x
yf      = ((VfT -V(1))*yf + V(1)*x(4*n-2))/VfT
ys      = ((VsT -V(2))*ys + V(2)*x(4))/VsT
for i    = 1:4:4*n
y(i)     = x(i+1);
y(i+1)   = x(i);
y(i+2)   = x(i+3);
y(i+3)   = x(i+2);
end

y(1)     = yf;
y(4*n-1)=ys;
e = abs(x(2)-x1old)+abs(x(4*n)-x2old);

while(e > tol)
    x1old = x(2);
    x2old = x(4*n);
    [x F]  = fsolve(@(x) membrane(x,y,k,V,n), xo);

    yf      = ((VfT -V(1))*yf + V(1)*x(4*n-2))/VfT
    ys      = ((VsT -V(2))*ys + V(2)*x(4))/VsT
    for i    = 1:4:4*n
y(i)     = x(i+1);
y(i+1)   = x(i);

```



```
y(i+2)=x(i+3);
y(i+3)=x(i+2);
end

y(1)      = yf;
y(4*n-1) = ys;

e = abs(x(2)-x1old)+abs(x(4*n)-x2old);
end
yf = ((VfT -V(1))*yf + V(1)*x(4*n-2))/VfT
ys = ((VsT -V(2))*ys + V(2)*x(4))/VsT
```

บทสรุป

การสกัดไอออนโลหะจากเยื่อแผ่นเหลวที่พองด้วยเส้นใยกลวงในระบบหอสกัดเดี่ยว ระบบสองหอสกัด และระบบหลายหอสกัดนั้น สามารถทำนายผลการสกัดได้โดยการสร้างกราฟอย่างง่าย โดยอาศัยทฤษฎีสมดุลและรูปแบบสมดุลการไหลในท่อ ที่มีแนวคิดมาจากกระบวนการกลั่นตามทฤษฎีของ McCabe-Theile การประยุกต์จากกลุ่มของ Chen และกลุ่มของ Patthaveekongka สำหรับการสร้างกราฟทำนายผลในระบบหอสกัดเดียวนั้นจะพิจารณาจากแผนผังขั้นตอนการสกัดไอออนโลหะดังในรูปที่ 6.7 ไปพร้อมกับการสร้างกราฟทำนายผลดังในรูปที่ 6.12 โดยขั้นตอนการสกัดไอออนโลหะในหนึ่งรอบวัฏจักรจะมีอยู่ 3 ขั้นตอนด้วยกันคือ

- | | |
|--------------|---|
| ขั้นตอนที่ 1 | ความเข้มข้นของไอออนโลหะ (Y_o) ในวัฏภาคสารละลายป้อนไหลเข้าส่วนท่อ และความเข้มข้นของสารละลายนำกลับ (S_o) ไหลเข้าสู่ชั้นเปลือกของเส้นใยกลวง |
| ขั้นตอนที่ 2 | เป็นการเกิดปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วในขั้นตอนการสกัด ซึ่งจะได้จุด Y_{F1} อยู่บนเส้นสมดุล k_F พร้อมกันนั้นจะเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับอย่างรวดเร็วเช่นกันในขั้นตอนการนำกลับ และได้จุด Y_{S1} อยู่บนเส้นสมดุล k_S โดยหากวาดเส้นปฏิบัติการเชื่อมระหว่างจุด Y_{F1} กับจุด Y_{S1} จะทำให้ได้ค่าความชันเท่ากับ $(-V_{Aq}/V_M)$ |
| ขั้นตอนที่ 3 | สารละลายป้อนและสารละลายนำกลับไหลออกจากหอสกัดหลังจากเสร็จสิ้นการเกิดปฏิกิริยาและเข้าสู่สภาวะสมดุลกับวัฏภาคเยื่อแผ่นเหลวแล้ว |

สำหรับวัฏจักรในรอบต่อไปจะมีความเป็นเช่นเดียวกันกับวัฏจักรในรอบที่หนึ่งจนกระทั่งการทำงานเข้าสู่รอบที่ N จะได้ความเข้มข้นของไอออนโลหะในถังพักสารละลายป้อน

เข้าสู่สภาวะอยู่ตัว $[Y_F]_{\infty}$ และเช่นเดียวกันในถึงพักสารละลายนำกลับ $[Y_S]_{\infty}$ โดยการสร้างกราฟทำนายผลจะเริ่มจากการสร้างเส้นสมดุล การสร้างเส้นปฏิบัติการ การกำหนดพิกัด และการลากเส้นกราฟตามลำดับ ซึ่งการลากเส้นกราฟเชื่อมต่อระหว่างสองจุดที่สภาวะอยู่ตัวนี้พบว่าเส้นกราฟที่ได้จะขนานกับแกน y ส่วนการสร้างกราฟทำนายผลของระบบสองหอสกัดและหลายหอสกัดนั้นได้แสดงไว้ดังรูปที่ 6.15 และรูปที่ 6.18 ตามลำดับ โดยมีวิธีการสร้างกราฟที่คล้ายคลึงกับในระบบหอสกัดเดี่ยว ถึงแม้ว่าจะเกิดเส้นสมดุลของกระบวนการมากขึ้นตามจำนวนหอสกัดที่เพิ่มขึ้นก็ตาม เพราะได้กำหนดให้เส้นสมดุลจากปฏิกิริยาเดียวกันของแต่ละหอสกัดมีค่าเท่ากันหรืออีกนัยหนึ่งก็คือการใช้สารสกัดตัวเดียวนั่นเอง นอกจากนี้กราฟทำนายผลยังสามารถใช้กับการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ทั้งแบบสารสกัดผสมกันและสารสกัดแยกกัน และกราฟทำนายผลยังสร้างได้ง่ายด้วยโปรแกรม MATLAB

คำถามท้าย

1. ประโยชน์ของกราฟทำนายผลคืออะไร
2. กราฟทำนายผลสร้างจากหลักการใด
3. การสร้างกราฟทำนายผลใช้หลักการอะไร
4. ไอโซฮิเล็กทริกพอยต์คืออะไร
5. อธิบายขั้นตอนในการสร้างกราฟทำนายผลอย่างคร่าวๆ
6. เส้นสมมูลในกราฟทำนายผลคืออะไร
7. การลากเส้นกราฟทำได้อย่างไร
8. เส้นปฏิบัติการในกราฟทำนายผลคืออะไร
9. ที่สถานะอยู่ตัวเส้นปฏิบัติการที่ได้จะเป็นอย่างไร
10. การหาจำนวนของหอสกัดทำได้อย่างไร
11. กราฟทำนายผลในกรณีระบบหอสกัด n หอต่างจากระบบหอสกัดเดี่ยวอย่างไร
12. จำนวนหอสกัดของการสกัดแบบเสริมฤทธิ์ขึ้นอยู่กับอะไร
13. เส้นปฏิบัติการที่สภาวะคงตัวในกราฟทำนายผลของการสกัดแบบเสริมฤทธิ์เป็นอย่างไร
14. การสร้างกราฟทำนายผลต่างจากวิธีของ McCabe–Theile อย่างไร
15. โปรแกรม MATLAB มีประโยชน์ต่อการสร้างกราฟทำนายผลอย่างไร
16. ขั้นตอนในการสร้างกราฟทำนายผลด้วยโปรแกรม MATLAB เป็นอย่างไร
17. การสกัดไอออนโลหะในหนึ่งรอบวัฏจักรมีกี่ขั้นตอน และแต่ละขั้นตอนเป็นอย่างไร