บทที่ 3

ทฤษฎีบท

3.1 ระบบการแลกเปลี่ยนมวล (Mass exchanger)

การแลกเปลี่ยนมวล คือ การที่สายสองสายเกิดการสัมผัสกันโดยตรงในหน่วยแลกเปลี่ยนมวล และเกิดการถ่ายโอนมวลระหว่างสายทั้งสอง ซึ่งเกิดจากสารที่มีความสามารถในการกระจายตัวได้ในทั้งสองสายเกิดการกระจายตัวใหม่โดยทิศทางของการกระจายตัวขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลาย (Solubility) และความเข้มข้นขององค์ประกอบที่เกิดการเคลื่อนย้ายมวลได้ในสายที่แลกเปลี่ยนมวลกัน จากหลักการนี้จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมเคมีอย่างแพร่หลายตามวัตถุประสงค์ต่างๆ ของงาน เช่น การนำไปใช้ในกระบวนนำกลับสารที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจ (Recovery of valuable component) การทำสารให้บริสุทธิ์ (Purification) และ การจัดการของเสีย (Waste treatment) เป็นต้น

ในอุตสาหกรรมเคมีมีกระบวนการแลกเปลี่ยนมวลอยู่มากมายหลายกระบวนการดังนี้

1. การดูดซึม (Absorption) คือ การใช้ตัวทำละลายที่เป็นของเหลวไปดูดซึมตัวถูกละลายที่ละลายอยู่ในก๊าซซึ่งตัวทำละลายต้องละลายตัวถูกละลายได้ดีกว่าก๊าซ ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานกระบวนการนี้ เช่น กระบวนการดึงซัลเฟอร์ออกจากก๊าซที่ออกจากเตาเผาก่อนที่จะออกสู่บรรยากาศ (Flue gas) โดยใช้สารละลายของอัลคาไลน์

2. การดูดซับ (Adsorption) คือ การใช้ของแข็งดูดซับสารที่อยู่ในก๊าซหรือสารละลาย โดยที่ตัวถูกละลายสามารถเกาะอยู่บนผิวของของแข็งได้

3. การสกัด (Extraction) คือ การใช้ตัวทำละลายที่เป็นของเหลวไปสกัดตัวถูกละลายจากสายเข้มข้น โดยที่ตัวทำละลายต้องมีความสามารถในการละลายตัวถูกละลายได้ดีกว่าตัวพา

4. การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) คือ การใช้เรซินที่มีทั้งไอออนบวกและไอออนลบมาดึงไอออนลบที่อยู่ในสารละลายเข้ามาแทนที่ไอออนลบในเรซินทำให้สารละลายที่ออกไปไม่มีสารที่มีไอออนที่เป็นอันตรายปนอยู่ เป็นต้น

ซึ่งการเลือกใช้กระบวนการใดจะขึ้นอยู่กับวัฏภาคของสายที่จะแลกเปลี่ยนมวลและกลไกการแลกเปลี่ยนมวล

3.2 **สมดุลวัฏภาค** (Equilibrium)

ในระบบที่มีวัฏภาคของเหลวอยู่ 2 วัฏภาค คือ วัฏภาคที่มีตัวถูกละลายอยู่เจือจาง (j) และวัฏภาคที่มีตัวถูกละลายอยู่มาก (i) เมื่อของเหลวทั้งสองสัมผัสกัน ตัวถูกละลายซึ่งมีความสามารถในการละลายได้ในทั้งสองวัฏภาคจะเกิดการแพร่ (Diffuses) จากวัฏภาคที่มีความเข้มข้นมากไปยังวัฏภาคที่มีความเข้มข้นน้อยกว่าทำให้ความเข้มข้นในสายเจือจางค่อยๆเพิ่มขึ้น ซึ่งการที่ความเข้มข้นในสายเจือจางเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เกิดความต้านทานในการแพร่เพิ่มขึ้นตามไปด้วย การแพร่จึงเกิดได้ยากขึ้น นอกจากนี้เมื่อพิจารณาทิศทางการถ่ายโอนมวลของระบบ พบว่าตัวถูกละลายสามารถแพร่จากวัฏภาคเจือจางไปยังวัฏภาคเข้มข้นได้ด้วย (Back-transfers) ดังนั้นอัตราการแพร่สุทธิจะเท่ากับผลต่างของอัตราการแพร่ย้อนกลับกับอัตราการแพร่ไปข้างหน้า (Forward-transfer) นั่นเอง โดยที่ทิศทางการถ่ายเทมวลสุทธิเป็นการถ่ายเทจากวัฏภาคเข้มข้นไปยังวัฏภาคเจือจาง ดังนั้นปริมาณของตัวถูกละลายในวัฏภาคเจือจางจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในขณะเดียวกันปริมาณของตัวถูกละลายในสายเข้มข้นจะค่อยๆลดลง จนกระทั่งอัตราการถ่ายเทมวลทั้งแบบย้อนกลับและแบบไปข้างหน้า เท่ากันที่จุดนี้ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในวัฏภาคทั้งสองจะมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งที่จุดนี้เรียกว่า จุดสมดุลของการถ่ายเทมวล (Equilibrium) พิจารณาระบบอุดมคติกำหนดให้ x_j คือ ความเข้มข้นของตัวทำละลายในวัฏภาค j และ y_i คือ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในวัฏภาค i โดยที่ i คือ วัฏภาคเข้มข้น และ j คือ วัฏภาคเจือจาง และฟังก์ชันการกระจายตัวที่สภาวะสมดุล คือ f_j^* ซึ่งฟังก์ชันการกระจายตัวนี้ อาจจะเป็น อุณหภูมิ หรือ ความดันของระบบก็ได้ และกำหนดให้ x_j^* คือความเข้มข้นที่สภาวะสมดุล ความสัมพันธ์ที่สภาวะสมดุลแสดงได้ดังสมการ

$$y_i = f_j^*\left(x_j^*\right) \tag{3.1}$$

ซึ่งในการนำสมการนี้ไปใช้งาน ในด้านของสิ่งแวดล้อมสามารถประมาณได้ด้วยสมการเชิงเส้นทำให้เขียนสมการที่ 3.1 ได้ดังนี้

$$y_i = m_j x_j^* + b_j \tag{3.2}$$

สำหรับกรณีที่ใช้ในระบบการดูดซึม (Absorption) สามารถใช้สมการของ Raoult's law ได้ดังนี้

$$y_i = \frac{P_{solute}^0(T)}{P_{total}} x_j^* \tag{3.3}$$

เมื่อ y_i และ x_j^* คือสัดส่วนโดยโมลของตัวถูกละลายในวัฏภาคก๊าซและของเหลวตามลำดับและ $P^0_{solute}(T)$ คือความดันไอของตัวถูกละลายที่อุณหภูมิ T และความดัน P_{total} คือความดันของก๊าซทั้งระบบ

นอกจากนี้สมการที่ใช้ในการประมาณค่าที่สมดุลสำหรับระบบ Stripping คือสมการของเฮนรี่ (Henry's law) ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$y_i = H_j x_j^* \qquad 3.4$$

เมื่อ

$$H_j = \frac{P_{total} y_i^{solubility}}{P^0_{solute}(T)} \qquad 3.5$$

กำหนดให้ $y_i^{solubility}$ คือ ความสามารถของวัฏภาคของเหลวในการละลายของมลพิษที่อุณหภูมิที่ดำเนินงาน

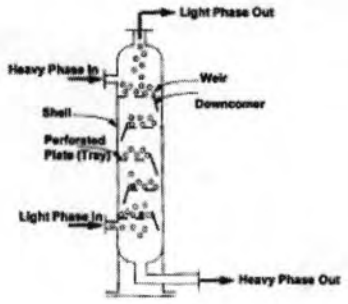
สำหรับกรณีของระบบการสกัด (Extraction) สามารถใช้สมการที่สภาวะสมดุลดังนี้

$$y_i = K_j x_j^* \qquad 3.6$$

ซึ่งสมการที่ใช้ในการประมาณค่าที่สภาวะสมดุลที่กล่าวมาข้างต้นสามารถใช้ได้เฉพาะช่วงที่ความเข้มข้นต่ำเท่านั้น

3.3 การกำหนดชนิดและขนาดของเครื่องแลกเปลี่ยนมวล (Types and Size of Mass Exchangers)

ในการแลกเปลี่ยนมวลระหว่างวัฏภาคสิ่งที่ต้องคำนึงถึง คือ การกำหนดรูปแบบของการสัมผัสกันของวัฏภาคทั้งสอง ซึ่งทำได้หลายแบบดังนั้นหน่วยปฏิบัติการที่ใช้จึงเปลี่ยนแปลงไปตามความเหมาะสมของคู่ที่เกิดการแลกเปลี่ยนกัน โดยหน่วยปฏิบัติการหลักที่นิยมใช้มีสองแบบคือแบบขั้น (Multi stages) และแบบต่อเนื่อง (Differential contactor) สำหรับหน่วยปฏิบัติการแบบขั้นนั้นจะมีสมมติฐานว่าเวลาที่เกิดการแลกเปลี่ยนมวลในแต่ละขั้นนานพอที่จะเกิดการถ่ายโอนมวลจนเข้าสู่สภาวะสมดุล ซึ่งตัวอย่างหน่วยปฏิบัติการที่เป็นแบบขั้น เช่น หอสกัดแบบชั้น (Tray columns) หรือ เครื่องผสม (Mixer settlers) เพื่อที่จะคำนวณขนาดของหอสกัดแบบชั้นจึงต้องมีการกำหนดสมมติฐานเพิ่มเติมโดยให้หอสกัดที่ใช้เป็นแบบที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อนเข้าหรือออกจากระบบ (Isothermal)



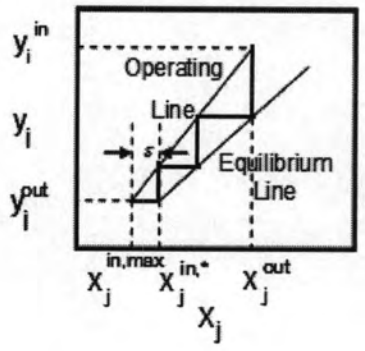
รูปที่ 3.1 หอกลั่นแบบชั้น (อ้างอิง: pollution prevention through process integration systematic design tool โดย Mahmoud M. El-Halwagi)

จากรูปกำหนดให้สายที่มีความเข้มข้นมาก (Rich stream: i) มีอัตราการไหลเท่ากับ G_i และมีองค์ประกอบของสารที่เป็นมลพิษที่ทางเข้า เท่ากับ y_i^{in} และที่ทางออกเท่ากับ y_i^{out} และมีตัวทำละลาย (MSA หรือ lean stream: j) อัตราการไหลเท่ากับ Lj โดยมีความเข้มข้นที่ทางเข้าและทางออกเท่ากับ x_j^{in} และ x_j^{out} และ ไหลในทิศทางดังรูปที่ 3.1

โดยปกติแล้วการไหลแบบสวนกัน (Counter flow) จะทำให้การถ่ายโอนมวลเกิดได้ดีที่สุด ดังนั้น ระบบการไหลที่พิจารณาจึงเป็นระบบไหลสวนทางกัน และกำหนดให้เวลาในการถ่ายโอนมวลในแต่ละขั้นมากพอที่จะทำให้การถ่ายโอนมวลจนกระทั่งเข้าสู่สภาวะสมดุล ซึ่งจำนวนขั้นของการแลกเปลี่ยนมวลทางทฤษฎี (Number of theoretical plates: NTP) คำนวณได้จากวิธีเชิงกราฟ (McCabe-Thiele method) เนื่องจากปกติแล้วสมการที่แสดงความสัมพันธ์ที่สภาวะสมดุลเป็นแบบไม่เชิงเส้น อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาที่ช่วงเจือจางมากพอความสัมพันธ์ที่สมดุลสามารถประมาณให้เป็นเชิงเส้นได้ดังสมการที่ 3.2 เมื่อสร้างสมการสมดุลมวลของสารที่เกิดการถ่ายเทมวลจะได้ดังสมการ

$$G_i\left(y_i^{in}-y_i^{out}\right)=L_j\left(x_j^{out}-x_j^{in}\right) \qquad 3.7$$

เมื่อนำสมการสมดุลมวลมาเขียนบนกราฟ y-x จะได้กราฟดังรูปที่ 3.2 โดยที่ความชันของเส้นดำเนินงาน (Operating line) คือ อัตราส่วนของอัตราการไหลของสายเจือจางต่อสายเข้มข้น $\frac{L_j}{Gi}$



รูปที่ 3.2 กราฟ McCabe-Thiele

ซึ่งจำนวนชั้นในทางทฤษฎีหาจากการลากเส้นระหว่างเส้นที่สมดุล (Equilibrium line) กับเส้นดำเนินงาน (Operating line) นอกจากวิธีเชิงกราฟแล้วจำนวนชั้นทางทฤษฎียังหาได้จากกสมการของเครมเซอร์ (Kremser's equation 1930) โดยสมการของเครมเซอร์แสดงได้ดังสมการ 3.8 หรือ สมการที่ 3.9

$$NTP = \frac{\ln\left[\left(1-\frac{m_j G_i}{L_j}\right)\left(\frac{y_i^{in}-m_j x_j^{in}-b_j}{y_i^{out}-m_j x_j^{in}-b_j}\right)+\frac{m_j G_i}{L_j}\right]}{\ln\left(\frac{L_j}{m_j G_i}\right)} \qquad 3.8$$

ซึ่งสมการเครมเซอร์สามารถเขียนได้อีกรูปแบบดังนี้

$$NTP = \frac{\ln\left[\left(1-\frac{L_j}{m_j G_i}\right)\left(\frac{x_i^{in}-x_j^{out,*}}{x_j^{out}-x_j^{out,*}}\right)+\frac{L_j}{m_j G_i}\right]}{\ln\left(\frac{m_j G_i}{L_j}\right)} \qquad 3.9$$

เมื่อกำหนดให้

$$x_j^{out,*} = \frac{y_i^{in}-b_j}{m_j} \qquad 3.10$$

และ

$$\frac{y_i^{in}-m_j x_j^{out}-b_j}{y_i^{out}-m_j x_j^{in}-b_j} = \left(\frac{L_j}{m_j G_j}\right)^{NTP} \qquad 3.11$$

ในสภาวะการทำงานจริงพบว่าบางครั้งเวลาที่ใช้ในการถ่ายเทมวลในแต่ละขั้นไม่มากพอที่จะเกิดการถ่ายเทจนเข้าสู่สภาวะสมดุลได้ ดังนั้นการหาจำนวนขั้นตอนที่แท้จริง (Number of actual plates) จึงต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพของการถ่ายเทมวลด้วยโดยประสิทธิภาพของการถ่ายเทมวลโดยรวม (Overall exchanger efficiency: η_o) สัมพันธ์กับจำนวนขั้นที่แท้จริงดังสมการ

$$NAP = \frac{NTP}{\eta_o} \tag{3.12}$$

ประสิทธิภาพของการถ่ายเทมวลของแต่ละขั้นสามารถนิยามโดยเทียบกับสายเข้มข้นหรือสายเจือจาง η_y ได้ ซึ่งจำนวนขั้นที่แท้จริงหาได้จากสมการ

$$NTP = \frac{\ln\left[\left(1-\frac{m_j G_i}{L_j}\right)\left(\frac{y_i^{in}-m_j x_j^{in}-b_j}{y_i^{out}-m_j x_j^{in}-b_j}\right)+\frac{m_j G_i}{L_j}\right]}{-\ln\left\{1+\eta_y\left[\left(\frac{m_j G_i}{L_j}\right)-1\right]\right\}} \tag{3.13}$$

สำหรับหน่วยปฏิบัติการในการแลกเปลี่ยนมวลแบบต่อเนื่อง (Differential contactor) คือหน่วยแลกเปลี่ยนมวลที่มีการใช้ตัวกลางเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการแลกเปลี่ยนมวลให้ดีขึ้น เช่น หอสกัดแบบต่อเนื่อง (Packed column) และ หอสเปรย์ (Spray tower) เป็นต้น ขนาดของหอสกัดประเภทนี้คำนวณได้จากความสูงของหอ (H) ดังสมการ

$$H = HTU_y NTU_y \tag{3.14}$$

$$H = HTU_x NTU_x \tag{3.15}$$

โดยให้ HTU_y คือ ความสูงของหอเมื่อคำนวณอ้างอิงกับสายเข้มข้น

HTU_x คือ ความสูงของหอเมื่อคำนวณโดยอ้างอิงกับสายเจือจาง และ

NTUy คือ จำนวนหน่วยแลกเปลี่ยนเมื่อคำนวณอ้างอิงกับสายเข้มข้น

NTUx คือ จำนวนหน่วยแลกเปลี่ยนเมื่อคำนวณอ้างอิงกับสายเจือจาง

ถ้าสมมติให้ระบบเป็นแบบที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อน (Isothermal) และเป็นแบบเจือจางมาก ความสัมพันธ์ที่สภาวะสมดุลสามารถประมาณเป็นแบบเชิงเส้นได้แล้วทำให้สามารถคำนวณจำนวนของหน่วยแลกเปลี่ยนมวลที่อ้างอิงกับสายเข้มข้น ได้ดังสมการ 3.16

$$NTU_y = \frac{y_i^{in} - y_i^{out}}{\left(y_i - y_i^*\right)_{\log mean}} \tag{3.16}$$

เมื่อ

$$\left(y_i - y_i^*\right)_{\log mean} = \frac{\left(y_i^{in} - m_j x_j^{out} - b_j\right) - \left(y_i^{out} - m_j x_j^{in} - b_j\right)}{\ln\left(\frac{\left(y_i^{in} - m_j x_j^{out} - b_j\right)}{\left(y_i^{out} - m_j x_j^{in} - b_j\right)}\right)} \tag{3.17}$$

$$NTU_x = \frac{x_i^{in} - x_i^{out}}{\left(x_i - x_i^*\right)_{\log mean}} \tag{3.18}$$

เมื่อ

$$\left(x_j - x_j^*\right) = \frac{\left[x_j^{out} - \left(\frac{y_i^{in} - b_j}{m_j}\right)\right] - \left[x_j^{in} - \left(\frac{y_i^{out} - b_j}{m_j}\right)\right]}{\ln\left\{\frac{\left[x_j^{out} - \left(\frac{y_i^{in} - b_j}{m_j}\right)\right]}{\left[x_j^{in} - \left(\frac{y_i^{out} - b_j}{m_j}\right)\right]}\right\}} \tag{3.19}$$

กรณีที่ไม่รู้อัตราการไหลของสายที่มาแลกเปลี่ยนมวลกัน ค่าจำนวนขั้นที่อ้างอิงสายเข้มข้นสามารถหาได้จากสมการที่ 3.20

$$NTU_y = \frac{\ln\left[\left(1 - \frac{m_j G_i}{L_j}\right)\left(\frac{y_i^{in} - m_j x_j^{in} - b_j}{y_i^{out} - m_j x_j^{in} - b_j}\right) + \frac{m_j G_i}{L_j}\right]}{1 - \left(\frac{m_j G_i}{L_j}\right)} \tag{3.20}$$

3.4 การสังเคราะห์ข่ายงานแลกเปลี่ยนมวล (Synthesis of Mass-Exchange Networks approaches)

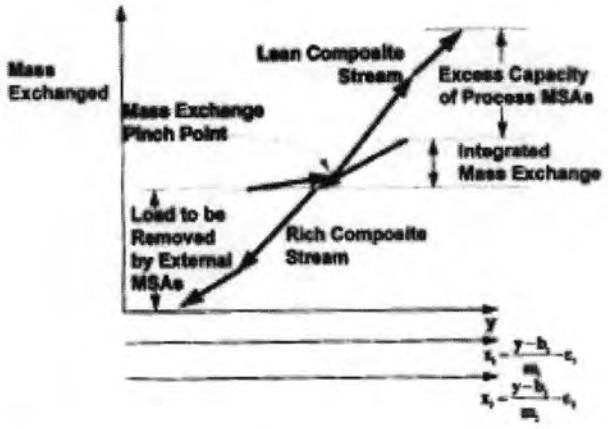
การออกแบบข่ายงานแลกเปลี่ยนมวลนั้นมีความซับซ้อนมาก เนื่องจากการออกแบบข่ายงานนั้นมีทางเลือกในการออกแบบมากมายหลายรูปแบบ เช่น จำนวนหน่วยแลกเปลี่ยนมวลที่ใช้ การจับคู่ของสายที่จะแลกเปลี่ยนมวล อัตราการไหลของตัวทำละลายที่ใช้ และอัตราการไหลของแต่ละสายในหน่วยแลกเปลี่ยนมวลแต่ละหน่วย เป็นต้น ซึ่งการทดลองออกแบบแล้วทวนสอบกลับ (Trial and error) หรือการออกแบบหลายๆโครงสร้างแล้วเทียบกัน พบว่าวิธีเหล่านี้ไม่สามารถหาข่ายงานที่เหมาะสมได้ ดังนั้นจึงต้องมีวิธีที่แก้ปัญหาเพื่อใช้ในการออกแบบซึ่งวิธีที่ใช้คือการสังเคราะห์ปัญหาของกระบวนการออกมา โดยการตั้งเป้าหมาย (target) ของข่ายงานที่ต้องการออกแบบ ซึ่งเป้าหมายของข่ายงานที่นิยมใช้ในการออกแบบมีสองแบบดังนี้

1. การหาค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานที่ต่ำที่สุด (Minimum cost of MSAs) เป้าหมายของการออกแบบข่ายงานที่ได้จะเป็นคำตอบที่ออกแบบให้มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานต่ำที่สุด (MOC)

2. การหาค่าใช้จ่ายของหน่วยแลกเปลี่ยนมวลที่ต่ำที่สุด (Minimum number of mass exchanger units) เป้าหมายของคำตอบที่ต้องการคือคำตอบที่ทำให้ ใช้จำนวนหน่วยแลกเปลี่ยนมวลให้น้อยที่สุดซึ่งจะส่งผลให้ค่าใช้จ่ายคงที่ต่ำสุดด้วยนั่นเอง

3.4.1 วิธีเชิงกราฟ (Graphical approach)

เมื่อพิจารณากระบวนการผลิตพบว่ามีบางสายสามารถแลกเปลี่ยนมวลกับสายของเสียได้ ซึ่งการที่สายนี้มีอยู่ในกระบวนการอยู่แล้วทำให้ไม่มีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้น ดังนั้นก่อนที่จะออกแบบข่ายงานจึงต้องพยายามนำสายของเสียมาจับคู่แลกเปลี่ยนมวลกับสายตัวทำละลายที่มีอยู่แล้วในกระบวนการ(Process MSAs) ให้มากที่สุดก่อน เพื่อเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายของตัวทำละลายจากภายนอก (External MSAs) ที่ต้องใช้ เมื่อพิจารณากราฟพบว่าสายของเสียและสายตัวทำละลายจะวิ่งมีทิศสวนทางกันและลู่เข้าหากันจนสัมผัสกันที่จุดหนึ่ง เรียกว่าจุดพินช์ (Pinch point) ซึ่งที่จุดนี้จะเป็นจุดที่สายทั้งสองไม่เกิดการแลกเปลี่ยนมวลกันเพราะเป็นจุดที่มีแรงขับดัน (Driving force) น้อยที่สุด และจากกราฟจะพบว่ามวลที่เหลือที่ไม่สามารถแลกเปลี่ยนได้หมด (Excess Capacity of Process MSAs) จะต้องใช้ตัวทำละลายภายนอกมารับมวลออกไป เพื่อให้สายของเสียมีความเข้มข้นตามเป้าหมายที่วางไว้ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 กราฟที่แสดงการถ่ายโอนมวล (อ้างอิง: pollution prevention through process integration systematic design tool โดย Mahmoud M. El-Halwagi)

โดยปริมาณของตัวทำละลายจากภายนอกที่ใช้แสดงถึงค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานนั่นเอง เพื่อที่จะลดค่าใช้จ่ายในส่วนของตัวทำละลายภายนอก โดยปกติแล้วจะทำโดยการเพิ่มค่าผลต่างของความเข้มข้นที่ต่ำที่สุดที่ทำให้เกิดการถ่ายโอนมวลได้ (minimum allowable composition different: ε) ซึ่งการเพิ่มค่านี้จะทำให้ใช้ตัวทำละลายภายนอกน้อยลงแต่จะส่งผลให้ค่าใช้จ่ายคงที่มากขึ้นซึ่งต้องมีการเปรียบเทียบกันระหว่างค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานที่น้อยลงกับค่าใช้จ่ายที่คงที่ที่เพิ่มขึ้นเพื่อหาโครงสร้างที่มีค่าใช้จ่ายน้อยที่สุด

3.4.2 **วิธีเชิงพีชคณิต** (An algebraic approach)

วิธีการนี้เริ่มต้นโดยการแบ่งช่วงก่อน โดยจำนวนช่วงที่แบ่งสัมพันธ์กับจำนวนของสายที่เกิดการแลกเปลี่ยนมวลกันซึ่งคำนวณได้จากสมการดังนี้ 3.21

$$N_{\text{int}} \le 2\left(N_R + N_{sp}\right) - 1 \qquad 3.21$$

เมื่อ N_{int} = จำนวนช่วง N_R = จำนวนของสายเข้มข้น N_{SP} = จำนวนของสายตัวทำละลาย

ปริมาณของสารที่ถ่ายโอนของสายเข้มข้น (i) และสายเจือจาง (j) ในช่วงที่ k คำนวณได้ดังสมการ 3.22 และ 3.23

$$W_{i,k}^{R} = G_i\left(y_{k-1} - y_k\right) \qquad 3.22$$

$$W_{j,k}^{S} = L_{j}^{C}\left(x_{j,k-1} - x_{j,k}\right) \quad 3.23$$

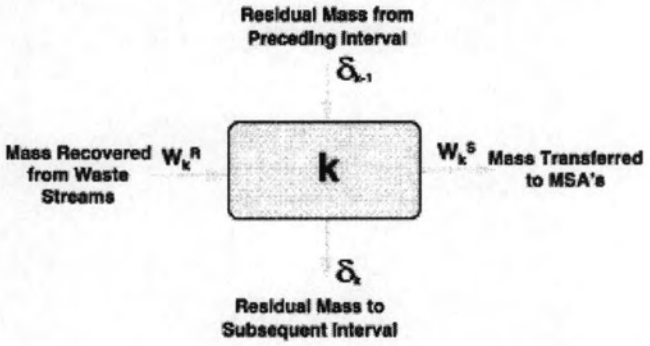
ปริมาณของสารที่ถูกถ่ายโอนทั้งหมดในช่วง k ของสายเข้มข้นเท่ากับผลรวมของมวลที่แต่ละสายถ่ายโอนในช่วง k รวมกันดังสมการ

$$W_{k}^{R} = \sum_{i} W_{i,k}^{R} \quad 3.24$$

ในทำนองเดียวกันปริมารสารที่สายเจือจางรับทั้งหมดในช่วง k คำนวณได้ดังสมการ

$$W_{k}^{S} = \sum_{j} W_{j,k}^{S} \quad 3.25$$

เมื่อสร้างสมการสมดุลมวลในแต่ละช่วงจะได้ดังสมการ

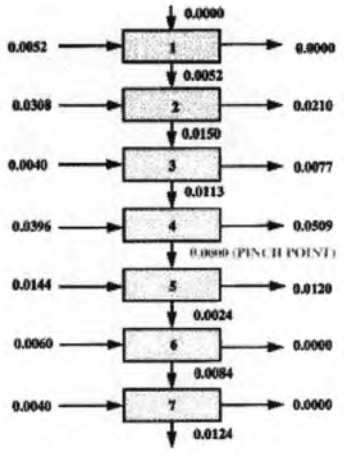


รูปที่ 3.4 การทำสมดุลมวลของแต่ละช่วง (อ้างอิง: pollution prevention through process integration systematic design tool โดย Mahmoud M. El-Halwagi)

สมดุลมวลขององค์ประกอบ

$$W_{k}^{R} + \delta_{k-1} - W_{k}^{S} = \delta_{k} \quad 3.26$$

พิจารณาการทำสมดุลมวลเมื่อพิจารณาช่วงที่แบ่งออกมาต่อกัน



รูปที่ 3.5 แผนภาพการถ่ายโอนมวลแบบข่วงต่อกันของระบบ dephenolization (อ้างอิง: pollution prevention through process integration systematic design tool โดย Mahmoud M. El-Halwagi)

ขั้นต่อมาทำการจับคู่กันของสายที่จะมาแลกเปลี่ยนมวลกันโดยที่การจับคู่จะถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนคือที่เหนือจุดพินช์และใต้จุดพินช์

เหนือจุดพินช์ $$\frac{L_j}{m_j} \geq G_i$$ 3.27

ใต้จุดพินช์ $$\frac{L_j}{m_j} \leq G_i$$ 3.28

3.4.3 **วิธีการเชิงคณิตศาสตร์** (A mathematical programming approach)

วิธีการนี้เป็นการเปลี่ยนปัญหาการสังเคราะห์ข่ายงานให้เป็นปัญหาคณิตศาสตร์และหาคำตอบเหมือนปัญหาทางคณิตศาสตร์ทั่วไป โดยตั้งวัตถุประสงค์ของปัญหาให้เป็นการหาค่าดำเนินการของตัวทำละลาย (Operating cost) ที่ต่ำที่สุดที่ใช้กำจัดสารพิษออกจากสายน้ำทิ้ง โดยทั่วไปแล้วค่าใช้จ่ายดำเนินงานคิดจากค่าใช้จ่ายต่อปีต่ออัตราการไหลของตัวทำละลายที่ใช้ไป ดังนั้นสมการวัตถุประสงค์ต้องอยู่ในรูปของสมการสมดุลมวลและมีอัตราการไหลของตัวทำละลายภายนอกอยู่ในสมการด้วย เพื่อหาอัตราการไหลที่เหมาะสม

3.4.4 **การสร้างข่ายงานขนาดใหญ่** (A superstructure approach)

วิธีการนี้เป็นการเปลี่ยนปัญหาการสังเคราะห์ข่ายงานแลกเปลี่ยนมวลให้เป็นปัญหาทางคณิตศาสตร์วิธีหนึ่ง โดยมีแนวคิดในการสร้างแบบจำลองที่มีการพิจารณาความเป็นไปได้ทั้งหมดของการจับคู่กันแลกเปลี่ยนมวล โดยสมการวัตถุประสงค์ของปัญหา คือการหาค่าใช้จ่ายรวมของค่าดำเนินงาน (Operating cost) และ ค่าใช้จ่ายคงที่ (Capital cost) ที่ต่ำที่สุด โดยค่าใช้จ่ายในส่วนของค่าดำเนินงานจะคิดเทียบจากอัตราการไหลของตัวทำละลายและค่าใช้จ่ายคงที่คำนวณจากจำนวนและขนาดของหน่วยแลกเปลี่ยนมวล

3.5 **การสร้างแบบจำลอง** (Model formulation)

แบบจำลองของข่ายงานที่สร้างขึ้นเป็นแบบจำลองที่ไม่เชิงเส้นและมีรูปแบบเป็นโครงสร้างขนาดใหญ่ที่พิจารณาทุกความเป็นไปได้ของการจับคู่ และแบ่งโครงสร้างเป็นแบบขั้น โดยหน่วยแลกเปลี่ยนมวลที่ใช้มีอยู่สองแบบคือ หอสกัดแบบต่อเนื่อง (Packed column) และหอสกัดแบบขั้น (Tray column) โดยตัวแปรและดัชนีที่เกี่ยวข้องแสดงดังนี้

3.5.1 **ดัชนี** (indices)

i = สายของเสีย (rich process stream)

j = สายตัวทำละลาย (lean process stream or mass separation agent: MSA)

k = ดัชนีที่แสดงจำนวนขั้นตอน (index for stage, 1,...,N_S, and composition location, 1...,N_{S+1})

n = องค์ประกอบที่ถ่ายแลกเปลี่ยนมวลได้ (transferable component)

p = ดัชนีที่แสดงสารที่ใช้ในหน่วยการเอามาใช้ใหม่ (index for regenerating agents)

RA = p คือ ดัชนีที่แสดงสารที่ใช้ในหน่วยการนำกลับมาใช้ใหม่ ({p|p is a regenerating agent})

$LP_{(reg)}$ = ดัชนีที่บอกอัตราการไหลของหน่วยที่เกิดการแลกเปลี่ยนมวลของหน่วยที่นำกลับมาใช้ใหม่ ({j|j is a possible match between MSA and regenerating agent})

3.5.2 **ชุดตัวแปร** (Sets)

RP = สายของเสีย i เมื่อ i คือสายของเสียในกระบวนการ โดย i=1,...,N_R

LP = สายตัวทำละลาย j เมื่อ j คือ ตัวทำละลายที่ใช้สกัด (MSA) โดย j=1... NL

$LP^{(t)}$ = สายตัวทำละลายที่ใช้ในหอสกัดแบบขั้น

$LP^{(h)}$ = สายตัวทำละลายที่ใช้ในหอสกัดแบบต่อเนื่อง

TC = สารที่เกิดการถ่ายโอนมวล n เมื่อ n คือสารที่ถ่ายโอนได้โดย n=1... N_C

ST = ขั้นของการจัดเรียง k เมื่อ k คือขั้นตอนที่พิจารณา โดย k=1... NS

3.5.3 **พารามิเตอร์** (Parameters)

AC_j = ค่าดำเนินงานต่อปีของสายตัวทำละลาย j

$AC_{ij}^{(t)}$ = ค่าใช้จ่ายคงที่ประจำปีของการสร้างหอสกัดแบบขั้น

$AC_{ij}^{(h)}$ = ค่าใช้จ่ายคงที่ประจำปีของการสร้างหอสกัดแบบต่อเนื่อง

$b_{ij}^{(n)}$ = เส้นตัดแกนของกราฟที่สภาวะสมดุลเมื่อสาย i จับคู่กับสาย j

G_i = อัตราการไหลของสายของเสีย

K_ya = สัมประสิทธิ์รวมของการถ่ายโอนมวล

$L_j^{(up)}$ = อัตราการไหลสูงสุดของสายที่มารับมวล

$m_{ij}^{(n)}$ = ความชันของเส้นที่แสดงความสัมพันธ์ที่สภาวะสมดุลของสาย i ที่จับคู่กับสาย j

S = พื้นที่หน้าตัดของหอสกัด (cross-sectional area of an exchange unit)

U, Γ = ค่าบวกที่มีค่ามาก (large positive values)

$x_j^{n(in)}$ = สัดส่วนโดยมวลขององค์ประกอบ n ที่ทางเข้าของสายที่จะมารับมวล

$x_j^{n(out)}$ = สัดส่วนโดยมวลขององค์ประกอบ n ที่ทางออกของสายที่จะมารับมวล

$x_j^{n(up)}$ = สัดส่วนโดยมวลขององค์ประกอบ n ที่มากที่สุด

$y_j^{n(in)}$ = สัดส่วนโดยมวลขององค์ประกอบ n ของสายของเสียที่ทางเข้า

$y_j^{n(out)}$ = สัดส่วนโดยมวลขององค์ประกอบ n ของสายของเสียที่ทางออก

$y_j^{n(up)}$ = สัดส่วนโดยมวลขององค์ประกอบ n ของสายของเสียที่มากที่สุด

ε_{ij}^n = แรงขับดันที่น้อยที่สุดที่ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนมวลได้

AC_p = ค่าดำเนินงานต่อปีของสายที่ใช้ในการทำให้ตัวทำละลายนำกลับมาใช้ใหม่ได้

$AC_{pj}^{(t)}$ = ค่าดำเนินงานต่อปีของสายที่ใช้ในการทำให้ตัวทำละลายนำกลับมาใช้ใหม่ได้เมื่อใช้หน่วยแลกเปลี่ยนมวลเป็นหอสกัดแบบขั้น

$AC_{pj}^{(h)}$ = ค่าดำเนินงานต่อปีของสายที่ใช้ในการทำให้ตัวทำละลายนำกลับมาใช้ใหม่ได้เมื่อใช้หน่วยแลกเปลี่ยนมวลเป็นหอแยกแบบต่อเนื่อง

$m_{pj}^{(n)}$ = ความชันของเส้นที่แสดงความสัมพันธ์ที่สภาวะสมดุลของหน่วยแลกเปลี่ยนมวลของระบบนำตัวทำละลายกลับมาใช้ใหม่เมื่อหน่วยนำกลับคือ Hp–Sj

$Z_p^{n(in)}$ = สัดส่วนโดยมวลของสายที่เข้าหน่วยแลกเปลี่ยนมวลเพื่อที่จะนำตัวทำละลายกลับมาใช้ใหม่

$Z_p^{n(out)}$ = สัดส่วนโดยมวลของสายที่ออกจากหน่วยแลกเปลี่ยนมวลเพื่อที่จะนำตัวทำละลายกลับมาใช้ใหม่

$Z_p^{n(up)}$ = สัดส่วนโดยมวลของสายที่ออกจากหน่วยแลกเปลี่ยนมวลเพื่อที่จะนำตัวทำละลายกลับมาใช้ใหม่ที่มีค่ามากที่สุด

ε_{pj}^{n} = แรงขับดันที่น้อยที่สุดที่ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนมวลได้ของหน่วยที่ใช้ในการนำตัวทำละลายกลับมาใช้

3.5.4 **ตัวแปร** (Variables)

N_{ijk} = จำนวนชั้นของหอสกัดแบบชั้นที่สาย i จับคู่กับสาย j ที่ขั้นที่ k

H_{ijk} = ความสูงของหอสกัดแบบต่อเนื่องที่สาย i จับคู่กับสาย j ที่ขั้นที่ k

HTU = ความสูงของหน่วยแลกเปลี่ยนมวลที่คำนวณอ้างอิงสายของเสียที่สาย i จับคู่กับสาย j ที่ขั้นที่ k

NTU = จำนวนหน่วยแลกเปลี่ยนมวลเมื่อคำนวณอ้างอิงสายของเสีย

g_{ijk} = อัตราการไหลของสายของเสียที่หน่วยแลกเปลี่ยนมวลของสายที่ i กับ j ที่ขั้นที่ k

l_{ijk} = อัตราการไหลของสายตัวทำละลายที่หน่วยแลกเปลี่ยนมวลของสายที่ i กับ j ที่ขั้นที่ k

L_j = อัตราการไหลของสายตัวทำละลาย j

M_{ijk}^{n} = มวลที่เกิดการแลกเปลี่ยนระหว่างสายของเสียและสายตัวทำละลายที่สาย i จับคู่กับสาย j ที่ขั้นที่ k

sx_{ijk}^{n} = สัดส่วนโดยมวลขององค์ประกอบที่ n ที่ทางออกของหน่วยแลกเปลี่ยนมวลที่สาย i จับคู่กับสาย j ที่ขั้นที่ k

sy_{ijk}^{n} = สัดส่วนโดยมวลขององค์ประกอบที่ n ที่ทางออกของหน่วยแลกเปลี่ยนมวลที่สาย i จับคู่กับสาย j ที่ขั้นที่ k

x_{jk}^{n} = สัดส่วนโดยมวลขององค์ประกอบที่ n ที่จุดสิ้นสุดของขั้นตอนที่ k ของสายตัวทำละลาย

y_{ik}^{n} = สัดส่วนโดยมวลขององค์ประกอบที่ n ที่จุดสิ้นสุดของขั้นตอนที่ k ของสายของเสีย

z_{ijk} = ตัวแปรบอกว่ามีหน่วยแลกเปลี่ยนมวลหรือไม่เท่ากับ 1 เมื่อเกิดการจับคู่ระหว่าง (i, j) ที่ขั้นที่ k และเท่ากับ 0 ถ้าไม่เกิดการจับคู่

N_p^j = จำนวนชั้นของหอสกัดแบบชั้นของหน่วยนำตัวทำละลาย j กลับมาใช้ใหม่

H_p^j = ความสูงของหอสกัดแบบต่อเนื่องที่นำตัวทำละลายที่ j กลับมาใช้ใหม่

Q_p = อัตราการไหลของสารที่รับมวลจากตัวทำละลายเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่

z_p^j = ตัวแปรที่บอกว่ามีหน่วยแลกเปลี่ยนมวลหรือไม่ของหน่วยที่นำตัวทำละลายกลับมาใช้ใหม่ มีค่าเป็น 1 เมื่อสายที่ใช้ในหน่วยนำกลับมาใช้ใหม่ p จับคู่กับสายตัวทำละลาย j เท่ากับ 0 เมื่อไม่มีการจับคู่

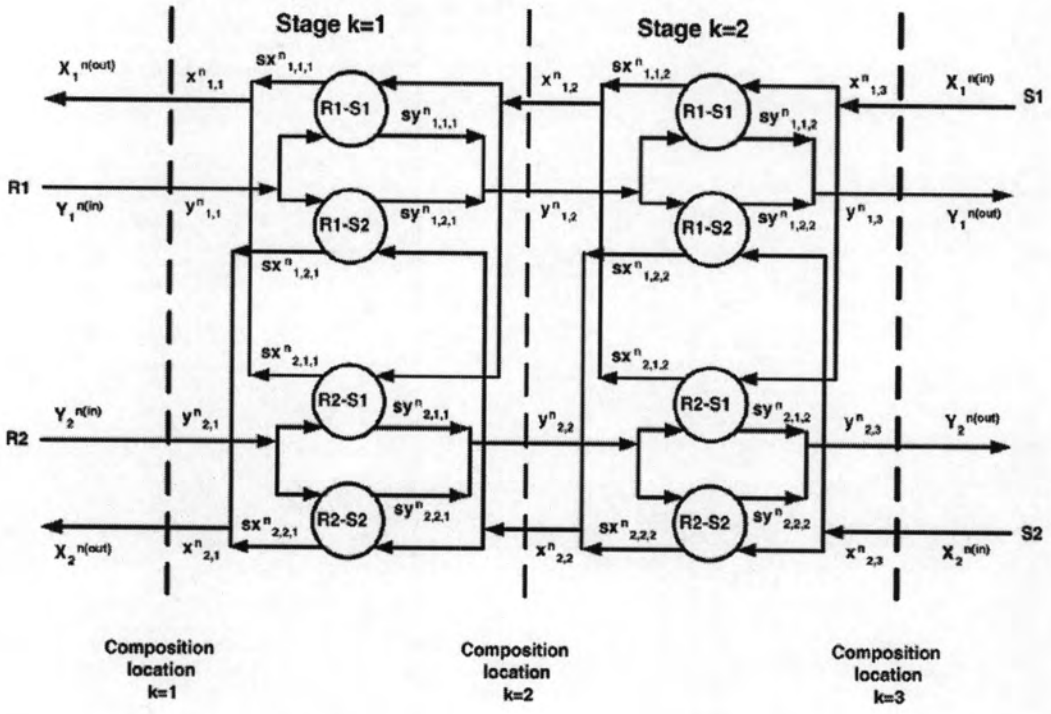
เมื่อพิจารณารูปที่ 3.6 ที่แสดงข่ายงานแลกเปลี่ยนมวลขนาดใหญ่ซึ่งสามารถสร้างแบบจำลองได้ดังนี้

3.5.5 **สมการสมดุลมวลของสารที่เกิดการถ่ายโอนมวลรอบข่ายงาน** (Overall mass balance for transferable component over the whole networks)

การทำสมดุลมวลรอบข่ายงานทั้งหมดนั้นเป็นเงื่อนไขเพียงพอของคำตอบที่ทำให้เกิดการถ่ายโอนมวลได้ตามเป้าหมายที่กำหนด โดยในการทำสมดุลมวลจะต้องคิดสายทุกสายที่องค์ประกอบ n เกิดการถ่ายโอน และปริมาณมวลสารที่ n ที่ถ่ายโอนออกจากสายของเสียทั้งหมดจะต้องเท่ากับปริมาณของสารทั้งหมดที่สายเจือจางทุกสายรวมกัน สมการที่แสดงการทำสมดุลมวลรอบข่ายงานแสดงได้ดังนี้

$$(y_{i1}^n - y_{i,N_{s+1}}^n)G_i = \sum_{\forall k \in ST} \sum_{\forall i \in RP} M_{ijk}^n \qquad \forall i \in RP, n \in TC \tag{3.29}$$

$$(x_{i1}^n - x_{i,N_{s+1}}^n)L_i = \sum_{\forall k \in ST} \sum_{\forall i \in LP} M_{ijk}^n \qquad \forall j \in LP, n \in TC \tag{3.30}$$



รูปที่ 3.6 แสดงข่ายงานขนาดใหญ่ที่แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน (อ้างอิง: Simultaneous synthesis of mass exchanger networks for waste minimization)

3.5.6 **สมการสมดุลมวลรอบขั้นตอน** (Mass balance in each stage)

สมดุลมวลแต่ละขั้นตอน

$$(y_{ik}^{n} - y_{i,k+1}^{n})G_i = \sum_{\forall j \in LP} M_{ijk}^{n} \qquad \forall i \in RP, k \in ST, n \in TC \tag{3.31}$$

$$(x_{jk}^{n} - y_{j,k+1}^{n})L_j = \sum_{\forall i \in RP} M_{ijk}^{n} \qquad \forall j \in LP, k \in ST, n \in TC \tag{3.32}$$

$$G_i = \sum_{\forall j \in LP} g_{ijk} \qquad \forall i \in RP, k \in ST \tag{3.33}$$

$$L_j = \sum_{\forall i \in RP} l_{ijk} \qquad \forall j \in LP, k \in ST \tag{3.34}$$

3.5.7 **สมการสมดุลมวลรอบหน่วยแลกเปลี่ยนมวล** (Mass balance in each exchange unit)

ในการหาขนาดของหน่วยแลกเปลี่ยนมวล อัตราการไหลที่ไหลผ่านและ ปริมาณสารที่เกิดการถ่ายโอน นั้นจำเป็นต้องมีการทำสมดุลมวลรอบหน่วยแลกเปลี่ยนมวลก่อน โดยกำหนดให้อัตราการไหลของสายของเสียและสายเจือจางที่ไหลผ่านหน่วยแลกเปลี่ยนมวลเท่ากับ g_{ijk} และ l_{ijk} ตามลำดับและมีองค์ประกอบที่ทางออกหลังจากการถ่ายโอนมวลแล้วเท่ากับ sy_{ijk}^{n} และ sx_{ijk}^{n} ตามลำดับ สมการสมดุลมวลรอบหน่วยแลกเปลี่ยนมวลแสดงได้ดังนี้

$$g_{ijk}(y_{ik}^{n} - sy_{ijk}^{n}) = M_{ijk}^{n} \qquad \forall i \in RP, j \in LP, k \in ST, n \in TC \qquad 3.35$$

$$l_{ijk}(sx_{ik}^{n} - x_{j,k+1}^{n}) = M_{ijk}^{n} \qquad \forall i \in RP, j \in LP, k \in ST, n \in TC \qquad 3.36$$

3.5.8 **การกำหนดตัวแปรที่ทางเข้าและทางออก** (Assignment of superstructure inlet outlet compositions)

$$Y_{i}^{n(in)} = y_{i1}^{n} \qquad Y_{i}^{n(out)} = y_{i,N_{S+1}}^{n} \qquad \forall i \in RP, n \in TC \qquad 3.37$$

$$X_{j}^{n(in)} = x_{j,N_{S+1}}^{n} \qquad X_{j}^{n(out)} = x_{j1}^{n} \qquad \forall j \in LP, n \in TC \qquad 3.38$$

3.5.9 **ขอบเขตของการแลกเปลี่ยนมวลที่เกิดขึ้นได้จริง** (Feasibility of the transferable component)

เนื่องจากในการหาค่าต่ำที่สุดเชิงสถิติจะต้องมีการสุ่มค่าตัวแปรเพื่อใช้ในการคำนวณค่าในแบบจำลองซึ่งค่าที่สุ่มมาอาจเป็นค่าที่ไม่สอดคล้องกับความเป็นจริง เช่น สัดส่วนโดยมวลขององค์ประกอบที่ทางออกของสายของเสียมีค่ามากกว่าที่ทางเข้า เป็นต้น ดังนั้นเพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าวจึงต้องมีเงื่อนไขนี้เพื่อทำให้สัดส่วนโดยมวลของแต่ละสายมีการเพิ่มหรือลดลงในทิศทางเดียว (Monotonic)

$$y_{ik}^{n} \geq y_{i,k+1}^{n} \qquad \forall \mathrm{i} \in \mathrm{RP}, \mathrm{k} \in \mathrm{ST}, \mathrm{n} \in \mathrm{TC}$$

$$\mathrm{x}_{\mathrm{jk}}^{\mathrm{n}} \geq x_{j,k+1}^{n} \qquad \forall j \in \mathrm{LP}, \mathrm{k} \in \mathrm{ST}, \mathrm{n} \in \mathrm{TC} \qquad 3.39$$

3.5.10 **เงื่อนไขตรรกศาสตร์** (Logical constraints)

เงื่อนไขตรรกศาสตร์และการใช้ตัวแปรตรรกศาสตร์ z_{ijk} คือตัวแปรที่บอกถึงการจับคู่ว่าเกิดขึ้นจริงหรือไม่ โดยให้ U เป็นเลขบวกที่มีค่ามาก เมื่อพิจารณาสมการจะพบว่าถ้าไม่เกิดการจับคู่กันตัวแปร z_{ijk} จะเป็น 0 ซึ่งการทำให้สมการนี้เป็นจริง M ต้องเป็น 0 ด้วย แสดงว่าไม่มีการถ่ายโอนมวลที่หน่วยนั้นแต่ถ้า z_{ijk} เป็น 1 แล้ว M จะมีค่าเท่าไรก็ได้

$$M_{ijk}^{n} - Uz_{ijk} \leq 0 \qquad 3.40$$

$$i \in \mathrm{RP}, \mathrm{j} \in \mathrm{LP}, \mathrm{k} \in \mathrm{ST}, \mathrm{n} \in \mathrm{TC}, \mathrm{z_{ijk}} \in \{0,1\}$$

3.5.11 **เงื่อนไขความเป็นไปได้ของความสัมพันธ์ที่สภาวะสมดุล** (Feasibility constraints of the equilibrium relationships)

เงื่อนไขความเป็นไปได้ที่สภาวะสมดุลเป็นเงื่อนไขที่ทำให้แน่ใจได้ว่าการแลกเปลี่ยนมวลสามารถเกิดขึ้นได้จริง ซึ่งค่าของเงื่อนไขนี้แสดงถึงแรงขับดัน (Driving force) ในการแลกเปลี่ยนมวลซึ่งต้องมีค่าเป็นบวกจึงจะเกิดการถ่ายโอนมวล จากอสมการจะเห็นว่า ถ้าเกิดการจับคู่ตัวแปรตรรกศาสตร์ z จะมีค่าเป็น 1 สมการแรงขับดันจึงต้องมีค่าเป็นบวกเพื่อสมการเป็นจริง แต่ถ้าตัวแปรตรรกศาสตร์มีค่าเท่ากับ 0 คือไม่เกิดการจับคู่ ไม่ว่าแรงขับดันจะเป็นเท่าไรสมการนี้ก็ยังเป็นจริงนั่นเอง ดังนั้นการมีสมการนี้จะทำให้คำตอบที่ได้ถูกต้องและสอดคล้องกับหลักการทางเทอร์โมไดนามิกส์ด้วย

$$y_{ik}^{n} - m_{ij}^{n}(sx_{ijk}^{n} + \varepsilon_{ij}^{n}) - b_{ij}^{n} + \Gamma(1 - z_{ijk}) \geq 0 \qquad \forall i \in RP, j \in RP, k \in ST, n \in TC \qquad 3.41$$

$$sy_{ik}^{n} - m_{ij}^{n}(x_{j,k+1}^{n} + \varepsilon_{ij}^{n}) - b_{ij}^{n} + \Gamma(1 - z_{ijk}) \geq 0 \qquad \forall i \in RP, j \in RP, k \in ST, n \in TC \qquad 3.42$$

3.5.12 **ขอบเขตของตัวแปร** (Bounds on variables)

เงื่อนไขนี้ใช้ในการกำหนดขอบเขตของตัวแปรที่ต้องการหาคำตอบ หรือ เป็นข้อจำกัดต่างๆของการออกแบบ

$$L_j \leq L_j^{(up)} \quad x_{j1}^{n} \leq X_j^{n(up)} \qquad \forall \mathrm{j} \in \mathrm{LP}, \mathrm{n} \in \mathrm{TC} \qquad 3.43$$

$$\mathrm{y}_{\mathrm{i,N_{s+1}}}^{\mathrm{n}} \leq Y_i^{n(up)} \quad \forall \mathrm{i} \in \mathrm{RP}, \mathrm{k} \in \mathrm{ST}$$

3.5.13 **เงื่อนไขทางเลือก** (Optional constraints)

นอกจากเงื่อนไขจำเป็นที่กล่าวมาแล้ว เช่น เงื่อนไขที่สภาวะสมดุล เงื่อนไขของขอบเขตตัวแปรแล้ว บางครั้งในการออกแบบอาจมีข้อจำกัดอื่นเพิ่มเติม เพื่อให้คำตอบที่ได้สอดคล้องกับข้อจำกัดที่เพิ่มเติมจึงมีการเพิ่มเงื่อนไขในการหาค่าต่ำสุดเข้ามาอีกเช่น เงื่อนไขที่ป้องกันการแยกไหล เงื่อนไขจำนวนหน่วยแลกเปลี่ยนมวล เป็นต้น

- เงื่อนไขที่ป้องกันการแยกไหลโดยที่ไม่มีหน่วยแลกเปลี่ยนมวล

$$\sum_{\forall i \in RP} z_{ijk} \leq 1 \quad \forall \mathrm{j} \in \mathrm{LP}, \mathrm{k} \in \mathrm{ST} \tag{3.44}$$

$$\sum_{\forall j \in LP} z_{ijk} \leq 1 \quad \forall \mathrm{i} \in \mathrm{RP}, \mathrm{k} \in \mathrm{ST}$$

- เงื่อนไขจำนวนหน่วยแลกเปลี่ยนที่มากที่สุดที่ยอมให้มีในข่ายงาน

$$\sum_{\forall i \in RP} \sum_{\forall j \in LP} \sum_{\forall k \in ST} z_{ijk} \leq MEU \tag{3.45}$$

3.5.14 **การคำนวณขนาดของหน่วยแลกเปลี่ยนมวล** (Sizing equations for mass transfer units)

หน่วยแลกเปลี่ยนมวลที่พิจารณาในการสร้างข่ายงานแบ่งเป็นสองแบบคือหอสกัดแบบขั้นและ แบบต่อเนื่องซึ่งการคำนวณขนาดแสดงได้ดังสมการ

- การคำนวณจำนวนขั้นของหอสกัดโดยใช้สมการ Kremser's equation:

$$N_{ijk}^{n} = \frac{\log \text{ mean}[y_{ik}^{n} - sy_{ijk}^{n}, sy_{ijk}^{n^*} - y_{ij,k+1}^{n^*}]}{\log \text{ mean}[y_{ik}^{n} - sy_{ijk}^{n^*}, sy_{ijk}^{n} - y_{ij,k+1}^{n^*}]}$$

or

$$N_{ijk}^{n} = \frac{y_{ik}^{n} - sy_{ijk}^{n}}{y_{ik}^{n} - sy_{ijk}^{n^*}} = \frac{y_{ik}^{n} - sy_{ijk}^{n}}{sy_{ijk}^{n} - y_{ij,k+1}^{n^*}} \tag{3.46}$$

- การคำนวณความสูงของหอสกัดแบบต่อเนื่อง

$$HTU_{ijk}^{n}=\frac{g_{ijk}}{K_y aS},\qquad NTU_{ijk}^{n}=\frac{y_{ik}^{n}-sy_{ijk}^{n}}{\log\ \text{mean}[y_{ik}^{n}-sy_{ijk}^{n*},sy_{ijk}^{n}-y_{ij,k+1}^{n*}]}$$

$$H_{ijk}^{n}=HTU_{ijk}^{n}\times NTU_{ijk}^{n}=\frac{M_{ijk}^{n}}{K_y aS}\times\frac{1}{\log\ \text{mean}[y_{ik}^{n}-sy_{ijk}^{n*},sy_{ijk}^{n}-y_{ij,k+1}^{n*}]} \qquad 3.47$$

3.5.15 **สมการวัตถุประสงค์** (Objective function)

สมการวัตถุประสงค์ของข่ายงานนี้แบ่งออกเป็นสองส่วน คือ ค่าดำเนินงานประจำปี (Operating cost) ซึ่งคิดเทียบต่ออัตราการไหลของตัวทำละลายต่อปี และค่าใช้จ่ายคงที่ประจำปี (Capital cost) ซึ่งคิดจากค่าใช้จ่ายในการสร้างหน่วยแลกเปลี่ยนมวล

$$\min_{x\in\Omega} TAC=\sum_{\forall j\in LP}\left(AC_j\right)\left(L_j\right)+\sum_{\forall j\in RP}\sum_{\forall j\in LP'''}\sum_{\forall k\in ST}\left(AC_{ij}^{(t)}\right)\left(\max_{\forall n\in TC} N_{ijk}^{n}\right)$$
$$+\sum_{\forall i\in RP}\sum_{\forall j\in LP}\sum_{\forall k\in ST}\left(AC_{ij}^{(h)}\right)\left(\max_{\forall n\in TC} H_{ijk}^{n}\right) \qquad 3.48$$

-กรณีข่ายงานที่มีหน่วยที่ใช้บำบัดตัวทำละลายให้สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้

3.5.16 **การทำสมดุลมวลของสารที่เกิดการถ่ายโอนมวลที่หน่วยแลกเปลี่ยนมวล** (Mass balance for the transferable component between regenerating agent and lean stream)

$$\sum_{\forall p\in RA}\left(z_p^{n(out)}-z_p^{n(in)}\right)Q_p=\sum_{\forall i\in RP}\sum_{\forall k\in ST}M_{ijk}^{n} \qquad 3.49$$

when

$$\forall j\in LP_{(reg)}, n\in TC$$

3.5.17 **เงื่อนไขเชิงตรรกศาสตร์** (Logical constraints)

$$(Z_p^{n(out)} - Z_p^{n(in)})Q_p - Uz_{pj} \le 0 \qquad \forall p \in RA, j \in LP_{reg}, n \in TC \qquad 3.50$$

3.5.18 **เงื่อนไขความเป็นไปได้ของสภาวะที่สมดุล** (Feasibility constraints of equilibrium relationship)

$$x_{ji}^n - m_{pj}^n (Z_p^{n(out)} - \varepsilon_{pj}^n) - b_{pj} + \Gamma(1 - z_{pj}) \ge 0 \qquad \forall p \in RA, j \in LP_{gen}, n \in TC \qquad 3.51$$

$$x_{j,N_{s+1}}^n - m_{pj}^n (Z_p^{n(in)} - \varepsilon_{pj}^n) - b_{pj} + \Gamma(1 - z_{pj}) \ge 0 \qquad \forall p \in RA, j \in LP_{gen}, n \in TC \qquad 3.52$$

3.5.19 **ขอบเขตของตัวแปร** (Bound on single regenerating agent)

$$Q_p \le Q_p^{up} \qquad \forall p \in RA \qquad 3.53$$

$$Z_p^{n(out)} \le Z_p^{n(up)} \qquad \forall p \in RA, n \in TC \qquad 3.54$$

3.5.20 **การคำนวณขนาดของหน่วยแลกเปลี่ยนมวล** (Sizing equation for regenerating units)

$$N_{pj}^n \cong z \left[\frac{\left(\begin{array}{l} \max\left(0, x_{j1}^n - x_{j,N_{s+1}}^n\right) \times \max\left(0, x_{pj}^{n(out)*} - x_{pj}^{n(in)*}\right) \times \\ \left[\max\left(0, x_{j1}^n - x_{j,N_{s+1}}^n\right) + \max\left(0, x_{pj}^{n(out)*} - x_{pj}^{n(in)*}\right)\right] + \delta \end{array} \right)}{\left(\begin{array}{l} \max\left(0, x_{j1}^n - x_{pj}^{n(out)*}\right) \times \max\left(0, x_{j,N_{s+1}}^n - x_{pj}^{n(in)*}\right) \times \\ \left[\max\left(0, x_{j1}^n - x_{pj}^{n(out)*}\right) + \max\left(0, x_{j,N_{s+1}}^n - x_{pj}^{n(in)*}\right)\right] + \delta \end{array} \right)} \right]^{1/3} \qquad 3.55$$

$$H_{pj}^n = \frac{\left(Z_p^{n(out)} - Z_p^{n(in)}\right)Q_p}{K_x a S} \times \left[\left(\begin{array}{l} \max\left(0, x_{j1}^n - x_{pj}^{n(out)*}\right) \times \max\left(0, x_{j,N_{s+1}}^n - x_{pj}^{n(in)*}\right) \times \\ \frac{1}{2}\left[\max\left(0, x_{j1}^n - x_{pj}^{n(out)*}\right) + \max\left(0, x_{j,N_{s+1}}^n - x_{pj}^{n(in)*}\right)\right] \end{array} \right) + \delta \right]^{-1/3} \qquad 3.56$$

3.5.21 สมการวัตถุประสงค์ของระบบทีมีการนำตัวทำละลายกลับมาใช้ใหม่ (Objective function for regeneration networks)

$$\min_{\{x\cup x_{(reg)}\}\in\{\Omega\cap\Omega_{(reg)}\}} TAC = \sum_{\forall j\in(LP-LP_{(reg)})}\left(AC_j\right)\left(L_j\right)+\sum_{\forall p\in RA}\left(AC_p\right)\left(Q_p\right)$$
$$+\sum_{\forall i\in RP}\sum_{\forall j\in LP^{(t)}}\sum_{\forall k\in ST}\left(AC_{ij}^{(t)}\right)\left(\max_{\forall n\in TC} N_{ijk}^{n}\right)+\sum_{\forall i\in RP}\sum_{\forall j\in LP^{(h)}}\sum_{\forall k\in ST}\left(AC_{ij}^{(t)}\right)\left(\max_{\forall n\in TC} H_{ijk}^{n}\right)$$
$$+\sum_{\forall p\in RA}\sum_{\forall j\in LP_{(reg)}^{(t)}}\left(AC_{pj}^{(t)}\right)\left(\max_{\forall n\in TC} N_{pj}^{n}\right)+\sum_{\forall p\in RA}\sum_{\forall j\in LP_{(reg)}^{(h)}}\left(AC_{pj}^{(h)}\right)\left(\max_{\forall n\in TC} H_{pj}^{n}\right)$$

3.57

3.6 ดิฟเฟอเรนเชียลอีโวลูชัน (Differential evolution)

ในการหาคำตอบของปัญหาการหาค่าต่ำสุดนั้นต้องพิจารณาปัญหาที่ต้องการหาคำตอบว่าสามารถใช้วิธีการใดได้บ้าง ซึ่งในการหาคำตอบของปัญหาการสังเคราะห์ข่ายงานนั้นมีเงื่อนไขจำนวนมากและเป็นปัญหาที่ไม่ใช่เชิงเส้นจึงใช้วิธีดิฟเฟอเรนเชียลอีโวลูชันเพื่อหาคำตอบ โดยวิธีนี้เป็นวิธีการหาคำตอบโดยใช้วิธีทางสถิติและยังสามารถเขียนแบบจำลองที่ประกอบด้วยสมการวัตถุประสงค์และเงื่อนไขเข้าไปได้ซึ่งเหมาะกับปัญหาการหาข่ายงาน นอกจากนี้ยังมีจุดเด่นที่เหนือกว่าวิธีอื่นอยู่ 3 ประการคือ สามารถหาคำตอบที่เป็นค่าต่ำที่สุดได้ (Global minimum) ใช้เวลาในการเข้าสู่คำตอบได้เร็ว และใช้พารามิเตอร์ในการควบคุมน้อย วิธีการหาคำตอบของอัลกอริทึมนี้เหมือนกับวิธีเจเนติกอัลกอริทึม (Genetic algorithm) คือมีกระบวนการมิวเตชัน (mutation) ครอสโอเวอร์ (Crossover) และ การคัดเลือก (Selection)

3.6.1 แนวคิดและความเป็นมาของวิธีดิฟเฟอเรนเชียลอีโวลูชันนารี (Differential evolutionary algorithm)

วิธีการดิฟเฟอเรนเชียลอีโวลูชันนารีนำเสนอโดย สตรอนและไพรซ์ (Stron and Price) ซึ่งเป็นวิธีที่เลียนแบบวิธีการทางธรรมชาติ (Evolutionary algorithm) ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีทางสถิติที่ใช้ได้ดีและมีเสถียรภาพ (Robust) ในการหาคำตอบ ซึ่งขั้นตอนการดำเนินงานแสดงเป็นแผนผังได้ดังรูปที่ 3.7 โดยขั้นตอนแรกเริ่มจากการสุ่มค่าของชุดตัวแปรมา N เวกเตอร์หลังจากนั้นทำการรบกวนเพื่อให้ตัวแปรเปลี่ยนแปลงค่า (Mutation) เพื่อให้ได้เวกเตอร์ใหม่ที่ชุดของตัวแปรภายในเวกเตอร์บางตัวหรือทุกตัวมีการเปลี่ยนแปลงค่า หลังจากนั้นสร้างเวกเตอร์ Ui (trial vector) โดยวิธีการสร้างเวกเตอร์นี้ทำได้หลายวิธี เช่น DE/rand/1/bin ซึ่งวิธีนี้เริ่มจากการเลือกชุดตัวแปรมา 3 ชุด หลังจากนั้นสร้างเวกเตอร์รบกวน (Perturbed vector) Vi ขึ้นมาดังสมการ $V_i = X_{r3} + F\left(X_{r2} - X_{r1}\right)$ เมื่อ Xr1;Xr2 และ Xr3 คือ ตัวแปรที่อยู่ในชุดคำตอบที่เลือกขึ้นมา โดยที่ $r1 \neq r2 \neq r3$ และ $F \in [0; 1+]$ เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมของวิธีนี้ หลังจากนั้นสร้างเวกเตอร์รบกวนจากสมการดังนี้

$$V_i = \frac{X_{r1} + X_{r2} + X_{r3}}{3} + (p_2 - p_1)(X_{1r} - X_{2r}) + (p_3 - p_2)(X_{r2} - X_{r3}) + (p_1 - p_3)(X_{r3} - X_{r1}) \quad 3.58$$

$$p_1 = \frac{|f(X_{r1})|}{|f(X_{r1})| + |f(X_{r2})| + |f(X_{r3})|} \quad 3.59$$

$$p_2 = \frac{|f(X_{r2})|}{|f(X_{r1})| + |f(X_{r2})| + |f(X_{r3})|} \quad 3.60$$

$$p_3 = \frac{|f(X_{r3})|}{|f(X_{r1})| + |f(X_{r2})| + |f(X_{r3})|} \quad 3.61$$

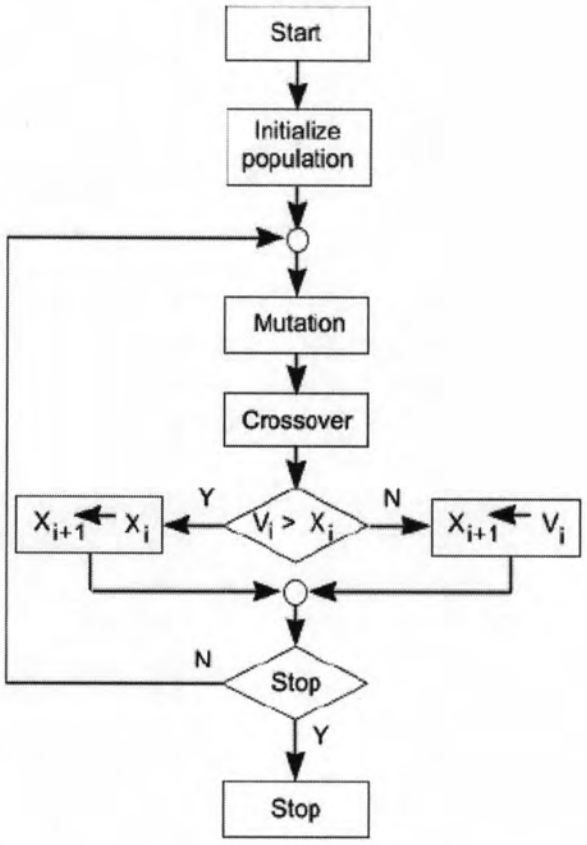
นำเวกเตอร์รบกวน $V_i(v_{i,1}, v_{i,2}, \ldots v_{i,n})$ และเวกเตอร์พ่อแม่ $X_i(x_{i,1}, x_{i,2}, \ldots x_{i,n})$ มาครอสโอเวอร์กันซึ่งเวกเตอร์ที่ได้ คือเวกเตอร์ $U_i(u_{i,1}, u_{i,2}, \ldots u_{i,n})$ โดยการครอสโอเวอร์ใช้หลักการดังนี้

$$\begin{aligned} &u_{i,j} = v_{i,j} \quad \text{if} \quad random[0,1) \le CR \cup j = random[1,n); \\ &or \\ &u_{i,j} = x_{i,j}, \quad otherwise \end{aligned} \quad 3.62$$

เมื่อ CR [0, 1] คือพารามิเตอร์ควบคุมในการครอสโอเวอร์ เมื่อได้เวกเตอร์ U แล้วนำเวกเตอร์ที่ได้ไปเปรียบเทียบกับเวกเตอร์พ่อแม่ ถ้าเวกเตอร์ที่สร้างขึ้นมาดีกว่าเวกเตอร์ที่สร้างมาจะใช้แทนที่เวกเตอร์พ่อแม่เลย ซึ่งวิธีการแสดงได้ดังสมการ

$$\begin{aligned} &X_{i+1} = U_i \quad \text{if} \quad f(U_1) \le f(X_1) \\ &or \\ &X_{i+1} = X_i \quad Otherwise \end{aligned} \quad 3.63$$

หลังจากนั้นทำต่อไปเรื่อยๆ จนกว่าเงื่อนไขหยุดอัลกอริทึ่มจะเป็นจริง



รูปที่ 3.7 แผนผังการทำงานของอัลกอริทึม DE

3.6.2 **การจัดการเงื่อนไข** (The constrain handling scheme)

3.6.2.1. **การจัดการเงื่อนไขที่มีตัวแปรแบบจำนวนเต็มและตัวแปรที่ไม่ต่อเนื่อง** (Handling integer and discrete variables)

วิธีดิฟเฟอเรนเชียลอีโวลูชันนั้นปกติแล้วไม่สามารถจัดการเงื่อนไขที่ที่มีตัวแปรที่เป็นจำนวนเต็มหรือไม่ต่อเนื่องได้จึงได้มีการปรับปรุงอัลกอริทึมให้สามารถจัดการกับตัวแปรที่ไม่ต่อเนื่องได้โดยการตัดเศษส่วนที่เป็นทศนิยมออกไปแล้วใช้ตัวแปรนี้ในการคำนวณค่าในแบบจำลองซึ่งการปัดค่าทำได้ดังนี้

$$x' = (\text{int})x \qquad 3.64$$

ซึ่งถ้าตัวแปรที่ใช้เป็นตัวแปรแบบไม่ต่อเนื่องอยู่แล้วเมื่อใช้วิธีนี้ตัวแปรดังกล่าวก็จะยังเป็นตัวแปรแบบไม่ต่อเนื่องเหมือนเดิมทำให้ตัวแปรที่ใช้ไม่เปลี่ยนแปลง

3.6.2.2. **การจัดการเงื่อนไขที่เป็นขอบเขต** (Handling boundary constraints)

ปัญหาที่สำคัญปัญหาหนึ่งคือ ต้องทำให้ตัวแปรที่สุ่มมีค่าอยู่ในช่วงที่กำหนดโดยเขียนได้ดังสมการ

$$\begin{aligned} & x' = x_i^{(L)} \quad if \quad x < x_i^{(L)} \\ & or \\ & x' = x_i^{(L)} \quad if \quad x_i^{(L)} \le x \le x_i^{(U)} \\ & or \\ & x' = x_i^{(U)} \quad if \quad x > x_i^{(U)} ; \end{aligned} \tag{3.65}$$

เมื่อ $x_i^{(L)}$ และ $x_i^{(U)}$ คือ ขอบล่างและขอบบนของตัวแปรตามลำดับ

3.6.2.3 **การคัดเลือกค่าโดยใช้การแทนที่** (Dominance-based selection scheme)

การคัดเลือกโดยใช้วิธีนี้เป็นการรวมเอาเงื่อนไขในการหาค่าต่ำสุดรวมเข้าไปในการหาค่าที่เหมาะสม (Fitness function) เมื่อเปรียบเทียบเวกเตอร์ Ui กับเวกเตอร์ต้นแบบ Xi จะมีเหตุการณ์ที่เป็นไปได้ 3 แบบ คือ กรณีแรก Ui กับ Xi อยู่ในบริเวณคำตอบทั้งคู่ เวกเตอร์ที่จะ dominance คือ เวกเตอร์ที่ทำให้สมการวัตถุประสงค์มีค่าต่ำที่สุด กรณีที่สอง คือกรณีที่เวกเตอร์ใดเวกเตอร์หนึ่งเท่านั้นที่อยู่ในบริเวณคำตอบ เวกเตอร์ที่อยู่ในบริเวณคำตอบจะ dominance อีกเวกเตอร์หนึ่งทันที กรณีสุดท้ายคือ เวกเตอร์ทั้งสองต่างก็ไม่เป็นจริงทั้งคู่ (Both violated) กรณีนี้ตัวที่ dominance ได้คือ เวกเตอร์ตัวที่มีขนาดของการขัดแย้งกับเงื่อนไข (Constraint violation) น้อยกว่า

$$\begin{aligned} & X_{i+1} = X_i \quad X_i < U_i \\ & or \\ & X_{i+1} = U_i \quad Otherwise \end{aligned} \tag{3.66}$$

เมื่อ $X_i < U_i$ แสดงว่า *Xi* dominance *Ui* นั่นคือ *Xi* มีค่าสมการวัตถุประสงค์ดีกว่า *Ui* หรือมีปริมาณการ violate เงื่อนไขน้อยกว่า

3.6.2.4 การจัดการเงื่อนไขแบบเท่ากับ (Handling equality constraints)

เงื่อนไขที่เท่ากันปกติแล้วเกิดจากการทำสมดุลมวลหรือสมดุลพลังงาน เป็นต้น ซึ่งเงื่อนไขแบบเท่ากันนี้สามารถใช้เพื่อลดตัวแปรที่ใช้ในการหาค่าที่ต่ำที่สุดได้โดยที่ไม่ทำให้คำตอบบิดเบี้ยวไปแต่การลดตัวแปรลงไปไม่ได้ทำให้การหาคำตอบง่ายขึ้น และนอกจากนี้สมการบางสมการไม่สามารถใช้ลดตัวแปรได้ดังนั้น ในการหาค่าต่ำสุดจึงต้องมีการจัดการเงื่อนไขที่เป็นแบบเท่ากันด้วยเพื่อจัดการเงื่อนไขแบบสมการ พิจารณาปัญหาที่มี n ตัวแปร และมีเงื่อนไขแบบสมการอยู่ m สมการ ดังนั้นดีกรีอิสระ (Degree of freedom) มีค่าเท่ากับ n-m นั่นคือ จำนวนตัวแปรที่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้มี n-m ตัว และ m ตัวแปรที่ถูกกำหนดด้วยสมการเงื่อนไข เมื่อนำตัวแปรในเวกเตอร์ X มาแทนค่าในแบบจำลองแล้วมีค่าไม่ถูกต้องแล้ว ตัวแปรในเวกเตอร์ X จะถูกปรับปรุงให้มีความผิดพลาดน้อยลง โดยในการปรับปรุงค่าจะเป็นการสุ่มตัวแปรที่จะเปลี่ยนแปลง และตรวจสอบปริมาณการฝ่าฝืนเงื่อนไข (Violate constraints) ซึ่งถ้าเวกเตอร์ที่มีการปรับปรุงค่าแล้วมีปริมาณการฝ่าฝืนเงื่อนไขน้อยก็จะไปแทนที่เวกเตอร์เดิม สำหรับเวกเตอร์ที่ฝ่าฝืนเงื่อนไขมากก็จะต้องใช้การแก้สมการเพื่อขยับจุดให้มาอยู่ใกล้เงื่อนไขมากขึ้นก่อนซึ่งสมการที่ใช้แสดงดังนี้

$$X_{i+1} = x_i - J^{-1}(X_i)H(X_i) \qquad 3.67$$

เมื่อ *J(Xi)* คือเมทริกซ์จาโคเบียน (Jacobian matrix) และ *H(Xi)* คือเวกเตอร์ของสมการเงื่อนไขที่ฝ่าฝืนเงื่อนไข ซึ่งถ้าค่าที่ฝ่าฝืนเงื่อนไขมีค่ามากกว่าค่าที่กำหนด (Tolerance:e) แล้วจะถือว่าฝ่าฝืนเงื่อนไข

3.7 กรณีศึกษา (Case study)

1. กระบวนการนำกลับทองแดง (Copper recovery in an etching plant)

กรณีศึกษานี้เป็นการศึกษาการนำกลับทองแดงจากสารละลายแอมโมเนียและน้ำที่ใช้ในกระบวนการล้างทองแดง โดยสารที่เกิดการถ่ายโอนมวลคือ ทองแดงนั่นเอง โดยกำหนดให้ R1 แทนสารละลายแอมโมเนียและ R2 คือ น้ำ โดยในการนำกลับทองแดงจะให้ตัวทำละลายภายนอกสองชนิดคือ: LIX63 (S1) และ aromatic β-hydroxyoxime (S2) โดยข้อมูลความสัมพันธ์ที่สภาวะสมดุลแสดงได้ดังนี้

$$(R_1,S_1) : y_1 = 0.734x_1 + 0.001 \quad 3.68$$

$$(R_2,S_1) : y_2 = 0.734x_1 + 0.001 \quad 3.69$$

$$(R_1,S_2) : y_1 = 0.111x_2 + 0.008 \quad 3.70$$

$$(R_2,S_2) : y_2 = 0.148x_2 + 0.013 \quad 3.71$$

เมื่อ $\varepsilon = 0.0001$

ตารางที่ 3.1 แสดงรายละเอียดของสายของเสีย

Rich stream	Description	G_i (kg/s)	Mass fraction	
			$Y_i^{(in)}$	$Y_i^{(out)}$
R1	Ammonium solution	0.25	0.13	0.10
R2	Rinsewater	0.10	0.06	0.02

ตารางที่ 3.2 แสดงรายละเอียดของสายตัวทำละลาย

MSA2	Description	L_j (kg/s)	Mass fraction		Annual operating cost	
			$X_i^{(in)}$	$X_i^{(out)}$	($/kg)	($/kg-yr)
S1	LIX63	∞	0.03	0.07	0.01	58680
S2	P1	∞	0.001	0.02	0.12	704160

2. การกำจัดและนำกลับฟีนอลจากน้ำเสียของกระบวนการเผาถ่านหิน

(Removal/recovery of phenols from aqueous waste streams of a coal conversion plant)

กรณีศึกษานี้เป็นการศึกษาการแลกเปลี่ยนมวลของฟีนอลที่เกิดจากกระบวนการเผาถ่านหินซึ่งฟีนอลที่เกิดขึ้นนั้นมีความเป็นพิษสูง ดังนั้นจึงต้องมีการจัดการที่เหมาะสมซึ่งฟีนอลที่นำกลับได้ยังมีประโยชน์ในการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นได้ด้วย ในกระบวนการนำกลับของฟีนอลจะใช้ตัวทำละลาย 2 ชนิดคือ น้ำมันมวลเบา (Light oil) และผงคาร์บอน (Activated carbon) โดยข้อมูลการถ่ายโอนงานที่สภาวะสมดุลแสดงได้ดังนี้

$$S_1 : y = 0.71x_1 + 0.001 \qquad 3.72$$

$$S_2 : y = 0.13x_2 + 0.001 \qquad 3.73$$

กระบวนการถ่ายโอนมวลของหน่วยนำกลับ (HU1)

$$X_2 = 1.38z_1 \qquad 3.74$$

ตารางที่ 3.3 แสดงรายละเอียดของสายของเสีย

Rich stream	Description	G_i (kg/s)	Mass fraction	
			$Y_i^{(in)}$	$Y_i^{(out)}$
R1	Wastewater	3.30	0.05	0.0015
R2	Condensate	0.60	0.07	0.0030
R3	Waste stream	1.40	0.02	0.0030
R4	Wastewater	0.20	0.03	0.0020

ตารางที่ 3.4 แสดงรายละเอียดของสายของตัวทำละลาย

MSA	Description	L_j (kg/s)	Mass fraction		Annual operating cost	
			$X_i^{(in)}$	$X_i^{(out)}$	($/kg)	($/kg-yr)
S1	Light oil	10	0.0013	0.025	0.01	58680
S2	Caustic soda	10	-	-	0.07	417060

I 14434779

ตารางที่ 3.5 แสดงรายละเอียดของสายของหน่วยการนำกลับ

Regeneration	Description	L_j (kg/s)	Mass fraction		Annual operating cost	
			$X_i^{(in)}$	$X_i^{(out)}$		
HU1	Caustic soda	10	0	0.005	0.015	88020