บทที่ 4

การหาข่ายงานแลกเปลี่ยนมวล

งานวิจัยนี้เป็นการเสนอแนวคิดการสังเคราะห์ข่ายงานแลกเปลี่ยนมวลระหว่างของเสียที่ออกจากกระบวนการผลิตกับตัวทำละลายภายนอกกระบวนการ โดยกระบวนการที่ศึกษาคือ การกำจัดไอออนโลหะทองแดงที่ปนเปื้อนในของเหลวที่ใช้ในกระบวนการล้างทองแดง (Copper recovery in an etching plant) และกระบวนการนำกลับและกำจัดฟีนอลจากน้ำเสียของกระบวนการแปลงสภาพถ่านหิน (Removal/recovery of phenols from aqueous waste streams of a coal conversion plant)

4.1 การหาค่าใช้จ่ายที่ต่ำที่สุดของข่ายงานการแลกเปลี่ยนมวลภายใต้ความไม่แน่นอนของสภาวะการดำเนินงาน (Mass exchanger networks synthesis under uncertainty)

4.1.1 การสร้างแบบจำลอง (Model formulation)

ในการหาคำตอบของข่ายงานการแลกเปลี่ยนมวลภายใต้สภาวะความไม่แน่นอนของสภาวะการดำเนินงานนั้นทำได้โดยใช้วิธีการออพติไมซ์สองขั้นตอนโดยที่ θ คือ พารามิเตอร์ของความไม่แน่นอนและ p คือ ความน่าจะเป็นของการเกิดเหตุการณ์ของความไม่แน่นอนของ θ ซึ่งการออพติไมซ์ทำได้โดย

$$\begin{aligned} &\min_{d,\theta} z = f^0(d) + \sum_n p_n f_n(x_n, \theta_n) \\ &subject \quad to \\ &h_n(d_n, x_n, \theta_n) = 0 \\ &g_n(d_n, x_n, \theta_n) \le 0 \end{aligned} \qquad 4.1$$

โดยให้ θ คือ พารามิเตอร์ของความไม่แน่นอน

p คือ ความน่าจะเป็นของการเกิดเหตุการณ์

d คือ ตัวแปรในการออกแบบคือ ขนาดและจำนวนของหอสกัด

f^0 คือ ค่าใช้จ่ายคงที่

ซึ่งในขั้นนี้เป็นการหาตัวแปรในการออกแบบ (design variable :d) ที่ทำให้สมการวัตถุประสงค์มีค่าที่ต่ำที่สุดภายใต้สภาวะความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นหลังจากนั้นตัวแปรในการ

ออกแบบจะถูกนำไปใช้ในการออพติไมซ์ครั้งที่สองเพื่อหาค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานเฉลี่ยที่น้อยที่สุดที่ทำงานได้เมื่อความไม่แน่นอนเกิดขึ้น ซึ่งในระหว่างออพติไมซ์ขั้นที่สองนี้ตัวแปรในการออกแบบจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่า

ซึ่งสมการวัตถุประสงค์ คือ

$$\min_{d,L_j} \cos t = \frac{\sum AC_j L_j + f^0(d,\theta)}{n} \qquad \forall j \in LP \qquad 4.2$$

เงื่อนไขการหาค่าต่ำที่สุด

- อสมการเงื่อนไขที่ใช้กำหนดขอบเขตของตัวแปร (Inequality constraints)

$$x_{i1,n} \le x_{i1,n}^{up} \qquad 4.3$$

$$y_{(j,k+1),n} \le y_{(j,k+1),n}^{up} \qquad 4.4$$

- สมการเงื่อนไข (Equality constraints)

สมการเงื่อนไขของการทำสมดุลมวลที่เกิดการถ่ายเท

$$\sum_{i=1}(x_{i1,n} - x_{i3,n})L_{i,n} = \sum_{j=1}(y_{j1,n} - y_{j3,n})G_j \qquad 4.5$$

$$\sum_{i=1}(x_{i1,n} - x_{i3,n})L_{i,n} = \sum_{\forall i \in RP} M_{ijk,n} \qquad 4.6$$
$$k = stages$$

$$N_{ijk,n} = N_{ijk}^d \qquad 4.7$$

$$H_{ijk,n} = H_{ijk}^d \qquad 4.8$$

4.2 ผลการคำนวณ (Result)

4.2.1 กระบวนการนำกลับไอออนทองแดง (Copper recovery in an etching plant)

กรณีศึกษานี้เสนอโดย El-Halwagi และ Manousiouthakis ซึ่งศึกษาการสร้างข่ายงานการแลกเปลี่ยนมวลเพื่อนำสารล้างที่ผ่านกระบวนการใช้งานแล้วมาแลกเปลี่ยนมวลกับตัวทำละลาย เมื่อสารล้างถูกป้อนเข้าสู่ข่ายงานแล้วจะทำให้ปริมาณสารเจือปนน้อยลงและสามารถป้อนกลับมาใช้งานใหม่ได้ทำให้ลดการใช้สารล้างซึ่งมีราคาแพงได้ โดยตัวอย่างกระบวนการล้างที่ศึกษาในงานนี้คือ ระบบการล้างทองแดงโดยใช้สารละลายแอมโมเนีย และน้ำ ในการล้าง ซึ่งเมื่อล้างเสร็จแล้วสารละลายแอมโมเนียและน้ำจะมีปริมาณทองแดงปนเปื้อนอยู่ในปริมาณมาก ซึ่งจากการศึกษากระบวนการพบว่าสารละลายแอมโมเนียมีประสิทธิภาพในการทำงานได้ดีที่ความเข้มข้นของทองแดงอยู่ระหว่าง 0.10 – 0.13 โดยน้ำหนัก ดังนั้นข่ายงานที่ใช้จึงต้องมารับทองแดงส่วนเกินออกไปเพื่อให้ความเข้มข้นของทองแดงในสารละลายแอมโมเนียอยู่ในระดับที่เหมาะสมต่อการใช้งาน ส่วนน้ำจะทำงานได้ดีที่ความเข้มข้นของทองแดงอยู่ระหว่าง 0.02 – 0.06 โดยน้ำหนัก

ในการกำจัดทองแดงส่วนเกินจำเป็นต้องใช้ตัวทำละลายภายนอกซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้ตัวทำละลายสองชนิดคือ LIX63 และอะลิฟาติกแอลฟาไฮดรอกซี่อ๊อกซีม (aliphatic α-hydroxyoxime: P1) ซึ่งตัวทำละลายทั้งสองชนิดนี้มีความสามารถในการละลายทองแดงได้ดีทั้งคู่และไม่ละลายน้ำกับแอมโมเนีย

เนื่องจากตัวทำละลายที่ใช้ในข่ายงานนี้มี 2 ชนิดโดยแต่ละชนิดมีความเหมาะสมกับหน่วยแลกเปลี่ยนมวลต่างกัน โดย LIX63 เหมาะกับหอสกัดแบบชั้น (Tray column) ส่วน P1 ใช้ได้ดีกับหอสกัดแบบต่อเนื่อง (Packed column) ดังนั้นหอสกัดที่ใช้จึงมี 2 แบบ โดยหอสกัดแบบชั้นที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เมตรและมีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างต่อชั้นต่อปีเท่ากับ 4552 ดอลล่าร์ ส่วนหอสกัดแบบต่อเนื่องมีค่าก่อสร้างต่อปีต่อความสูงเท่ากับ 4245 ดอลล่าร์ และมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลเท่ากับ 0.685 kg copper/m^3s เมื่อ P1 แลกเปลี่ยนมวลกับสารละลายแอมโมเนีย และเท่ากับ 0.211 kg copper/m^3s เมื่อ P1 แลกเปลี่ยนมวลกับน้ำ

4.2.2 การหาค่าใช้จ่ายที่ต่ำที่สุดของข่ายงานการแลกเปลี่ยนมวลโดยไม่คำนึงถึงผลของความไม่แน่นอน

สำหรับกรณีการสังเคราะห์ข่ายงานเมื่อไม่ได้คำนึงถึงความไม่แน่นอน พบว่าค่าใช้จ่ายรวมระหว่างค่าใช้จ่ายคงที่กับค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานที่ใช้ไปในหนึ่งปี (Total annualized cost) แสดงได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าใช้จ่ายของข่ายงานแลกเปลี่ยนมวล

กรณีศึกษา	ค่าใช้จ่าย ($/yr) (งานวิจัยนี้)	ค่าใช้จ่าย ($/yr) (Chen et. al 2005)
1. copper recovery	51600	52000

จากตารางพบว่าเมื่อเทียบค่าใช้จ่ายรวมรายปีที่ออพติไมซ์ได้กับผลของ Chen และคณะ (2005) แล้ว พบว่าสำหรับกระบวนการนำกลับไอออนทองแดงจะได้คำตอบที่จุดเดียวกันคือ มีค่าใช้จ่ายรวมต่อปีเท่ากับ 52000 ดอลล่าร์ และโครงสร้างของข่ายงานที่ได้ก็มีลักษณะเหมือนกัน คือ ใช้หอสกัดแบบชั้น(Tray column) 2 หน่วยและแบบต่อเนื่อง(packed column) 1 หน่วย และใช้ปริมาณตัวทำละลายที่ 1 คือ LIX63 เท่ากับ 0.2766 kg/s และ ตัวทำละลายที่ 2 เท่ากับ 0.0228 kg/s ตามลำดับเหมือนกัน ดังนั้นแบบจำลองของกระบวนการนำกลับทองแดงที่ใช้จึงมีความน่าเชื่อถือเนื่องจากเมื่อทำออพติไมซ์แล้วคำตอบที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Chen ด้วย

4.2.3 การหาค่าใช้จ่ายที่ต่ำที่สุดของข่ายงานการแลกเปลี่ยนมวลโดยคำนึงถึงผลของความไม่แน่นอน

ตารางที่ 4.2 ค่าใช้จ่ายของข่ายงานที่เหมาะสมภายใต้สภาวะความไม่แน่นอน

ชนิดของความไม่แน่นอน	ช่วงค่าความไม่แน่นอน	ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยต่อปี (ดอลล่าร์ต่อปี)	เปอร์เซ็นต์ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยในการดำเนินงานที่เพิ่มขึ้น (%)	ปริมาณของสิ่งเจือปนสูงสุดที่เพิ่มขึ้น (kg/s)
1. สัดส่วนโดยน้ำหนักที่ทางเข้าของสายสารละลายแอมโมเนีย	0.13-0.26	73,600	40	0.0325
2. สัดส่วนโดยน้ำหนักที่ทางเข้าของสายน้ำล้าง (Rinsewater)	0.06-0.12	56,400	8.25	0.0060
3. อัตราการไหลของสายสารละลายแอมโมเนีย(kg/s)	0.25-0.50	55,500	7.1	0.0075
4. อัตราการไหลของสายสายน้ำล้าง (Rinsewater) (kg/s)	0.10-0.20	75,500	7.3	0.0040

เมื่อสัดส่วนโดยน้ำหนักของทองแดงที่ทางเข้าและอัตราการไหลของสายสารละลายแอมโมเนียและสายน้ำล้างมีการเปลี่ยนแปลงจะทำให้ปริมาณของทองแดงที่ต้องถ่ายเทเพื่อให้สัดส่วนโดยมวลที่ทางออกมีค่าที่กำหนดจะต้องถ่ายเทมากขึ้น ซึ่งในบางครั้งข่ายงานที่ออกแบบโดยกำหนดให้ปริมาณสารที่ถ่ายโอนคงที่นั้นเมื่อต้องทำงานภายใต้สภาวะที่ไม่แน่นอนของสภาวะการดำเนินงานนี้อาจจทำให้มีค่าใช้จ่ายสูงและไม่ใช่ข่ายงานที่เหมาะสมอีกต่อไป ซึ่งจากแนวคิดนี้จึงมีการออกแบบข่ายงานภายใต้สภาวะความไม่แน่นอนของสภาวะการดำเนินงานของสายสารละลายแอมโมเนีย และสายน้ำล้างขึ้น ซึ่งข่ายงานที่ได้แสดงได้ดังตารางที่ 4.2

- กรณีที่ความไม่แน่นอนในระบบที่เกิดจากสัดส่วนโดยมวลที่ทางเข้าของสายสารละลายแอมโมเนีย (R1) โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0.13 – 0.26

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายต่อปีของข่ายงานที่ทำงานภายใต้สภาวะความไม่แน่นอนของสัดส่วนโดยมวลที่ทางเข้าของทองแดงในสารละลายแอมโมเนีย

โครงสร้าง	ช่วงที่ใช้งานได้	ค่าใช้จ่ายเฉลี่ย (ดอลล่าร์ต่อปี)	ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยที่ลดลงเมื่อออกแบบโดยคำนึงถึงความไม่แน่นอน (%)
1. ไม่คิดผลของความไม่แน่นอน	0.13-0.26	75,700	-
2. คำนึงถึงผลของความไม่แน่นอน	0.13-0.26	73,600	3

จากตารางที่ 4.3 พบว่าเมื่อออพติไมซ์โดยคิดผลของความไม่แน่นอนจะทำให้ได้ข่ายงานที่มีค่าใช้จ่ายเฉลี่ยรายปีน้อยกว่าข่ายงานที่ได้จากการออพติไมซ์ปกติโดยที่ข่ายงานทั้งสองโครงสร้างสามารถรองรับปริมาณการถ่ายโอนทองแดงที่เพิ่มขึ้นได้

- กรณีที่ความไม่แน่นอนในระบบที่เกิดจากสัดส่วนโดยมวลที่ทางเข้าของสายน้ำล้าง (R2) โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0.06 – 0.12

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายต่อปีของข่ายงานที่ทำงานภายใต้สภาวะความไม่แน่นอนของสัดส่วนโดยมวลที่ทางเข้าของทองแดงในสายน้ำล้าง

โครงสร้าง	ช่วงที่ใช้งานได้	ค่าใช้จ่ายเฉลี่ย (ดอลล่าร์ต่อปี)	ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยที่ลดลงเมื่อออกแบบโดยคำนึงถึงความไม่แน่นอน (%)
1. ไม่คิดผลของความไม่แน่นอน	0.06-0.12	56,400	-
2. คำนึงถึงผลของความไม่แน่นอน	0.06-0.12	56,400	0.0

ในกรณีที่ความแปรปรวนที่เกิดขึ้นคือสัดส่วนโดยมวลของทองแดงในสายน้ำล้างพบว่าข่ายงานที่ได้จากการคำนวณทั้งสองวิธีมีค่าใช้จ่ายเฉลี่ยต่อปีเท่ากับ 56400 ดอลล่าร์ต่อปีทั้งคู่ แสดงว่ากรณีที่ความแปรปรวนเกิดขึ้นนั้น ข่ายงานที่สังเคราะห์มาโดยการออพติไมซ์แบบไม่ได้พิจารณาผลของความไม่แน่นอนสามารถรองรับความแปรปรวนที่เกิดขึ้นได้

- กรณีที่ความไม่แน่นอนในระบบที่เกิดจากอัตราการไหลที่ทางเข้าของสายสารละลายแอมโมเนีย (R1) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.25 – 0.50 kg/s

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายต่อปีของข่ายงานที่ทำงานภายใต้สภาวะความไม่แน่นอนของอัตราการไหลที่ทางเข้าของสายสารละลายแอมโมเนีย (R1)

โครงสร้าง	ช่วงที่ใช้งานได้ (kg/s)	ค่าใช้จ่ายเฉลี่ย (ดอลล่าร์ต่อปี)	ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยที่ลดลงเมื่อออกแบบโดยคำนึงถึงความไม่แน่นอน (%)
1. ไม่คิดผลของความไม่แน่นอน	0.25-0.50	55,900	-
2. คำนึงถึงผลของความไม่แน่นอน	0.25-0.50	55,500	1

จากตารางที่ 4.5 พบว่าข่ายงานที่ได้จากการคิดผลของความไม่แน่นอนของอัตราการไหลของสายแอมโมเนียจะมีค่าใช้จ่ายต่อปีลดลงประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์

- กรณีที่ความไม่แน่นอนในระบบที่เกิดจากอัตราการไหลที่ทางเข้าของสายน้ำล้าง (R2) มีค่าอยู่ระหว่าง 0.10 – 0.20 kg/s

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายต่อปีของข่ายงานที่ทำงานภายใต้สภาวะความไม่แน่นอนของอัตราการไหลที่ทางเข้าของสายน้ำล้าง (R2)

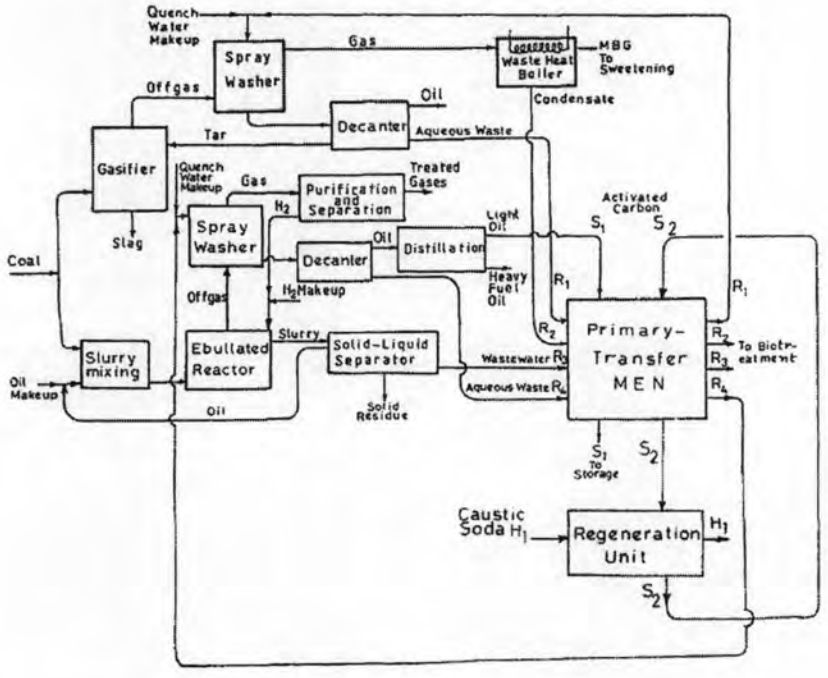
โครงสร้าง	ช่วงที่ใช้งานได้ (kg/s)	ค่าใช้จ่ายเฉลี่ย (ดอลล่าร์ต่อปี)	ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยที่ลดลงเมื่อออกแบบโดยคำนึงถึงความไม่แน่นอน (%)
1. ไม่คิดผลของความไม่แน่นอน	-	-	-
2. คำนึงถึงผลของความไม่แน่นอน	0.10-0.20	75,500	-

จากตารางที่ 4.6 เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของสายน้ำล้างให้มีค่าอยู่ระหว่าง 0.10 – 0.20 kg/s แล้ว พบว่าข่ายงานที่ได้จากการทำออพติไมซ์ปกติไม่สามารถทำงานได้ เนื่องจากในการเพิ่มปริมาณทองแดงในสายน้ำล้างจะส่งผลโดยตรงต่อหอสกัดแบบต่อเนื่องซึ่งไม่สามารถรองรับปริมาณสารที่เพิ่มขึ้นได้ ส่วนข่ายงานที่คิดความไม่แน่นอนด้วยสามารถทำงานได้และมีค่าใช้จ่ายเฉลี่ยเท่ากับ 75,500 ดอลล่าร์ต่อปี

ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อตัวแปรบางตัวมีความแปรปรวนเกิดขึ้นอาจจะส่งผลต่อข่ายงานอย่างรุนแรงจนทำให้ไม่สามารถทำงานได้เลย ดังนั้นเพื่อให้ข่ายงานมีความยืดหยุ่นและทำงานได้ภายใต้สภาวะดังกล่าวจึงต้องมีการทำออพติไมซ์ภายใต้สภาวะความไม่แน่นอน

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

กระบวนการแปลงสภาพถ่านหิน (Coal conversion) คือ การทำให้ถ่านหินที่เป็นของแข็งให้อยู่ในสภาพที่ใช้งานได้ง่าย เช่น อยู่ในรูปของเหลว หรือ ก๊าซ เป็นต้น ซึ่งในระหว่างกระบวนการนี้จะมีมลพิษและสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ออกมาหลายชนิด โดยเฉพาะฟีนอลซึ่งมีความเป็นพิษสูงมาก ซึ่งถ้าปล่อยออกสู่ภายนอกโดยปราศจากการจัดการที่เหมาะสมแล้วฟีนอลที่รั่วไหลออกไปอาจจะส่งผลต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมบริเวณนั้นได้ นอกจากนี้ฟีนอลยังเป็นสารที่มีราคาแพงและเป็นวัตถุดิบเริ่มต้นของการผลิตของหลายกระบวนการ ดังนั้นการนำกลับฟีนอลจึงมีความคุ้มค่าในทางเศรษฐศาสตร์และในด้านลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้วย ซึ่งแผนภาพกระบวนการแปลงสภาพถ่านหินซึ่งแสดงไว้ในงานวิจัยของ El-Halwagi และ Manousiouthakis แสดงได้รูปที่ 4.1 ซึ่งจากรูปจะเห็นว่าสายน้ำเสียมีทั้งหมด 4 สายคือ สาย R1 R2 R3 และ R4 ซึ่งสายน้ำเสียทั้ง 4 สายจะต้องมาถ่ายโอนมวลในข่ายงานก่อนที่จะปล่อยออกสู่ภายนอก ซึ่งตัวทำละลายที่ใช้ในงานข่ายงานนี้มี 2 ชนิด คือ น้ำมันมวลโมเลกุลต่ำ (Light oil) และ ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) โดยที่ถ่านกัมมันต์สามารถนำไปผ่านกระบวนการนำกลับเพื่อนำมาใช้ใหม่ได้ ดังรูป



รูปที่ 4.1 แผนภาพกระบวนการ (Coal conversion) และ ข่ายงานแลกเปลี่ยนมวล (อ้างอิง: pollution prevention through process integration systematic design tool โดย Mahmoud M. El-Halwagi)

4.2.5 ผลของการออพติไมซ์ภายใต้สภาวะความไม่แน่นอนของสภาวะการดำเนินงาน

ตารางที่ 4.7 ค่าใช้จ่ายของข่ายงานที่เหมาะสมภายใต้สภาวะความไม่แน่นอน

ชนิดของความไม่แน่นอน	ช่วงค่าความไม่แน่นอนที่ทำงานได้	ค่าใช้จ่ายเฉลี่ยต่อปี (ดอลล่าร์ต่อปี)	เปอร์เซ็นส่วนต่างของค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้น
1. อัตราการไหลของสายของเสียที่ 1 (kg/s)	3.36-4.40	946000	2.4
2. อัตราการไหลของสายของเสียที่ 2 (kg/s)	0.70-1.20	985000	31.0
3. อัตราการไหลของสายของเสียที่ 3 (kg/s)	1.40-2.60	804000	12.0
4. อัตราการไหลของสายของเสียที่ 4 (kg/s)	0.20-0.40	712000	1.2
5. สัดส่วนโดยน้ำหนักที่ทางเข้าของสายของเสียที่ 2	0.08-0.14	970000	26.2
6. สัดส่วนโดยน้ำหนักที่ทางเข้าของสายของเสียที่ 3	0.02-0.04	859000	19.8
7. สัดส่วนโดยน้ำหนักที่ทางเข้าของสายของเสียที่ 4	0.03-0.06	713000	2.2

เมื่อสัดส่วนโดยน้ำหนักของฟีนอลและอัตราการไหลของสายของเสียทั้ง 4 สายที่ทางเข้ามีการเปลี่ยนแปลงจะทำให้ปริมาณของฟีนอลที่ต้องถ่ายเทในข่ายงานมีปริมาณมากขึ้น ดังนั้นข่ายงานที่ออกแบบโดยมีการกำหนดให้ปริมาณสารที่ถ่ายโอนคงที่อาจจะไม่สามารถทำงานได้ภายใต้สภาวะที่ไม่แน่นอนของสภาวะการดำเนินงานที่เกิดขึ้นหรือมีค่าใช้จ่ายที่สูง ตารางที่ 4.7 แสดงถึงค่าใช้จ่ายเฉลี่ยต่อปีของข่ายงานที่สังเคราะห์ขึ้นมาภายใต้สภาวะความไม่แน่นอนของอัตราการไหลและสัดส่วนโดยมวลของฟีนอลที่ทางเข้าของสายของเสียทั้ง 4 สาย

- กรณีที่ความไม่แน่นอนในระบบที่เกิดจากอัตราการไหลที่ทางเข้าของสาย R1 มีค่าอยู่ระหว่าง 3.36 – 4.40kg/s

ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายต่อปีของข่ายงานที่ทำงานภายใต้สภาวะความไม่แน่นอนของอัตราการไหลของสาย R1

โครงสร้าง	ช่วงที่ใช้งานได้	ค่าใช้จ่ายเฉลี่ย (ดอลล่าร์ต่อปี)
1. ไม่คิดผลของความไม่แน่นอน	-	-
2. คำนึงถึงผลของความไม่แน่นอน	3.36 - 4.40	946000

จากตารางที่ 4.8 พบว่าเมื่อออพติไมซ์โดยคิดผลของความไม่แน่นอนของอัตราการไหลที่ทางเข้าของสายของเสียที่ 1 ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 3.36 – 4.40 kg/s จะทำให้ได้ข่ายงานที่มีค่าใช้จ่ายเฉลี่ยรายปีเท่ากับ 946000 ดอลล่าร์ต่อปี ในขณะที่ข่ายงานที่เสนอโดย Chen et al (2005) ไม่สามารถรองรับความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นได้

- กรณีที่ความไม่แน่นอนในระบบที่เกิดจากอัตราการไหลที่ทางเข้าของสาย R2 มีค่าอยู่ระหว่าง 0.70 – 1.20 kg/s

ตารางที่ 4.9 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายต่อปีของข่ายงานที่ทำงานภายใต้สภาวะความไม่แน่นอนของอัตราการไหลของสาย R2

โครงสร้าง	ช่วงที่ใช้งานได้	ค่าใช้จ่ายเฉลี่ย (ดอลล่าร์ต่อปี)
1. ไม่คิดผลของความไม่แน่นอน	0.80 - 0.90	911600
2. คำนึงถึงผลของความไม่แน่นอน	0.70-1.20	985000

จากตารางที่ 4.9 พบว่าเมื่อออพติไมซ์โดยคิดผลของความไม่แน่นอนของอัตราการไหลที่ทางเข้าของสายของเสียที่ 2 ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0.70 – 0.12 kg/s พบว่าข่ายงานที่เสนอโดย Chen et al (2005) สามารถทำงานได้ในช่วงของความแปรปรวนของอัตราการไหลอยู่ในช่วง0.80 – 0.90 kg/s เท่านั้น โดยมีค่าใช้จ่ายเฉลี่ยต่อปีเท่ากับ 911600 ดอลล่าร์ต่อปี ส่วนข่ายงานที่ใช้วิธีที่เสนอในงานวิจัยนี้สามารถรองรับความแปรปรวนได้ในช่วงที่กว้างกว่าโดยมีค่าใช้จ่ายเฉลี่ยต่อปีใกล้เคียงกัน

- กรณีที่ความไม่แน่นอนในระบบที่เกิดจากอัตราการไหลที่ทางเข้าของสาย R3 มีค่าอยู่ระหว่าง 1.40 – 2.60 kg/s

ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายต่อปีของข่ายงานที่ทำงานภายใต้สภาวะความไม่แน่นอนของอัตราการไหลของสาย R3

โครงสร้าง	ช่วงที่ใช้งานได้	ค่าใช้จ่ายเฉลี่ย (ดอลล่าร์ต่อปี)
1. ไม่คิดผลของความไม่แน่นอน	1.40 - 2.60	809400
2. คำนึงถึงผลของความไม่แน่นอน	1.40 - 2.60	804000

จากตารางที่ 4.10 พบว่าเมื่อออพติไมซ์โดยคิดผลของความไม่แน่นอนของอัตราการไหลที่ทางเข้าของสายของเสียที่ 3 ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 1.40 – 2.60 kg/s จะทำให้ได้ข่ายงานที่มีค่าใช้จ่ายเฉลี่ยรายปีน้อยกว่าข่ายงานที่เสนอโดย Chen et al (2005) โดยที่ข่ายงานทั้งสองโครงสร้างสามารถรองรับปริมาณการถ่ายโอนฟีนอลที่เพิ่มขึ้นได้เหมือนกัน

- กรณีที่ความไม่แน่นอนในระบบที่เกิดจากอัตราการไหลที่ทางเข้าของสาย R4 มีค่าอยู่ระหว่าง 0.20 – 0.40 kg/s

ตารางที่ 4.11 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายต่อปีของข่ายงานที่ทำงานภายใต้สภาวะความไม่แน่นอนของอัตราการไหลของสาย R4

โครงสร้าง	ช่วงที่ใช้งานได้	ค่าใช้จ่ายเฉลี่ย (ดอลล่าร์ต่อปี)
1. ไม่คิดผลของความไม่แน่นอน	-	-
2. คำนึงถึงผลของความไม่แน่นอน	0.20-0.40	712000

จากตารางที่ 4.11 พบว่าเมื่อออพติไมซ์โดยคิดผลของความไม่แน่นอนของอัตราการไหลที่ทางเข้าของสายของเสียที่ 3 ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0.20 – 0.40 kg/s พบว่าข่ายงานที่สังเคราะห์โดยใช้วิธีที่เสนอในงานวิจัยนี้สามารถรองรับความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นได้ในขณะที่ข่ายงานที่เสนอโดย Chen et al (2005) ไม่สามารถทำงานได้

- กรณีที่ความไม่แน่นอนในระบบที่เกิดจากสัดส่วนโดยมวลที่ทางเข้าของสาย R2 มีค่าอยู่ระหว่าง 0.08 – 0.14

ตารางที่ 4.12 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายต่อปีของข่ายงานที่ทำงานภายใต้สภาวะความไม่แน่นอนของสัดส่วนโดยมวลที่ทางเข้า R2

โครงสร้าง	ช่วงที่ใช้งานได้	ค่าใช้จ่ายเฉลี่ย (ดอลล่าร์ต่อปี)
1. ไม่คิดผลของความไม่แน่นอน	-	-
2. คำนึงถึงผลของความไม่แน่นอน	0.08-0.14	970000

จากตารางที่ 4.12 พบว่าเมื่อออพติไมซ์โดยคิดผลของความไม่แน่นอนของสัดส่วนโดยมวลที่ทางเข้าของสายของเสียที่ 2 ระหว่าง 0.08-0.14 พบว่าข่ายงานที่สังเคราะห์โดยใช้วิธีที่เสนอในงานวิจัยนี้สามารถรองรับความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นได้ในขณะที่ข่ายงานที่เสนอโดย Chen et al (2005) ไม่สามารถทำงานได้

- กรณีที่ความไม่แน่นอนในระบบที่เกิดจากสัดส่วนโดยมวลที่ทางเข้าของสาย R3 มีค่าอยู่ระหว่าง 0.02 – 0.04

ตารางที่ 4.13 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายต่อปีของข่ายงานที่ทำงานภายใต้สภาวะความไม่แน่นอนของสัดส่วนโดยมวลที่ทางเข้า R3

โครงสร้าง	ช่วงที่ใช้งานได้	ค่าใช้จ่ายเฉลี่ย (ดอลล่าร์ต่อปี)
1. ไม่คิดผลของความไม่แน่นอน	0.025 – 0.35	850000
2. คำนึงถึงผลของความไม่แน่นอน	0.02 - 0.04	859000

จากตารางที่ 4.13 พบว่าเมื่อออพติไมซ์โดยคิดผลของความไม่แน่นอนของสัดส่วนโดยมวลที่ทางเข้าของสายของเสียที่ 3 ระหว่าง 0.02 - 0.04 จะทำให้ได้ข่ายงานที่มีค่าใช้จ่ายเฉลี่ยรายปีใกล้เคียงกับค่าใช้จ่ายเฉลี่ยรายปีของข่ายงานที่เสนอโดย Chen et al (2005) แต่ข่ายงานที่เสนอโดยงานวิจัยนี้สามารถรองรับความไม่แน่นอนได้ในช่วงที่กว้างกว่า

- กรณีที่ความไม่แน่นอนในระบบที่เกิดจากสัดส่วนโดยมวลที่ทางเข้าของสาย R4 มีค่าอยู่ระหว่าง 0.03 – 0.06

ตารางที่ 4.14 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายต่อปีของข่ายงานที่ทำงานภายใต้สภาวะความไม่แน่นอนของสัดส่วนโดยมวลที่ทางเข้า R4

โครงสร้าง	ช่วงที่ใช้งานได้	ค่าใช้จ่ายเฉลี่ย (ดอลล่าร์ต่อปี)
1. ไม่คิดผลของความไม่แน่นอน	-	-
2. คำนึงถึงผลของความไม่แน่นอน	0.03-0.06	713000

จากตารางที่ 4.14 พบว่าเมื่อออพติไมซ์โดยคิดผลของความไม่แน่นอนของสัดส่วนโดยมวลที่ทางเข้าของสายของเสียที่ 4 ระหว่าง 0.03 - 0.06 พบว่าข่ายงานที่สังเคราะห์โดยใช้วิธีที่เสนอในงานวิจัยนี้สามารถรองรับความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นได้ ในขณะที่ข่ายงานที่เสนอโดย Chen et al (2005) ไม่สามารถทำงานได้