บทที่ 2

ผลงานวิจัยที่ผ่านมา และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การป้องกันมลพิษเป็นหลักการที่ต้องอาศัยความรู้ของศาสตร์ทางวิศวกรรม ทำดุลมวลสาร และดุลพลังงาน เพื่อพิจารณาที่ต้นกำเนิดของของเสีย พร้อมทั้งดำเนินการลด หรือป้องกันการเกิดของเสียจากกระบวนการผลิตโดยตรง และวิธีการศึกษาภาพรวมกระบวนการทั้งหมด (Process Integration Method) เป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการแก้ปัญหาของโรงงานอุตสาหกรรมเคมีในเชิงป้องกันมลพิษ ซึ่งแบ่งได้เป็น 3 หัวเรื่องหลัก (Gundersen และ Naess, 1987) ได้แก่

1. การวิเคราะห์พินช์ (Pinch Analysis)
2. ระบบผู้เชี่ยวชาญ (Expert System)
3. การออปติไมเซชันด้วยวิธีเชิงตัวเลข (Numerical) หรือกราฟ (Graphical)

สำหรับทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยมากที่สุด ได้แก่การประยุกต์ใช้เทคนิคพินช์ สำหรับการป้องกันมลพิษ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.1 ความเป็นมาของเทคนิคพินช์

เทคนิคพินช์เป็นเทคโนโลยีที่พัฒนามาจากหลักการพื้นฐานของเทอร์โมไดนามิกส์ โดยอาศัยกฎข้อที่หนึ่งและกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ไปใช้ในกระบวนการทางเคมี พร้อมกับพิจารณาถึงสมดุลทางด้านความร้อนและทางมวล ซึ่งพินช์เทคโนโลยีนี้เป็นที่ยอมรับและใช้อย่างกว้างขวางในการออกแบบโครงข่ายแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchange Networks, HENs) ของโรงงานอุตสาหกรรมเคมี ทั้งสำหรับโรงงานที่จะสร้างใหม่ และโรงงานเดิมที่ต้องการปรับปรุงการใช้พลังงานเพื่อให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายทางด้านยูทิลิตีความร้อน (Hot Utility) และยูทิลิตีความเย็น (Cold Utility) ตลอดจนค่าใช้จ่ายในการลงทุนให้เหลือน้อยที่สุดหรือต่ำที่สุด

โดยทั่วไปแล้วกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม จะมีการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสายของไหลร้อน (Hot Stream) และสายของไหลเย็น (Cold Stream) มากกว่า 1 คู่ขึ้นไป

เพื่อความสะดวกในการพิจารณาให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างกันได้มากที่สุด ดังนั้นในช่วงอุณหภูมิหนึ่ง ๆ ต้องทำการรวมสายของไหลร้อนแต่ละสายเข้าด้วยกันและรวมสายของไหลเย็นแต่ละสายเข้าด้วยกันเสียก่อน จะได้เป็นเส้นกราฟภาระความร้อนสะสม (Composite Curve) ของสายของไหลร้อนและสายของไหลเย็น ขึ้นบนแกนระหว่างค่าอุณหภูมิและค่าเอนทาลปี ซึ่งเมื่อปรับหรือเลื่อนเส้นกราฟทั้งสองเข้าหากันตามแนวราบผลต่างของอุณหภูมิต่ำสุด (ΔT_{min}) ระหว่างเส้นกราฟ 2 เส้นนี้ก็คือ จุดที่อยู่ห่างกันน้อยที่สุด เรียกว่า จุดพินช์ (Pinch Point) ซึ่งจะไม่มีการถ่ายเทความร้อนข้ามจุดนี้ และจากกราฟภาระความร้อนสะสมนี้ เราจะได้ค่ายูทิลิตีความร้อนและเย็นต่ำสุดที่ต้องการใช้ในกระบวนการทางด้านปลายบนและปลายล่างตามลำดับ ซึ่งยูทิลิตีความร้อนและความเย็นต่ำสุดที่ต้องการนี่เอง คือ "เป้าหมายพลังงาน (Energy Target)" (Linnhoff และ Townsend, 1982)

เทคนิคพินช์ได้ถูกนำมาใช้ในเพื่อพัฒนาในการออกแบบด้านพลังงานของระบบต่าง ๆ และมีการประยุกต์ไปใช้งานในเรื่องต่าง ๆ ดังนี้ (Linnhoff, 1994)

1. การออปติไมซ์ความดันลดลง (Pressure Drop Optimization)
2. โพรไฟล์หอกลั่น (Distillation Column Profiles)
3. ออกแบบกระบวนการผลิตอุณหภูมิต่ำ
4. การบูรณาการกระบวนแบบแบทช์ (Batch Process Integration)
5. การลดน้ำและน้ำเสียให้น้อยที่สุด
6. ภาพรวมทั้งโรงงาน (Total Site Integration)

ซึ่งการวิเคราะห์โดยใช้หลักการพินช์มาประยุกต์นี้ ทำให้เราทราบเป้าหมายก่อนออกแบบไม่ว่าจะเป็นตัวเลือกในระบบยูทิลิตี เงินลงทุนที่เหมาะสม การเปลี่ยนแปลงระบบ และอื่น ๆ ได้

2.2 การประยุกต์เทคนิคพินช์กับโครงข่ายแลกเปลี่ยนมวล

เทคนิคพินช์ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในเชิงของการถ่ายโอนมวล (mass transfer) ซึ่งสามารถใช้ได้กับทั้งของแข็ง ของเหลว และก๊าซ โดยการสังเคราะห์หาโครงข่ายแลกเปลี่ยนมวล (Mass Exchnage Networks, MENs) ซึ่งภายในโครงข่ายดังกล่าวนี้จะอาศัยความแตกต่างของ

ความเข้มข้นระหว่างสายของไหลที่มีสิ่งเจือปน (Rich Stream) กับสายของไหลที่ไม่มีสิ่งเจือปน (Lean Stream) เป็นแรงขับ (Driving Force) ให้เกิดการแลกเปลี่ยนมวล ซึ่งเป็นหลักการเดียวกับโครงข่ายแลกเปลี่ยนความร้อนที่อาศัยอุณหภูมิเป็นแรงขับ

ของเสียจากอุตสาหกรรมจำเป็นต้องมีการแยกหรือจัดการให้เหมาะสม ซึ่งเครื่องแลกเปลี่ยนมวลเป็นอุปกรณ์หนึ่งที่ถูกนำมาใช้เพื่อแยกสิ่งเจือปนที่ไม่ต้องการออกไปจากสายของเสีย (waste stream) ดังกล่าว และสำหรับในภาคอุตสาหกรรมเครื่องแลกเปลี่ยนมวลจะมีหลายรูปแบบ เช่น การไหลสวนทาง (Counter-Current) หรือการถ่ายโอนมวลโดยวิธีการสัมผัสโดยตรง เช่น การดูดซับ การดูดซึม หรือ การสกัดแยกโดยใช้ของเหลวกับของเหลว (liquid-liquid extraction) เป็นต้น ซึ่งการแลกเปลี่ยนมวลเหล่านี้จำเป็นต้องมีการใช้สารแยกมวล (Mass Separating Agent, MSA) ช่วยในการแลกเปลี่ยนมวล ซึ่งสารแยกมวลดังกล่าวนี้ก็มีหลายชนิด และมีราคาหรือต้นทุนการจัดการต่างกัน ดังนั้นการศึกษาโครงข่ายแลกเปลี่ยนมวลจึงเป็นประโยชน์อย่างมากในการหาโครงข่ายที่มีค่าใช้จ่ายคุ้มค่าที่สุด

El-Halwagi และ Manousiouthakis (1989) เริ่มศึกษาโครงข่ายแลกเปลี่ยนมวลโดยมีวัตถุประสงค์ เพื่อวิเคราะห์หาโครงข่ายแลกเปลี่ยนมวลที่มีค่าใช้จ่ายคุ้มค่าที่สุด ในการถ่ายโอนมวลระหว่างสายของเสียที่ออกมาจากกระบวนการซึ่งจัดว่าเป็นสายของไหลที่มีสิ่งเจือปน กับสายของไหลที่ไม่มีสิ่งเจือปน ซึ่งได้แก่สายของสารแยกมวล (MSA) โดยแรกเริ่มได้มีการกำหนดขั้นตอนการศึกษาโครงข่ายแลกเปลี่ยนมวลไว้เป็น 2 ขั้นตอน ประกอบด้วย

ขั้นที่ 1 คือ การใช้กระบวนการทางเทอร์โมไดนามิกส์ มาวิเคราะห์หาเทอร์โมไดนามิกส์บอทเทิลเนค (Thermodynamic Bottleneck) หรือจุดพินช์ (pinch point) ของการแลกเปลี่ยนมวลระหว่างสายของไหลที่มีสิ่งเจือปนกับสายของไหลที่ไม่มีสิ่งเจือปน ภายในขอบเขตที่มีอยู่ของระบบโดยวิธีการสร้างแผนผังแบ่งช่วงส่วนประกอบ (Composition-Interval-Diagram, CID) ซึ่งผลที่ได้จะทำให้ทราบถึงจุดต่ำสุดที่สามารถยินยอมให้เกิดการแลกเปลี่ยนสิ่งเจือปน ระหว่างทั้ง 2 สายได้ นอกจากนี้ค่าใช้จ่ายต่ำสุดของสารแยกมวลจะถูกหาได้โดยอยู่ภายใต้สภาวะขอบเขตทางเทอร์โมไดนามิกส์ หรือเรียกอีกทางหนึ่งคือ ความสัมพันธ์ที่สมดุล (Equilibrium Relation)

ขั้นที่ 2 เป็นการพัฒนาเพื่อหารูปแบบสุดท้ายของโครงข่ายแลกเปลี่ยนมวลที่จะก่อให้เกิดค่าใช้จ่ายต่ำสุดโดยประสิทธิภาพยังคงเท่าเดิม อย่างไรก็ตามวิธีการนี้โดยแรกเริ่มมีการประยุกต์ใช้

ได้กับองค์ประกอบหลักเดี่ยว (Single key component) และ ยังไม่มีขั้นตอนสำหรับการหาโครงข่ายแลกเปลี่ยนมวลสุดท้ายอย่างเป็นรูปแบบชัดเจน

El-halwagi และ Manousiouthakis (1990) ได้นำรูปแบบโปรแกรมเชิงเส้น (Linear Program: LP) ของโครงข่ายแลกเปลี่ยนความร้อนที่เสนอโดย Papoulias และ Grossmann (1983) มาประยุกต์ใช้กับโครงข่ายแลกเปลี่ยนมวลแบบคอมโพเนนท์เดี่ยวเพื่อวิเคราะห์หาจุดพินช์และหาค่าใช้จ่ายต่ำสุดของสารแยกมวลได้อย่างดี พร้อมทั้งได้พัฒนารูปแบบโปรแกรมจำนวนเต็มแบบผสม (Mixed Integer Linear Program, MILP) ขึ้นมาใช้กับโครงข่ายแลกเปลี่ยนมวลเพื่อหาจำนวนหน่วยแลกเปลี่ยนมวลสารที่น้อยที่สุด แต่โปรแกรมโครงข่ายแลกเปลี่ยนมวลดังกล่าวนี้ยังไม่ได้รวมไปถึงโครงข่ายแลกเปลี่ยนมวลของกระบวนการรีเจเนอเรต (Mass-Exchange Regeneration Network) สายของไหลที่มีความปนเปื้อนเพิ่มขึ้นเพื่อนำกลับไปใช้ใหม่ในกระบวนการ

El-halwagi และ Manousiouthakis (1990) ได้เสนอขั้นตอนการศึกษาโครงข่ายแลกเปลี่ยนมวลในการแยกสารระหว่างสายของไหลที่มีสิ่งเจือปนกับสายของไหลที่ไม่มีสิ่งเจือปน ควบคู่กับโครงข่ายแลกแลกเปลี่ยนมวลของกระบวนการรีเจเนอเรต โดยมีรูปแบบโปรแกรมจำนวนเต็มผสมแบบไม่เชิงเส้นตรง (Mixed Integer Nonlinear Program: MINLP)

Papalexandi, Pistikopoulos และ Floudas (1994) ได้ชี้แจงปัญหาของการวิเคราะห์โครงข่ายแลกเปลี่ยนมวล พร้อมทั้งได้นำเสนอโครงสร้างขั้นสูงในรูปแบบโปรแกรมจำนวนเต็มผสมแบบไม่เชิงเส้นตรง ที่สามารถวิเคราะห์โครงข่ายแลกเปลี่ยนมวลได้ครอบคลุมถึงค่าใช้จ่ายปฏิบัติการต่อปีต่ำสุดเมื่อเทียบความสัมพันธ์กับเงินลงทุนด้วย

Gupta และ Manousiouthakis (1994) นำเสนอโครงข่ายการแลกเปลี่ยนมวลสำหรับจัดการปัญหาการลดของเสียให้น้อยที่สุด โดยเป็นรูปแบบแลกเปลี่ยนมวลสารมากกว่า 1 คอมโพเนนท์ พร้อมทั้งใช้ "State Space Approach" ในการสังเคราะห์ปัญหาโครงข่ายแลกเปลี่ยนมวล ซึ่งเป็นการทดลองศึกษาในระบบรีไซเคิลและนำกลับมาใช้ใหม่ของกระบวนการแยกสารประกอบไนโตรเจนออกจากสายของเสียของโรงงานผลิตปุ๋ยเคมี

เห็นได้ว่างานวิจัยที่ผ่านมาข้างต้นเป็นการศึกษาเกี่ยวกับกลุ่มของสายของไหลที่มีสิ่งเจือปน กับกลุ่มของสายของไหลที่ไม่มีสิ่งเจือปน โดยนักวิจัยพยายามเสนอถึงขั้นตอนการแก้ปัญหาโครงข่ายแลกเปลี่ยนมวลอย่างเป็นระบบ ดังนั้น รูปแบบโปรแกรมเชิงเส้นตรง รูปแบบโปรแกรมจำนวนเต็มแบบผสม และรูปแบบจำนวนเต็มผสมแบบไม่เชิงเส้นตรง จึงถูกเสนอขึ้นมา เพื่อให้วิเคราะห์จัดหาคู่ที่เหมาะสมในการแลกเปลี่ยนมวลระหว่างสายของไหลที่มีสิ่งเจือปนกับสายของไหลที่ไม่มีสิ่งเจือปน เพื่อหาปริมาณของมวลที่สามารถถูกแลกเปลี่ยนได้ หาปริมาณของสารแยกมวลที่ต้องการใช้ในการแลกเปลี่ยนมวล และหาค่าใช้จ่ายต่ำสุดของโครงข่ายแลกเปลี่ยนมวล ซึ่งเห็นได้ว่ารูปแบบโปรแกรมดังกล่าวนี้จะไม่สามารถใช้ได้หากไม่มีข้อมูลของสายของไหลที่ไม่มีสิ่งเจือปนเพียงพอ เช่น ขาดข้อมูลอัตราการไหล หรือ ส่วนประกอบ (Composition) ของสายของไหลที่ไม่มีสิ่งเจือปน

2.3 การประยุกต์โครงข่ายแลกเปลี่ยนมวลกับการลดน้ำเสียของกระบวนการ

Wang และ Smith (1994) นำเสนอการประยุกต์เทคนิคพินช์ในการจัดการน้ำเสียให้น้อยที่สุด (Wastewater Minimisation) ซึ่งเป็นการใช้หลักการพินช์ในเชิงของการแลกเปลี่ยนมวล เพื่อลดการใช้น้ำในกระบวนการผลิตหรือระบบสนับสนุนของโรงงานอุตสาหกรรมเคมีให้น้อยลง อันจะส่งผลให้ปริมาณน้ำเสียลดลงด้วย ซึ่งแนวทางสำหรับการลดน้ำเสียประกอบด้วย 4 แนวทาง ดังนี้

1. การเปลี่ยนกระบวนการ (Process Change) ดังเช่น การเปลี่ยนกระบวนการทำความเย็นด้วยน้ำมาเป็นการทำความเย็นด้วยอากาศ หรือการใช้สารอื่นเป็นตัวสกัดแทนน้ำ เป็นต้น แต่วิธีเหล่านี้เป็นการแก้ปัญหาการใช้น้ำเฉพาะที่ โดยไม่ได้พิจารณาถึงการใช้น้ำทุกระบบในโรงงาน

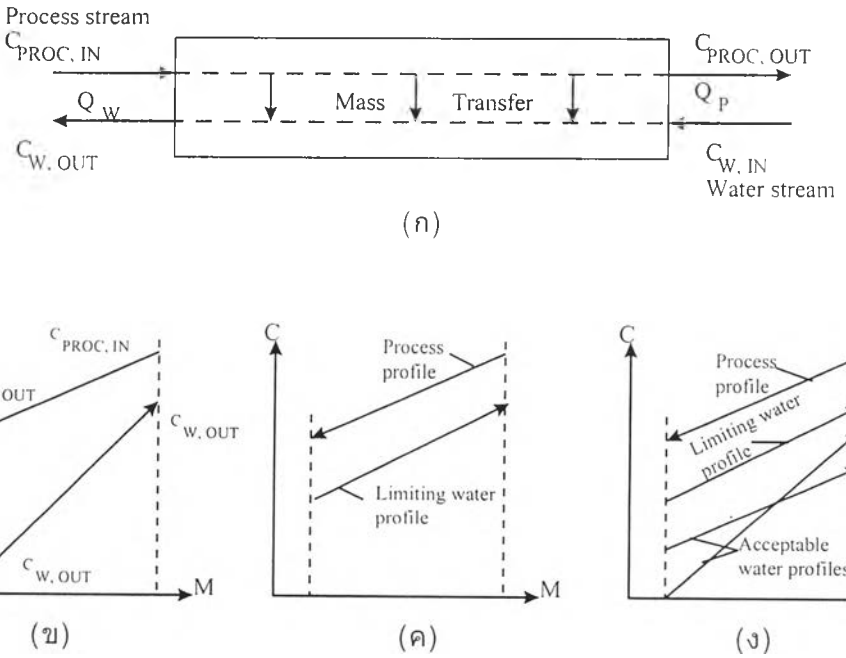
2. การนำกลับมาใช้ใหม่ (Re-use) ซึ่งอาจเป็นการนำน้ำที่ผ่านการใช้ในกระบวนใดกระบวนการหนึ่งมาแล้วไปใช้ต่อในกระบวนการอื่นหรือกระบวนการเดิมโดยตรง หรืออาจมีการนำมาผสมน้ำสะอาดหรือน้ำที่ผ่านการใช้มาจากกระบวนการอื่นก็ได้ โดยกระบวนการที่จะนำน้ำส่วนนี้ไปใช้ต่อ สามารถยอมรับค่าความสกปรกของน้ำที่ผ่านจากกระบวนการแรกได้

3. การปรับปรุงคุณภาพแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ (Regeneration re-use) วิธีการนี้มีลักษณะเดียวกับการนำมาใช้ใหม่ แต่มีการเพิ่มขั้นตอนการกำจัดสิ่งสกปรกบางส่วนออกไปก่อนที่จะนำไป

ใช้ในกระบวนการต่อไป รวมถึงการนำไปผสมกับน้ำสะอาดหรือน้ำที่ผ่านการใช้งานแล้วจากกระบวนการอื่น แล้วจึงนำไปใช้ในกระบวนการอื่นต่อไป แต่จะไม่นำกลับมาใช้ในกระบวนการเดิม

4. การปรับปรุงคุณภาพแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการเดิม (Regeneration-recycling) โดยรูปแบบของวิธีการนี้เป็นไปในลักษณะเดียวกับวิธีการปรับปรุงคุณภาพน้ำแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ แต่วิธีนี้จะนำน้ำกลับมาใช้เฉพาะในกระบวนการเดิมเท่านั้น

Wang และ Smith (1994) เสนอตัวอย่างการลดน้ำเสียจากกระบวนการอุตสาหกรรมให้น้อยที่สุด โดยการนำน้ำกลับมาใช้ให้ได้มากที่สุดภายใต้ข้อจำกัดของกระบวนการ ซึ่งในตัวอย่างจะใช้น้ำเป็นสายของไหลที่ไม่มีสิ่งเจือปนนำไปใช้ถ่ายโอนมวลสารกับสายของไหลจากกระบวนการที่มีสิ่งเจือปน ดังรูป 2.1 (ก) แสดงสายน้ำใช้ในกระบวนการเพื่อถ่ายโอนมวลกับสายของไหลที่มีสิ่งเจือปนจากกระบวนการ รูป 2.1 (ข) เส้นแสดงความเข้มข้นกับปริมาณของสิ่งเจือปนที่ถูกถ่ายโอนของสายของไหลทั้ง 2 สาย รูปที่ 2.1 (ค) แสดงเส้นขอบเขตจำกัดของน้ำ (Limiting Water Profile) ซึ่งเป็นเส้นแสดงความเข้มข้นสูงสุดของน้ำขาเข้าและออกที่กระบวนการจะยอมรับได้ และรูปที่ 2.1 (ง) เห็นได้ว่าเส้นจ่ายน้ำ (Water Supply Line) ทุกเส้นที่มีค่าต่ำกว่าขอบเขตจำกัดของน้ำ จะสามารถนำมาใช้ในกระบวนการนี้ได้



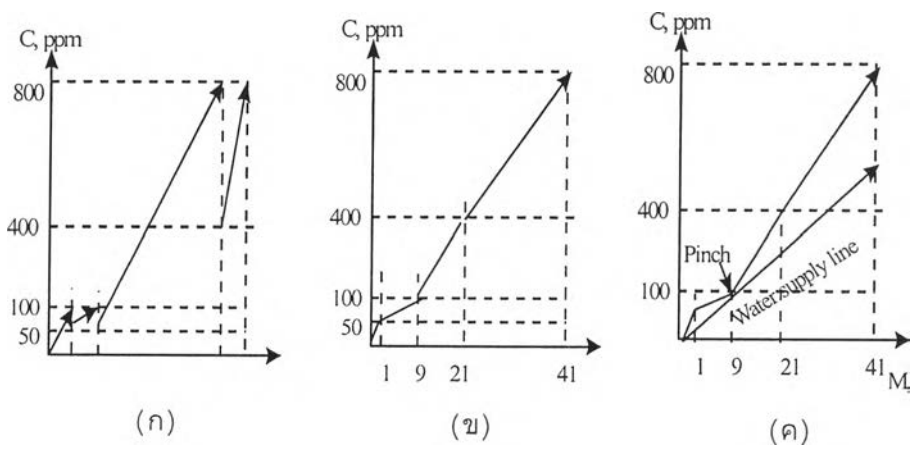
รูป 2.1 ลักษณะการใช้น้ำในกระบวนการ (Wang และ Smith, 1994)

การประยุกต์เทคนิคพินช์มาเพื่อหาสภาวะการใช้น้ำน้อยที่สุดในการทำให้กระบวนการถ่ายโอนมวลมีประสิทธิภาพเท่าเดิม ซึ่งจุดพินช์ดังกล่าวหาได้จากจุดสัมผัสระหว่าง Limiting Composite curve กับเส้นจ่ายน้ำ (water supply line) อันจะทำให้ทราบถึงอัตราการใช้น้ำที่ต่ำที่สุดในกระบวนการถ่ายโอนมวลดังกล่าว ดังตัวอย่างต่อไปนี้

ตารางที่ 2.1 ข้อมูลของกระบวนการตัวอย่าง

กระบวนการ	มวลของสิ่งเจือปน (กิโลกรัม/ชั่วโมง)	ความเข้มข้นขาเข้า (หนึ่งในล้านส่วน)	ความเข้มข้นขาออก (หนึ่งในล้านส่วน)	อัตราการไหลน้ำ (ตัน/ชั่วโมง)
1	2	0	100	20
2	5	50	100	100
3	30	50	800	40
4	4	400	800	10

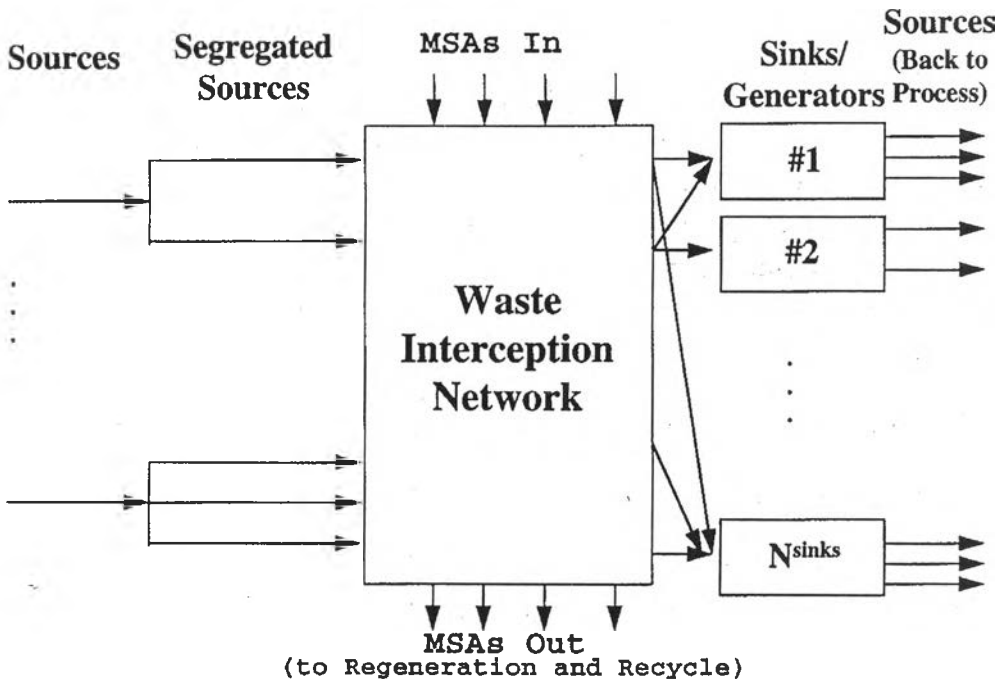
ข้อมูลของกระบวนการตัวอย่างดังตารางที่ 2.1 นำมาทำการวิเคราะห์เพื่อออกแบบระบบที่จะให้มีการใช้น้ำน้อยที่สุดในการถ่ายโอนมวล ทำได้ดังรูป 2.2 (ก) จากข้อมูลกระบวนการสามารถนำมาสร้างเป็นเส้นขอบเขตจำกัดของน้ำแต่ละกระบวนการ จากนั้นจึงสร้างเส้นภาระน้ำรวมจำกัด (Limiting Composite Curve) ได้ดังรูป 2.2 (ข) และเมื่อลากเส้นจ่ายน้ำสัมผัสกับเส้นภาระน้ำรวมจำกัดจะได้จุดพินช์ และปริมาณน้ำต่ำสุดที่ต้องใช้สำหรับกระบวนการนี้ ดังรูป 2.2 (ค)



รูป 2.2 การสร้างเส้นภาระน้ำรวมจำกัด และค่าต่ำสุดของการใช้น้ำ (Wang และ Smith, 1994)

El-Halwagi, Hamad และ Garrison (1995) เสนอแนวคิดการสังเคราะห์โครงข่ายเชื่อมตัดของเสีย (Waste-interception networks, WINs) ซึ่งเป็นการติดตามสารมลพิษ (pollutant) ที่อยู่ในสายของไหลของกระบวนการทุกสาย แทนการไปติดตามที่สายของเสียรวมปลายทาง ซึ่งสามารถใช้ได้ทั้งสายของของเหลวหรือก๊าซ ซึ่งเครื่องมือที่ใช้มี 2 รูปแบบคือ รูปแบบกราฟ เรียกว่า "แผนผังเส้นทาง (Path Diagram)" และรูปแบบโปรแกรมจำนวนเต็มผสมแบบไม่เชิงเส้นตรง เพื่อติดตามสารมลพิษที่ผ่านกระบวนการ หาจุดเหมาะสมของการแลกเปลี่ยนมวล และค่าใช้จ่ายที่ต่ำสุดของโครงข่ายแลกเปลี่ยนมวล

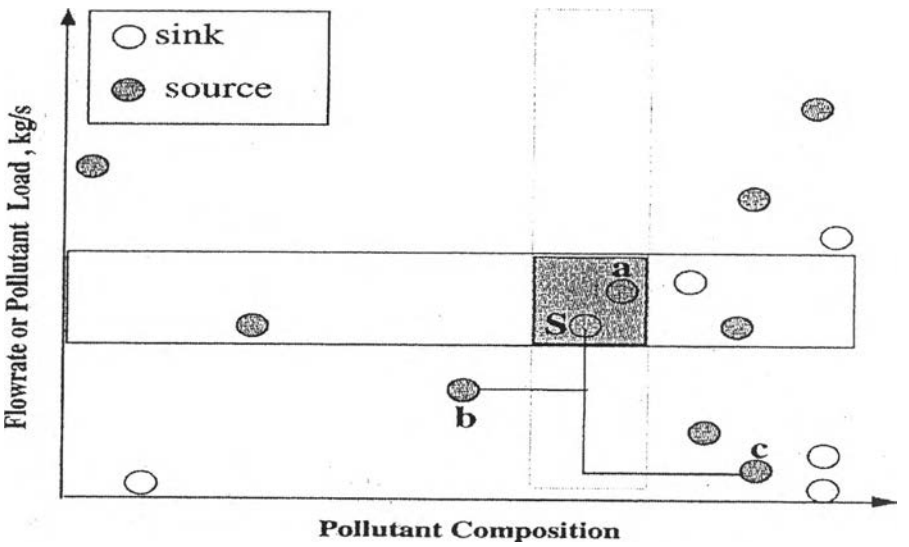
การประยุกต์ใช้โครงข่ายเชื่อมตัดของเสีย (WINs) กับการลดน้ำเสียให้น้อยที่สุด สามารถประยุกต์ใช้กันได้โดยอาศัยหลักการแจกแจงมวลของสายน้ำเสียในภาพรวมทั้งกระบวนการ การแยกประเภท (segregation) การเชื่อมตัด (interception) และ การรีไซเคิล (recycle) ดังรูป 2.3 ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับคำ 2 คำคือ "แหล่งให้น้ำ (Source)" และ "แหล่งรับน้ำ (Sink)" โดย "แหล่งให้น้ำ" หมายถึงกระบวนการที่ก่อให้เกิดของเสียหรือมลพิษที่เราติดตาม และ "แหล่งรับน้ำ" หมายถึงกระบวนการที่สามารถยอมรับของเสียหรือมลพิษที่เราติดตามเหล่านั้นได้



รูป 2.3 รูปแบบโครงข่ายเชื่อมตัดของเสีย (El-Halwagi, 1997)

การหาสภาวะที่มีความเหมาะสมที่สุดของการแจกแจงน้ำเสียหรือสิ่งเจือปนในน้ำเสียของภาพรวมทั้งกระบวน มีหลักการเริ่มต้นจากการจำแนก "แหล่งให้น้ำ" คือ แหล่งหรือสายของไหลที่มีสิ่งเจือปน เพื่อหาทางนำเอาสายของไหลเหล่านั้นส่งไปยัง "แหล่งรับน้ำ" คือ หน่วยที่จะสามารถยอมรับสายของไหลหรือสิ่งเจือปนเหล่านั้นไปใช้ได้ โดยวิเคราะห์รวมถึงสายของไหลที่ออกมาจาก "แหล่งรับน้ำ" จะกลายเป็น "แหล่งให้น้ำ" ต่อไป

และเพื่อหาโอกาสของการนำน้ำเสียกลับมาใช้ให้ได้มากที่สุด จึงมีแนวคิดเพิ่มขึ้นว่า 'แหล่งให้น้ำ" ยังสามารถที่จะถูกผสมเข้าด้วยกัน และนำกลับไปใช้ใหม่ได้ ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล หรือปริมาณของสิ่งเจือปน (contaminant load) กับ ความเข้มข้นของสิ่งเจือปนที่เกิดขึ้นแสดงได้ดังรูป 2.4 เรียกว่า "แผนภาพ แหล่งให้น้ำ - แหล่งรับน้ำ" (Sources-Sinks Mapping)

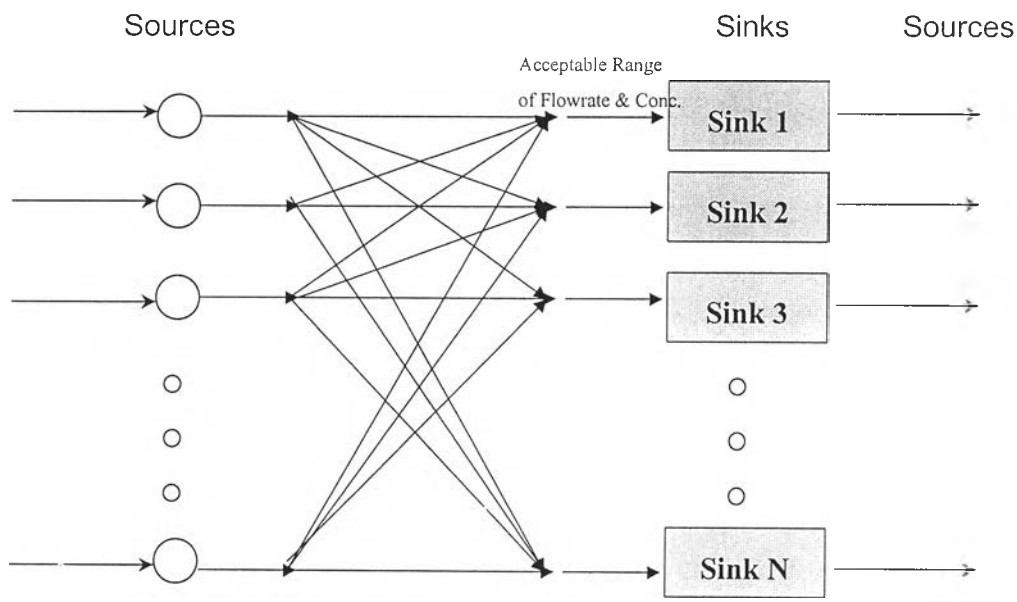


รูป 2.4 แผนภาพ "แหล่งให้น้ำ – แหล่งรับน้ำ" (El-Halwagi, 1997)

รูป 2.4 วงกลมที่แรเงา คือ "แหล่งให้น้ำ" และ วงกลมธรรมดา คือ "แหล่งรับน้ำ" ซึ่งโดยทั่ว ๆ ไป ช่วงของความเข้มข้นของสิ่งเจือปนแต่ละชนิดจะถูกจำกัดโดยขอบเขตของกระบวนการ ซึ่งได้แก่ส่วนที่ตัดกันของบริเวณที่ยอมรับได้ของ "แหล่งรับน้ำ" กับ "แหล่งให้น้ำ" บริเวณที่ได้นี้จะเป็นบริเวณที่สามารถนำกลับไปใช้ใหม่ได้

สำหรับ "แหล่งให้น้ำ" ใด ๆ ซึ่งเชื่อมอยู่ภายในบริเวณดังกล่าวนี้ จะสามารถนำกลับไปใช้ได้โดยตรงใน "แหล่งรับน้ำ" นั้น โดยจากรูป 2.4 จะเห็นได้ว่าจาก "แหล่งให้น้ำ a" ไป "แหล่งรับน้ำ S" ขณะที่การผสมที่ได้ของแต่ละสาย โดยสายที่ผสมกันจะถูกจัดลำดับให้นำกลับไปใช้ใน "แหล่งรับน้ำ" ก่อน "แหล่งให้น้ำ" อื่น ๆ ดังรูป 2.4 ซึ่ง "แหล่งให้น้ำ b และ c " จะสามารถผสมและถูกนำนำกลับไปใช้ใน "แหล่งรับน้ำ S" ได้ก่อนแหล่งให้น้ำอื่น ๆ

Srinivas และคณะ (1996) เสนอโครงข่ายการแจกแจงมวล โดยอาศัยหลักการแยก การผสม และการนำกลับไปใช้โดยตรง (ดังรูป 2.5) โดยถือหลักว่าสายของไหลทุกสายที่ออกจากกระบวนการจะเป็น "แหล่งให้น้ำ" จากนั้นจะถูกนำมาแยกประเภท ผสม และแจกจ่ายไปยังหน่วยอื่น ๆ รวมทั้งกลับเข้าสู่กระบวนการ โดยมีขอบเขตการยอมรับได้ของกระบวนการเป็นข้อจำกัดในการนำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งขอบเขตการยอมรับได้หรือไม่ขึ้นกับอัตราการไหล และ ความเข้มข้นของสิ่งเจือปนที่แต่ละ "แหล่งรับน้ำ" จะยอมรับได้ ดังนั้นการออปติไมซ์ จะสามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อหาอัตราการไหล และ ความเข้มข้นของสิ่งเจือปนของแต่ละสายของไหลที่สามารถสอดคล้องกับสภาวะขอบเขตทั้งหมดของกระบวนการ



รูป 2.5 การแจกแจงมวล ผ่านกระบวนการแยก ผสม และนำกลับไปใช้ใหม่โดยตรง (Srinivas, 1996)

2.4 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้เทคนิคพินช์เพื่อลดการใช้น้ำในภาคอุตสาหกรรม

Takama และคณะ (1980) ศึกษาวิธีนำกลับมาใช้ใหม่ และการปรับปรุงคุณภาพแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ จัดสรรการใช้น้ำในโรงกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม ซึ่งมีผลให้ค่าใช้จ่ายของน้ำใช้ และค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำทิ้งลดลง

Wang และ Smith (1994) ได้ศึกษาการใช้น้ำในโรงกลั่นน้ำมันโดยใช้เทคนิคพินช์ พบว่าการนำกลับมาใช้ใหม่ และการปรับปรุงคุณภาพแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ จะทำให้ค่าอัตราการใช้น้ำที่ต่ำที่สุดเท่ากับ 55.5 ตันต่อชั่วโมงเทียบกับกรณีที่ไม่ได้ทำการปรับปรุงคุณภาพแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งใช้น้ำ 107.5 ตันต่อชั่วโมง นอกจากนี้พบว่าการนำกลับมาใช้ใหม่โดยตรง โดยไม่มีการปรับปรุงคุณภาพจะลดค่าใช้จ่ายได้ร้อยละ 20 เมื่อเทียบกับกรณีที่ไม่ได้ทำ ส่วนการทำการปรับปรุงคุณภาพแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ จะลดค่าใช้จ่ายได้ร้อยละ 26 เมื่อเทียบกับกรณีที่นำกลับมาใช้โดยตรง

Hamilton และ Dowson (1994) ได้ลดการใช้น้ำในการผลิตของบริษัท ยูนิลีเวอร์ โดยใช้เทคนิคพินช์กับน้ำเสีย ซึ่งพบว่าจะสามารถลดการใช้น้ำใหม่ได้ถึงร้อยละ 50 และลดปริมาณน้ำเสียลงได้ถึงร้อยละ 65 โดยการดำเนินการปรับปรุงระบบถังพักเพิ่มหนึ่งถัง และปรับปรุงระบบท่อในโรงงานบางส่วน

Alan และ Frank (1996) ได้ทำการประยุกต์ใช้เทคนิคพินช์ในระบบการใช้น้ำของบริษัทมอนซานโต ทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสียได้ถึงร้อยละ 30 และปริมาณของน้ำเสียก็ลดลงด้วย

2.5 การออปติไมซ์

การออปติไมซ์คือ วิธีการหาคำตอบที่ดีที่สุดแก่กระบวนการภายใต้ข้อจำกัดของระบบหรือกระบวนการนั้นๆ โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นตัวบ่งชี้เชิงตัวเลขของคำว่า "คำตอบที่ดีที่สุด" ฟังก์ชันที่พิจารณาอาจเป็นต้นทุน ค่าใช้จ่ายด้านการดำเนินงาน ผลผลิต กำไรสุทธิ และอื่นๆ ค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์หาได้โดยการปรับตัวแปรตัดสินใจ (ตัวแปรปรับ) ของกระบวนการ ตัวแปรเหล่านี้อาจเป็นขนาดของอุปกรณ์ และสภาวะการปฏิบัติการของกระบวนการ ได้แก่ ความดัน อุณหภูมิ และอัตราการไหล ซึ่งการปรับต้องพิจารณาภายใต้ข้อจำกัดในการปฏิบัติการของกระบวนการ ได้แก่ ความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ ความเป็นไปได้ของแบบจำลอง และความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร

หน้าที่ของวิศวกรคือ การปรับปรุงหรือเปลี่ยนแปลงวิธีการและเงื่อนไขทางด้านการผลิต การออกแบบอุปกรณ์ และการดำเนินงานของโรงงาน เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด ซึ่งปัจจัยของกระบวนการผลิตที่เกี่ยวกับผลประโยชน์ของการออปติไมซ์อาจจำแนกได้ตามหัวข้อต่างๆ ดังนี้

1) แรงจูงใจด้านเศรษฐศาสตร์ (Economic Incentives) ได้แก่
   - กำไรสูงที่สุด
   - ค่าใช้จ่ายต่ำสุดทั้งค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการใช้พลังงาน และค่าใช้จ่ายสำหรับการปฏิบัติการ
   - การใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่ามากที่สุด
   - กำลังของเครื่องจักรต่ำที่สุด

2) แรงจูงใจเกี่ยวกับเทคนิค (Technical Incentives) ได้แก่
   - วิธีการดำเนินงานทางกระบวนการที่ดีที่สุด
   - ปริมาณผลผลิตที่เพิ่มสูงขึ้น และ/หรือการเพิ่มคุณภาพของผลิตภัณฑ์
   - การเลือกสรรที่น่าพอใจที่สุด
   - การหยุดชะงักของเครื่องจักร หรือการปฏิบัติการของกระบวนการมีโอกาสเกิดขึ้นน้อยที่สุด

3) หน้าที่โดยรวมของการออกแบบและการปฏิบัติการ (Integral Part of Design and Operation)
   - การออปติไมซ์ของการสังเคราะห์กระบวนการ
   - การออปติไมซ์ของการดำเนินงาน
   - เกี่ยวกับด้านเทคนิคและเศรษฐศาสตร์
   - การควบคุมกระบวนการ

การแก้ปัญหาออปติไมเซชันคือ การใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ การหาคำตอบเชิงตัวเลขของปัญหา ดังนั้นการตั้งปัญหาออปติไมซ์จะต้องใช้สมการคณิตศาสตร์ นั่นแสดงว่าการออปติไมซ์จะเป็นไปได้ก็ต่อเมื่อสามารถแปลงปัญหาเป็นสมการทางคณิตศาสตร์ได้ โดยปัญหาออปติไมซ์เหล่านี้จะมีโครงสร้างคล้ายคลึงกัน ทำให้การศึกษา และพัฒนาเทคนิคการออปติไมซ์ทำได้รวดเร็วขึ้นในระยะเวลาไม่กี่ปีที่ผ่านมา โครงสร้างคล้ายคลึงกันนี้จะมีเฟรมเวิร์กหรือวิธีการเหมือน ๆ กัน สำหรับส่วนประกอบที่สำคัญในการทำออปติไมซ์ ได้แก่

2.5.1 ส่วนประกอบของการออปติไมซ์

สิ่งจำเป็นที่สำคัญ 4 อย่างก่อนการออปติไมซ์กระบวนการ ประกอบด้วย

1. แบบจำลองกระบวนการ (Process Model)
2. ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function)
3. ข้อจำกัด (Constraint)
4. ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variable)

2.5.1.1 แบบจำลองกระบวนการ

จุดประสงค์ของแบบจำลองคือ เพื่อหาคำตอบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และตำแหน่งของข้อจำกัด แบบจำลองกระบวนการที่ดีเป็นสิ่งที่สำคัญของการคำนวณทางวิศวกรรมกระบวนการ ซึ่งแบบจำลองอาจจำแนกได้เป็น 2 กรณีใหญ่ๆ

1) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model)

วิธีการธรรมดาที่สุดคือ สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการ เพื่อใช้แบบจำลองในการทำออปติไมซ์เพื่อหาสภาวะที่ดีที่สุดของแบบจำลองกระบวนการ และข้อมูลกระบวนการ ได้แก่

- ที่ได้จากกระบวนการจริง (Phenomenological)
- ที่ได้จากการทดลอง (Empirical)
- ที่ได้จากการทดสอบ (Response Surface)

2) กระบวนการจริง (Actual Process)

วิธีใช้กระบวนการจริงหาสภาวะที่ดีที่สุด ปรากฏเป็นจริงกว่าวิธีสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการ แต่จะยุ่งยากกว่า ซึ่งต้องมีการวัดของกระบวนการออนไลน์ที่ดี (On-line Process Measurements) และสามารถปรับพารามิเตอร์เพื่อหาสภาวะที่ดีที่สุดได้

2.5.1.2 **ฟังก์ชันวัตถุประสงค์** (Objective Function)

ฟังก์ชันวัตถุประสงค์หมายถึงสมการหรือกลุ่มสมการที่สร้างขึ้น เพื่อใช้คำนวณตามวัตถุประสงค์ที่สร้างขึ้น ซึ่งมีทั้งการคำนวณแบบเพื่อหาค่าต่ำสุด และแบบเพื่อหาค่าสูงสุด ซึ่งฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการออปติไมซ์กระบวนการมีหลายรูปแบบด้วยกันตามวัตถุประสงค์ของงาน ยกตัวอย่างเช่น

1) งานทางด้านเศรษฐศาสตร์ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์อาจเป็น

- ค่าใช้จ่ายรายปี
- กำไรสุทธิ
- ผลตอบแทนของการลงทุนได้แก่ เงินที่ได้และเวลาที่เสียไป
- รายได้

2) งานทางด้านการพัฒนาเกี่ยวกับเทคโนโลยีทางการผลิต ฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับออปติไมซ์กระบวนการอาจเป็น

- การใช้เวลาในการผลิตน้อยสุด
- การใช้พลังงานต่ำสุด
- อัตราการผลิตสูงสุด

2.5.1.3 **ข้อจำกัด** (Constraint)

การออปติไมซ์จะมีข้อจำกัดในแต่ละกระบวนการเสมอ เพื่อหาคำตอบภายในช่วงขอบเขตดำเนินการ (Feasible Region) ของตัวแปรตัดสินใจ หรือพื้นที่ของตัวแปรตัดสินใจที่เป็นไปได้ถูกกำหนดขอบเขตโดยข้อจำกัด ข้อจำกัดเกิดขึ้นจากแหล่งที่มาต่างๆ ดังนี้

1) ข้อจำกัดภายนอก
   - ถูกต้องตามกฎหมาย และพระราชบัญญัติ
   - กฎทางธรรมชาติได้แก่ ดุลมวลและพลังงาน และผลรวมของสัดส่วนโมล
   - สภาพความต้องการสินค้า

2) ข้อจำกัดภายใน
   - กำหนดโดยผู้ออกแบบกระบวนการ
   - เหมาะสมกับความสัมพันธ์ที่กำหนด
   - เกิดจากการออกแบบของอุปกรณ์
   - สมบัติของสาร ได้แก่ อุณหภูมิและความดัน
   - การไหลที่เชื่อถือได้
   - ความสามารถที่จะรับได้ต่ำสุด หรือสูงสุด
   - กฎเกณฑ์ที่เคร่งครัด ได้แก่การท่วมของเทรย์ในหอกลั่น

เงื่อนไขทางธรรมชาติของระบบด้านการผลิตทางกายภาพ จะกำหนดพื้นที่ หรือขอบเขตที่เป็นไปได้ (Feasible Region) และคำตอบที่ต้องการจะอยู่ภายในขอบเขตที่เป็นไปได้นี้ ซึ่งข้อจำกัดมีอยู่ 2 แบบ ได้แก่

1) ข้อจำกัดที่เป็นสมการ (Equality Constraints) เป็นข้อจำกัดที่มีเครื่องหมาย = ในสมการ ซึ่งเป็นสมการที่แสดงข้อกำหนดของแบบจำลองกระบวนการ และผลิตภัณฑ์ เช่น

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สมการดุลมวลสาร และพลังงาน สมการผลรวมของเศษส่วนโมล และความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์

2) ข้อจำกัดที่เป็นอสมการ (Inequality Constraints) เป็นข้อจำกัดที่มีเครื่องหมาย $<$, $>$, $\leq$, $\geq$ หรือ $\neq$ ในสมการซึ่งเป็นสมการที่แสดงข้อจำกัดของการออกแบบ และข้อจำกัดต่างๆ เช่นเศษส่วนโมล และค่าอัตราการไหลควรมากกว่าหรือเท่ากับศูนย์, ค่าสูงสุดของความดันของระบบ, ค่าสูงสุดของปริมาตรของสารที่เครื่องปฏิกรณ์รับได้ และค่าต่ำสุดของอัตราการผลิต หรือความบริสุทธ์ของผลิตภัณฑ์

2.5.1.4 **ตัวแปรตัดสินใจ** (Decision Variable)

ตัวแปรตัดสินใจเป็นตัวแปรที่ใช้ปรับ เพื่อหาค่าสูงสุดหรือต่ำสุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และส่งผลกระทบต่อฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ยกตัวอย่างเช่น อุณหภูมิ ความดัน อัตราการไหล ความเข้มข้น จำนวนเทรย์ และขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ เป็นต้น สำหรับในการปฏิบัติงานนของโรงงาน ตัวแปรตัดสินใจนี้จะเป็นเซตพอยท์ในระบบการควบคุมกระบวนการ

2.5.2 **อัลกอริทึมของการออปติไมซ์** (Optimization Algorithm)

อัลกอริทึม ใช้สำหรับการออปติไมซ์ จะใช้แบบจำลองของกระบวนการ และฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการหาเซทพอยท์ที่เหมาะสมใหม่ของกระบวนการ รูปแบบทั่วๆ ไปของการแก้ปัญหาสมการไม่เป็นเชิงเส้นด้วยการเลียนแบบกระบวนการ ณ สภาวะคงตัว สำหรับการออปติไมซ์ของโฟล์วชีทกระบวนการสามารถเขียนในรูปของสมการเป็น

การแก้ปัญหาการหาค่าต่ำสุด $\quad \text{Min } f(x) ; \quad x \in Rn \qquad (2.1)$

โดยมีเงื่อนไข

$$h_k(x) = 0$$

$$g_j(x) \leq 0$$

$$x_i^l \leq x_i \leq x_i^u$$

สำหรับปัญหาการหาค่าสูงสุดสามารถแทนด้วย $\max f(x) = - \min (- f(x))$

เมื่อ	f(x)	แทน	ออบเจคทีฟฟังก์ชัน
	$h_k(x)$	แทน	ข้อจำกัดที่เป็นสมการ
	$g_j(x)$	แทน	ข้อจำกัดที่เป็นอสมการ
	x_i	แทน	ตัวแปรอิสระ
	l	แทน	ขอบเขตล่าง
	u	แทน	ขอบเขตบน
	Rn	แทน	จำนวนจริง