บทที่ 2
ผลงานวิจัยที่ผ่านมา

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลงานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับวิธีการออกแบบข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน สำหรับวิธีการออกแบบข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบยืดหยุ่นของ Wongsri (1990) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จะได้กล่าวไว้ในบทที่ 3

2.1 วิธีการออกแบบข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไม่ยืดหยุ่น

ขั้นตอนของวิธีการออกแบบข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไม่ยืดหยุ่น แบ่งออกได้เป็น 2 ขั้นตอน คือ การวิเคราะห์เป้าหมายของข่ายงาน และการออกแบบข่ายงาน

2.1.1 การวิเคราะห์เป้าหมายของข่ายงาน

ขั้นตอนนี้จะกำหนดเป้าหมายสำหรับการออกแบบข่ายงานก่อน คือ ค่าพลังงานกลับคืนมากที่สุด (The Maximum Energy Recovery, MER) และจำนวนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนน้อยที่สุด (The Minimum Number of Units, MNU)

ค่าพลังงานกลับคืนมากที่สุด (MER) คือ พลังงานความร้อนมากที่สุดที่กระแสกระบวนการใช้แลกเปลี่ยนความร้อนกันเอง โดยสามารถหาได้จากไดอะแกรมอุณหภูมิและเอนทาลปี

(Hohmann, 1971) วิธีตารางปัญหา (Problem table method) พัฒนาโดย Hohmann (1971) และ Linnhoff et al. (1982) หรือเทคนิคการโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ (Cerda และ Westerberg, 1983) สำหรับวิธีเหล่านี้ นอกจากหาค่า MER ได้แล้ว ยังสามารถหาอุณหภูมิพินช์ได้ด้วย อุณหภูมิพินช์ มีความสำคัญที่จะแบ่งการแก้ปัญหาของข่ายงานออกเป็นข่ายงานย่อย ที่ใช้หน่วยยูทิลิตีให้ความร้อนเข้าไปข่ายงานหนึ่ง และข่ายงานที่ใช้หน่วยยูทิลิตีดึงความร้อนออกมาอีกข่ายงานหนึ่ง การแก้ปัญหาของข่ายงานย่อยทั้งสองจะเป็นอิสระต่อกัน ข่ายงานที่สมบูรณ์จะได้จากการนำข่ายงานย่อยทั้งสองมารวมกัน การออกแบบข่ายงานโดยแบ่งการแก้ปัญหาออกเป็นข่ายงานเหนือจุดพินช์และข่ายงานใต้จุดพินช์ ซึ่งสามารถทำให้ใช้พลังงานจากยูทิลิตีน้อยที่สุดได้ตามที่คำนวณไว้ (แต่ไม่จำเป็นที่ข่ายงานที่ออกแบบจะมีอุณหภูมิพินช์เสมอไป) จากวิธีของเส้นโค้งคอมโพสิต (Composite curves) ซึ่งพล็อตระหว่างค่าของอุณหภูมิ และเอนทาลปีนั้น จุดที่เส้นโค้งของส่วนประกอบรวมระหว่างกระแสร้อนและเย็น (กระแสร้อน คือกระแสที่ต้องการให้ความร้อนออกไป เพื่อให้อุณภูมิขาออกมีค่าลดลง กระแสเย็น คือกระแสที่ต้องการรับความร้อนเข้ามา เพื่อให้อุณภูมิขาออกมีค่าสูงขึ้น) มีระยะห่างในแกนอุณหภูมิเท่ากับ ΔT_{min} ก็คือ จุดพินช์ หรือในวิธีตารางปัญหา จุดพินช์จะเป็นจุดที่ไม่มีการส่งผ่านความร้อนจากข่ายงานย่อยหนึ่ง (Subnetwork) ไปยังอีกข่ายงานย่อยหนึ่ง

จำนวนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนน้อยที่สุด ในที่นี้จะรวมฮีตเตอร์และคูลเลอร์ในข่ายงานด้วย สามารถหาได้โดยสมการ (Hohmann, 1971)

$$N_{min} = N_h + N_c + N_{hu} + N_{cu} - 1 \qquad (2.1)$$

เมื่อ N_h และ N_c คือ จำนวนของกระแสร้อน และกระแสเย็นในกระบวนการผลิต

N_{hu} และ N_{cu} คือ จำนวนกระแสยูทิลิตีร้อน และกระแสยูทิลิตีเย็น

สำหรับข่ายงานที่มีอุณหภูมิพินช์ สมการดังกล่าวสามารถใช้ได้ทั้งการออกแบบข่ายงานย่อยเหนือจุดพินช์ และใต้จุดพินช์ (Linnhoff et al., 1982)

ในงานวิจัยนี้ จะใช้วิธีตารางปัญหาและสมการ 2.1 ในการวิเคราะห์เป้าหมายของข่ายงาน

2.1.2 การออกแบบข่ายงาน

การออกแบบข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน แบ่งได้เป็นสองวิธี คือ วิธีออปติไมเซชัน (Optimiztion method) และวิธีฮิวริสติก (Heuristic method)

1. วิธีออปติไมเซชัน

วิธีนี้ข้อมูลและเงื่อนไขการออกแบบ จะถูกเปลี่ยนไปในรูปของโมเดลทางคณิตศาสตร์ ซึ่งในบางปัญหาที่ซับซ้อนจะทำได้ยาก หรืออาจทำไม่ได้เลย ตัวอย่างของวิธีนี้ ได้แก่

ก. ปัญหาการขนส่ง (Transportation problem) ในปี 1983 Cerda และ Westerberg ได้พัฒนาวิธีนี้ขึ้นมาเพื่อนำมาใช้หาโครงสร้างข่ายงาน อาศัยหลักการส่งความร้อนจากกระแสร้อนไปยังเป้าหมาย คือ กระแสเย็น โดยใช้เงื่อนไขเกี่ยวกับเทอร์โมไดนามิกส์ช่วยในการพิจารณา

ข. โมเดลทรานส์ชิพเมนต์ (Transshipment models) ในปี 1986 Floudas และคณะ ได้เสนอวิธีการหาโครงสร้างข่ายงานได้อย่างอัตโนมัติ โดยรวมถึงการหาค่าพลังงานที่ใช้น้อยที่สุดจากหน่วยยูทิลิตี และจำนวนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนน้อยที่สุดสำหรับข่ายงานด้วย โดยใช้โมเดลทรานส์ชิพเมนต์สำหรับการออกแบบ และจัดเตรียมข้อมูลการหาโครงสร้างข่ายงาน

จากนั้นจึงใช้การโปรแกรมไม่เชิงเส้น (Nonlinear programming) สำหรับหาโครงสร้างข่ายงานที่สมบูรณ์ พร้อมทั้งลดค่าใช้จ่ายสำหรับการสร้างและการทำงานของข่ายงานให้เหลือน้อยที่สุด

2. วิธีฮิวริสติก เนื่องจากยังไม่มีทฤษฎีที่สมบูรณ์ใดๆ สำหรับหาโครงสร้างของข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน วิธีฮิวริสติกจะใช้ความรู้ที่ได้มาจากประสบการณ์ในการออกแบบนำมาแก้ปัญหา จึงมีข้อดีที่ไม่จำเป็นต้องทราบแบบจำลอง หรือสร้างสมการในการออกแบบเหมือนวิธีออปติไมเซชัน และสามารถเขียนด้วยภาษาคอมพิวเตอร์ชั้นสูงได้โดยตรง จึงทำให้การค้นหาโครงสร้างของข่ายงานที่ประหยัดพลังงานเป็นไปได้อย่างรวดเร็ว และมีประสิทธิภาพกว่า ตัวอย่างของวิธีฮิวริสติก เช่น

ก. กราฟ (Graphs) หรือ ไดอะแกรม (Diagrams) วิธีกราฟหรือไดอะแกรมนี้ มีผู้คิดไว้หลายแบบ เช่น ใช้ไดอะแกรมของปริมาณความร้อน กราฟของอุณหภูมิกับผลคูณของอัตราการไหลกับความจุความร้อนจำเพาะ (Nishida et al. ปี 1971, Pehler และ Liu ปี 1983) ไดอะแกรมของเอนทาลปี กราฟระหว่างอุณหภูมิและเอนทาลปี (Whistler, 1984) เป็นต้น วิธีต่างๆ เหล่านี้จะพยายามแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างกระแสร้อนและกระแสเย็น โดยใช้การตัดสินใจของผู้ออกแบบและใช้กฎฮิวริสติกช่วย เช่น ให้นำกระแสร้อนที่ร้อนมากที่สุดมาแลกเปลี่ยนความร้อนกับกระแสเย็นที่เย็นที่สุดก่อน

ข. วิธีการแบ่งช่วงอุณหภูมิ (Temperature interval method) ในปี 1978 Linnhoff และ Flower ได้เสนอวิธีการแบ่งข่ายงานออกเป็นข่ายงานย่อย (Subnetworks หรือ Temperature intervals) หลายๆ ข่ายงาน ข่ายงานย่อยเหล่านี้ แบ่งช่วงโดยใช้อุณหภูมิขาเข้าและขาออกของ

กระแส การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างข่ายงานย่อยๆ เหล่านี้สามารถทำได้ง่าย อย่างไรก็ดี การรวมข่ายงานย่อยเข้าด้วยกันจะทำได้ไม่ง่ายนัก และเมื่อใช้ออกแบบปัญหาที่มีจำนวนกระแสมากๆ และวิธีการแบ่งช่วงอุณหภูมินี้ ยังต้องใช้ร่วมกับวิธีออกแบบเชิงวิวัฒนาการด้วย

ค. วิธีออกแบบเชิงวิวัฒนาการ (Evolutionary design methods) โดยส่วนใหญ่แล้ว วิธีการแบ่งช่วงอุณภูมิ หรือวิธีอื่นๆ จะให้ข่ายงานมีจำนวนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมากกว่าค่าที่น้อยที่สุด หรือไม่สามารถทำให้พลังงานที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนกระแสกระบวนการถึงค่ามากที่สุดตามที่คำนวณได้ วิธีนี้จะปรับปรุงโดยลดจำนวนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และใช้พลังงานความร้อนจากหน่วยยูทิลิตีให้ได้ตามค่าที่ออกแบบ กฎการออกแบบของวิธีการออกแบบเชิงวิวัฒนาการนี้ มีผู้คิดค้นไว้หลายท่าน เช่น Linnhoff และ Flower (1978), Pehler และ Liu (1983), Su และ Motard (1984)

ง. วิธีพินช์ (Pinch method) วิธีนี้ Linnhoff และ Hindmarsh (1983) ได้ออกแบบฮิวริสติกซึ่งพัฒนามาจากผลงานวิจัยของ Linnhoff และ Flower (1978) โดยการออกแบบจะตรวจสอบว่า ปัญหาสามารถแบ่งเป็นปัญหาทางความร้อน (Heating problem ใช้ฮีตเตอร์ในข่ายงาน) และปัญหาทางด้านความเย็น (Cooling problem ใช้คูลเลอร์ในข่ายงาน) ด้วยอุณหภูมิพินช์ได้หรือไม่ และใช้ฮิวริสติกสำหรับการจับคู่กระแสเพื่อนำมาแลกเปลี่ยนความร้อน เช่น เริ่มจับคู่กระแสจากจุดพินช์ก่อน, ไม่ส่งผ่านความร้อนข้ามจุดพินช์ เป็นต้น

จ. วิธีการแจงนับ (Enumeration methods) วิธีนี้ใช้ความหลากหลายของเทคนิคการค้นหา (Search techniques) และฮิวริสติก เพื่อเลือกการจับคู่กระแสนำมาแลกเปลี่ยนความร้อนให้

เหมาะสม ผลงานวิจัยที่ผ่านมาเช่น Pho และ Lapidus (1973) Lee และคณะ (1970) Rathore และ Powers (1975) Flower และ Linnhoff (1980) Jezowski และ Hahne (1986)

ฉ. **วิธีฐานกฎ (Ruled-based methods)** ในปี 1987 Metha และ Fan ได้ใช้หลักการของระบบฐานความรู้ในการแก้ปัญหา โดยใช้กฎการออกแบบสองข้อสำหรับข่ายงานด้านปลายอุณหภูมิสูง (Hot end) และทางด้านปลายอุณหภูมิต่ำ (Cold end) ในปี 1989 Chen และ คณะ ได้ใช้ระบบฐานข้อมูลสร้างเป็นโปรแกรมในการหาโครงสร้างข่ายงาน พร้อมทั้งลดค่าใช้จ่ายของการสร้างและการทำงานของข่ายงานลงด้วย อย่างไรก็ตาม ข่ายงานแบบไม่ยืดหยุ่นที่ออกแบบโดยวิธีเหล่านี้ จะไม่สามารถรักษาอุณหภูมิขาออกของกระแสต่างๆ ให้เท่ากับอุณภูมิเป้าหมายได้เมื่อมีความแปรปรวนของอุณหภูมิขาเข้าและอัตราการไหล แม้ว่าจะแก้ไขโดยเพิ่มพื้นที่ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนให้มีค่าเปลี่ยนไปมากเพียงใดก็ตาม แต่ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้ ถ้าเลือกโครงสร้างของข่ายงานที่เหมาะสม ข่ายงานที่มีคุณสมบัติทำงานได้ในภาวะที่มีความแปรปรวนดังกล่าวนี้ เรียกว่า ข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบยืดหยุ่น (Resilient Heat Exchanger Network, RHEN)

มีศัพท์ภาษาอังกฤษที่เกี่ยวข้องในความหมายว่า "ยืดหยุ่น" อยู่สองคำก็คือ Resiliency และ Flexibility คำแรกหมายถึง ความสามารถในการทำงานของข่ายงาน ในภาวะความแปรปรวนที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้น ส่วนคำหลังนั้น หมายถึง ความสามารถของข่ายงานที่พร้อมจะปรับตัวให้ได้ตามความเปลี่ยนแปลงที่ต้องการ

โดยปกติแล้ว ผู้ออกแบบสามารถออกแบบโครงสร้างของข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนได้หลายโครงสร้างด้วยกัน สำหรับการหาโครงสร้างของข่ายงานที่มีความยืดหยุ่นวิธีง่ายๆ ก็คือ นำโครงสร้างทั้งหมดมาทดสอบว่า โครงสร้างใดที่สามารถทำงานได้ในภาวะความแปรปรวนของอุณหภูมิขาเข้า และอัตราการไหลในช่วงที่กำหนด ถ้าโครงสร้างใดสามารถทำให้อุณหภูมิขาออกของกระแส ถึงค่าอุณหภูมิเป้าหมายที่ต้องการได้ ก็จะเลือกโครงสร้างนั้นไปใช้งาน จะสังเกตได้ว่า ผู้ออกแบบไม่สามารถกำหนดหาโครงสร้างที่มีความยืดหยุ่นได้ตั้งแต่การเริ่มออกแบบ แต่จะหาโครงสร้างปกติมาหลายๆ โครงสร้าง แล้วนำมาคัดเลือกและทดสอบในภายหลัง วิธีนี้มีชื่อเรียกว่า วิธีแอดฮอค (Ad hoc method)

2.2 การออกแบบข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบยืดหยุ่น

ในปี 1983 Saboo และ Morari ได้แบ่งปัญหาการออกแบบข่ายงานแบบยืดหยุ่นออกเป็นสองประเภท ตามลักษณะความแปรปรวนที่ส่งผลต่อตำแหน่งของอุณหภูมิพินช์ สำหรับกรณีที่มีความแปรปรวนของอุณหภูมิขาเข้าเพียงเล็กน้อย และทำให้การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของพินช์เปลี่ยนแปลงไปในลักษณะที่ต่อเนื่อง จะเรียกว่าข่ายงานนั้นว่า เป็นปัญหาแบบคลาส I (Class I) แต่ในกรณีที่มีความแปรปรวนของอุณหภูมิขาเข้า หรือความแปรปรวนเนื่องจากอัตราการไหลมาก อุณภูมิพินช์จะเปลี่ยนแปลงไปอย่างไม่ต่อเนื่อง และจะเรียกว่าเป็นปัญหาแบบคลาส II (Class II)

Saboo และ Morari (1985) ได้เสนอการวัดความยืดหยุ่นของข่ายงานที่ออกแบบโดยใช้ดัชนีความยืดหยุ่น (Resiliency Index, *RI*) ซึ่งจะบอกถึงปริมาณความแปรปรวนสูงสุดที่ข่ายงานสามารถรับได้โดยไม่มีผลกระทบต่อเป้าหมายของข่ายงาน

$$RI = min\{ L_{i,max} \} \tag{2.2}$$

$$L_{i,max} = min\{L_o , R_o \} \tag{2.3}$$

$$L_i = W_i \, \Delta T_i^s \tag{2.4}$$

เมื่อ W_i คือ ผลคูณของอัตราการไหลกับความจุความร้อนจำเพาะ

ΔT_i^s คือ ความแปรปรวนของอุณหภูมิขาเข้าจากค่าที่ภาวะปกติ

L_o และ R_o คือ ค่าความแปรปรวน และค่าพารามิเตอร์ความยืดหยุ่น (Resiliency parameter) ตามลำดับ

Swaney และ Grossmann (1985) ได้เสนอพารามิเตอร์ตัวใหม่สำหรับวัดความยืดหยุ่นของข่ายงาน คือดัชนีความอ่อนโยน (Flexibility Index, *FI*) ซึ่งจะวัดขนาดหรือขอบเขตของภาวะที่ข่ายงานยังสามารถทำงานได้ตามปกติ

Calandranis และ Stephanopoulos (1986) ได้เสนอการวิเคราะห์วิธีการออกแบบโดยตรวจสอบ Nonconvexity ของข่ายงาน สำหรับกรณีพินช์ไม่ต่อเนื่อง และความแปรปรวนของอุณหภูมิ เป็นต้น

Saboo และ Morari (1987) ใช้วิธีการโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ในการวิเคราะห์ความยืดหยุ่นของข่ายงาน โดยใช้โปรแกรมเชิงเส้นและโปรแกรมเชิงเส้นหลายตัวแปร

2.2.1 การออกแบบข่ายงานด้วยวิธีการรวมข่ายงาน (Combination Design)

สำหรับการออกแบบข่ายงานแบบยืดหยุ่นด้วยวิธีนี้ จะคำนึงถึงสภาวะการทำงานในกรณีที่ความแปรปรวนถึงขีดสุด (Extreme points) โดยการหาคำตอบของข่ายงานที่สมบูรณ์ จะได้มาจากการรวมข่ายงานที่สภาวะดังกล่าวเข้าด้วยกัน ตัวอย่างวิธีเหล่านี้ เช่น

ก. การออกแบบที่สภาวะแย่ที่สุด (Worst cases design) ในปี 1982 Marselle และคณะ ได้เสนอวิธีวิเคราะห์ข่ายงานแบบยืดหยุ่น โดยพิจารณาในสภาวะการทำงานที่จุดขีดสุด 4 สภาวะด้วยกัน คือ ความร้อนสูงสุด(Maximum heating) ความเย็นสูงสุด (Maximum cooling) การแลกเปลี่ยนความร้อนรวมสูงสุด (Maximum total exchange) และการแลกเปลี่ยนความร้อนรวมต่ำสุด (Minimum total exchange) จากนั้นจะนำโครงสร้างทั้งหมดมารวมกัน ก็จะได้คำตอบสุดท้ายของข่ายงานที่นำไปใช้งานได้

ข. ทฤษฎีจุดมุม (Corner point theorem) Saboo และ Morari (1984) ใช้ทฤษฎีจุดมุมสำหรับข่ายงานที่มีความแปรปรวนเนื่องจากอุณหภูมิอย่างเดียว ถ้าข่ายงานสามารถแลกเปลี่ยนพลังงานได้ตามค่าสูงที่สุดได้ (MER) โดยปราศจากการไปรบกวน ΔT_{min} ที่จำนวน M จุด (โดย $M = 2N_h + 2N_c$) ข่ายงานนั้นจะมีโครงสร้างที่ยืดหยุ่น วิธีการออกแบบนี้ มีความคล้ายคลึงกับวิธีของ Marselle และคณะ (1982) แต่ว่าใช้สภาวะขีดสุดในการพิจารณาเพียงสองกรณี ดังนี้

สภาวะความเย็นสูงสุด (Maximum cooling) คือ กรณีที่กระแสทั้งหมดมีอุณหภูมิขาเข้าสูงที่สุด อัตราการไหลของกระแสร้อนมีค่าสูงที่สุด แต่อัตราการไหลของกระแสเย็นทุกกระแสมีค่าต่ำที่สุด

สภาวะความร้อนสูงสุด (Maximum heating) คือ กรณีที่กระแสทั้งหมดมีอุณหภูมิขาเข้าต่ำที่สุด อัตราการไหลของกระแสร้อนมีค่าต่ำที่สุด แต่อัตราการไหลของกระแสเย็นทุกกระแสมีค่าสูงที่สุด

การออกแบบจะใช้วิธีออปติไมเซชันและจะรวมทั้งกรณีสองเข้าด้วยกัน การทดสอบความยืดหยุ่นของโครงสร้างที่ได้จะใช้ค่าดัชนีความยืดหยุ่น (*RI*) และถ้าการทดสอบไม่ได้ผลก็จะทำการปรับค่า ΔT_{min} โดยเพิ่มหรือลดค่าตามความเหมาะสม หรือโดยวิธีเปลี่ยนตำแหน่งของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

ค. การออกแบบการดำเนินการหลายคาบ (Multiperiod Operation Design) วิธีนี้จะวิเคราะห์การทำงานของข่ายงานที่อัตราการไหล อุณหภูมิขาเข้า และขาออกของกระแสหลายๆ สภาวะ (Floudas และ Grossmann, 1986) โดยใช้โมเดลทรานส์ชิพเมนต์ในการออกแบบ

ง. การออกแบบโครงสร้างซ้อนทับ (Superstructure Design) Floudas และ Grossmann (1987) ใช้ผลงานจากปี 1986 มาปรับปรุง โดยนำโมเดลการออกแบบการดำเนินการหลายคาบมาใช้หาโครงสร้างกระสวนการจับคู่เพื่อที่จะเลือกการออกแบบที่เหมาะสม จากนั้นนำข้อมูลมาทดสอบว่าเป็นไปตามเงื่อนไขหรือไม่ ถ้าไม่ จะเพิ่มเงื่อนไขวิกฤตในการพิจารณาเข้าไป และปัญหาจะถูกนำมาจัดแก้ไขใหม่อีกครั้ง ซึ่งเมื่อได้ตามเงื่อนไขที่กำหนดแล้ว จะนำข้อมูลมาสร้างเป็นปัญหาทางการโปรแกรมไม่เชิงเส้น เพื่อหาจำนวนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่น้อยที่สุด หลังจากนั้น ข่ายงานที่ได้จะนำมาทดสอบความยืดหยุ่นโดยใช้ดัชนีความอ่อนโยน (*FI*) ถ้าการ

ทดสอบไม่ได้ผล ก็จะเปลี่ยนขนาดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน หรือเพิ่มเงื่อนไขวิกฤตอันใหม่เข้าไปที่โมเดลทรานส์ชิพเมนต์ หลังจากนั้นก็นำไปแก้ปัญหาใหม่อีกครั้ง

จ. **การออกแบบด้วยคอมพิวเตอร์ (Computer design package)** เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สร้างขึ้นโดย Saboo และ Morari (1986) สำหรับการออกแบบข่ายงานแบบยืดหยุ่น ความยืดหยุ่นของข่ายงานจะถูกทดสอบในช่วงความแปรปรวนที่กำหนด และคำนวณค่าดัชนีความยืดหยุ่น (*RI*) ออกมา การหาโครงสร้างของข่ายงานจะเป็นไปอย่างอัตโนมัติ โดยพัฒนามาจากโมเดลของ Papolias และ Grossmann (1983)

ฉ. **เทคนิคดาวน์พาธ (Downpath technique)** Linnhoff และ Kotjabasakis (1984) ได้ใช้พาธ (Paths) เชื่อมระหว่างตัวแปรของความแปรปรวนกับตัวแปรควบคุม การออกแบบที่สภาวะการทำงานปกติใช้วิธีพินช์ (Pinch method) จากนั้นตรวจสอบผลของความแปรปรวนต่อตัวแปรควบคุม ตัวแปรดังกล่าวจะถูกกำจัดออกไปโดยทำการเปลี่ยนตำแหน่ง หรือกำจัดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ถ้าขั้นตอนนี้ยังไม่ได้ผลก็จะเพิ่มกระบวนการควบคุมเข้าไปในโครงสร้างด้วย

ช. **ตารางความไว (Sensitivity table)** ปี 1986 Kotjabasakis และ Linnhoff พัฒนาวิธีนี้ขึ้นเพื่อใช้ตรวจสอบหาความเปลี่ยนแปลงของตัวแปรควบคุม จากการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรความแปรปรวน ข้อมูลการออกแบบที่ภาวะขีดสุด จะถูกนำมาพิจารณาและเพิ่มเข้าไปในการออกแบบที่ภาวะปกติ จากนั้นสร้างตารางความไวขึ้น เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแปรปรวนของอุณหภูมิและอัตราการไหล กับผลของอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปในข่ายงาน

ข้อเสียของการออกแบบข่ายงานด้วยวิธีการรวมข่ายงาน

ข้อเสียของวิธีการออกแบบข่ายงานด้วยวิธีการรวมข่ายงานที่กล่าวมา มีดังนี้คือ

1. โดยทั่วไป สภาวะการทำงานที่แย่ที่สุดของข่ายงานไม่สามารถรู้ได้ และไม่จำเป็นที่จะเกิดขึ้นที่จุดขีดสุด ข่ายงานอาจสามารถทำงานได้ที่สภาวะที่ออกแบบไว้ แต่ทำงานล้มเหลวที่จุดอื่นก็ได้
2. การรวมข่ายงานวิธีนี้ เป็นวิธีแอดฮอค ดังนั้น ผู้ออกแบบข่ายงานจะเสียเวลาในการลองผิดลองถูกค่อนข้างมากด้วย
3. วิธีเหล่านี้ไม่สามารถรับรองได้ว่า สามารถให้ข่ายงานที่มีจำนวนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจำนวนน้อยที่สุด (MNU) ตามค่าที่คำนวณได้หรือไม่
4. เนื่องจากในบางกรณีไม่ได้คำนึงถึงผลการเปลี่ยนตำแหน่งของอุณหภูมิพินช์ ซึ่งอาจมีผลต่อค่า MER ในบางกรณีจึงไม่สามารถหาข่ายงานที่ให้คุณสมบัติยืดหยุ่นได้

วิธีการออกแบบข่ายงานแบบยืดหยุ่นดังที่ได้กล่าวมานี้ เป็นวิธีที่ทดสอบความยืดหยุ่นของข่ายงานภายหลังการออกแบบ วิธีต่อไปนี้จะเป็นวิธีการออกแบบโดยตรง

2.2.2 วิธีการออกแบบข่ายงานแบบยืดหยุ่นโดยตรง

วิธีนี้ จะทดสอบความยืดหยุ่นของข่ายงานในขณะออกแบบโครงสร้างได้โดยตรง โดยข่ายงานที่ได้ในขั้นตอนสุดท้าย ไม่ต้องนำมาทดสอบความยืดหยุ่นอีก สำหรับตัวอย่างวิธีทางออปติไมเซชันที่สำคัญ คือ

การออปติไมซ์หลายวัตถุประสงค์ (Multiple-objective Optimiztion) วิธีนี้แบ่งการวิเคราะห์ได้เป็นสองขั้นตอน ดังนี้

(1) การโปรแกรมไม่เชิงเส้นอนันต์ (Infinite nonlinear programming) สำหรับการส่งผ่านความร้อนที่มีค่าเปลี่ยนแปลงจากแหล่งให้ความร้อนไปยังแหล่งรับความร้อน

(2) วิธีการออปติไมซ์รวม (Multi-optimization methods) สำหรับวัดความยืดหยุ่นและสร้างเป็นฟังก์ชันเพื่อทำการออปติไมซ์ รวมทั้งการทดสอบทางด้านค่าใช้จ่ายของข่ายงานด้วย

เราสามารถแก้ปัญหาของการวิเคราะห์ข่ายงานโดยคำนึงถึงค่า MER, MNU และการทดสอบความยืดหยุ่นพร้อมๆ กันได้ แม้ว่าที่จริงแล้ว ค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง หรือการสร้างข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการผลิต และการทดสอบความยืดหยุ่นนั้น ไม่สามารถใช้เกณฑ์เดียวกันได้ก็ตาม วิธีแก้ปัญหาก็คือ จะแบ่งปัญหาดังกล่าวออกเป็นหลายๆ ฟังก์ชัน แล้วทำการออปติไมซ์รวมเข้าด้วยกัน ดังนี้

$$max\ [f_1(x), f_2(x), f_3(x)]\ \ subject\ to:\ g_i(x) \le 0\ ,\ i = 1, 2, \ldots, m \qquad (2.5)$$

Cerda และคณะ (1990) ได้คิดเทคนิคนี้ เพื่อที่จะรวมการทดสอบความยืดหยุ่นเข้าไปในโมเดลของการออปติไมเซชัน

สำหรับกระแสในกระบวนการผลิตจะถูกแบ่งเป็นสองประเภท คือ

(1) กระแสถาวร เป็นกระแสที่เข้ามามีอุณหภูมิขาเข้าต่ำที่สุด โดยไม่คำนึงถึงความแปรปรวน

(2) กระแสชั่วคราว เป็นกระแสที่เข้ามาโดยมีอุณหภูมิขาเข้าที่เปลี่ยนแปลงด้วย

จากนั้นทำการแก้ปัญหาโดยใช้หลักดังนี้

(1) แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างกระแสถาวรให้มากที่สุด

(2) ส่งผ่านความร้อนจากกระแสร้อนชั่วคราว ให้ไปยังกระแสเย็นถาวรที่เหลืออยู่ให้มากที่สุด หลังจากนั้น กำหนดกระแสเย็นถาวรที่ปริมาณความร้อนเหลืออยู่ไปเป็นกระแสชั่วคราว

(3) แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างกระแสชั่วคราวให้มากที่สุด

การรวมเป้าหมายทั้งสามเข้าด้วยกัน จะให้น้ำหนักต่างๆ กันตามความสำคัญ สำหรับวิธีทางฮิวริสติกของ Wongsri (1990) จะได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 ต่อไป

งานวิจัยของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ผ่านมา คือของ ประทีป อรุณวัฒนมงคล (1992) ได้ใช้กระสวนการจับคู่ของ Wongsri (1990) เขียนโปรแกรมการออกแบบข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไม่ยืดหยุ่น โดยไม่ได้คำนึงถึงความแปรปรวนของอุณหภูมิขาเข้าและอัตราการไหลของกระแส นอกจากนี้โปรแกรมเขียนด้วยภาษาเบสิก ซึ่งมีข้อจำกัดด้านโครงสร้างของข้อมูล และทำงานได้ไม่เร็วนัก

ในงานวิจัยครั้งนี้ ใช้กระสวนการจับคู่และวิธีส่งผ่านความแปรปรวนของ Wongsri (1990) ออกแบบข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบยืดหยุ่น โดยพิจารณาในกรณีช่วงความแปรปรวนของอัตราการไหลและอุณหภูมิขาเข้าของกระแสค่า ที่ไม่ทำให้การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิพินช์เกิดการกระโดด หรือเป็นปัญหาแบบคลาส I

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ได้นี้ ช่วยให้ผู้ใช้สามารถออกแบบข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบยืดหยุ่นได้อย่างรวดเร็ว โดยภาษาคอมพิวเตอร์สำหรับการออกแบบโปรแกรมที่

ใช้คือ ภาษา C++ ซึ่งเป็นภาษาที่รวมเอาความสามารถของภาษา C ที่มีความคล่องตัว, ความเร็วสูง และความสามารถใหม่เพิ่มขึ้นมาคือ ความเป็นโปรแกรมเชิงวัตถุ (Object-oriented program) ซึ่งเป็นการออกแบบโครงสร้างการเขียนโปรแกรมที่มีประสิทธิภาพสูง สามารถแก้ไขหรือนำมาพัฒนาต่อในภายหลังได้ง่าย โดยการออกแบบโปรแกรมเชิงวัตถุนี้ จะได้กล่าวไว้ในบทที่ 4