บทที่ 3

วิธีการออกแบบข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบยืดหยุ่น

หลักการสำคัญที่จะช่วยให้ออกแบบข่ายงานแบบยืดหยุ่นโดยตรง ตามวิธีของ Wongsri (1990) คือ การใช้กระสวนการจับคู่ (Match patterns) และวิธีการส่งผ่านความแปรปรวน (Disterbance propagation method) อย่างไรก็ตาม ก่อนที่จะกล่าวถึงหลักการออกแบบดังกล่าว จะได้อธิบายถึงฮิวริสติกที่ใช้สำหรับการสร้างกระสวนการจับคู่ก่อน ดังนี้

3.1 ฮิวริสติกสำหรับการวิเคราะห์ข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

มีผลงานวิจัยเกี่ยวกับฮิวริสติกสำหรับการออกแบบข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจำนวนมาก โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้พลังงานจากหน่วยยูทิลิตีให้น้อยที่สุด และประหยัดค่าใช้จ่ายการสร้างข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนให้มากที่สุด เช่น Masso และ Rudd (1969) Ponton และ Donalson (1974) Rathore และ Powers (1975) Linnhoff และ Hindmarsh (1983) Jezowski และ Hahne (1986) Metha และ Fan (1988) เป็นต้น

ตัวอย่างฮิวริสติกที่สำคัญในการออกแบบข่ายงาน มีดังนี้

ฮิวริสติกสำหรับการประหยัดค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในข่ายงาน

C.1 ให้การจับคู่กระแสเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนทุกครั้งนั้น สามารถกำจัดกระแสใดกระแสหนึ่งหรือทั้งสองกระแสออกไปเสมอ เพื่อให้ข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีจำนวนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนน้อยที่สุด

C.2 ถ้าเป็นปัญหาทางด้านความร้อน ให้แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างคู่กระแส ที่ให้กระแสมีความร้อนหลงเหลืออยู่ที่ปลายด้านอุณหภูมิต่ำ และถ้าเป็นปัญหาทางด้านความเย็น ให้แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างคู่ของกระแส โดยให้กระแสมีความร้อนหลงเหลืออยู่ที่ปลายด้านอุณหภูมิสูง การแลกเปลี่ยนความร้อนลักษณะนี้เรียกว่า การจับคู่แบบที่ 1 (First type match โดย Rathore และ Powers, 1975)

สำหรับการจับคู่แบบที่ 2 (Second type match) นั้น สำหรับปัญหาทางด้านความร้อนจะให้ความร้อนหลงเหลืออยู่ที่ปลายด้านอุณหภูมิสูง กรณีเป็นปัญหาทางด้านความเย็นจะให้ความร้อนหลงเหลืออยู่ที่ปลายด้านอุณหภูมิต่ำ

C.3 ให้แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างคู่กระแสที่มีความร้อนสูงก่อน

ฮิวริสติกสำหรับทำให้ข่ายงานประหยัดพลังงานความร้อน

E.1 แบ่งการออกแบบข่ายงาน (เมื่อมีจุดพินช์) ออกเป็นปัญหาย่อยๆ และแก้ปัญหาแยกกันอย่างอิสระ (Linnhoff และ Hindmarsh, 1983)

E.2 ไม่ส่งผ่านความร้อนข้ามจุดพินช์

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

E.3 ไม่ใช้คูลเลอร์สำหรับการออกแบบเหนือจุดพินช์ (ปัญหาทางด้านความร้อน)

E.4 ไม่ใช้ฮีตเตอร์สำหรับการออกแบบใต้จุดพินช์ (เป็นปัญหาทางด้านความเย็น)

E.5 ควรใช้การจับคู่แบบที่ 2 เนื่องจากให้กระแสที่มีความร้อนหลงเหลือมีอุณหภูมิต่ำ ทำให้ประหยัดการใช้พลังงานจากหน่วยยูทิลิตีมากกว่า (Ponton และ Donaldson, 1974)

E.6 สำหรับปัญหาด้านความร้อน ถ้ามีกระแสร้อนกระแสเดียวที่ทำให้กระแสเย็นมีอุณหภูมิถึงค่าเป้าหมายได้ ให้แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างกระแสคู่นี้ก่อนเป็นอันดับแรก ส่วนถ้าเป็นปัญหาทางด้านความเย็น จะเป็นในลักษณะทางตรงกันข้าม

ฮิวริสติกสำหรับการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างคู่ของกระแส

N.1 สำหรับปัญหาทางด้านความร้อนนั้น ควรเลือกจับคู่กระแสที่ความร้อนของกระแสเย็นมีค่ามากกว่าความร้อนของกระแสร้อน

N.2 สำหรับปัญหาทางด้านความเย็น ควรเลือกจับคู่กระแสที่ความร้อนของกระแสร้อนมีค่ามากกว่าความร้อนของกระแสเย็น

N.3 สำหรับปัญหาด้านความร้อน ควรเลือกการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างคู่กระแสสำหรับกระแสร้อนที่มีความร้อนหลงเหลือน้อยกว่า หรือเท่ากับค่าความเย็นที่มีค่าน้อยที่สุดที่จะใช้จากหน่วยยูทิลิตี

N.4 สำหรับปัญหาด้านความเย็น ควรเลือกการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างคู่กระแสสำหรับกระแสเย็นที่มีความร้อนหลงเหลือน้อยกว่า หรือเท่ากับค่าความร้อนที่มีค่าน้อยที่สุดที่จะใช้จากหน่วยยูทิลิตี

กฎทางเทอร์โมไดนามิกส์

T.1 สำหรับปัญหาทางด้านความร้อน ให้จับคู่ระหว่างกระแสร้อน และกระแสเย็น ถ้าอุณหภูมิเป้าหมายของกระแสร้อน ต่างจากอุณหภูมิขาเข้าของกระแสเย็น มากกว่าหรือเท่ากับ ΔT_{min} หรือสำหรับกรณีที่ค่าผลคูณของอัตราการไหลและความจุความร้อนจำเพาะของกระแสร้อนน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าดังกล่าวของกระแสเย็น

T.2 สำหรับปัญหาทางด้านความเย็น ให้จับคู่ระหว่างกระแสร้อนและกระแสเย็น ถ้าอุณหภูมิขาเข้าของกระแสร้อน ต่างจากอุณหภูมิเป้าหมายของกระแสเย็นมากกว่าหรือเท่ากับ ΔT_{min} หรือสำหรับกรณีที่ค่าผลคูณของอัตราการไหลและความจุความร้อนจำเพาะของกระแสร้อนมากกว่าหรือเท่ากับค่าดังกล่าวของกระแสเย็น

T.3 สำหรับการจับคู่ที่มีเงื่อนไขต่างจากข้างต้น ให้ตรวจสอบค่าอุณหภูมิที่แตกต่างในการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างคู่กระแส ให้มีค่ามากกว่า ΔT_{min} เสมอ

3.2 กระสวนการจับคู่ (Match patterns)

จากฮิวริสติกที่กล่าวมา สามารถนำมาออกแบบเป็นกระสวนการจับคู่อันเป็นแนวความคิดใหม่ เพื่อใช้สำหรับสร้างข่ายงานแลกเปลี่ยนความร้อนได้ง่ายขึ้น กระสวนการจับคู่นี้ ถือเป็นหน่วยๆ หนึ่ง หรือเป็นโครงสร้างย่อยๆ ซึ่งประกอบไปด้วยเงื่อนไขสำหรับการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเครื่องหนึ่งระหว่างคู่ของกระแสร้อน และกระแสเย็น ในข่ายงานที่ออกแบบเสร็จสมบูรณ์จะมีโครงสร้างย่อยๆ เหล่านี้ มากกว่าหรือเท่ากับหนึ่งโครงสร้างขึ้นไป

เนื่องจากการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างคู่ของกระแส มีโอกาสแลกเปลี่ยนกันได้สี่แบบด้วยกัน จึงแบ่งกระสวนการจับคู่ออกเป็นคลาสต่างๆ ได้สี่คลาส ดังนี้

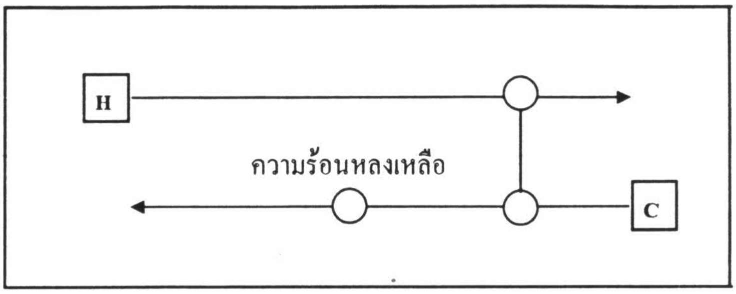
คลาสเอ (Class A) - สำหรับปริมาณความร้อนของกระแสเย็นมีค่าสูงกว่าค่าของกระแสร้อน และการแลกเปลี่ยนความร้อนทำที่ปลายกระแสที่มีอุณหภูมิต่ำ โดยหลังการแลกเปลี่ยนความร้อนแล้วความร้อนของกระแสร้อนจะหมดไป สำหรับปัญหาด้านความร้อนควรเลือกใช้คลาสเอก่อน เนื่องจากทำให้กระแสเย็นมีความร้อนหลงเหลือที่ปลายด้านอุณหภูมิสูง ซึ่งจะมีโอกาสสร้างเป็นฮีตเตอร์ได้ต่อไป

คลาสบี (Class B) - สำหรับปริมาณความร้อนของกระแสเย็นมีค่าต่ำกว่าค่าของกระแสร้อน และการแลกเปลี่ยนความร้อนทำที่ปลายกระแสที่มีอุณหภูมิสูง โดยหลังการแลกเปลี่ยนความร้อนแล้วความร้อนของกระแสเย็นจะหมดไป สำหรับปัญหาด้านความเย็นควรเลือกใช้คลาสบีก่อน เนื่องจากทำให้กระแสร้อนมีความร้อนหลงเหลือที่ปลายด้านอุณหภูมิต่ำ ซึ่งจะมีโอกาสสร้างเป็นคูลเลอร์ได้ต่อไป

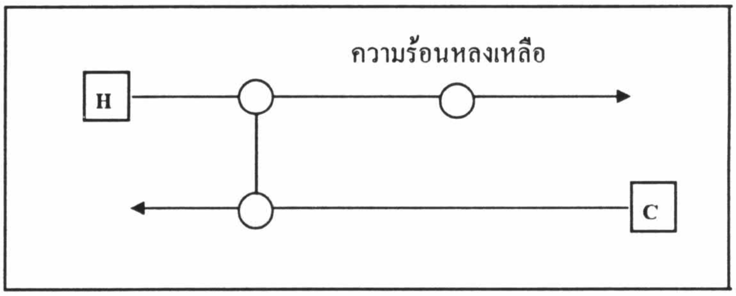
คลาสซี (Class C) - สำหรับปริมาณความร้อนของกระแสเย็นมีค่าต่ำกว่าค่าของกระแสร้อน และการแลกเปลี่ยนความร้อนจะทำที่ปลายกระแสที่มีอุณหภูมิต่ำ โดยหลังการแลกเปลี่ยนความร้อนแล้วความร้อนของกระแสเย็นจะหมดไป

คลาสดี (Class D) - สำหรับปริมาณความร้อนของกระแสเย็นมีค่าสูงกว่าค่าของกระแสร้อน และการแลกเปลี่ยนความร้อนจะทำที่ปลายกระแสที่มีอุณหภูมิสูง โดยหลังการแลกเปลี่ยนความร้อนแล้วความร้อนของกระแสร้อนจะหมดไป (ดูรูปที่ 3.1 และตารางที่ 3.1)

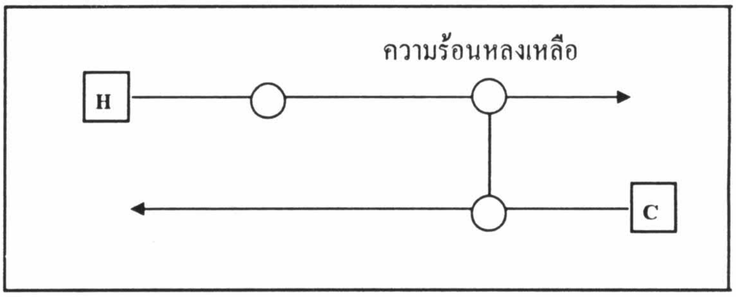
คลาสเอ



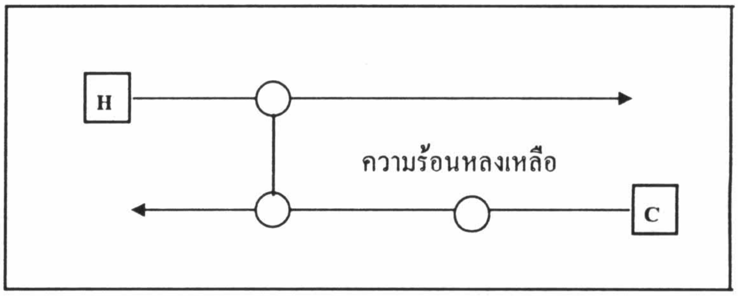
คลาสบี



คลาสซี

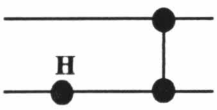
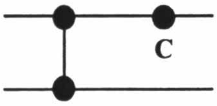
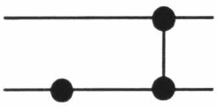
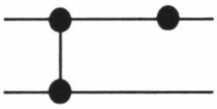
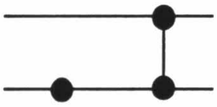
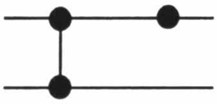


คลาสดี

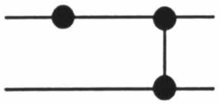
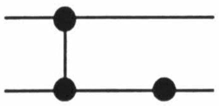
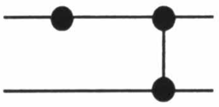
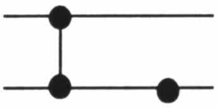


รูปที่ 3.1 แสดงลักษณะการแลกเปลี่ยนความร้อนคลาสต่าง ๆ

ตารางที่ 3.1 โอเปอเรเตอร์ของกระสวนการจับคู่คลาสเอ และ คลาสบี

โอเปอเรเตอร์	เงื่อนไข	ค่าที่คำนวณใหม่
 แพทเทิร์น AH	$T_H^t \ge T_C^s$, $L_H \le L_C$ $T_H^s \ge T_C^s + L_H W_C^{-1}$ $L_C - L_H \le Q_{min}^{heating}$	$T_C^s = T_C^s + L_H W_C^{-1}$ $L_C = L_C - L_H$
 แพทเทิร์น BC	$T_H^s \ge T_C^t$, $L_H \ge L_C$ $T_C^s \le T_H^s - L_C W_H^{-1}$ $L_H - L_C \le Q_{min}^{cooling}$	$T_H^s \le T_H^s - L_C W_H^{-1}$ $L_H = L_H - L_C$
 แพทเทิร์น A[H]	$T_H^t \ge T_C^s$ $L_H \le L_C$ $W_H \le W_C$	$T_C^s = T_C^s + L_H W_C^{-1}$ $L_C = L_C - L_H$
 แพทเทิร์น B[C]	$T_H^s \ge T_C^t$ $L_H \ge L_C$ $W_H \ge W_C$	$T_H^s \le T_H^s - L_C W_H^{-1}$ $L_H = L_H - L_C$
 แพทเทิร์น A[C]	$T_H^t \ge T_C^s$, $L_H \le L_C$ $W_H > W_C$ $T_H^s \ge T_C^s + L_H W_C^{-1}$	$T_C^s = T_C^s + L_H W_C^{-1}$ $L_C = L_C - L_H$
 แพทเทิร์น B[H]	$T_H^s \ge T_C^t$, $L_H \ge L_C$ $W_H < W_C$ $T_C^s \le T_H^s - L_C W_H^{-1}$	$T_H^s \le T_H^s - L_C W_H^{-1}$ $L_H = L_H - L_C$

ตารางที่ 3.1 (ต่อ) โอเปอเรเตอร์ของกระสวนการจับคู่คลาสซี และ คลาสดี

โอเปอเรเตอร์	เงื่อนไข	ค่าที่คำนวณใหม่
 แพทเทิร์น C[H]	$T_H^t \ge T_C^s$ $L_H > L_C$ $W_H \le W_C$	$T_H^t = T_H^t + L_C W_H^{-1}$ $L_H = L_H - L_C$
 แพทเทิร์น D[C]	$T_H^s \ge T_C^t$ $L_H < L_C$ $W_H \ge W_C$	$T_C^t = T_C^t - L_H W_C^{-1}$ $L_C = L_C - L_H$
 แพทเทิร์น C[C]	$T_H^t \ge T_C^s$, $L_H > L_C$ $W_H > W_C$ $T_C^t \le T_H^t + L_C W_H^{-1}$	$T_H^t = T_H^t + L_C W_H^{-1}$ $L_H = L_H - L_C$
 แพทเทิร์น D	$T_H^s \ge T_C^t$, $L_H < L_C$ $W_H < W_C$ $T_H^t \ge T_C^t - L_H W_C^{-1}$	$T_C^t = T_C^t - L_H W_C^{-1}$ $L_C = L_C - L_H$

T^t = อุณหภูมิเป้าหมาย , T^s = อุณหภูมิขาเข้า

W = ผลคูณของอัตราการไหลและความจุความร้อนจำเพาะ

L หรือ Q = ความร้อนที่ใช้ในการแลกเปลี่ยน

อุณหภูมิของกระแสเย็นในที่นี้ (T_C) จะถูกลบออกไปด้วย ΔT_{min} แล้ว

จากฮิวริสติก N3 และ N4 ยังสามารถแบ่งคลาสออกเป็นคลาสย่อยได้อีก คือ

1. คลาสย่อย AH ใช้สำหรับปัญหาทางด้านความร้อน เมื่อความร้อนหลงเหลือของกระแสเย็นในการแลกเปลี่ยนหลังการจับคู่ มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าความร้อนน้อยที่สุดที่ต้องการรับจากหน่วยยูทิลิตี ($Q_{H,min}$)
2. คลาสย่อย BC ใช้สำหรับปัญหาทางด้านความเย็น เมื่อความร้อนหลงเหลือของกระแสร้อนในการแลกเปลี่ยนหลังการจับคู่ มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าความร้อนน้อยที่สุดที่ต้องการให้แก่หน่วยยูทิลิตี ($Q_{C,min}$)

เมื่อความร้อนหลงเหลือของกระแสหนึ่งๆ หลังการจับคู่แลกเปลี่ยนความร้อน มีค่าน้อยกว่าความร้อนที่ต้องการรับ (หรือให้) จากหน่วยยูทิลิตีแล้ว จะสามารถสร้างเป็นฮีตเตอร์ (หรือคูลเลอร์) ได้ทันที ดังนั้น จึงควรให้กระสวนการจับคู่หรือแพทเทิร์น AH หรือ BC อยู่ในอันดับแรกของการเลือกใช้แพทเทิร์น โดยสำหรับการจับคู่กระแสเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนในปัญหาทางด้านความร้อน จะใช้แพทเทิร์น AH เป็นอันดับแรก และสำหรับปัญหาทางด้านความเย็นจะใช้แพทเทิร์น BC เป็นอันดับแรก นอกจากนี้ ยังสามารถใช้ความแตกต่างระหว่างผลคูณของอัตราการไหลและความจุความร้อนจำเพาะของกระแส ออกแบบกระสวนการจับคู่เพิ่มขึ้นได้อีก เช่น จากฮิวริสติกที่กล่าวว่า สำหรับปัญหาทางด้านความร้อน ควรจับคู่ระหว่างกระแสที่ค่าผลคูณของอัตราการไหลและความจุความร้อนจำเพาะของกระแสเย็น มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าของกระแสร้อน ตามเงื่อนไขนี้ จะได้แพทเทิร์น A[H] แต่ถ้าค่าของกระแสเย็นน้อยกว่าของกระแสร้อนจะให้เป็นแพทเทิร์น A[C] สำหรับปัญหาทางด้านความเย็น จากฮิวริสติกกล่าวไว้ว่า

ควรจะจับคู่ระหว่างกระแส ที่ผลคูณของอัตราการไหลและความจุความร้อนจำเพาะของกระแสร้อน มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับค่าของกระแสเย็น ซึ่งก็คือ แพทเทิร์น B[C] แต่ถ้าค่าดังกล่าวของกระแสร้อนน้อยกว่าค่าของกระแสเย็น ก็จะให้เป็นแพทเทิร์น B[H] สำหรับการพิจารณาในกระสวนการจับคู่ของคลาสซี และคลาสซี ก็พิจารณาคล้ายๆ กัน

สรุปสำหรับปัญหาทางด้านความร้อน จะใช้กระสวนการจับคู่เรียงตามลำดับดังนี้ AH, A[H], B[C], A[C], B[H], C[H], D[C], C[C] และ D[H] และปัญหาทางด้านความเย็นจะใช้ลำดับกระสวนการจับคู่เป็น BC, B[C], A[H], B[H], A[C], D[C], C[H], D[H] และ C[C]

3.3 กระสวนการจับคู่ของข่ายงานแบบยืดหยุ่น

กระสวนการจับคู่ที่ใช้กับข่ายงานแบบยืดหยุ่นนั้น ต้องสามารถส่งความแปรปรวนของกระแสหนึ่งไปให้อีกกระแสหนึ่งซึ่งมีความร้อนหลงเหลือได้ นอกจากนี้ จะต้องมีพารามิเตอร์ทดสอบค่าความยืดหยุ่นของกระแสและความยืดหยุ่นของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วย

สำหรับกระสวนการจับคู่คลาสเอและคลาสบี ความแปรปรวนของทั้งสองกระแสสามารถถูกส่งไปให้กระแสที่มีความร้อนหลงเหลือได้ ดังนั้น กระสวนการจับคู่ทั้งสองนี้ ถือว่าเป็นกระสวนการจับคู่แบบยืดหยุ่น ส่วนคลาสซี พบว่ามีเพียงความแปรปรวนของกระแสร้อนหรือสำหรับคลาสดี จะมีเพียงความแปรปรวนของกระแสเย็นที่สามารถถูกจัดการได้เท่านั้น กระสวนการจับคู่ทั้งสองนี้ ไม่สามารถจัดการกับความแปรปรวนที่เกิดขึ้นในสองกระแสพร้อมกันได้ ดังนั้น จึงถือว่า คลาสซีและคลาสดีเป็นกระสวนการจับคู่สำหรับการออกแบบข่ายงาน

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ที่ไม่คำนึงถึงความยืดหยุ่นเท่านั้น (อย่างไรก็ตาม ถ้าต้องการใช้คลาสซีและดีในการออกแบบข่ายงานแบบไม่ยืดหยุ่นแล้ว จะต้องมีกระบวนการควบคุมที่เหมาะสมร่วมด้วย)

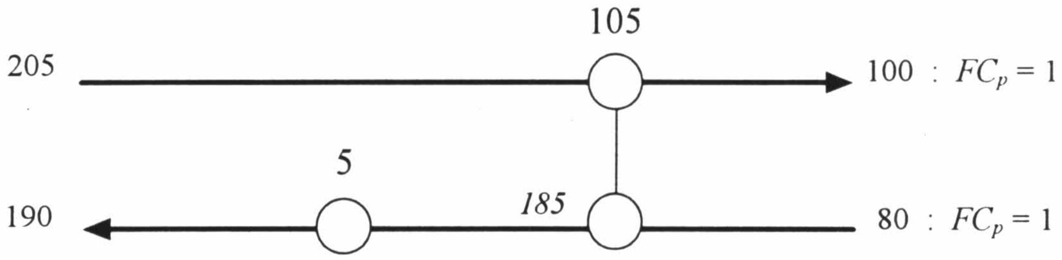
พิจารณารูปที่ 3.2 เป็นตัวอย่างการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างกระแสร้อนและกระแสเย็นรวมสองกระแส ในที่นี้ใช้กระสวนการจับคู่คลาสเอ โดยให้ ΔT_{min} เท่ากับ 10° กระแสทั้งสองใช้ความร้อนในการแลกเปลี่ยนกันเองเท่ากับ 105 หน่วย กระแสเย็นจะเหลือความร้อนอยู่อีก 5 หน่วย ซึ่งจะใช้ความร้อนจากยูทิลิตี (ฮีตเตอร์) หรือนำไปแลกเปลี่ยนความร้อนกับกระแสร้อนกระแสอื่น เพื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 185° ให้ถึงอุณหภูมิเป้าหมายคือ 190°

รูปที่ 3.3 อุณหภูมิขาเข้ากระแสร้อนมีค่าเพิ่มขึ้นไปอีก 5° อุณหภูมิขาเข้าจึงเป็น 210° คิดเป็นความแปรปรวน หรือ ความร้อนเนื่องจากอุณหภูมิที่เปลี่ยนไป $F.Cp\ \Delta T$ = 1*(210-205) = 5 หน่วย ความร้อนในกระแสร้อนเพิ่มจาก 105 เป็น 110 หน่วย โดยที่ความร้อนของกระแสร้อนนี้เท่ากับความร้อนของกระแสเย็น จึงใช้แลกเปลี่ยนกันได้พอดี ซึ่งหมายความว่า อุณหภูมิขาเข้าของกระแสร้อนในที่นี้สามารถเพิ่มขึ้นได้ถึง 5° โดยที่ไม่ทำให้อุณภูมิเป้าหมายของกระแสเย็นเปลี่ยนไปจาก 190°

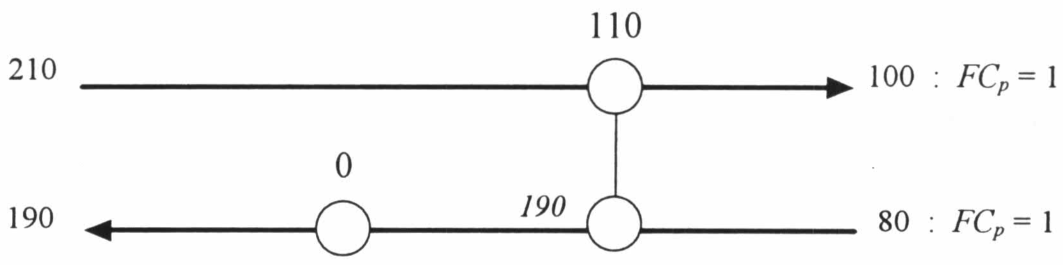
รูปที่ 3.4 แสดงอุณหภูมิขาเข้าของกระแสร้อนเมื่อลดลงไปถึง 101° ในที่นี้กระแสร้อนจะเหลือความร้อนอยู่เพียง 1 หน่วย ดังนั้น การที่จะทำให้อุณหภูมิขาออกของกระแสเย็นเท่ากับอุณหภูมิเป้าหมาย 190° ให้ได้จึงตกเป็นภาระของฮีตเตอร์ทั้งหมดโดยใช้ความร้อนเท่ากับ 109 หน่วย (ความร้อนจำนวนนี้ อาจถูกมองว่าเป็นปริมาณความร้อนที่หลงเหลือของกระแสเย็นซึ่งอาจถูกส่งไปแลกเปลี่ยนความร้อนกับกระแสร้อนอื่นๆ ที่ไม่ใช่กระแสจากยูทิลิตีก็ได้)

รูปที่ 3.5 เมื่อเพิ่มอุณหภูมิขาเข้าของกระแสเย็นจาก 80° เป็น 85° ความร้อนจากทั้งสองกระแสจะเท่ากันพอดี จึงไม่ต้องใช้ความร้อนจากฮีตเตอร์อีก เช่นเดียวกับจากรูป 3.2 การเพิ่มอุณหภูมิขาเข้าของกระแสเย็นให้มีค่าสูงกว่า 85° จะทำให้อุณหภูมิขาออกของกระแสเย็นสูงกว่าอุณหภูมิ 190° ดังนั้นในที่นี้อุณหภูมิ 85° จึงเป็นอุณหภูมิขาเข้าสูงสุดของกระแสเย็นที่เป็นไปได้

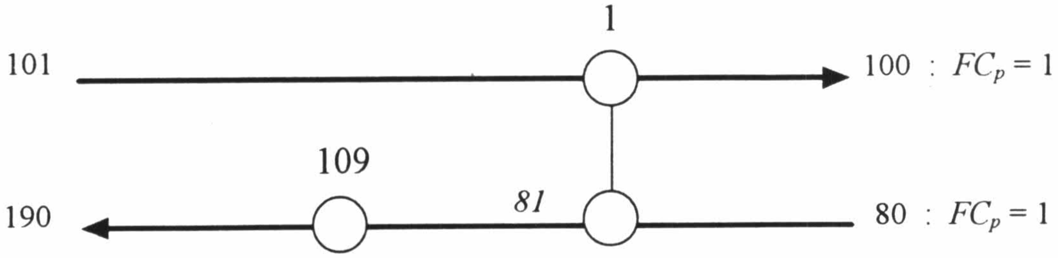
รูปที่ 3.6 จากรูป อุณหภูมิขาเข้าของกระแสเย็นสามารถลดลงได้ไม่มีขีดจำกัด โดยภาระทั้งหมดจะถูกผลักไปให้แก่ฮีตเตอร์แทน ในที่นี้แสดงตัวอย่างเมื่ออุณหภูมิขาเข้าของกระแสเย็นลดลงไปถึง 0°



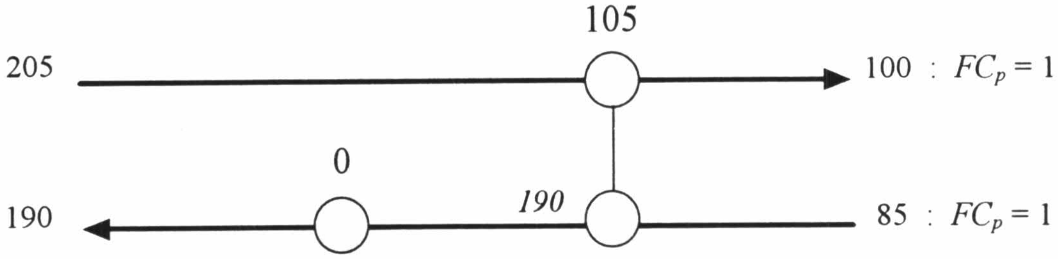
รูปที่ 3.2 ตัวอย่างการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างสองกระแส



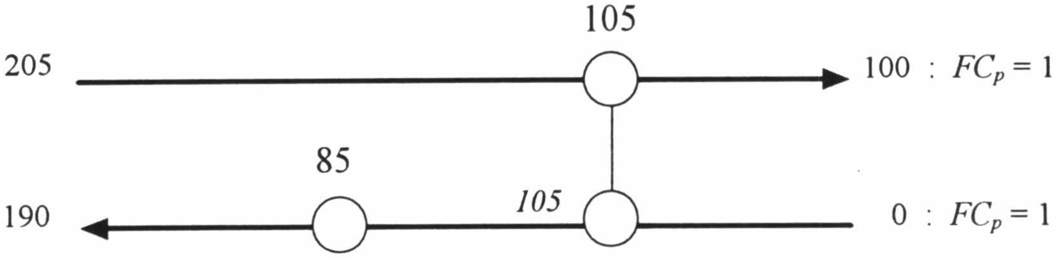
รูปที่ 3.3 เมื่ออุณหภูมิขาเข้าของกระแสร้อนเพิ่มขึ้น 5°



รูปที่ 3.4 เมื่ออุณหภูมิขาเข้าของกระแสร้อนลดลงเหลือ 101°



รูปที่ 3.5 เมื่ออุณหภูมิขาเข้าของกระแสเย็นเพิ่มขึ้น 5°



รูปที่ 3.6 เมื่ออุณหภูมิขาเข้าของกระแสเย็นลดลงเหลือ 0°

ต่อไปนี้เป็นการพิจารณาผลของการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิ สำหรับการแลกเปลี่ยนความร้อนกระสวนการจับคู่คลาสดี

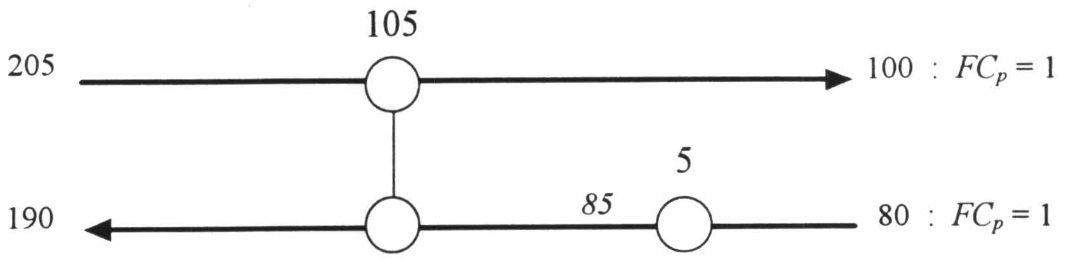
รูปที่ 3.7 เป็นการแลกเปลี่ยนความร้อนที่ภาวะปกติที่ปลายด้านอุณหภูมิสูง โดยกระแสเย็นจะเหลือความร้อนเท่ากับ 5 หน่วย ความร้อนจำนวนนี้อาจมองเป็นฮีตเตอร์ตัวหนึ่ง หรือเป็นความร้อนที่จะถูกแลกเปลี่ยนความร้อนกับกระแสร้อนอื่นๆ ต่อไป หรือเป็นความร้อนที่ได้ถูกแลกเปลี่ยนความร้อนกับกระแสอื่นไว้แล้วก็ได้ ซึ่งถ้ามองในกรณีหลังนี้ จะพบว่ากระสวนการจับคู่คลาสดี นี้ไม่มีความยืดหยุ่นในบางกรณี ดังที่จะกล่าวต่อไปนี้

รูปที่ 3.8 เมื่ออุณหภูมิขาเข้าของกระแสร้อนเพิ่มขึ้นเท่ากับ 1° จะทำให้อุณหภูมิขาออกของกระแสเย็นเพิ่มจาก 190° เป็น 191° ซึ่งเกินค่าอุณหภูมิเป้าหมาย คือ 190° ไป

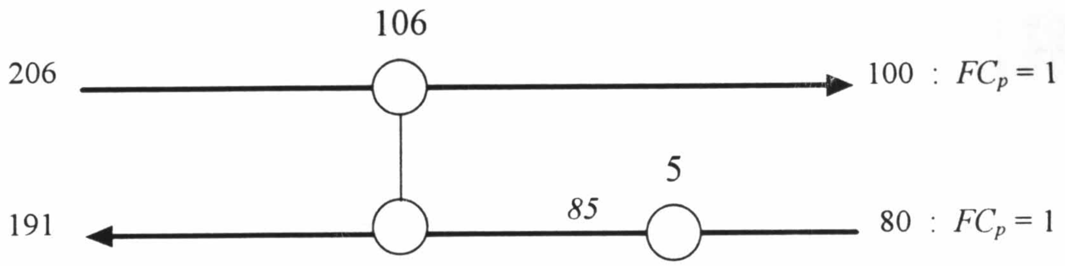
รูปที่ 3.9 เมื่ออุณหภูมิขาเข้าของกระแสร้อนลดลงขึ้นเท่ากับ 1° จะทำให้อุณหภูมิขาออกของกระแสเย็นลดลงจาก 190° เป็น 189° ซึ่งน้อยกว่าค่าอุณหภูมิเป้าหมาย 190°

รูปที่ 3.10 และ 3.11 พิจารณาเช่นเดียวกับคลาสเอ ซึ่งได้ผลคล้ายๆ กัน

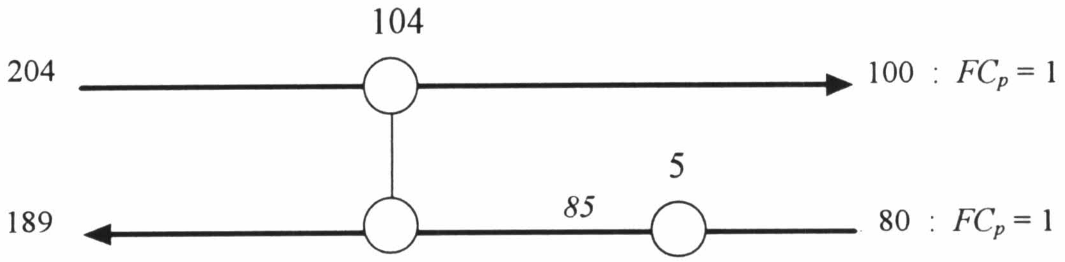
สรุปก็คือ เปรียบเทียบระหว่างคลาสเอและคลาสดีแล้ว คลาสเอสามารถจัดการกับความแปรปรวนได้ทั้งจากกระแสร้อนและกระแสเย็น ส่วนคลาสดีจัดการได้เฉพาะความแปรปรวนของกระแสเย็นเท่านั้น ดังนั้น คลาสเอจึงเหมาะเป็นกระสวนการจับคู่สำหรับข่ายงานแบบยืดหยุ่นมากกว่าคลาสดี กรณีการเปรียบเทียบระหว่างคลาสบีและคลาสซีก็เช่นเดียวกัน จะพบว่าควรใช้คลาสบีเป็นกระสวนการจับคู่แบบยืดหยุ่นมากกว่าคลาสซี และสำหรับพารามิเตอร์ทดสอบข่ายงานแบบยืดหยุ่นที่ใช้ร่วมกับกระสวนการจับคู่นี้ จะได้กล่าวในภายหลัง



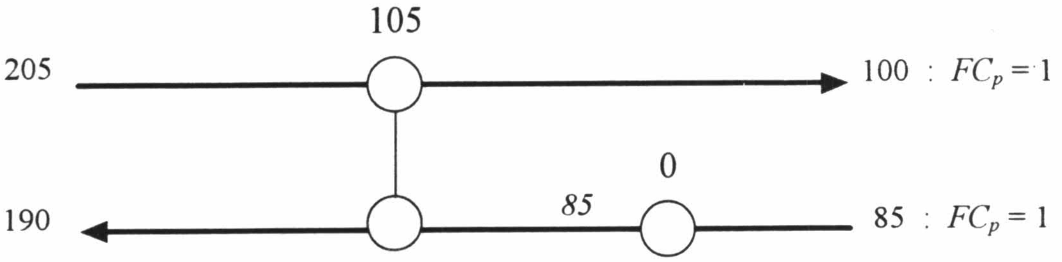
รูปที่ 3.7 การแลกเปลี่ยนความร้อนที่ภาวะปกติ



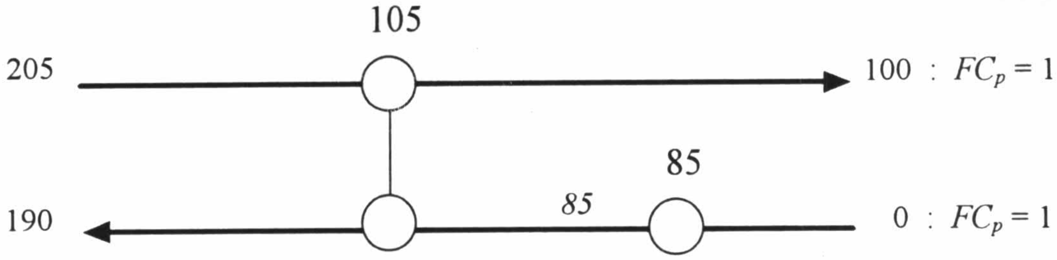
รูปที่ 3.8 เมื่ออุณหภูมิขาเข้าของกระแสร้อนเพิ่มขึ้น 1°



รูปที่ 3.9 เมื่ออุณหภูมิขาเข้าของกระแสร้อนลดลง 1°



รูปที่ 3.10 เมื่ออุณหภูมิขาเข้าของกระแสเย็นเพิ่มขึ้น 5°



รูปที่ 3.11 เมื่ออุณหภูมิขาเข้าของกระแสเย็นลดลง

3.4 ชนิดของความแปรปรวน

การออกแบบข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบยืดหยุ่น ความแปรปรวนที่ถูกใช้นำมาพิจารณามีสองแบบ คือ ความแปรปรวนเนื่องจากอุณหภูมิขาเข้า และความแปรปรวนเนื่องจากอัตราการไหล

I16717765X

ความแปรปรวนเนื่องจากอุณหภูมิ = $W(T_{supply,max} - T_{supply,min})$ (3.1)

ความแปรปรวนเนื่องจากอัตราการไหล = $(W_{max} - W_{min})(T_{target} - T_{supply})$ (3.2)

เมื่อ W (หรือ FC_p) คือ ผลคูณของอัตราการไหลและความจุความร้อนจำเพาะ

T_{supply} และ T_{target} คืออุณหภูมิขาเข้าและอุณหภูมิเป้าหมายตามลำดับ

ความแปรปรวนดังกล่าวนี้ ยังสามารถแบ่งได้อีกเป็นสองประเภท คือ ความแปรปรวนบวก หรือ ความแปรปรวนลบ ดังนี้

ความแปรปรวนบวก คือ ความแปรปรวนที่ทำให้ความร้อนของกระแสมีค่าเพิ่มขึ้น เช่น กรณีอุณหภูมิขาเข้าของกระแสร้อนถูกรบกวนโดยมีค่าสูงกว่าที่ภาวะปกติ หรืออุณหภูมิขาเข้าของกระแสเย็นมีค่าที่ต่ำกว่าค่าปกติ ปริมาณความร้อนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากความแปรปรวนนี้ สามารถที่จะถูกกำจัดไปได้ โดยส่งไปที่กระแสซึ่งมีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจากหน่วยยูทิลิตีบริการอยู่ (กระแสที่ติดตั้งฮีตเตอร์ หรือ คูลเลอร์) ถ้าเกิดความแปรปรวนบวกในกระแสร้อน จะทำให้เพิ่มปริมาณความร้อนที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนของคูลเลอร์ แต่จะลดปริมาณความร้อนที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนของฮีตเตอร์ ในขณะที่ความแปรปรวนบวกของกระแสเย็น จะทำให้เพิ่มปริมาณความร้อนที่ใช้ของฮีตเตอร์ แต่จะลดปริมาณความร้อนของคูลเลอร์

ความแปรปรวนลบ คือ ความแปรปรวนที่ทำให้ความร้อนของกระแสมีค่าลดลง เช่น กรณีอุณหภูมิขาเข้าของกระแสร้อนถูกรบกวนโดยมีค่าต่ำกว่าที่ภาวะปกติ หรืออุณหภูมิขาเข้าของกระแสเย็นมีค่าที่สูงกว่าค่าปกติ ความแปรปรวนลบถ้าเกิดในกระแสร้อน จะทำให้ลดปริมาณ

ความร้อนของคูลเลอร์ลง แต่จะเพิ่มปริมาณความร้อนของฮีตเตอร์ ในขณะที่ความแปรปรวนลบของกระแสเย็น จะทำให้ลดปริมาณความร้อนที่ใช้ของฮีตเตอร์ แต่จะเพิ่มปริมาณความร้อนของคูลเลอร์ให้สูงขึ้น

3.5 สภาวะการออกแบบ

จากการที่ข่ายงานถูกรบกวนโดยค่าของอุณหภูมิและอัตราการไหล ซึ่งแปรปรวนออกไปจากค่าที่ได้กำหนดไว้จากสภาวะปกตินั้น การรบกวนดังกล่าวจะแบ่งได้สี่สภาวะ (คิดที่สภาวะสุดขีด หรือ Extream conditions) คือ

สภาวะโหลดความร้อนสูงสุด (Maximum heat load condition) เป็นสภาวะที่ทุกกระแสมีค่าปริมาณความร้อนมากที่สุด เช่น อุณหภูมิขาเข้าของกระแสร้อนมีค่าสูงที่สุดจากช่วงการแปรปรวนและอุณหภูมิขาเข้ากระแสเย็นมีค่าต่ำที่สุดจากช่วงการแปรปรวน

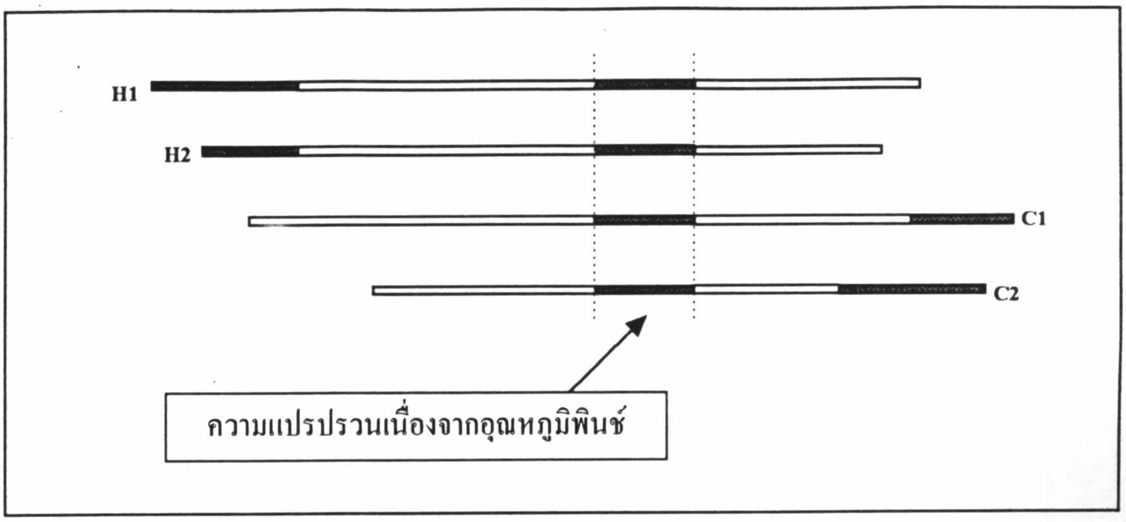
สภาวะโหลดความร้อนต่ำสุด (Minimum heat load condition) เป็นสภาวะที่ทุกกระแสมีค่าปริมาณความร้อนน้อยที่สุด เช่น อุณหภูมิขาเข้าของกระแสร้อนมีค่าต่ำที่สุดจากช่วงการแปรปรวน และอุณหภูมิขาเข้ากระแสเย็นมีค่าสูงที่สุดจากช่วงการแปรปรวน

สภาวะดึงความร้อนสูงสุด (Maximum cooling condition) เป็นสภาวะที่กระแสร้อนมีความร้อนมากที่สุดและกระแสเย็นมีความร้อนน้อยที่สุด เช่น อุณหภูมิขาเข้าของกระแสร้อนมีค่าสูงสุด และของกระแสเย็นมีค่าต่ำสุด

สภาวะให้ความร้อนสูงสุด (Minimum heating condition) เป็นสภาวะที่กระแสร้อนมีความร้อนน้อยที่สุดและกระแสเย็นมีความร้อนมากที่สุด ตัวอย่างเช่น อุณหภูมิขาเข้าของกระแสร้อนมีค่าต่ำสุดและของกระแสเย็นมีค่าสูงสุด

สำหรับการออกแบบข่ายงานนั้น ถ้าทำการวิเคราะห์ข่ายงานด้วยความแปรปรวนเพียงชนิดเดียวแล้ว (ความแปรปรวนบวก หรือ ลบ) จะทำให้สามารถพิจารณาทดสอบความยืดหยุ่นเพื่อจับคู่แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างกระแสร้อนและเย็นได้ง่ายขึ้น ซึ่งในที่นี้ก็คือ ที่สภาวะโหลดความร้อนของกระแสมีค่าสูงสุดหรือต่ำสุด โดยที่สภาวะโหลดความร้อนสูงสุด จะทำให้เกิดความแปรปรวนลบชนิดเดียวทั้งในกระแสเย็นและกระแสร้อน ส่วนสภาวะโหลดความร้อนต่ำสุดจะทำให้เกิดความแปรปรวนบวกชนิดเดียวเช่นกัน นอกจากนี้ที่สภาวะทั้งสอง ความแตกต่างระหว่างกระแสร้อนและกระแสเย็นจะเป็นที่สภาวะขีดสุดด้วย ซึ่งที่ภาวะอื่นๆ จะไม่ใช่

และสำหรับปัญหาที่มีอุณหภูมิพินช์ ถ้าสภาวะการรบกวนทำให้เกิดความแปรปรวนเนื่องจากอุณหภูมิพินช์เพิ่มขึ้นมา ความแปรปรวนจากอุณหภูมิพินช์นี้ จะถูกนำมาพิจารณาพร้อมกันไปด้วย (ดูรูปที่ 3.11)



รูปที่ 3.12 ความแปรปรวนเนื่องจากอุณหภูมิพินช์ในข่ายงานแบบยืดหยุ่น

3.6 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณ

ในการคำนวณและทดสอบความยืดหยุ่น จะมีพารามิเตอร์ที่ใช้ร่วมกับกระสวนการจับคู่ ดังนี้

โหลดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger load, $L_{E,i}$) คือ ความร้อนที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

โหลดของกระแสกระบวนการ (Process stream load, $L_{S,i}$) คือ ปริมาณความร้อนของกระแส

พารามิเตอร์ความยืดหยุ่นของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat exchanger resiliency parameter, E) คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิในการแลกเปลี่ยนความร้อน (ΔT) กับ ΔT_{min}

$$E_{i,j} = W_j\,(\Delta T_S - \Delta T_{min}) \qquad \text{เมื่อ} \quad L_j > L_i \qquad (3.3)$$

ความยืดหยุ่นของกระแส (Stream resiliency, $R_{i,j}$) คือ ความร้อนหลงเห งกระแส

พารามิเตอร์ความยืดหยุ่นของกระแส (Stream resiliency parameter, S) นิยามโดย

$$S_i = (W_j - W_i)(T_i^1 - T_i^2) \quad (3.4)$$

เมื่อ T_i^1 และ T_i^2 คือ อุณหภูมิของกระแสปลายด้านอุณหภูมิสูงและต่ำตามลำดับ

ความแปรปรวนจากอุณหภูมิ (Temperature disturbance, D^θ) เป็นค่าความแปรปรวนเนื่องจากอุณหภูมิขาเข้า

$$D^\theta = W\,(T_{Supply,max} - T_{Supply,min}) \quad (3.5)$$

ความแปรปรวนจากอัตราการไหล (Flowrate Disturbance, D^ω) คือ ค่าความแปรปรวนของผลคูณของอัตราการไหลกับความจุความร้อนจำเพาะของกระแส

$$D_i^\omega = (W_{i,max} - W_{i,min})(T_{i,max}^1 - T_{i,min}^2) \quad (3.6)$$

เมื่อ $T_{i,max}^1$ คือ อุณหภูมิปลายกระแสด้านอุณหภูมิสูงที่มีค่ามากที่สุดจากช่วงการแปรปรวน และ

$T_{i,min}^2$ คือ อุณหภูมิปลายกระแสด้านอุณหภูมิต่ำที่มีค่าน้อยที่สุดจากช่วงการแปรปรวน

ความแปรปรวนเริ่มต้น (Original Disturbance, D) คือ ความแปรปรวนรวมซึ่งมีค่าเท่ากับ

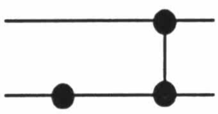
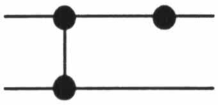
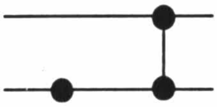
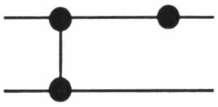
$$D_i = D_i^\theta + D_i^\omega \quad (3.7)$$

ความแปรปรวนจากอุณหภูมิพินช์ (Pinch induced Disturbance, D^p) นิยามโดย

$$D_i^p = W_{i,max}(T_{i,max}^p - T_{i,min}^p) \quad (3.8)$$

สำหรับเงื่อนไขในการพิจารณาพารามิเตอร์เหล่านี้ที่ใช้ในกระสวนการจับคู่ เพื่อออกแบบข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบยืดหยุ่น ได้แสดงไว้ในตา .2

ตารางที่ 3.2 โอเปอเรเตอร์กระสวนการจับคู่แบบยืดหยุ่น

โอเปอเรเตอร์	เงื่อนไข	การตรวจสอบความยืดหยุ่น
 แพทเทิร์น A[H]	$T_H^t \geq T_C^s$ $L_H \leq L_C$ $W_H \leq W_C$	$D^\theta + D^\omega \leq R_{C,H}$ $D^\omega \leq E_{C,H} + S_{C,H}$
 แพทเทิร์น B[C]	$T_H^s \geq T_C^t$ $L_H \geq L_C$ $W_H \geq W_C$	$D^\theta + D^\omega \leq R_{H,C}$ $D^\omega \leq E_{H,C} + S_{H,C}$
 แพทเทิร์น A[C]	$T_H^t \geq T_C^s$ $L_H \leq L_C$ $W_H > W_C$ $-S_{C,H} \leq E_{C,H}$	$D^\theta + D^\omega \leq min\left\{R_{C,H}, E_{C,H}\right\}$ $D^\omega \leq E_{C,H} + S_{C,H}$
 แพทเทิร์น B[H]	$T_H^s \geq T_C^t$ $L_H \geq L_C$ $W_H < W_C$ $-S_{H,C} \leq E_{H,C}$	$D^\theta + D^\omega \leq min\left\{R_{H,C}, E_{H,C}\right\}$ $D^\omega \leq E_{H,C} + S_{H,C}$

D^θ = ความแปรปรวนเนื่องจากอุณหภูมิ (Temperature disturbance)

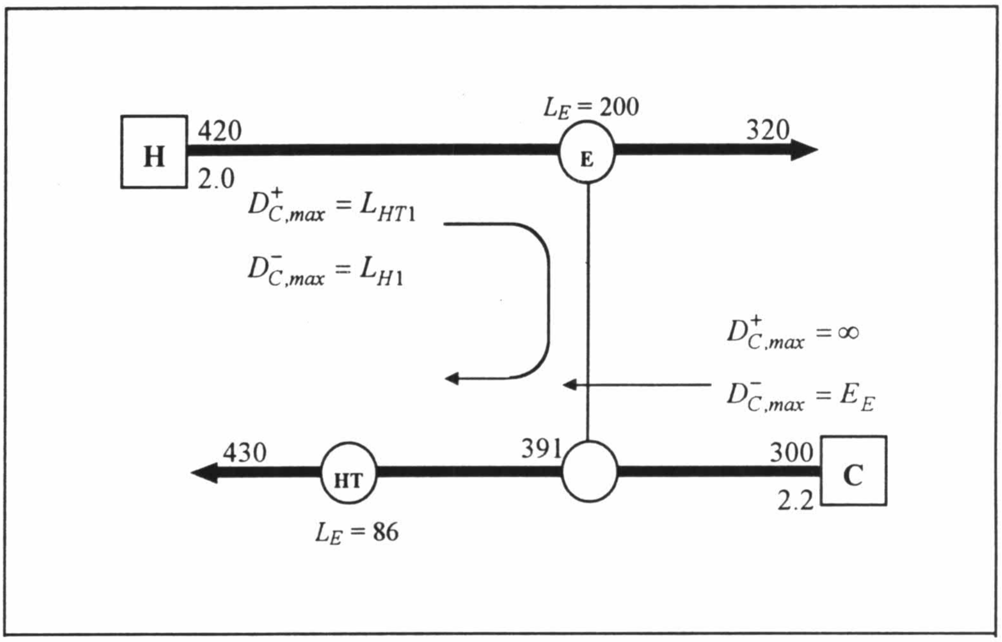
D^ω = ความแปรปรวนเนื่องจากค่าผลคูณของอัตราการไหลและความจุความร้อนจำเพาะ (Heat capacity flowrate disturbance)

R = ความยืดหยุ่นของกระแส (Stream resiliency)

E = พารามิเตอร์ความยืดหยุ่นของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (Exchanger resiliency parameter)

S = พารามิเตอร์ความยืดหยุ่นของกระแส (Stream resiliency parameter)

ต่อไปนี้เป็นอีกตัวอย่างหนึ่งของการพิจารณาความแปรปรวน ที่เกิดขึ้นระหว่างการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างกระแส ในที่นี้จะแสดงความแปรปรวนของอุณหภูมิเท่านั้น



รูปที่ 3.13 แสดงตัวอย่างการพิจารณาความแปรปรวนของกระแส

จากรูปที่ 3.12 มีกระแสร้อน (H) และกระแสเย็น (C) นำมาแลกเปลี่ยนความร้อนกันในแบบการจับคู่คลาสเอ โดยความร้อนที่เหลือของกระแส C จะถูกให้ความร้อนด้วยฮีตเตอร์ (HT) ให้ $\Delta T_{min} = 10^\circ$ การพิจารณามีดังนี้

1. **กรณีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น** ความแปรปรวนบวกสูงสุดของกระแส H จะมีค่าเท่ากับความร้อนที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนของฮีตเตอร์ HT (หรืออุณหภูมิขาเข้าของกระ ที่จะเป็นไปได้คือไม่สูงกว่า 463°) เพราะว่าถ้าความแปรปรวนบวกมีค่ามากกว่านี้ จะทำให้อุณหภูมิขาอ ของกระแส H หลังจากผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน E ไม่ได้ค่าเท่ากับอุณหภูมิเป้าหมาย

คือค่าจะไม่ต่ำลงถึง 320° หรืออีกกรณีหนึ่ง อุณหภูมิขาออกของกระแส C จะมีค่าสูงกว่า 430° สำหรับการพิจารณาเมื่ออุณหภูมิขาเข้าของกระแส C เพิ่มขึ้นจะต้องพิจารณาที่ต่างกันออกไปจากกรณีสำหรับกระแส H เพราะว่าความแตกต่างของอุณหภูมิต่ำที่สุดในการแลกเปลี่ยนความร้อนของกระแสในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ถูกจำกัดด้วยค่า ΔT_{min} เท่ากับ 10° โดยความแปรปรวนสูงสุดของกระแส C ที่จะมีได้นั้น มีค่าเท่ากับพารามิเตอร์ความยืดหยุ่นของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (E_E)

$$E_E = \Delta T_s W_C$$

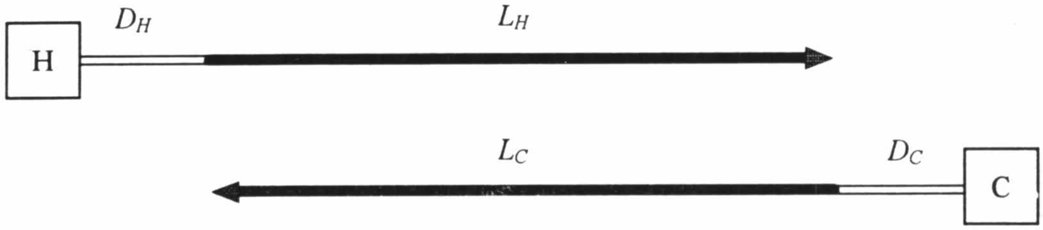
$$= (20\text{-}10)\ 2.2$$

$$= 22 \text{ kW}$$

2. **กรณีอุณภูมิลดลง** ความแปรปรวนลบสำหรับกระแส H นั้นจะถูกจำกัดด้วยค่า L_H เนื่องจากอุณหภูมิขาเข้าของกระแส H สามารถลดลงได้เท่ากับอุณหภูมิเป้าหมายของกระแสเอง โดยกระแส C ยังสามารถใช้ฮีตเตอร์ให้ความร้อน โดยมีอุณหภูมิขาออกค่าเท่ากับอุณหภูมิเป้าหมายได้ (ชดเชยความร้อนจากกระแส H ที่น้อยลงไป) กรณีถ้าอุณหภูมิของกระแส C ลดลงนั้นจะเป็นความแปรปรวนบวก ซึ่งสามารถลดลงได้อย่างไม่จำกัด เนื่องจากสามารถผลักภาระความร้อนส่วนเกินไปให้ฮีตเตอร์ได้ทั้งหมด

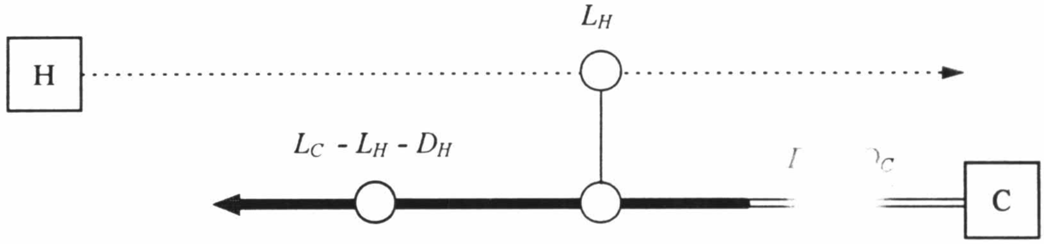
3.7 วิธีการส่งผ่านความแปรปรวน (Disturbance Propagation Method หรือ DPM)

โดยการเลือกที่สภาวะโหลดความร้อนต่ำสุด เมื่อมีการจับคู่ระหว่างกระแส ความแปรปรวนของกระแสหนึ่ง จะถูกส่งไปให้กับกระแสที่มีความร้อนหลงเหลือหลังการจับคู่ ซึ่งความแปรปรวนของกระแสที่มีความร้อนหลงเหลือนี้ จะเท่ากับผลรวมความแปรปรวนของกระแสทั้งสอง ดังนั้น แม้ว่าอีกกระแสหนึ่งไม่มีความแปรปรวน จะถูกจับคู่กับอีกกระแสหนึ่งซึ่งมีความแปรปรวนแต่มีปริมาณความร้อนน้อยกว่าก็ตาม ผลสุดท้ายความแปรปรวนของกระแสที่สองก็จะถูกส่งไปให้กระแสแรก ดูรูปที่ 3.14-3.16

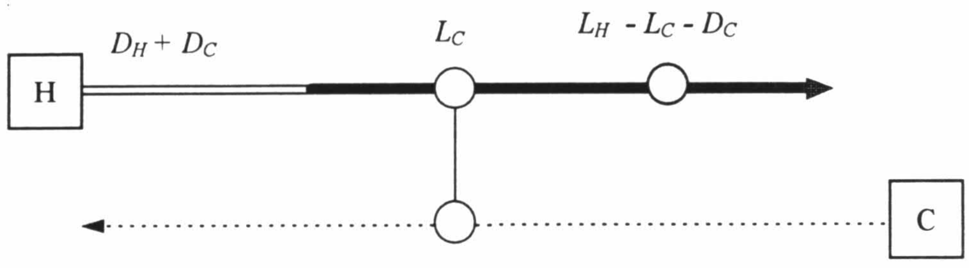


รูปที่ 3.14 แสดงความร้อนและความแปรปรวนของกระแส ก่อนการแลกเปลี่ยนความร้อน

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

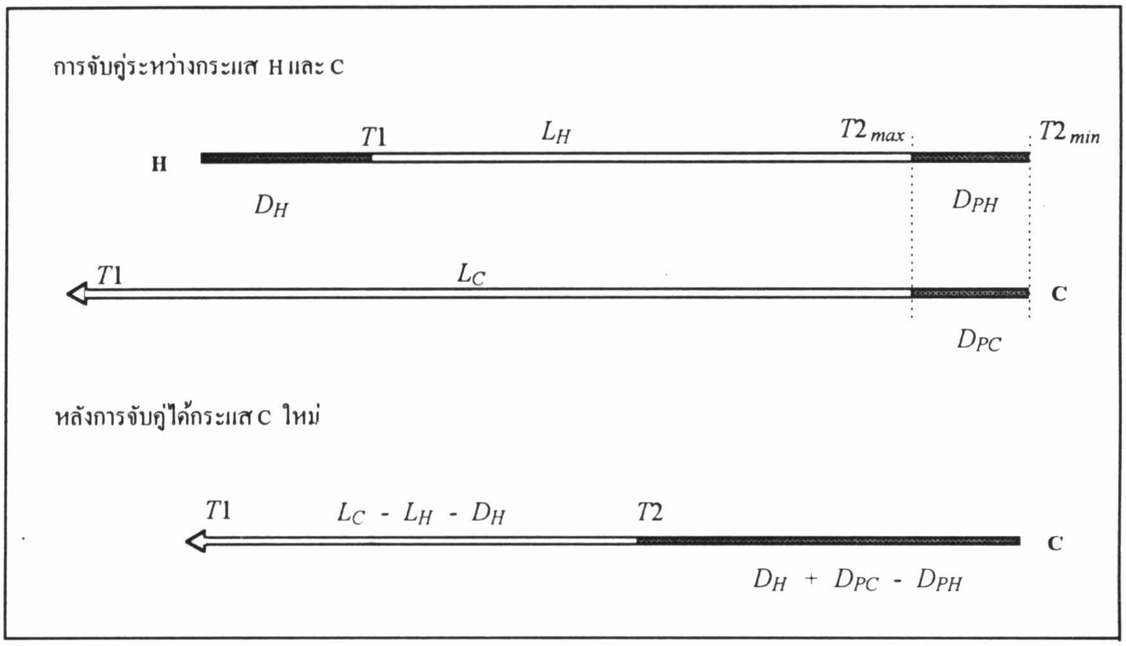


รูปที่ 3.15 การแลกเปลี่ยนความร้อนเมื่อ $L_C > L_H$ (คลาสเอ)

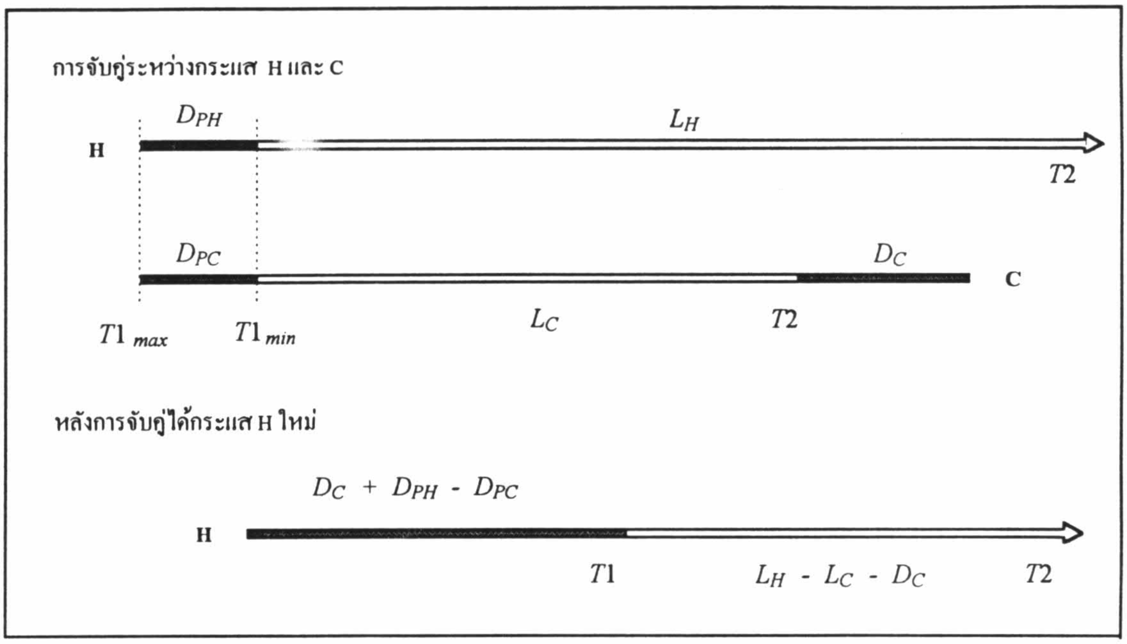


รูปที่ 3.16 การแลกเปลี่ยนความร้อนเมื่อ $L_C < L_H$ (คลาสบี)

กรณีมีความแปรปรวนเนื่องจากอุณหภูมิพินช์ ดูรูปที่ 3.17-3.18

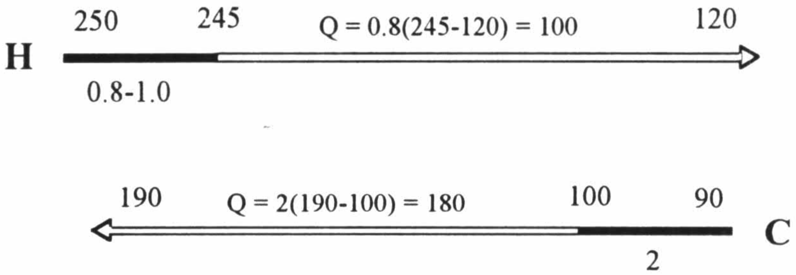


รูปที่ 3.17 กรณี $L_C > L_H$ (คลาสเอ)



รูปที่ 3.18 กรณี $L_H > L_C$ (คลาสบี)

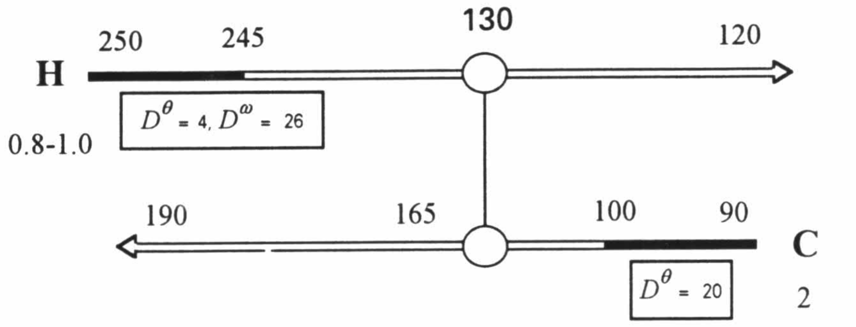
<u>ตัวอย่างที่ 3.1</u> เมื่อกระแสมีข้อมูลดังรูป 3.19 กำหนด ΔT_{min} = 10 °C



รูปที่ 3.19 แสดงข้อมูลของกระแสในตัวอย่างที่ 3.1

1. เมื่อจับคู่ที่ปลายอุณหภูมิต่ำ (Cold end) ทดสอบ ΔT ด้านหนึ่งได้ 120 – 100 = 20 > ΔT_{min}

   คำนวณอุณหภูมิของกระแส C ขาออกใหม่ได้ T = 100 + 130/2 = 165 ซึ่ง 245 – 165 > ΔT_{min}



รูปที่ 3.20 แสดงค่าความแปรปรวนของกระแสที่คำนวณได้

2. ความร้อนในกระแส H จะถูกใช้หมดไป ความร้อนของกระแส C จะเหลือเท่ากับ 180 – 130 = 50 หรือ $R_{C,H}$ = 50

$$D_H^{\theta} = 0.8(250 - 245) = 4$$

$$D_H^{\omega} = (1 - 0.8)(250 - 120) = 26$$

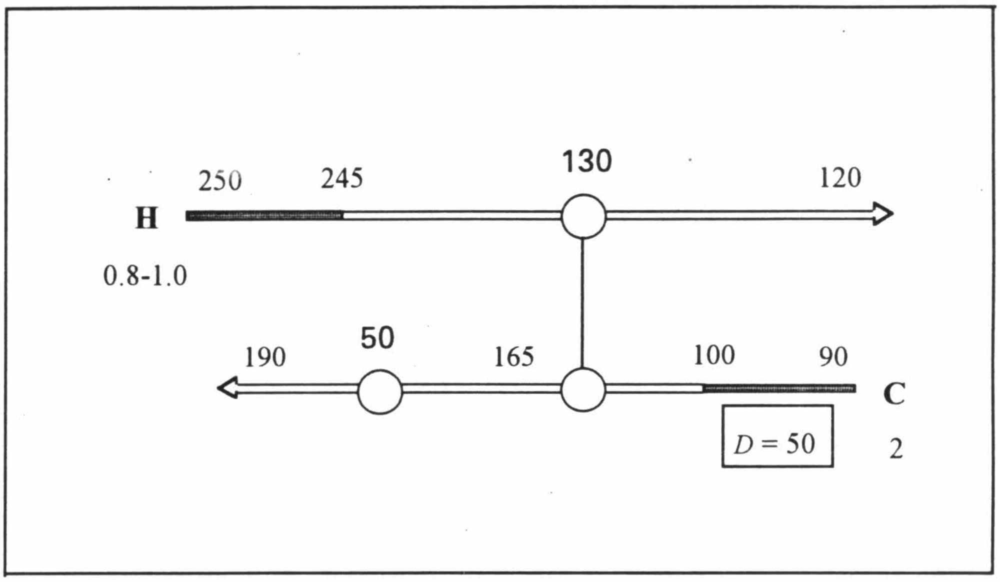
$$D_H^{\theta} + D_H^{\omega} = 30 < R_{C,H}$$

3. พารามิเตอร์ความยืดหยุ่นของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน, $E_{C,H} = 2(20 - 10) = 20$

พารามิเตอร์ความยืดหยุ่นของกระแส, $S_{C,H} = (2 - 0.8)(250 - 120) = 156$

$$D_H^{\omega} = 26 < E_{C,H} + S_{C,H}$$

4. ความแปรปรวนทั้งหมดของกระแส H = 26+4 = 30 จะถูกส่งไปให้กระแส C และสำหรับกระแส C มีความแปรปรวนเนื่องจากอุณหภูมิอย่างเดียวโดย D_C^{θ} = 2(1[illegible]0) = 20 ดังนั้นความแปรปรวนรวมในกระแส C จะมีค่า = 20 + 30 = 50 และปริมาณความร้อนที่เหลือเท่ากั[illegible] 50 นั้น จะนำไปจับคู่กับกระแสร้อนอื่นๆ หรือสร้างเป็นฮีตเตอร์ต่อไปก็ได้ ดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 แสดงการแลกเปลี่ยนความร้อนของกระแสทั้งสองที่สมบูรณ์แล้ว

3.8 การหาค่า ΔT_{min} ที่เหมาะสมกับข่ายงาน

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการหาค่า ΔT_{min} ที่ทำให้ค่าใช้จ่ายทางด้านพลังงานและค่าใช้จ่ายการสร้างข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (โดยวิธีสมดุลพลังงานและสมดุลมวลสาร) มีค่าน้อยที่สุด โดยจะสามารถหาค่า ΔT_{min} นี้ได้ก่อนการออกแบบหาโครงสร้างของข่ายงานจริง

3.8.1 จำนวนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่น้อยที่สุด

จากที่เคยกล่าวมาแล้วในบทที่ 2 จำนวนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่น้อยที่สุดในข่ายงานนี้สามารถหาค่าได้โดย

$$N_{UNITS} = S - 1 \tag{3.9}$$

เมื่อ N_{UNITS} คือ จำนวนเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่น้อยที่สุดในข่ายงาน

S คือ จำนวนกระแสในข่ายงานทั้งหมดซึ่งจะรวมกระแสจากยูทิลิตีด้วย

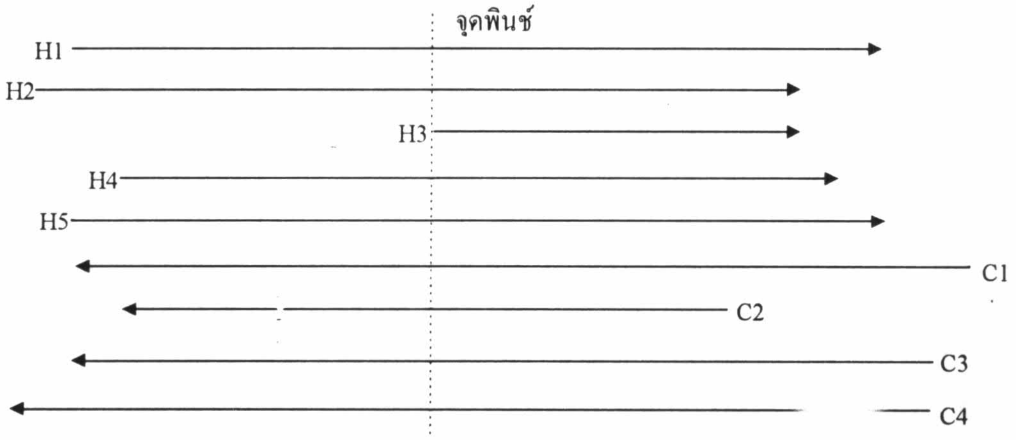
ในกรณีถ้าข่ายงานมีอุณหภูมิพินช์ สมการที่ 3.9 จะเปลี่ยนเป็น

$$N_{UNITS} = (S_{ABOVE\ PINCH} - 1) + (S_{BELOW\ PINCH} - 1) \qquad (3.10)$$

เมื่อ $S_{ABOVE\ PINCH}$ และ $S_{BELOW\ PINCH}$ คือ จำนวนกระแสทั้งหมดในข่ายงานเหนือและใต้จุดพินช์

ตัวอย่างที่3.2 สำหรับข่ายงานที่มีอุณหภูมิพินช์ตามรูปที่ 3.22 นี้ให้หา N_{UNITS} กำหนดให้มีกระแสยูทิลิตีร้อนและเย็นอย่างละ 1 กระแส

ที่เหนือจุดพินช์ จำนวนกระแสร้อนมี 4 กระแส, กระแสเย็น 4 กระแส และกระแสยูทิลิตีร้อนอีก 1 กระแส รวมทั้งหมดเท่ากับ 9 กระแส



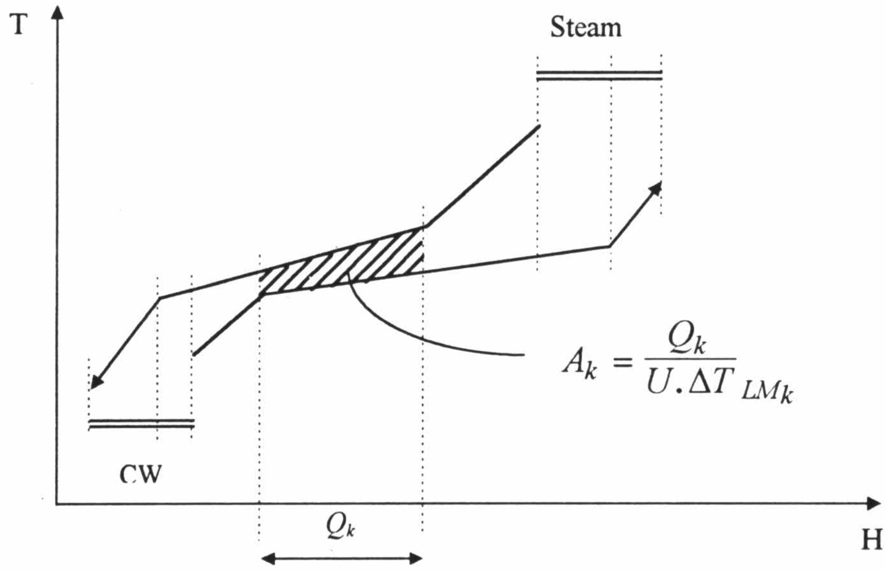
รูปที่ 3.22 ไดอะแกรมกริดสำหรับตัวอย่างที่ 3.2

ใต้จุดพินช์ จำนวนกระแสร้อนมี 5 กระแส, กระแสเย็น 4 กระแส และกระแสยูทิลิตีเย็นอีก 1 กระแส รวมทั้งหมดเท่ากับ 10 กระแส

ดังนั้น $N_{UNITS} = (9 - 1) + (10 - 1) = 17$

3.8.2 พื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อน

การหาพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนทั้งหมดของข่ายงานนี้ สามารถหาได้โดยใช้วิธีเส้นโค้งคอมโพสิต แต่จะต้องรวมกระแสจากยูทิลิตีเข้าไปด้วย และเรียกชื่อใหม่ว่า เส้นโค้งคอมโพสิตสมดุล (Balanced composite curves) ซึ่งเส้นโค้งคอมโพสิตสมดุลนี้จะถูกแบ่งเป็นช่วงเอนทาลปีแนวตั้ง (Vertical enthalpy intervals) ดังแสดงในรูป 3.23



รูปที่ 3.23 เส้นโค้งคอมโพสิตสมดุลสำหรับการหาพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของข่ายงาน

โดยให้การแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นแบบสวนทาง (Counter current) พื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนในช่วง k ใด ๆ สำหรับการถ่ายเทความร้อนแนวตั้ง (Vertical heat transfer) จะเท่ากับ

$$A_{NETWORK\ k} = \frac{\Delta H_k}{U.\Delta T_{LM_k}} \tag{3.11}$$

เมื่อ $A_{NETWORK\ k}$ = พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับการถ่ายเทความร้อนแนวตั้งในช่วง k ใดๆ

ΔH_k = เอนทาลปีในช่วง k

$\Delta T_{LM\ k}$ = อุณหภูมิเฉลี่ยลอการิธึม (Logarithmic mean temperature) ในช่วง k

U = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall heat transfer coefficient)

ดังนั้น การหาพื้นที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนรวมทั้งหมดในข่ายงาน จะได้จากการรวมพื้นที่ในแต่ละช่วง k เข้าด้วยกัน

$$A_{NETWORK} = \frac{1}{U}\sum_{k}^{INTERVALS\ K}\frac{\Delta H_k}{\Delta T_{LM_k}} \tag{3.12}$$

เมื่อ $A_{NETWORK}$ = พื้นที่รวมของข่ายงานในการแลกเปลี่ยนความร้อนแนวตั้ง

K = จำนวนของช่วงเอนทาลปี (Enthalpy intervals)

จากสมการการหาพื้นที่ที่ได้กล่าวมานี้ ค่า U ได้ถูกสมมติให้คงที่ทุกๆ ช่วงการคำนวณ แต่ในความเป็นจริงแล้วไม่ใช่ และสามารถคำนวณใหม่ได้จากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผ่านฟิล์ม (Film transfer coefficient, h) ดังนี้

$$A_{NETWORK} = \sum_{k}^{INTERVALS\ K}\frac{1}{\Delta T_{LM_k}}\left(\sum_{i}^{HOT\ SRTEAMS\ I}\frac{q_i}{h_i} + \sum_{j}^{COLD\ SRTEAM\ldots}\frac{q_j}{h_j}\right) \quad (3.1\ldots$$

เมื่อ q_i = ปริมาณความร้อนของกระแสร้อน i ในช่วงเอนทาลปีที่ k

q_j = ปริมาณความร้อนของกระแสเย็น j ในช่วงเอนทาลปีที่ k

h_i, h_j = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผ่านฟิล์ม สำหรับกระแสร้อน i และกระแสเย็น j ซึ่งจะรวมความต้านทานจากผนัง (Wall resistances) และสิ่งสกปรกภายใน (Fouling resistances) ด้วย

I , J = จำนวนกระแสร้อนและกระแสเย็นทั้งหมดในช่วงเอนทาลปีที่ k

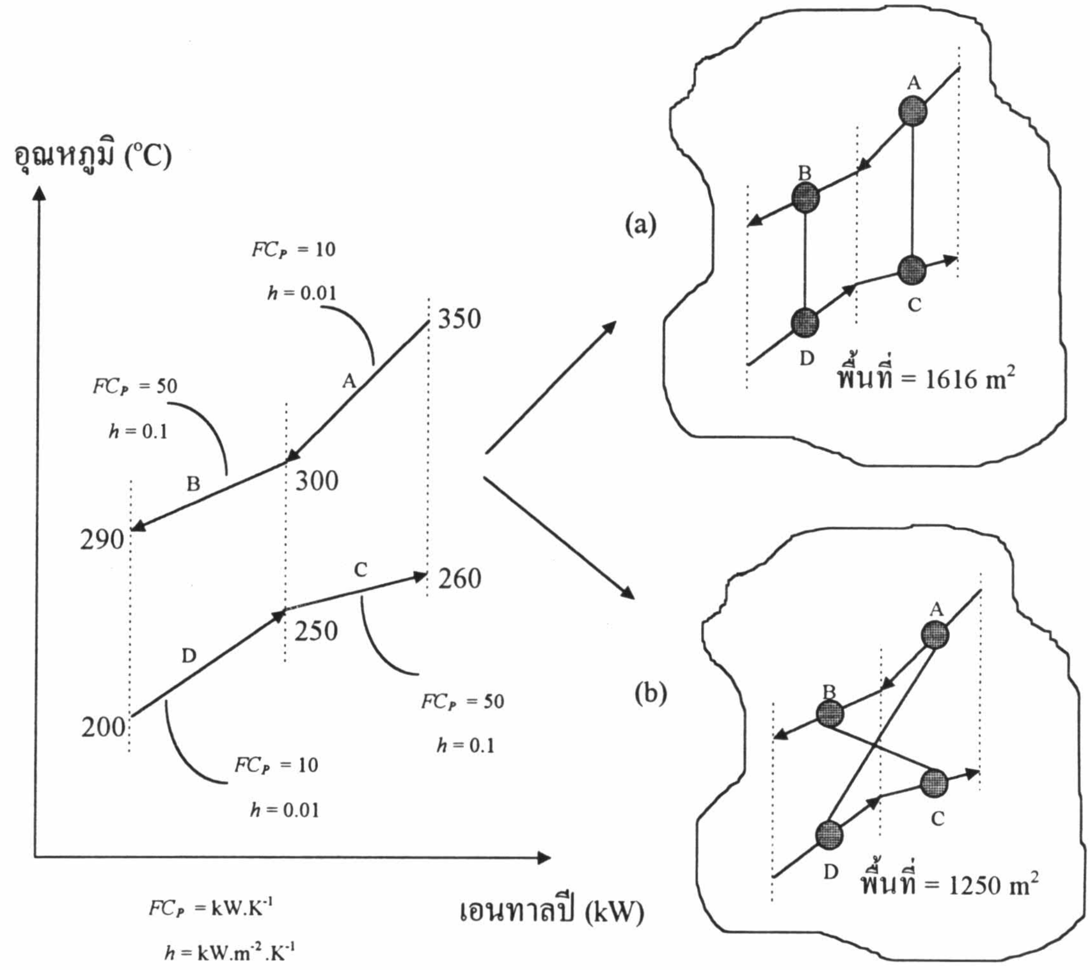
K = จำนวนช่วงเอนทาลปีทั้งหมด

สมการที่ 3.13 จะใช้ในกรณีที่ h ของกระแสร้อนและกระแสเย็นไม่มีค่าต่างกันมากนัก จึงใช้โมเดลการแลกเปลี่ยนความร้อนแนวตั้งได้ แต่ในกรณีถ้าค่า h ของกระแสร้อนและกระแสเย็นในช่วงเอนทาลปีหนึ่งๆ มีค่าต่างกันมาก จะใช้การแลกเปลี่ยนแบบไม่ใช่แนวตั้งแทน (Nonvertical heat transfer) ดังรูปที่ 3.24 ซึ่งจะทำให้ได้พื้นที่ของข่ายงานน้อยที่สุด

3.8.3 ค่าใช้จ่ายของข่ายงาน

ค่าใช้จ่ายของข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนั้นแบ่งได้สองประเภท คือ ค่าใช้จ่ายด้านพลังงานขณะทำงาน (Operating cost) และค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของข่ายงาน (Capital cost)

ค่าใช้จ่ายในการทำงานจะมาจากหน่วยยูทิลิตี เช่น ถ้ากำหนดให้ไอน้ำมีค่าใช้จ่าย 2 ล้านบาท/ปี.เมกกะวัตต์ และน้ำหล่อเย็นมีค่าใช้จ่าย 3 แสนบาท/ปี.เมกกะวัตต์ [illegible]ติว่าข่ายงานหนึ่งใช้พลังงานไอน้ำ 5 เมกกะวัตต์/ปี ใช้พลังงานจากน้ำหล่อเย็น 10 เมกกะวัตต์/ปี ค่าใช้จ่ายร[illegible]ทั้งหมดจะเท่ากับ 2*5 + 0.3*10 = 13 ล้านบาท/ปี



รูปที่ 3.24 ผลของการแลกเปลี่ยนแบบแนวตั้ง (a) และไม่ใช่แนวตั้ง (b)

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สรุปเป็นสมการสำหรับค่าใช้จ่ายดำเนินการผลิตด้านพลังงานที่ใช้จากหน่วยยูทิลิตี ดังนี้

$$\text{ค่าใช้จ่ายจากพลังงาน} = C_H * Q_{H,min} + C_C * Q_{C,min} \quad (3.14)$$

เมื่อ C_H, C_C = สัมประสิทธิ์ค่าใช้จ่ายของยูทิลิตีในการให้ความร้อนและยูทิลิตีในการดึงความร้อน คิดต่อ 1 ปี ต่อหน่วยความร้อน

$Q_{H,min}$, $Q_{C,min}$ = พลังงานความร้อนที่ใช้น้อยที่สุดสำหรับให้ความร้อนแก่ข่ายงานและดึงความร้อนออกจากข่ายงาน

สำหรับค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 1 เครื่อง ซึ่งมีพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนเท่ากับ A นั้น เป็นไปตามสมการ

$$\text{ค่าใช้จ่ายของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน} = a + bA^c \quad (3.15)$$

ค่า a,b และ c เป็นค่าคงที่ (Cost law constants) ซึ่งมีค่าต่างๆ กันไปตามชนิดวัสดุที่ใช้สร้าง, ความดัน และชนิดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

สำหรับการประมาณค่าใช้จ่ายในการสร้างข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน N เครื่อง (Network capital cost) คำนวณได้จากสมการ 3.16

$$\text{ค่าใช้จ่ายสร้างข่ายงานรวม} = N[\, a + b(A_{NETWORK} / N)^c \,] \quad (3.16)$$

ถ้าคิดถึงจำนวนปี (n) ที่จะต้องจ่ายเงินให้กับธนาคาร โดยมีดอกเบี้ยอัตราเท่ากับ i แล้ว ค่าใช้จ่ายสร้างข่ายงานรวมคิดเป็นรายปี (Annualized capital cost) จะคำนวณได้จาก ที่ 3.17

$$\text{ค่าใช้จ่ายสร้างข่ายงานรวมรายปี} = \text{ค่าใช้จ่ายสร้างข่ายงานรวม} \times \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (3.17)$$

ตัวอย่างที่ 3.3 สำหรับข้อมูลของกระแสตามตารางที่ 3.3 ให้คำนวณหา ΔT_{min} ที่ทำให้ข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนประหยัดค่าใช้จ่ายมากที่สุด

กำหนดให้ ไอน้ำมีอุณหภูมิ 240°C และ น้ำหล่อเย็นมีอุณหภูมิ 20°C

ค่าใช้จ่ายของไอน้ำ = 120,000 ($.MW^{-1}/year)

ค่าใช้จ่ายของน้ำหล่อเย็น = 10,000 ($.MW^{-1}/year)

ค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน = 40,000+500A

จากสมการ 3.17 ให้ i = 0.1 และ n = 5

การคำนวณต่อไปนี้จะใช้ตัวอย่าง ΔT_{min} 10°C ซึ่งจะได้ค่า $Q_{H,min}$ = 7.5 และ $Q_{C,min}$ = 10 MW คำนวณอุณหภูมิขาออกของไอน้ำได้ 239°C และอุณหภูมิขาออกของน้ำหล่อเย็นได้ 30°C ดังแสดงข้อมูลไว้ในตารางที่ 3.3

วิธีทำ

ในขั้นแรกจะสร้างเส้นโค้งคอมโพสิตสมดุล โดยใช้วิธีเช่นเดียวกับการสร้างเส้นโค้งคอมโพสิต แต่จะรวมข้อมูลของกระแสไอน้ำและน้ำหล่อเย็นเข้าไปด้วย

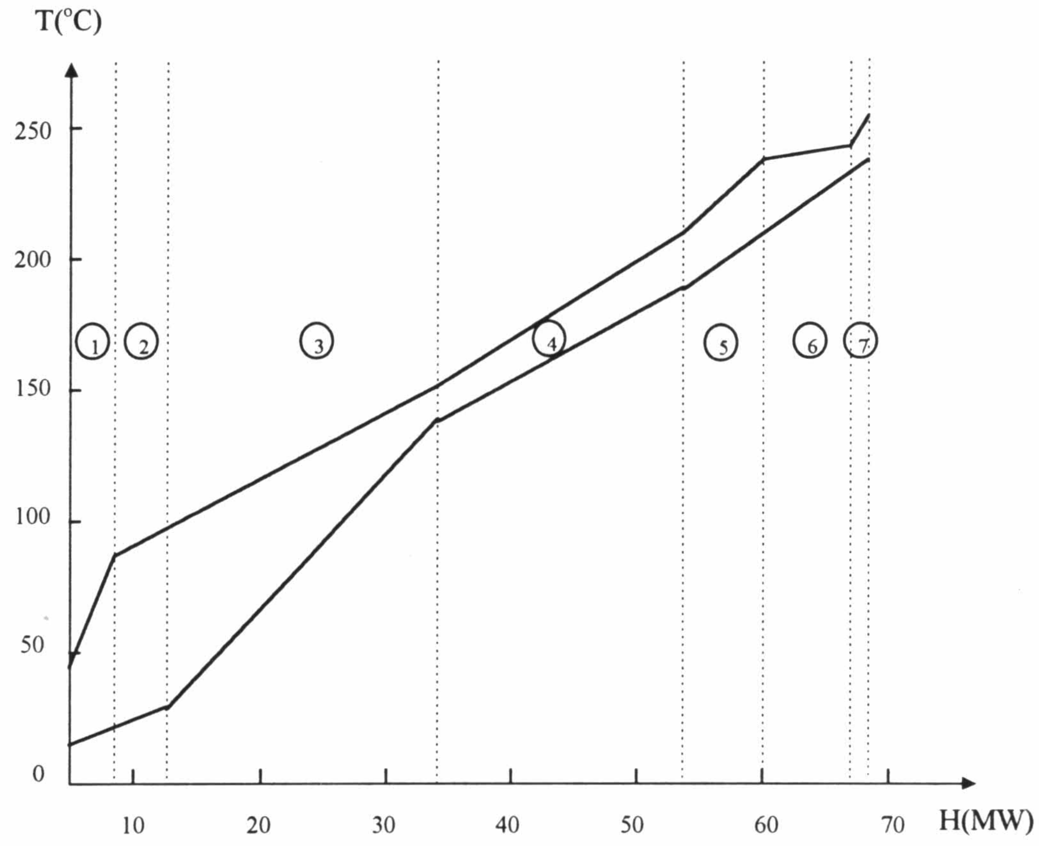
จากรูปรูปที่ 3.25 สังเกตได้ว่า ช่วงเอนทาลปีนั้นแบ่งได้จากการเปลี่ยนแปลงความชันของเส้นกราฟเส้นใดเส้นหนึ่ง รูปที่ 3.26 แสดงไดอะแกรมของแต่ละช่วงเอนทาลปีในไดอะแกรมกริด ซึ่งจะแบ่งขอบเขต หรือช่วงในกระแสต่างๆ ได้ชัดเจนขึ้น

ตารางที่ 3.3 ข้อมูลในการหาพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของข่ายงานของตัวอย่างที่ 3.3

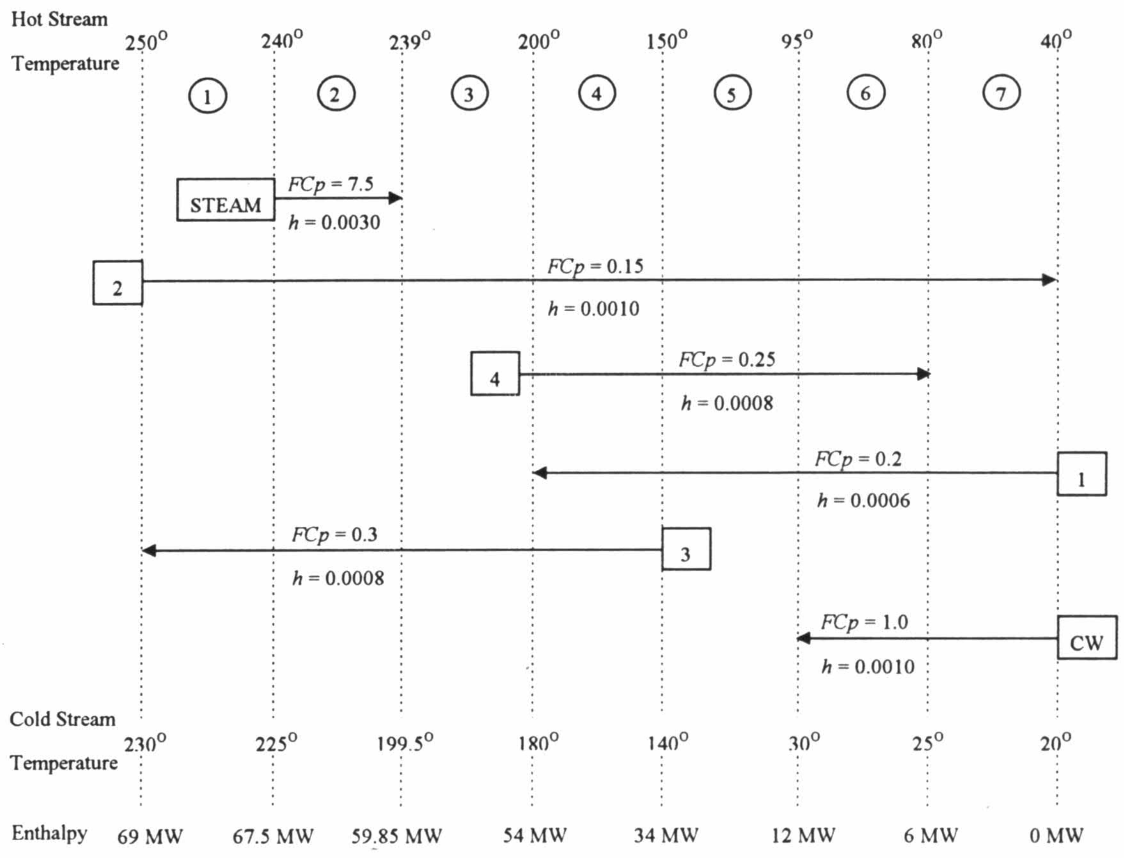
Stream	SupplyTemp (°C)	Target Temp (°C)	ΔH (MW)	FCp ($MW°C^{-1}$)	h ($MW.m^{-2}.°C$)
1. Reactor1 feed	20	180	-32.0	0.2	0.0006
2. Reactor1 product	350	40	-31.5	0.15	0.0010
3. Reactor 2 feed	140	230	27.0	0.3	0.0008
4. Reactor2 product	200	80	-30.0	0.25	0.0008
5. Steam	240	239	-7.5	7.5	0.0030
6. Cooling water	20	30	10.0	1.0	0.0010

ผลของการคำนวณหาพื้นที่รวมน้อยที่สุดของข่ายงานเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับ ΔT_{min} เท่ากับ 10° นี้ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.4 สำหรับการคำนวณหาพื้นที่และค่าใช้จ่ายของช่วง ΔT_{min} ตั้งแต่ 2-14° ได้แสดงผลออกมาไว้ในตารางที่ 3.5

เมื่อนำค่าใช้จ่ายของการทำงานและการสร้างข่ายงานมารวมกัน จะได้ค่าค่าใช้จ่ายรวม (Total cost) นำค่าใช้จ่ายรวมมาพล็อตกับค่าของ ΔT_{min} จะได้กราฟดังรูปที่ 3.27



รูปที่ 3.25 เส้นโค้งคอมโพสิตสมดุลของตัวอย่างที่ 3.3 โดย ΔT_{min} = 10°



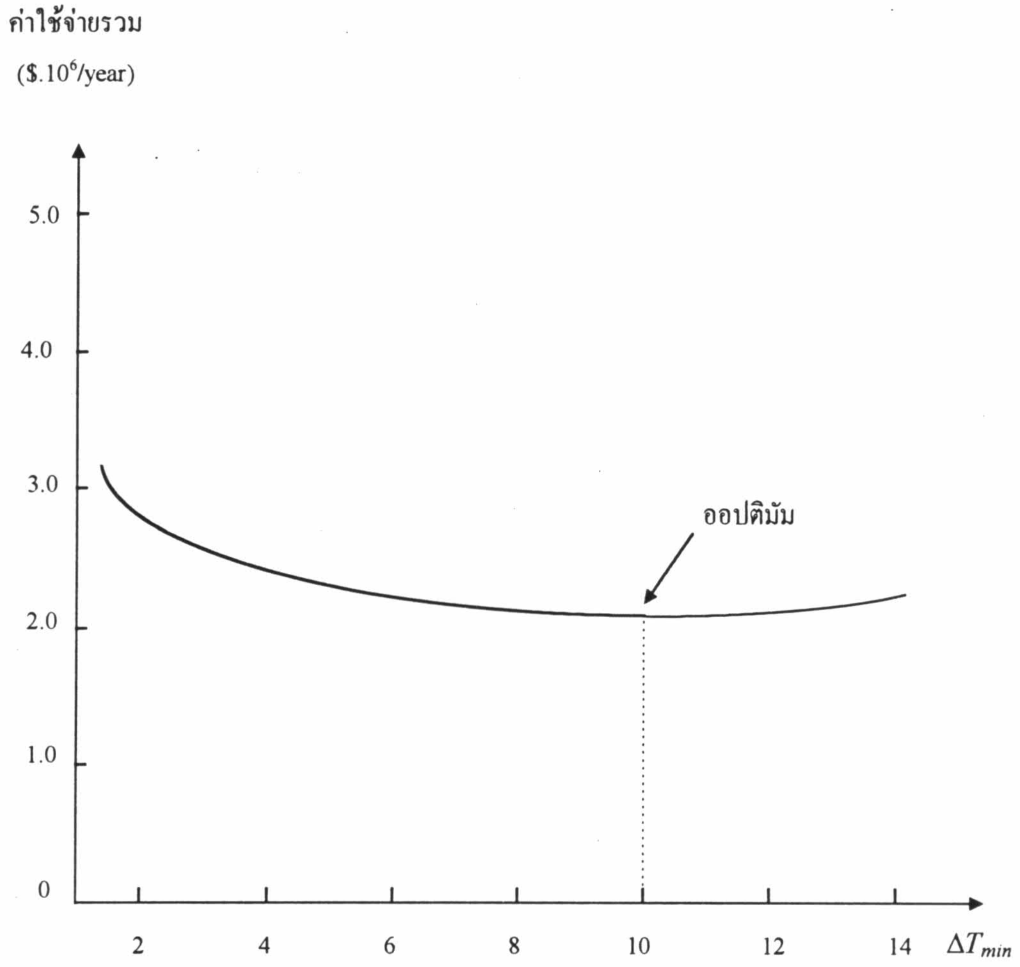
รูปที่ 3.26 แสดงการแบ่งช่วงเอนทาลปีในไดอะแกรมกริด

ตารางที่ 3.4 แสดงข้อมูลในการคำนวณที่ ΔT_{min} = 10°

Enthalpy intervals	$\Delta T_{LM\,k}$	Hot streams $\Sigma(q_i/h_i)_k$	Cold Streams $\Sigma(q_j/h_j)_k$	A_k
1	17.38	1,500	1,875.0	194.2
2	25.30	2,650	9,562.5	482.7
3	28.65	5,850	7,312.5	459.4
4	14.43	23,125	28,333.3	3566.1
5	29.38	25,437.5	36,666,7	2113.8
6	59.86	6,937.5	6,666.7	227.3
7	34.60	6,000	6,666.7	366.1
			ΣA_k =	7,409.6

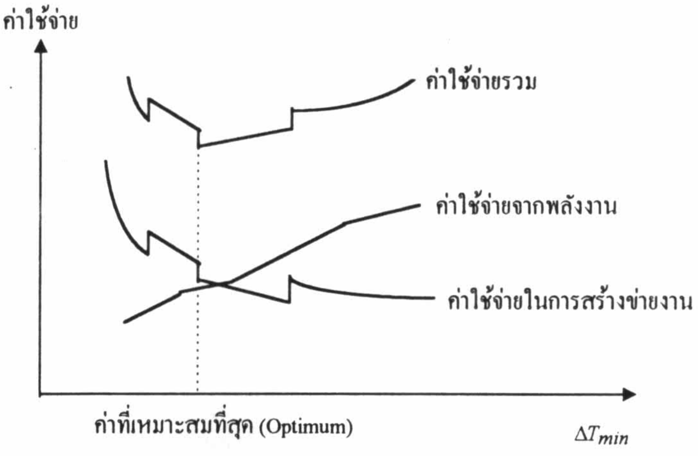
ตารางที่ 3.5 เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายของข่ายงานที่ ΔT_{min} ค่าต่าง ๆ

ΔT_{min}	$Q_{H,min}$ (MW)	$Q_{C,min}$ (MW)	Annual hot utility cost (10^6 \$/year)	Annual Cold utility cost (10^6 \$/year)	$A_{NETWORK}$ (m^2)	N_{UNITS}	Annualized capital cost (10^6 \$/year)	Annualized total cost (10^6 \$/year)
2	4.3	0.516	6.8	0.068	15,519	7	2.121	2.705
4	5.1	0.612	7.6	0.076	11,677	7	1.614	2.302
6	5.9	0.708	8.4	0.084	9,645	7	1.346	2.138
8	6.7	0.804	9.2	0.092	8,336	7	1.173	2.069
10	7.5	0.900	10.0	0.100	7,410	7	051	2.051
12	8.3	0.996	10.8	0.108	6,716	7	0.960	2.064
14	9.1	1.092	11.6	0.116	6,174	7	0.888	2.096



รูปที่ 3.27 แสดงค่า ΔT_{min} ในข่ายงานตัวอย่าง 3.3 ที่ประหยัดค่าใช้จ่ายมากที่สุด

จากรูปจะเห็นว่าค่า ΔT_{min} ที่ทำให้ข่ายงานประหยัดค่าใช้จ่ายมากที่สุด คือ 10° สังเกตได้จากจุดต่ำที่สุดของเส้นกราฟ สำหรับการออกแบบปัญหาที่ซับซ้อนกว่านี้ เส้นกราฟของค่าใช้จ่ายนั้นจะเปลี่ยนแปลงไปแบบขั้น (Step changes) ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 3.28 ที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของค่า N_{UNITS} มีค่าไม่เท่ากันตลอดในช่วง ΔT_{min}



รูปที่ 3.28 ค่าใช้จ่ายของข่ายงานเปลี่ยนแปลงแบบขั้นบันได

สรุปแล้ว สำหรับการหาค่า ΔT_{min} ที่ทำให้ข่ายงานประหยัดค่าใช้จ่ายมากที่สุดนี้ เราสามารถหาค่าได้ก่อนการออกแบบโครงสร้างของข่ายงาน โดยใช้ค่าพลังงานจากหน่วยยูทิลิตีที่คำนวณได้จากตารางปัญหา กับค่าพื้นที่การแลกเปลี่ยนความร้อนที่น้อยที่สุดของข่ายงานทางทฤษฎี (Minimum area) จากเส้นโค้งคอมโพสิตสมดุล ซึ่งจะให้ค่าผิดพลาดในทางปฏิบัติไม่เกิน 5 %