บทที่ 2
เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะรวบรวมแนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการทดลองต่าง ๆ ในบทต่อ ๆ ไป

แนวคิดและทฤษฎี

2.1 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน[1]

ในอุสาหกรรมเคมีส่วนมากต้องเกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ วิศวกรเคมีจึงต้องทำงานเกี่ยวกับการทำให้ของไหลในกระบวนการมีอุณหภูมิสูงขึ้นหรือต่ำลง รวมทั้งการส่งของไหลไปยังหน่วยต่างๆ มีเครื่องมือถ่ายเทความร้อนที่ใช้ในอุตสาหกรรมมากชนิด เช่น เครื่องมือถ่ายเทความร้อนแบบแผ่น (Plate heat exchanger) แบบท่อสองชั้น (Double pipe) แบบฟลูอิไดซ์เบด (Fluidized bed) แบบเบดเคลื่อนที่ (Moving bed) แบบท่อติดแผ่นครีบ (finned tube) แบบขด (Coils) แบบแท่ง (Bayonets) แบบถังสองชั้น (Jackets) และแบบอื่นๆ อย่างไรก็ตาม เครื่องมือถ่ายเทความร้อนที่สามารถสร้างเองได้จากโรงงานแบบหนึ่งคือ แบบท่อและเปลือก (Shell and Tube) ซึ่งเป็นเครื่องมือถ่ายเทความร้อนที่จะให้รายละเอียดเกี่ยวกับการออกแบบในที่นี้

โดยทั่วไป มีปัญหาหลักในการออกแบบเครื่องมือถ่ายเทความร้อนอยู่สองประการ ประการแรก คือการคำนวณหาสมรรถนะของเครื่องมือถ่ายเทความร้อน ที่ได้ออกแบบสร้างไว้แล้ว ประการที่สอง คือการออกแบบกำหนดรายละเอียดต่างๆของเครื่องมือถ่ายเทความร้อนจากข้อมูลความต้องการของกระบวนการหรือหน่วย

การออกแบบเครื่องมือถ่ายเทความร้อนถือเป็นทั้งศาสตร์และศิลป์ ที่ต้องการความเชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะ เช่นเดียวกับการเลือกหรือกำหนดชนิดของเครื่องมือถ่ายเทความร้อน การให้รายละเอียดสำหรับการจัดสร้างถือเป็นงานที่ส่วนผู้ผลิตหรือผู้จำหน่ายรับผิดชอบ ผู้ผลิตรายใหญ่ส่วนมากใช้คอมพิวเตอร์เข้าช่วยในการออกแบบ และการคำนวณสมรรถนะของเครื่องมือถ่ายเทความร้อนที่สร้างขึ้น แน่นอนว่าคำสั่งหรือโปรแกรมที่ใช้ ย่อมถือเป็นความลับที่ไม่เผยแพร่ต่อสาธารณชน อย่างไรก็ตาม วิศวกรย่อมต้องการวิธีการออกแบบที่รวบรัด เพื่อการประมาณราคาโดยไม่ต้องเสียเวลาในการติดต่อกับผู้ผลิต หรือเพื่อการจัดสร้างเครื่องมือถ่ายเทความร้อนขนาดเล็กสำหรับใช้ในโรงงาน เนื้อหาของส่วนนี้จะกล่าวถึงข้อมูลและเทคนิคต่างๆซึ่งใช้ในการออกแบบเครื่องมือสำหรับถ่ายเทความร้อนอย่างคร่าวๆ โดยแบ่งวิธีการออกแบบเป็น 2 ระดับ

ระดับแรก เป็นการออกแบบอย่างรวบรัดโดยใช้ความรู้พื้นฐานการถ่ายเทและดุลความร้อน

ระดับที่สอง เป็นการให้รายละเอียดสำหรับเครื่องมือถ่ายเทความร้อน ซึ่งเป็นการคำนวณในลักษณะการทำซ้ำ (Iterative)

ข้อมูลที่ต้องการสำหรับการออกแบบ

ในการออกแบบเครื่องมือสำหรับการถ่ายเทความร้อนทั้งสองระดับที่จะกล่าวถึงในบทนี้ มีข้อมูลของกระบวนการที่จำเป็นหลายประการ เช่น ของไหลที่ต้องการแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นของไหลใด มีวัฏภาคเป็นแก๊สหรือของเหลว ลักษณะของไหลมีแก๊สหรือของแข็งแขวนลอยอยู่หรือไม่ อัตราการไหลของของไหล อุณหภูมิเข้าของของไหล และอุณหภูมิออกของของไหลที่ต้องการ ความดันใช้งานของเครื่องมือ ลักษณะการใช้งานที่ต้องการ เช่น ใช้เพื่อทำให้ของเหลวกลายเป็นไอ (Boiling) ทำให้ไอควบแน่นเป็นของเหลว (Condensing) หรือทำให้ของไหลมีอุณหภูมิสูงขึ้นหรือต่ำลงโดยไม่เปลี่ยนวัฏภาค (Heating หรือ cooling)

กลุ่มชนิดของเครื่องมือถ่ายเทความร้อน

กลุ่มใหญ่ของเครื่องมือถ่ายเทความร้อน

เครื่องมือถ่ายเทความร้อนอาจแบ่งเป็นกลุ่มใหญ่ๆตามลักษณะการทำงานได้ดังนี้

เครื่องมือ	การทำงาน
Condenser	ทำให้ไอหรือไอผสมควบแน่นเป็นของเหลว โดยไอหรือไอผสมนั้นอาจจะอยู่ตามลำพัง หรือรวมอยู่กับแก๊สชนิดไม่กลั่นตัว (non-condensable) ก็ได้
Chiller	ทำให้ของไหลเย็นลงกว่าการใช้น้ำเป็นตัวหล่อเย็น สารหล่อเย็นที่ใช้อาจเป็นแอมโมเนียหรือฟรีออน
Cooler	ทำให้ของไหลเย็นลงโดยใช้น้ำเป็นตัวหล่อเย็น
Exchanger	ทำให้ของไหลสองชนิดแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งกันและกัน
Heater	ทำให้ของไหลมีอุณหภูมิสูงขึ้นโดยไม่เปลี่ยนวัฏภาค
Re-boiler	ติดตั้งไว้ทางตอนล่างของหอกลั่น ให้ความร้อนแฝงที่จำเป็นสำหรับการกลั่นสารจากไอน้ำหรือสารทำงาน (Service fluid) อื่นๆ
Boiler	เครื่องมือผลิตไอน้ำสำหรับใช้ในโรงงาน โดยใช้ความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง
Vaporizer	Heater ชนิดที่ทำให้บางส่วนของของเหลวระเหยออกไป กรณีที่ของเหลวซึ่งระเหยออกไปนั้นคือ น้ำ อาจเรียกว่า Evaporator

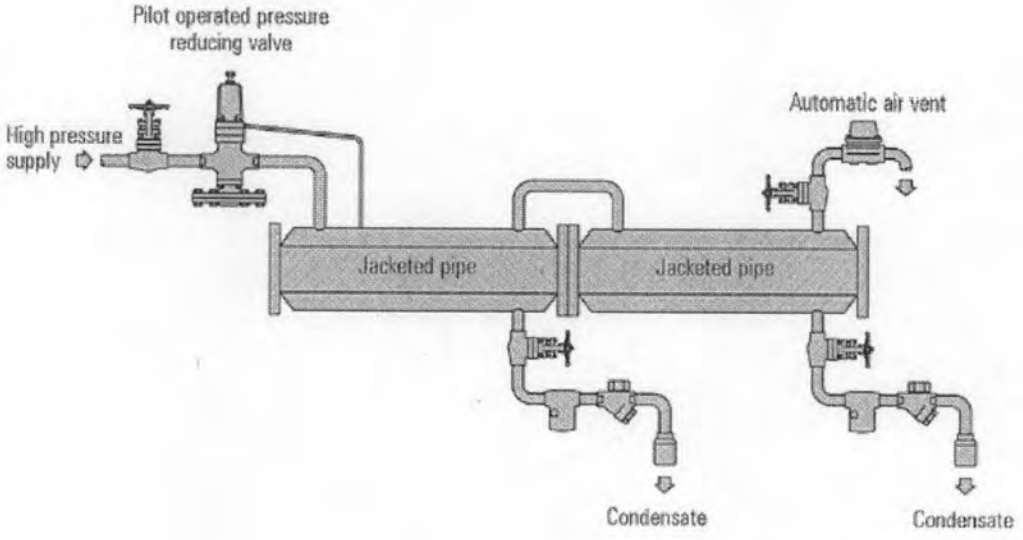
ตารางที่ 2.1 กลุ่มของเครื่องมือถ่ายเทความร้อนแยกตามลักษณะการทำงาน

ชนิดของเครื่องมือถ่ายเทความร้อน

นอกจากเครื่องมือถ่ายเทความร้อนจะสามารถแบ่งเป็นชนิดต่างๆตามลักษณะของการออกแบบแต่ละชนิดได้แล้ว ยังสามารถแบ่งย่อยออกไปได้อีก โดยตัวอย่างของเครื่องมือถ่ายเทความร้อนที่ใช้ในอุตสาหกรรมมีดังนี้

Double Pipe Heat Exchanger (Jacketed pipe)

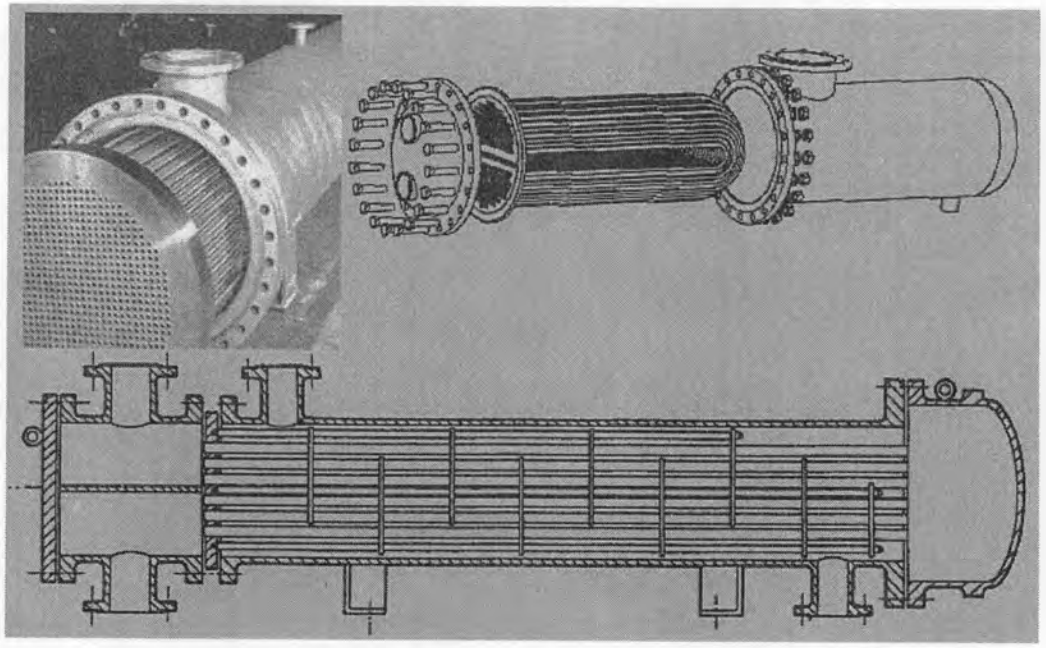
เป็นเครื่องมือถ่ายเทความร้อนพื้นฐาน ซึ่งสามารถสร้างได้เองภายในโรงงาน ประกอบด้วยท่อต่างขนาดซ้อนร่วมแกนเดียวกัน ท่อชั้นในสำหรับของไหลชนิดหนึ่งไหลผ่าน พื้นที่วงแหวนระหว่างท่อชั้นในและท่อชั้นนอกสำหรับของไหลอีกชนิดหนึ่งไหลผ่าน เครื่องมือถ่ายเทความร้อนชนิดนี้สร้างง่าย มีราคาถูก แต่มีข้อเสียคือสิ้นเปลืองเนื้อที่ในการติดตั้ง โดยทั่วไปหากต้องการพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer Area) มาก มักจะต่อรวมกันหลายๆหน่วย โดยแต่ละหน่วยจะมีความยาวไม่เกิน 6 เมตร และพื้นที่ผิวในการถ่ายเทความร้อนไม่เกิน 20 ตารางเมตรต่อชุด



รูปที่ 2.1 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิด Double Pipe Heat Exchanger (Jacketed pipe) ภาพจาก www.spiraxsarco.com

Shell and Tube Heat Exchanger

เป็นเครื่องมือถ่ายเทความร้อนที่พัฒนามาจากเครื่องมือถ่ายเทความร้อนชนิด Double Pipe เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการถ่ายเทความร้อน ตัว Shell จะเป็นรูปทรงกระบอกขนาดใหญ่ ภายในบรรจุท่อขนาดเล็กไว้เป็นจำนวนมาก ท่อเหล่านี้ จะถูกจัดเรียงไว้อย่างเป็นระเบียบด้วยแผ่นยึดท่อ (tube sheet) โดยเครื่องมือถ่ายเทความร้อนชนิด Shell and Tube ยังสามารถแบ่งเป็นแบบย่อยๆ ได้อีกหลายแบบ ตามมาตรฐานของ TEMA (Tubular Exchanger Manufacturer Association) ซึ่งได้จัดกลุ่มของเครื่องมือถ่ายเทความร้อน ชนิดนี้เป็น 4 แบบ คือ Fixed tube sheet, Floating head, U-bundle หรือ U-bend และ Kettle

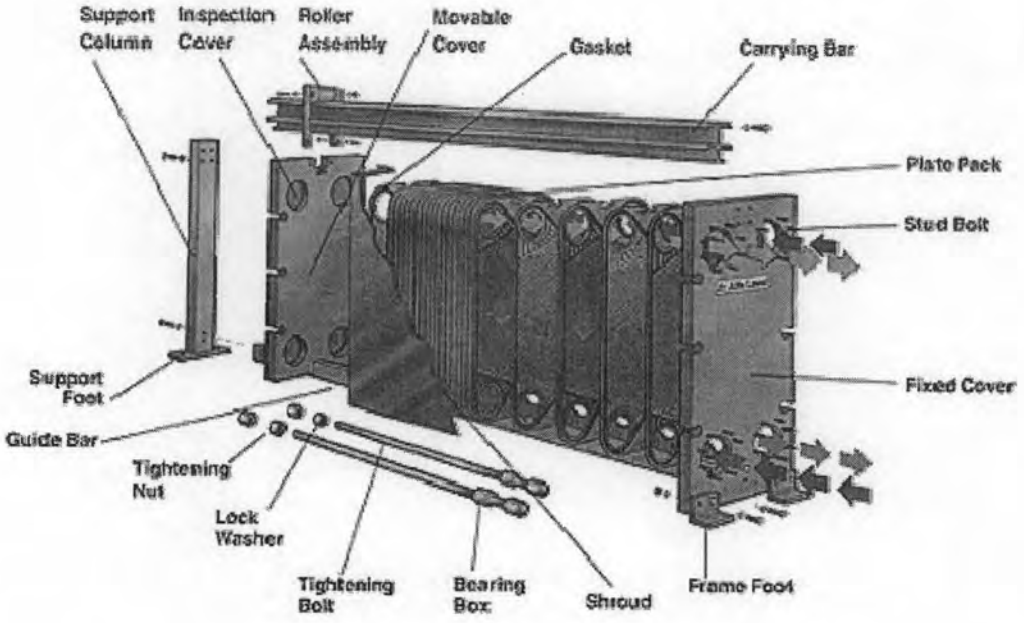


รูปที่ 2.2 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิด Shell and Tube Heat Exchanger

ภาพจาก www.secshellandtube.com

เครื่องมือถ่ายเทความร้อนแบบเพลท (Plate heat exchanger)

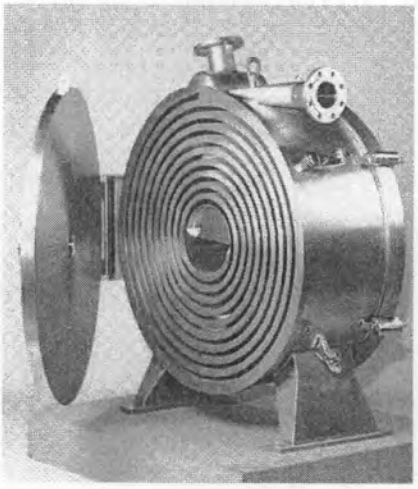
เป็นเครื่องมือถ่ายเทความร้อนที่ประกอบด้วยแผ่นโลหะ ซึ่งภายในเป็นช่องกลวงซ้อน ๆ กันคล้ายเครื่องกรองแบบอัดความดัน (Filter press) ลักษณะเช่นนี้ทำให้สามารถใช้เครื่องมือถ่ายเทความร้อนชนิดนี้ กับการไหลมากกว่าสองชนิดได้ มีความดันลดต่ำ ผู้ใช้สามารถปรับค่าพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อนได้โดยเพิ่มหรือลดจำนวนเพลท สามารถทำความสะอาดได้ง่าย ในปัจจุบันได้มีการนำเครื่องถ่ายเทความร้อนชนิดนี้ มาใช้กันอย่างแพร่หลายมากขึ้นในวงการอุตสาหกรรม ในการออกแบบ ต้องการข้อมูลจากผู้ผลิต เพื่อหาพื้นที่ผิวในการถ่ายเทความร้อน หรือจำนวนเพลทที่ต้องการเท่านั้น เนื่องจากเป็นเครื่องมือถ่ายเทความร้อนที่ยากต่อการจัดสร้างขึ้นใช้เองภายในโรงงาน โดนทั่วไปเครื่องมือชนิดนี้มีพื้นที่ผิวถ่ายเทความร้อนไม่เกิน 400 ตารางเมตรต่อหน่วย ความดันใช้งานไม่สูง อุณหภูมิใช้งานไม่เกิน 150 องศาเซลเซียส เมื่อเทียบกับ Shell and tube เครื่องมือถ่ายเทความร้อนชนิดนี้มีพื้นที่ถ่ายเทความร้อนมากกว่าประมาณ 2 ถึง 3 เท่า และราคาต่อหน่วยสูงกว่า 3-3.5 เท่า



รูปที่ 2.3 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิด เครื่องมือถ่ายเทความร้อนแบบเพลท (Plate heat exchanger) ภาพจาก www.separationequipment.com

เครื่องมือถ่ายเทความร้อนชนิด Spiral plate

มีลักษณะเป็นแผ่นโลหะยาวๆ สองแผ่นประกบกันโดยมีหมุดแทรกเพื่อให้ระยะระหว่างสองแผ่นคงที่ จากนั้นม้วนแผ่นโลหะทั้งสองแผ่นขึ้น เพื่อบรรจุลงใน Shell รูปทรงกระบอก ภายใน Shell จะมีช่องการไหลสำหรับของเหลวสองชนิด ลักษณะการไหลของของเหลวจะหมุนวนอยู่ในเพลท ไหลตามแนวแกนของตัวถัง หรืออาจไหลทั้งสองลักษณะข้างต้นรวมกันก็ได้



รูปที่ 2.4 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิด Spiral plate ภาพจาก www.me.metu.edu.tr

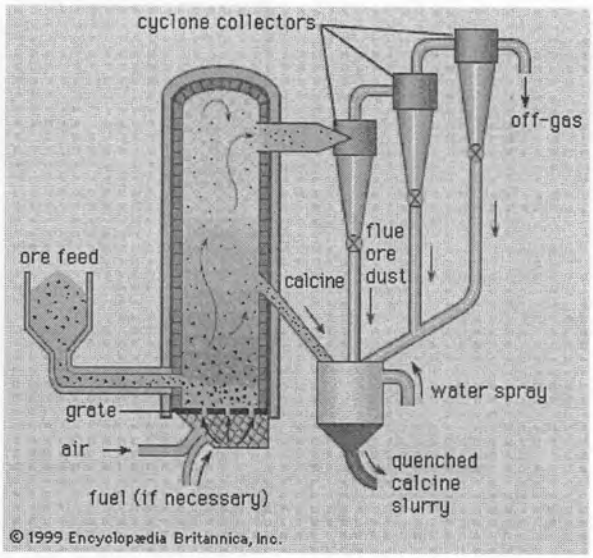
เครื่องมือถ่ายเทความร้อนชนิด Spiral tube

เป็นเครื่องมือถ่านเทความร้อนที่มีท่อหลาย ๆ ชุดต่อกันบรรจุอยู่ในตัวถัง โดยเครื่องมือถ่ายเทความร้อนชนิดนี้ มีแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางจากการไหล ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน สามารถใช้ได้กับของเหลวที่มีสิ่งแขวนลอยเป็นจำนวนมาก

รูปที่ 2.5 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความ ร้อนชนิด Spiral tube ภาพจาก www.sentry-equip.com

เครื่องมือถ่ายเทความร้อนชนิด Fluidized bed **หรือ** Moving bed

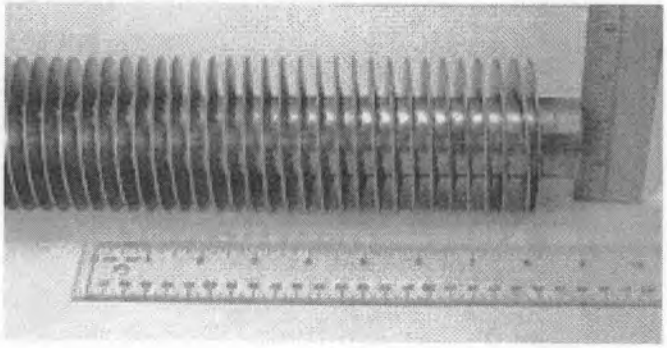
โดยมากใช้ในการถ่ายเทความร้อน ระหว่างแก๊สกับอนุภาคของแข็ง โดยให้ของแข็งแขวนลอยอยู่กับแก๊ส ซึ่งไหลสวนทางขึ้นไปในคอลัมน์



รูปที่ 2.6 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความ ร้อนชนิดFluidized bed หรือ Moving bed ภาพจาก www.britannica.com

เครื่องมือถ่ายเทความร้อนชนิดท่อติดครีบ (Finned tube)

เป็นท่อติดครีบ (Fin) เพื่อเพิ่มพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อน นิยมจัดเรียงกันอยู่เป็นกลุ่ม (Bank) สำหรับทำให้ของไหลในกระบวนการซึ่งไหลในท่อมีอุณหภูมิลดลงหรือควบแน่น โดยใช้ของไหลทำงานเป็นอากาศ หรือน้ำหล่อเย็น



รูปที่ 2.7 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิด Finned tube ภาพจาก images.google.co.th

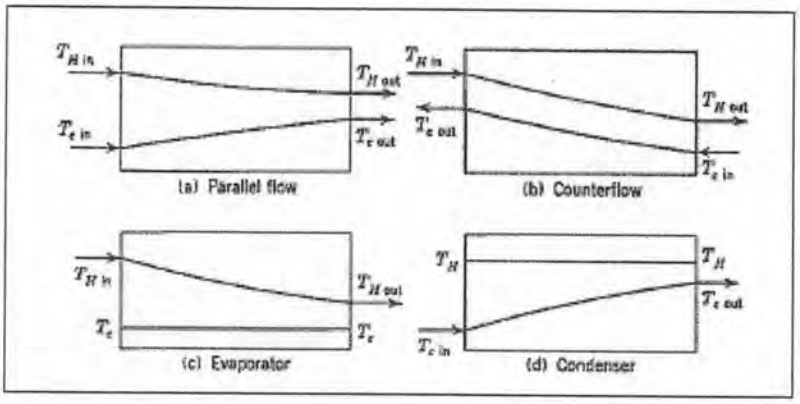
เครื่องมือถ่ายเทความร้อนแบบอื่น ๆ เช่นเครื่องมือถ่ายเทความร้อนชนิดท่อขด (Tube coil) เครื่องมือถ่ายเทความร้อนชนิด Jacket เครื่องมือถ่ายเทความร้อนชนิด Bayonet เป็นต้น

2.2 การประเมินเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน[2]

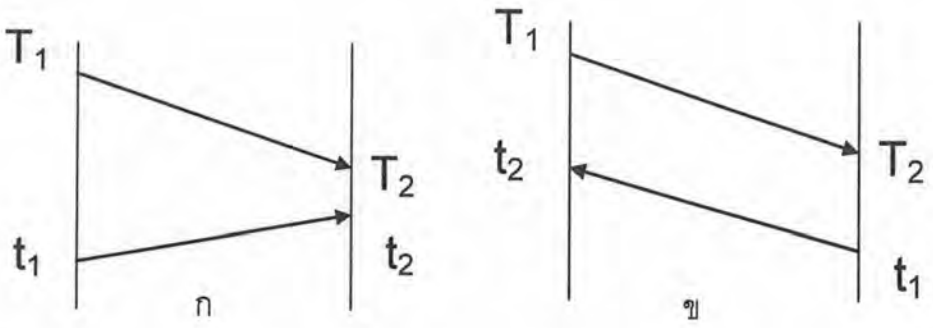
เครื่องที่ใช้แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหลร้อนและของไหลเย็นซึ่งมีอุณหภูมิแตกต่างกัน และไหลอย่างต่อเนื่อง ซึ่งใช้กันทั่วไปตั้งแต่เครื่องทำความร้อน และเครื่องปรับอากาศให้เย็นในบ้านเรือน กระบวนการทางเคมี การผลิตไฟฟ้าในโรงานขนาดใหญ่ การถ่ายโอนความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นแบบการพาความร้อนของของไหล 2 ชนิด และการนำความร้อนผ่านผนังที่กั้นของไหลออกจากกัน

การถ่ายโอนความร้อนมักจะมีการพาความร้อนในของไหลแต่ละชนิดร่วมกับการนำความร้อนผ่านผนังที่ยอกของไหลร้อนและเย็นออกจากกัน การวิเคราะห์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะใช้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนทั้งหมด (U, Overall heat transfer coefficient) ซึ่งคิดรวมผลต่าง ๆ ที่มีผลต่อการถ่ายโอนความร้อนเพื่อความสะดวก อัตราการถ่ายโอนความร้อนระหว่างของไหลร้อนและเย็นที่จุดใด ๆ ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนขึ้นกับความแตกต่างของอุณหภูมิที่จุดนั้น ๆ ซึ่งแปรผันไปตามเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน การวิเคราะห์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะใช้วิธีความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยล็อกการิทึม หรือ LMTD (Log Mean Temperature Difference) ซึ่งเท่ากับอุณหภูมิแตกต่างเฉลี่ยระหว่างของไหลร้อนและเย็น ตลอดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และวิธีประสิทธิผลเอ็นทียู (Effectiveness NTU) หรือเรียกสั้น ๆ ว่า NTU ชนิดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

การใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนขึ้นกับความต้องการนำไปใช้ถ่ายโอนความร้อนอย่างเหมาะสม จึงต้องมีการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดต่าง ๆ อย่างมากมาย เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบง่ายที่สุดคือแบบท่อซ้อนท่อซึ่งมีจุดศูนย์กลางร่วมกัน แต่มีเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกัน โดยการไหลของของไหลเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อนจะมี 2 แบบคือ การไหลขนานของของไหลร้อนและเย็น (Parallel flow) โดยของไหลร้อนและเย็นจะเข้าทางเดียวกัน เคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกัน และการไหลสวนทาง (Counter flow) จะตรงข้ามกับการไหลแบบขนาน กล่าวคือของไหลร้อน และเย็นจะไหลเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ปลายด้านตรงข้ามกัน และไหลในทิศสวนทางตรงกันข้ามกัน



รูปที่ 2.8 การไหลแลกเปลี่ยนความร้อนแบบต่าง ๆ



รูปที่ 2.9 ก.การแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลทางเดียวกันและ ข. แบบไหลสวนทาง

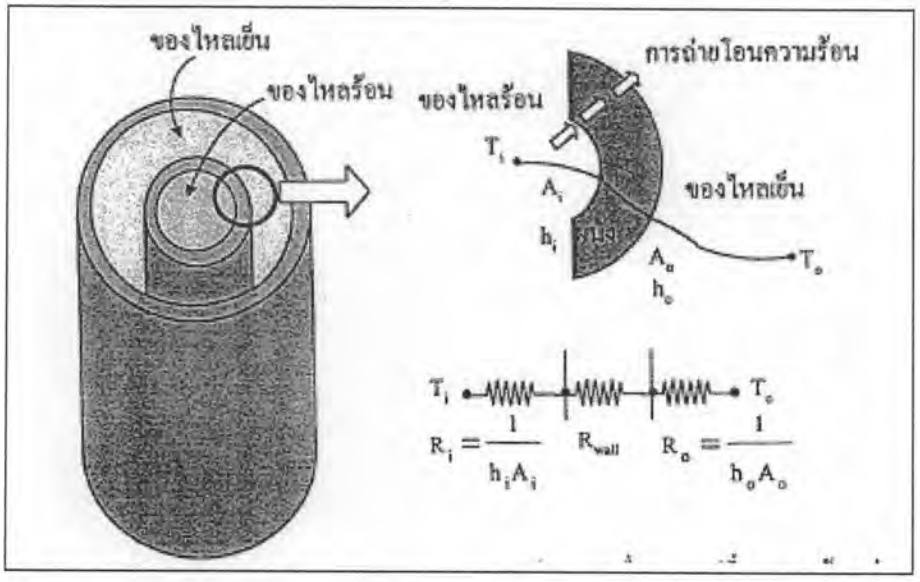
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ทั่วไปที่ใช้ในอุตสาหกรรม คือเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิด Shell and tube heat exchanger ประกอบด้วยท่อจำนวนมากบรรจุอยู่ใน Shell ท่อเหล่านี้ถูกวางอยู่ในแนวแกนไปตามความยาวของ Shell การถ่ายโอนความร้อนเกิดขึ้นเมื่อของไหลหนึ่งไหลอยู่ในท่อ ขณะที่ของไหลอีกชนิดไหลอยู่ใน Shell ภายนอกท่อ และจะมี Baffles วางไว้ทั่วไปใน Shell เพื่อให้ของไหลภายใน Shell ไหลตัดท่อเพื่อเพิ่มการถ่ายโอนความร้อน และรักษาช่องว่างระหว่างท่อให้สม่ำเสมอ

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดอินโนเวทีฟ ที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางคือ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเพลทและเฟรม (Plate and frame) ซึ่งประกอบด้วยแผ่นแบบลูกฟูกแบบเอียงให้ของไหลไหลผ่าน ใช้แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหลร้อนและเย็นที่ความดันใกล้เคียงกัน ลำของของไหลเย็นถูกล้อมรอบโดยลำของของไหลร้อนสองลำ ส่งผลให้การถ่ายโอนความร้อนมีประสิทธิภาพมาก

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเพลทและเฟรม (Plate and frame) สามารถทำให้การถ่ายโอนความร้อนเพิ่มขึ้นได้ง่ายตามต้องการโดยการติดแผ่นเพิ่มได้อีก โดยเหมาะสมในงานแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของเหลวไปของเหลว โดยลำของของเหลวมีความดันใกล้เคียงกัน สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนทั้งหมด (Overall heat transfer coefficient)

ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีของไหล 2 ชนิด (ถูกแยกด้วยผนังท่อ) ไหลตามกันหรือไหลสวนทางกันเพื่อถ่ายเทความร้อนให้กันและกัน ความร้อนถูกถ่านโอนจากของไหลร้อนไปยังผนังโดยการพาความร้อนแล้วจึงผ่านผนังออกไปโดยการนำความร้อน และของไหลที่เย็นกว่าจะมารับความร้อนอีกครั้งโดยการพาความร้อน ผลจากการแผ่รังสีมักจะเกิดร่วมกับการพาความร้อนจึงรวมผลนี้ให้อยู่ในสัมประสิทธิ์การพาความร้อน

โครงข่ายความต้านทานของการถ่ายโอนความร้อน ที่มีความต้านทานจากการพาความร้อนสองค่าและการนำความร้อนหนึ่งค่าดังแสดงในรูป โดย i, o คือผิวท่อด้านในและด้านนอกตามลำดับ



รูปที่ 2.10 โครงข่ายความต้านทานของการถ่ายโอนความร้อน

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนท่อคู่ ซึ่งมี $A_i = \pi D_i L$ และ $A_o = \pi D_o L$ และความต้านทานความร้อนของผนังท่อคือ

$$R_{wall} = \frac{\ln(D_o / D_i)}{2\pi kL}$$

โดยที่ k คือสภาพการนำความร้อนของวัสดุผนังและ L คือความยาวของท่อดังนั้น ความต้านทานความร้อนทั้งหมดจะได้เป็น

$$R = R_{total} = R_i + R_{wall} + R_o = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln(D_o / D_i)}{2\pi kL} + \frac{1}{h_o A_o}$$

A_i คือ พื้นที่ผิวด้านในของผนังที่แยกของไหลทั้งสองออกจากกัน และ A_o พื้นที่ผิวด้านนอกของผนัง หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า A_i และ A_o คือพื้นที่ผิวผนังเปียกที่ใช้แยกของไหลข้างในและข้างนอกท่อ ตามลำดับ

การวิเคราะห์ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน จะรวมความต้านทานความร้อนทั้งหมดในทางเดินของการไหลของความร้อนจากของไหลที่ร้อนไปยังของไหลที่เย็นให้เป็นค่าของความต้านทานเดียว R และใช้สมการอัตราการถ่ายโอนความร้อนระหว่างของไหลทั้งสองคือ

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R} = UA\Delta T = U_i A_i \Delta T = U_o A_o \Delta T$$

โดยที่ U คือ สัมประสิทธิ์การถ่านโอนความร้อนทั้งหมด (Overall heat transfer coefficient) มีหน่วย $W/m^2 \cdot C$ เหมือนสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนธรรมดา h ถ้าตัดเทอม ΔT ทิ้งสมการจะลดรูปเหลือเป็น

$$\frac{1}{UA_s} = \frac{1}{U_i A_i} = \frac{1}{U_o A_o} = R = \frac{1}{h_i A_i} + R_{wall} + \frac{1}{h_o A_o}$$

เพราะพื้นที่ผิวของการถ่ายโอนความร้อนของท่อด้านในและด้านนอกไม่เท่ากันเสมอไป ดังนั้นจึงต้องใช้พื้นที่ผิว A_i และ A_o จึงมีค่า U_i และ U_o สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน หมายเหตุ $U_i A_i = U_o A_o$ แต่ $U_i \neq U_o$ ถ้า $A_i \neq A_o$ เพราะฉะนั้น สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนทั้งหมด U ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนไม่มีความหมายถ้าไม่กำหนดพื้นที่ผิวของท่อมาให้

เมื่อผนังท่อมีความหนาน้อยมากและค่าสภาพการนำความร้อนของท่อมีค่าสูง ความต้านทานความร้อนของท่อจึงตัดทิ้งได้ ($R_{wall} \approx 0$) พื้นที่ผิวด้านในและด้านนอกมีพื้นที่เกือบเท่ากัน ($A_i \approx A_o \approx A_s$) ดังนั้นสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนทั้งหมดอาจลดรูปได้เป็น

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o}$$

โดย $U \approx U_i \approx U_o$ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนธรรมดาของท่อแต่ละด้าน h_i และ h_o หาจากการใช้ความสัมพันธ์ของการพาความร้อน

สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนทั้งหมด U แสดงในตาราง เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิด ก๊าซไปก๊าซ มีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนทั้งหมดประมาณ 10 $W/m^2 \cdot C$ ถึง 10,000 $W/m^2 \cdot C$ สำหรับการแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการเปลี่ยนวัฏภาค เพราะก๊าซมีค่าการนำความร้อนต่ำ และกระบวนการที่มีการเปลี่ยนวัฏภาคจะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนสูง

สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนทั้งหมดในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

ชนิดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	U, $W/m^2 °C$
น้ำไปน้ำ	850-1,700
น้ำไปน้ำมัน	100-350
น้ำไปน้ำมันแก๊สโซลีนหรือน้ำมันก๊าด	300-1,000
ฮีตเตอร์ใช้น้ำป้อน	100-8,500
ไอน้ำไปน้ำมันเชื้อเพลิงเบา	200-400
ไอน้ำไปน้ำมันเชื้อเพลิงหนัก	50-200
เครื่องควบแน่นไอน้ำ	1,000-6,000
ก๊าซไปก๊าซ	10-40

ตารางที่ 2.1 สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนทั้งหมดในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนบางชนิด

เฟาลิ่งแฟกเตอร์ (Fouling factor)

สมรรถนะการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมักจะลดลงเมื่อเวลาผ่านไป เนื่องจากมีตะกอนมาสะสมบนผิวของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ชั้นของตะกอนจะเป็นความต้านทานที่เพิ่มขึ้นต่อการถ่ายโอนความร้อน ทำให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนลดลง ผลสุทธิของการสะสมเหล่านี้ต่อการถ่ายโอนความร้อนแทนด้วย เฟาลิ่งแฟกเตอร์ (Fouling factor) R_f ซึ่งคือการวัดของความต้านทานความร้อนที่มาจากตะกรัน

ตะกรันที่พบมากคือสารของแข็งที่อยู่ในของไหลตกเป็นตะกอนบนผิวของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เช่น ในกาต้มน้ำจะเกิดตะกรันจากหินปูนที่มีอยู่ในน้ำ การทำความสะอาดใช้การขูดลอกหรือสารเคมีช่วย ตะกรันในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนส่งผลที่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อพื้นที่การไหลและการถ่ายโอนความร้อน เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดตะกรันในน้ำป้อนของโรงงานผลิตไฟฟ้า และในกระบวนการของโรงงานอุตสาหกรรมจึงต้องทำการปรับสภาพน้ำอย่างดี ปราศจากสิ่งเจือปนที่อาจก่อให้เกิดตะกอนหรือตะกรัน

อีกรูปแบบหนึ่งของตะกรันซึ่งเป็นธรรมดาที่มีอยู่ในกระบวนการอุตสาหกรรมเคมีคือ จากการผุกร่อน (Corrosion) และตะกรันเคมี (Chemical fouling) ในกรณีนี้ผิวถูกตะกรันจับโดยมีการสะสมของผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาเคมี ทำให้เกิดตะกรันที่ควรหลีกเลี่ยงโดยการเคลือบท่อโลหะด้วยแก้วหรือใช้ท่อพลาสติกแทนท่อโลหะ บางครั้งจะมีสาหร่ายเกิดขึ้นที่ผิวเรียกว่าตะกรันชีวภาพ (Biological fouling) สามารถแก้ปัญหาได้โดยใช้สารเคมีปรับสภาพน้ำ

เฟาลิ่งแฟกเตอร์ (Fouling factor) ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนใหม่มีค่าเท่ากับศูนย์และจะเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป ขณะที่มีของแข็งมาสะสมเพิ่มขึ้นของผิวของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมากขึ้น เฟาลิ่งแฟกเตอร์ (Fouling factor) ขึ้นกับอุณหภูมิที่ใช้งานและความเร็วของของไหลรวมทั้งระยะเวลาในการดูแล เฟาลิ่งแฟกเตอร์ (Fouling factor) จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและความเร็วลดลง

เฟาลิ่งแฟกเตอร์ (Fouling factor) ใช้เป็นแนวทางในการเลือกและคำนวณของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เมื่อนับผลจากตะกรันที่เกิดบนผิวท่อ ค่าเฟาลิ่งแฟกเตอร์ (Fouling factor) ในตารางส่วนใหญ่ มีระดับอยู่ที่ $10^{-4}\ m^2\,^\circ C/W$ ซึ่งเท่ากับความต้านทานความร้อนของชั้นหินปูนหนา 0.2 มิลลิเมตร $(k = 2.9W/m^2\,^\circ C)$ ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่เพราะฉะนั้น ในกรณีไม่มีข้อมูลกำหนดมาให้ เราจะสมมติให้ผิวถูกเคลือบด้วยหินปูนหนา 0.2 มิลลิเมตร เป็นจุดเริ่มต้นสำหรับผลจากตะกรัน

ของไหล	$R_f,\ m^2\,^\circ C/W$
น้ำกลั่น น้ำทะเล น้ำแม่น้ำ น้ำป้อนหม้อต้มไอน้ำ	
ต่ำกว่า 50 $^\circ C$	0.0001
สูงกว่า 50 $^\circ C$	0.0002
น้ำมันเชื้อเพลิง	0.0009
ไอน้ำ	0.0001
สารทำความเย็น (ของเหลว)	0.0002
สารทำความเย็น (ไอ)	0.0004
ไอแอลกอฮอล์	0.0001
อากาศ	0.0004

ตารางที่ 2.2 เฟาลิ่งแฟกเตอร์ (Fouling factor)

การวิเคราะห์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่นำมาใช้งาน ในทางปฏิบัติวิศวกรเป็นผู้เลือกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งจำเป็นต้องทราบการแลกเปลี่ยนอุณหภูมิในลำของของไหลที่ทางออกของลำของไหลร้อนและเย็นตามอัตราการไหลที่กำหนดมา โดยหาได้สองวิธีคือ วิธีความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยล็อกการิทึม หรือ LMTD และวิธีประสิทธิผล เอ็นทียู (Effectiveness NTU) หรือ NTU

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้งานมาเป็นระยะเวลาที่ยาวนาน โดยไม่เปลี่ยนสถานะ ดังนั้นจึงใช้การจำลองให้เป็นการไหลคงที่ เช่น อัตราการไหลเชิงมวลของของไหลคงที่ และสมบัติต่าง ๆ ของของไหลได้แก่ อุณหภูมิ ความเร็วที่จุดใด ๆ มีค่าเท่าเดิม ลำของของไหลไม่มีการเปลี่ยนความเร็วหรือความสูง ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงของพลังงานจลน์และพลังงานศักดิ์ถือว่ามีค่าน้อยมากจึงตัดทิ้งได้ ปกติความร้อนจำเพาะของของไหลเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ แต่ในช่วงอุณหภูมิที่กำหนดมาให้มีค่าคงที่ ที่ค่าเฉลี่ยบางค่าได้โดยมีความคลาดเคลื่อนเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ปกติการนความร้อนในแนวแกนตามความยาวท่อถือว่าไม่มีนัยสำคัญและตัดทิ้งได้ ท้ายที่สุดสมมติให้ผิวด้านนอกของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนหุ้มด้วยฉนวนอย่างสมบูรณ์ ดังนั้นจะไม่มีการสูญเสียความร้อนให้ตัวกลางที่อยู่ด้านนอก การถ่ายโอนความร้อนใด ๆ เกิดขึ้นในของเหลวสองชนิดเท่านั้น

การกำหนดดังกล่าวข้างต้นเป็นแบบอุดมคติซึ่งใกล้เคียงกับการนำไปใช้ในทางปฏิบัติ ทำให้การวิเคราะห์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนง่ายขึ้น ดังนั้นสามารถใช้ได้โดยทั่วไปภายใต้สมมติฐานเหล่านี้ต้องใช้กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ ที่อัตราการถ่ายโอนความร้อนจากของไหลร้อนเท่ากับอัตราการถ่ายโอนความร้อนไปยังของไหลเย็นนั่นคือ

$$\dot{Q} = \dot{m}_c C_{pc}(T_{c,out} - T_{c,in})$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_h C_{ph}(T_{h,out} - T_{h,in})$$

โดยที่ตัวห้อย c และ h คือของไหลเย็นและร้อน $\dot{m}_c$ และ $\dot{m}_h$ คืออัตราการไหลเชิงมวล C_{pc} และ C_{ph} คือความร้อนจำเพาะของของไหล $T_{c,out} - T_{h,out}$ = อุณหภูมิขาออก และ $T_{c,in} - T_{h,in}$ = อุณหภูมิขาเข้าตามลำดับ อัตราการถ่ายโอนความร้อน $\dot{Q}$ ให้มีปริมาณเป็นบวกและทิศทางของมันเป็นที่เข้าใจกันว่าไหลจากของไหลร้อนไปยังของไหลเย็นซึ่งเป็นไปตามกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์

การวิเคราะห์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะรวมผลคูณของอัตราการไหลเชิงมวล และความร้อนจำเพาะของของไหลให้เป็นเทอมเดียวกันเพื่อความสะดวก เรียกว่าอัตราความจุความร้อน (Heat capacity rate) และนิยมสำหรับของไหลร้อนและเย็น

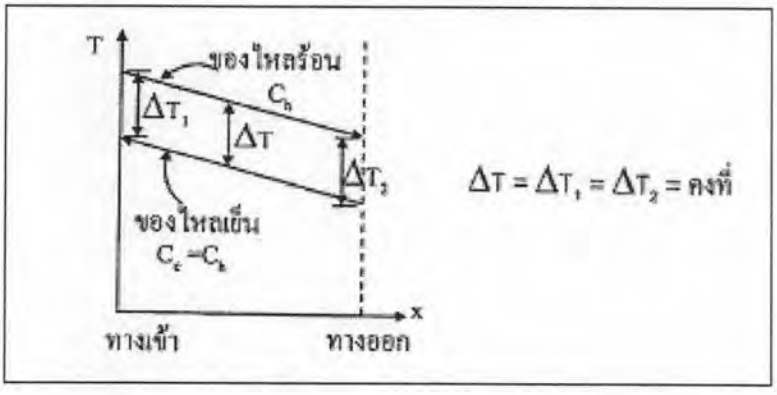
$$C_h = \dot{m}_h C_{ph} \text{ และ } C_c = \dot{m}_c C_{pc}$$

อัตราความจุความร้อนของลำของไหลแทนอัตราถ่ายโอนความร้อนที่ต้องการ เพื่อเปลี่ยนอุณหภูมิของลำของไหลไป 1 $^{\circ}C$ ขณะที่มันไหลผ่านเข้าไปยังเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ถ้าของไหลมีอัตราความจุความร้อนสูงจะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนน้อย และของไหลที่มีอัตราความจุความร้อนน้อยจะทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงมาก เพราะฉะนั้นการเพิ่มอัตราการไหลเชิงมวลของของไหลเป็นสองเท่าขณะที่ตัวแปรอื่นไม่เปลี่ยนแปลง ทำให้อุณหภูมิของของไหลเปลี่ยนไปครึ่งหนึ่ง จากนิยามของอัตราความจุความร้อนดังกล่าวข้างต้นสามารถเขียนสมการใหม่ได้คือ

$$\dot{Q} = C_c(T_{c,out} - T_{c,in})$$

$$\dot{Q} = C_h(T_{h,out} - T_{h,in})$$

นั่นคือ อัตราการถ่ายโอนความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเท่ากับอัตราความจุความร้อนของไหลทั้งสองคูณกับอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงของของไหล เวลาที่อุณหภูมิของไหลเย็นเพิ่มขึ้นเท่ากับอุณหภูมิของไหลร้อนลดลง คือของไหลทั้งสองมีอัตราความจุความร้อนเท่ากัน



รูปที่ 2.11 ของไหลที่มีอัตราการไหลและความจุความร้อนเท่ากันจะมีความแตกต่างอุณหภูมิเหมือนกันในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่หุ้มฉนวนอย่างดี

อัตราการถ่ายโอนความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถเขียนสมการให้มีความคล้ายคลึงกับกฎทำความเย็นของนิวตันคือ

$$\dot{Q} = UA_s\Delta T_m$$

โดยที่ U คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนทั้งหมด

A_s คือ พื้นที่ถ่ายโอนความร้อน

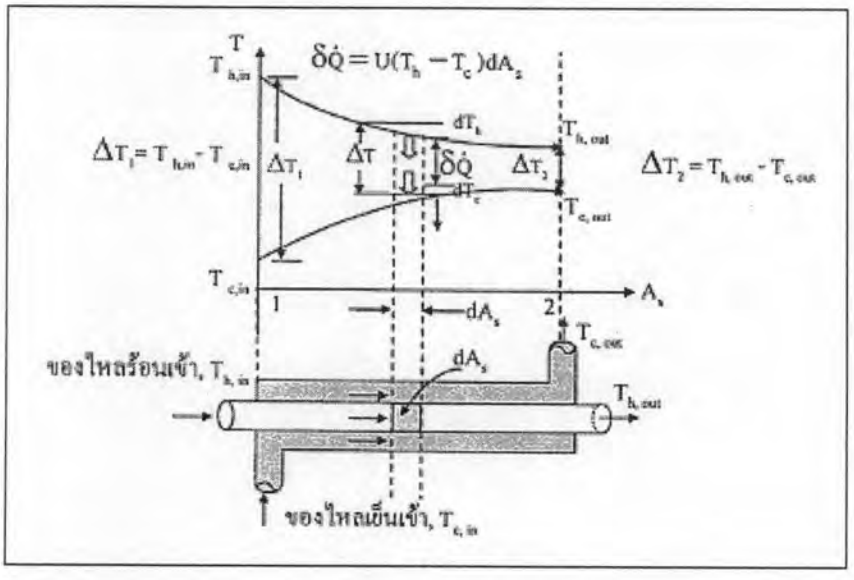
ΔT_m คือความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างของไหลทั้งสอง

ในที่นี้พื้นที่ถ่ายโอนความร้อน A_s หาได้โดยตรงจากขนาดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน อย่างไรก็ตาม สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนทั้งหมด (U) และความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างของไหลทั้งสอง (ΔT_m) ปกติมีค่าไม่คงที่ และแปรผันตามเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

วิธีหาความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยล็อกการิทึม

ความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างของไหลร้อนและเย็นแปรผันตามเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและเพื่อความสะดวกจึงต้องมีความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ย (ΔT_m Mean temperature difference) ระหว่างของไหลทั้งสองเพื่อใช้ในความสัมพันธ์ $\dot{Q} = UA_s\Delta T_m$

ความสัมพันธ์ของความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างของไหลร้อน และเย็นที่เทียบเท่านำไปพัฒนาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนท่อคู่ ที่มีการไหลขนาน ความแตกต่างอุณหภูมิ (ΔT) ระหว่างของไหลร้อนและเย็นมีค่ามากที่ทางเข้าของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน แต่ลดลงอย่างเอ็กซ์โปแนนเชียลยังทางออก ขณะที่อุณหภูมิของของไหลอมลดลง อุณหภูมิของของไหลเย็นเพิ่มขึ้นตลอดไหลผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแต่อุณหภูมิของของไหลเย็นจะมีค่าไม่สูงได้มากกว่าของไหลร้อนไม่ว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะยาวเท่าไหร่ก็ตาม



รูปที่ 2.12 การแปรผันอุณหภูมิของไหลในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ไหลแบบขนาน

สมมติให้ผิวด้านนอกของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนหุ้มด้วยฉนวนอย่างดี ดังนั้นการถ่ายโอนความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างของไหลร้อนและเย็น เมื่อคิดว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์และพลังงานศักดิ์ การดุลพลังงานของของไหลแต่ละลำในส่วนที่มีขนาดเล็ก ๆ ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถเขียนสมการได้เป็น

$$\delta \dot{Q} = -\dot{m}_h C_{ph} dT_h$$

$$\delta \dot{Q} = \dot{m}_c C_{pc} dT_c$$

นั่นคืออัตราการสูญเสียความร้อนจากของไหลร้อนที่ส่วนใด ๆ ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเท่ากับอัตราความร้อนที่ของไหลเย็นได้รับในส่วนนั้น อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงของของไหลร้อนเป็นปริมาณติดลบ ทำให้อัตราการถ่ายโอนความร้อนเป็นปริมาณบวก ย้ายข้าง dT_h และ dT_c ได้สมการใหม่คือ

$$dT_h = \frac{\delta \dot{Q}}{\dot{m}_h C_{ph}}$$

$$dT_c = \frac{\delta \dot{Q}}{\dot{m} C_{ph}}$$

นำสมการมาลบกันจะได้

$$dT_h - dT_c = d(T_h - T_c) = -\delta \dot{Q}\left(\frac{1}{\dot{m}_h C_{ph}} - \frac{1}{\dot{m}_c C_{pc}}\right)$$

การถ่ายโอนความร้อนที่มีขนาดเล็ก ๆ ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเขียนสมการได้

$\delta \dot{Q} = U(T_h - T_c)dA_s$ แทนสมการนี้ในสมการด้านบนแล้วจัดเทอมใหม่

$$\frac{d(T_h - T_c)}{T_h - T_c} = -UdA_s\left(\frac{1}{\dot{m}_h C_{ph}} - \frac{1}{\dot{m}_c C_{pc}}\right)$$

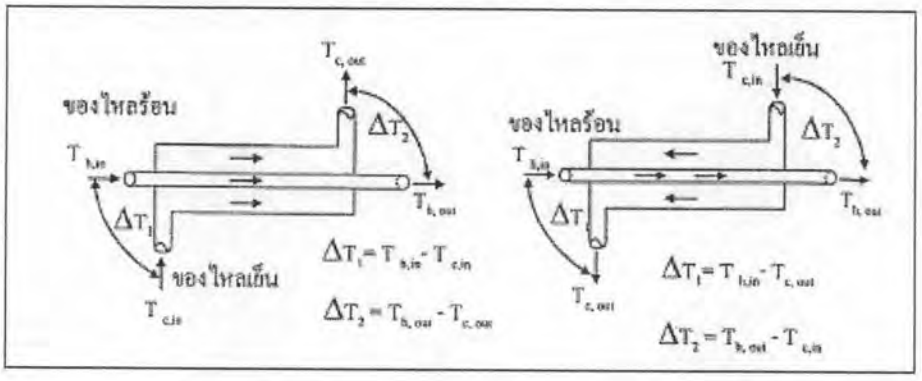
อินทริเกรตจากทางเข้าเครื่องไปยังทางออกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน จะได้

$$\ln\left(\frac{T_{h,out} - T_{c,out}}{T_{h,in} - T_{c,in}}\right) = -UA_s\left(\frac{1}{\dot{m}_h C_{ph}} - \frac{1}{\dot{m}_c C_{pc}}\right)$$

แทน ค่า $\dot{m}_c C_{pc}$ และ $\dot{m}_h C_{ph}$ ในสมการจะได้

$\dot{Q} = UA_s \Delta T_{lm}$ โดยที่ $\Delta T_{lm} = \dfrac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)}$

เรียกว่า ความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยล็อกการิทึม (Log mean temperature difference) เป็นรูปแบบที่เหมาะสมของความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างของไหลสองลำที่สองปลายสุดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน



รูปที่ 2.13 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขนานและไหลสวนทาง

ความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างของไหลสองลำลดลงจาก ΔT_1 ที่ทางเข้าไปยัง ΔT_2 ที่ทางออก การใช้ความแตกต่างเฉลี่ยพีชคณิตจากสูตร $\Delta T_{am} = \frac{1}{2}(\Delta T_1 - \Delta T_2)$ จึงไม่สอดคล้องนัก อย่างไรก็ตาม ความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยล็อกการิทึมได้จาก โปรไฟล์ของอุณหภูมิจริงของของไหลตลอดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน จึงเป็นค่าความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยอย่างแท้จริงระหว่างของไหลร้อนและเย็น ซึ่งใช้แทนการลดลงแบบเอ็กซ์โปแนนเชียลของความแตกต่างอุณหภูมิของจุดนั้น ๆ อย่างแท้จริง

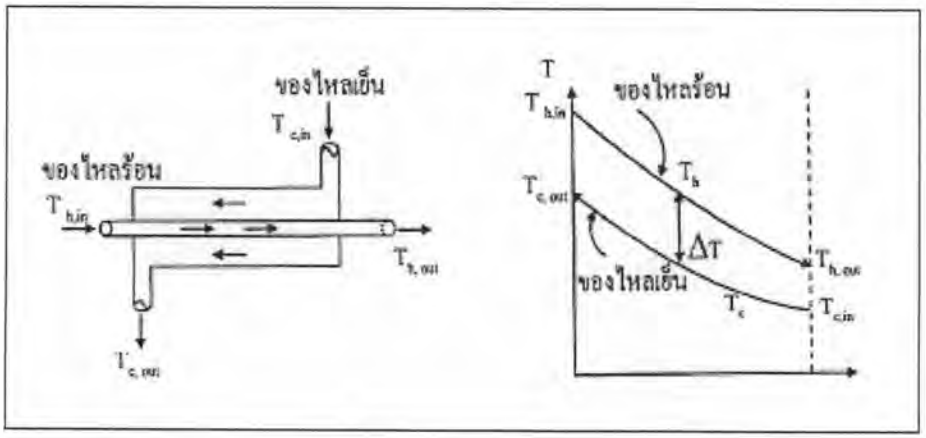
ความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยล็อกการิทึม ΔT_{lm} มีค่าน้อยกว่า ΔT_{am} เสมอเพราะฉะนั้น การใช้ ΔT_{am} ในการคำนวณแทน ΔT_{lm} จะทำให้ค่าของอัตราการถ่ายโอนความร้อนที่คำนวณได้ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหลร้อนและเย็นมีค่าเกินจริง เมื่อมีความแตกต่างของ ΔT_1 และ ΔT_2 มีค่าไม่เกิน 40 เปอร์เซ็นต์ ความคลาดเคลื่อนในการใช้ความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยทางพีชคณิต มีค่าน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ แต่ความคลาดเคลื่อนมากขึ้นซึ่งไม่เป็นที่ต้องการเมื่อความแตกต่างของ ΔT_1 และ ΔT_2 มีค่าเกิน 40 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป ดังนั้นเราจึงควรใช้ความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยล็อกการิทึม เมื่อหาอัตราการถ่ายโอนความร้อน ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนหนึ่ง ๆ

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนี่การไหลสวนทาง

การแปรผันของอุณหภูมิของไหลร้อนและเย็นเมื่อไหลสวนทางในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ของไหลร้อนไหลเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตรงปลายด้านที่อยู่ตรงข้ามกับของไหลเย็น ของไหลร้อนที่ทางเข้าถ่ายโอนความร้อนให้ของไหลเย็นที่ไหลสวนมา ทำให้อุณหภูมิของไหลเย็นที่ทางออกสูงขึ้น แต่มีค่าไม่เกิดอุณหภูมิของไหลร้อนที่ทางเข้า ตามกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ สมการความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยล็อกการิทึมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการไหลสวนทาง ได้จากการวิเคราะห์แบบเดียวกับที่ได้จากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการไหลขนาน

ความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยแบบล็อกการิทึมสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการไหลสวนทางหาได้จากอุณหภูมิตรงทางเข้าและทางออกที่ทราบค่า ผลที่ได้คือ $\Delta T_{lm,CF} > \Delta T_{lm,PF}$ ดังนั้น เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการไหลสวนทางต้องการใช้พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนน้อยกว่าการไหลขนานที่อัตราการถ่ายโอนความร้อนและสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนเท่ากัน เพราะฉะนั้น จึงนิยมใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการไหลสวนทางกันในทางปฏิบัติ

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการไหลสวนทาง ความแตกต่างอุณหภูมิระหว่างของไหลร้อนและเย็นจะมีค่าคงที่ตลอดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เมื่ออัตราความจุความร้อนของไหลสองลำมีค่าเท่ากัน (นั่นคือ $\Delta T =$ คงที่ เมื่อ $C_h = C_c$ หรือ $\dot{m}_c C_{pc} = \dot{m}_h C_{ph}$) ดังนั้น เรามี $\Delta T_1 = \Delta T_2$ และความสัมพันธ์ความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยล็อกการิทึมจะให้ $\Delta T_{lm} = 0/0$ ซึ่งหาค่าไม่ได้ ในกรณีนี้ใช้กฎของฮอปิทัล (Hopital's rule) ที่ในกรณีนี้เรามี $\Delta T_{lm} = \Delta T_1 = \Delta T_2$ เครื่องควบแน่น หรือหม้อไอน้ำไม่ว่าจะใช้แบบการไหลขนานหรือสวนทาง ผลที่ได้มีค่าเท่ากัน



รูปที่ 2.14 การแปรผันอุณหภูมิของไหลในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนท่อคู่ที่ไหลสวนทาง

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการไหลตัด และการไหลหลายทาง: การใช้แฟกเตอร์การแก้

ความสัมพันธ์ของความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยนล็อกการิทึม ΔT_{lm} มีข้อจำกัดตรงที่ใช้สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบการไหลขนานและสวนทางเท่านั้น ความสัมพันธ์ที่คล้ายคลึงกันได้พัฒนาขึ้นสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบที่มีการไหลตัดและการไหลหลายทางในเปลือกและท่อ เพื่อความสะดวกให้การวิเคราะห์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการไหลสวนทางทำได้ง่ายขึ้น จึงหาความสัมพันธ์โดยใช้แฟกเตอร์การแก้ (Correction factor, F) คูณกันความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยล็อกการิทึม ดังนี้

$$\Delta T_{lm} = F\Delta T_{lm,CF}$$

แฟกเตอร์การแก้ขึ้นกับรูปทรงเรขาคณิตของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และอุณหภูมิของลำของไหลร้อน และเย็นตรงทางเข้าและทางออก $\Delta T_{lm,CF}$ คือ ความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยล็อกการิทึมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการไหลสวนทาง หาได้จากสมการ

แฟกเตอร์การแก้มีค่าน้อยกว่าหนึ่งสำหรับการไหลตัด และการไหลหลายทางในเปลือกและท่อนั่นคือ $F \leq 1$ ค่าจำกัดของ F = 1 เป็นของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลสวนทาง ดังนั้น แฟกเตอร์การแก้ F สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนหนึ่ง คือการวัดการเบี่ยงเบนของ ΔT_{lm} จากค่าที่ได้กรณีการไหลสวนทาง แฟกเตอร์การแก้ F สำหรับรูปทรงเรขาคณิตของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีการไหลตัด และแบบเปลือกและท่อ กับอัตราส่วนของอุณหภูมิสองค่า P และ R มีนิยามคือ

$$P = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1}$$

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} = \frac{(\dot{m}C_p)_{tubeside}}{(\dot{m}C_p)_{shellside}}$$

โดยที่ ตัวห้อย 1 และ 2 แทนทางเข้าและทางออก ตามลำดับ สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน Shell และ Tube T และ t แทนอุณหภูมิของด้านเปลือกและด้านท่อ ตามลำดับ ดังแสดงในแผนภาพแฟกเตอร์การแก้ไม่มีความแตกต่างไม่ว่าของไหลร้อนหรือเย็นไหลผ่านเปลือกหรือท่อ การหาแฟกเตอร์การแก้ต้องใช้อุณหภูมิทางเข้าและทางออกของของไหลร้อนและเย็น

ค่าของ P อยู่ในช่วง 0-1 ค่าของ R มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง อินฟินิตี้ ที่ R = 0 สอดคล้องกับการเปลี่ยนวัฏภาค (การควบแน่นหรือการเดือด) บนด้านเปลือก และ $R \to \infty$ มีการเปลี่ยนวัฏภาคบนด้านท่อแฟกเตอร์การแก้ F = 1 สำหรับทั้งสองกรณีจำกัดเหล่านี้ เพราะฉะนั้น แฟกเตอร์การแก้

สำหรับเครื่องควบแน่นและหม้อไอน้ำคือ F = 1 โดยไม่คำนึงถึงรูปร่างของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

2.3 การเสียเฮดความฝืด[3]

เป็นที่ยอมรับกันแล้วว่าการเสียเฮดหรือพลังงานเนื่องจากความฝืด (Friction Head Loss) ในเส้นท่อตรง ไม่ว่าการไหลนั้นจะเป็นแบบ Lamina หรือ Turbulent คำนวณได้จากสูตรของ Darcy-Weisbach คือ

$$h_f = f \times \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2g}$$

โดย h_f = การเสียเฮดเนื่องจากความฝืด บอกเป็นความสูงของของเหลว

f = สัมประสิทธิ์ของความฝืด (จาก Moody diagram)

L = ความยาวของท่อ

D = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของท่อ

V = ความเร็วของการไหลในท่อ

g = ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก

ค่าสัมประสิทธิ์ของความฝืด f ขึ้นอยู่กับทั้งคุณสมบัติของท่อและลักษณะการไหลว่าเป็นแบบ Lamina หรือ Turbulent ในกรณีที่การไหลเป็นแบบ Lamina ค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวอาจจะหาได้จากสูตร

$$f = \frac{64}{R_e} \quad (\text{Laminar flow } R_e \le 2{,}000)$$

ขอให้สังเกตว่าในกรณีที่การไหลเป็นแบบ Lamina การเสียเฮดจะขึ้นอยู่กับ Reynolds Number เพียงอย่างเดียว ไม่ขึ้นอยู่กับความขรุขระ (Roughness) ของผนังท่อ

เมื่อ Reynolds Number มีค่ามากกว่าประมาณ 3,000 การไหลจะเป็นแบบ turbulent เสมอ ไม่ว่าผนังท่อจะเรียบสม่ำเสมอเท่าใดก็ตาม ในกรณีนี้สัมประสิทธิ์ของความฝืดจะขึ้นอยู่กับทั้ง R_e และอัตราส่วนระหว่างความขรุขระของผนังท่อต่อความยาวของเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน (ε / D)

จากการทดลองให้น้ำไหลผ่านท่อพบว่า ถึงแม้ว่าการไหลจะเป็นแบบ Turbulent ก็ตาม แต่จะมีชั้นบางๆ ติดกับผนังท่อที่การไหลเป็นแบบ Lamina ความหนาของชั้นนี้จะลดลงเมื่อ Reynolds Number เพิ่มขึ้น ถ้าหากว่าความสูงของความขรุขระที่ยื่นออกมากจากผนังท่อน้อยกว่า

ชั้นความหนาที่การไหลเป็นแบบ Lamina อัตราส่วน (ε / D) ก็จะไม่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ของความฝืด f และถือว่าท่อนั้นเป็นท่อเรียบทาง ชลศาสตร์ (Hydraulically Smooth Pipe)

ในทางตรงกันข้าม ถ้าความสูงของความขรุขระที่ผนังท่อ สูงกว่าชั้นที่เป็นการไหลแบบ Lamina ส่วนที่สูงกว่าก็จะก่อให้เกิดความปั่นป่วนในการไหลมากขึ้น และจะมีผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ของความฝืดเพิ่มขึ้นโดยตรง และถ้าผนังท่อขรุขระมากค่าสัมประสิทธิ์ของความฝืดก็จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วน (ε / D) เพียงอย่างเดียว ไม่ขึ้นกับ R_e

ค่าสัมประสิทธิ์ของความฝืด f ของทั้งสองกรณีนี้ คำนวณได้จากสูตร

ก. เมื่อผนังท่อเรียบ (Hydraulically Smooth)

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2\log(\frac{R_e\sqrt{f}}{2.51})$$

ข. เมื่อผนังท่อขรุขระมากจนทำให้การไหลเป็น Turbulent อย่างแท้จริง

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2\log(3.7D/\varepsilon)$$

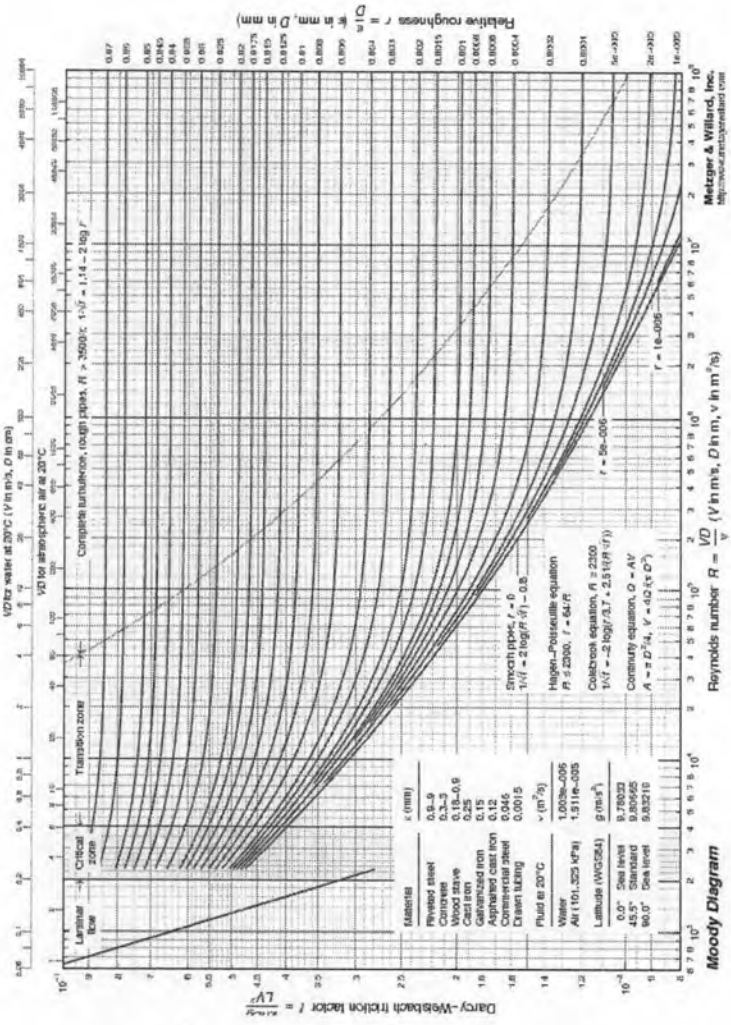
ค. ในกรณีที่การไหลเป็นแบบ Turbulent แต่ความขรุขระของผนังท่ออยู่ระหว่างสองกรณีที่กล่าวข้างต้น

ค่าสัมประสิทธิ์ของความฝืด f จะขึ้นอยู่กับทั้ง R_e และอัตราส่วน ε / D คือ

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2\log(\frac{\varepsilon}{3.1D} + \frac{2.51}{R_e\sqrt{f}})$$

จะเห็นได้ว่า ในกรณีที่การไหลเป็นแบบ Turbulent จะต้องมีสมการสำหรับคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ของความฝืดถึงสามสมการ คือ ในกรณีที่ผนังท่อเรียบ ผนังท่อขรุขระมาก และเมื่อผนังท่ออยู่ระหว่าง 2 กรณีข้างต้น นอกจากนั้น สมการที่ใช้คำนวณ เช่น สมการ (ก) และ (ค) ก็ค่อนข้างยุ่งยาก ในทางปฏิบัติแล้ว นิยมอ่านค่าจาก Moody Diagram ซึ่งแสดงค่าสัมประสิทธิ์ของความฝืดของทุกกรณีที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ไดอะแกรมที่กล่าวนี้แสดงไว้ในรูปที่ 3.1

ค่าความขรุขระของผนังท่อใหม่ซึ่งจำเป็นต้องใช้ร่วมกับ Moody Diagram ให้ไว้ในตาราง



รูปที่ 2.15 แสดงแผนภาพ Moody diagram

เมื่อท่อมีอายุใช้งานมากขึ้น ผนังท่ออาจจะผุกร่อนหรือมีสนิมทำให้ความขรุขระสูงขึ้น สำหรับท่อน้ำที่ทำด้วยเหล็ก ความขรุขระเมื่อมีอายุใช้งานเพิ่มขึ้นอาจประมาณได้จาก

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \alpha t$$

ในเมื่อ ε เป็น ความขรุขระเมื่อท่อมีอายุใช้งาน t ปี

ε_0 เป็น ความขรุขระเริ่มต้น

การเสียเฮดเนื่องจากอุปกรณ์ในระบบท่อ

การสูญเสียพลังงานเนื่องจากอุปกรณ์ในระบบท่อ เช่น ข้องอ ประตูน้ำ ซึ่งถือว่าเป็นการสูญเสียส่วนน้อย (Minor Loss) อาจจะคำนวณได้โดยใช้สมการ

$$h_L = K \times \frac{V^2}{2g}$$

โดย h_L = การเสียเฮดเนื่องจากอุปกรณ์ในระบบท่อ

K = สัมประสิทธิ์ของความต้านทานการไหล ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดของอุปกรณ์

V = ความเร็วของการไหล

g = ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก

---

[1] สุธรรม สุขมณี.การออกแบบวิศวกรรมเคมี: ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2539.

[2] ผศ.ผ่องศรี ศิวราศักดิ์. การถ่ายโอนความร้อน. พิมพ์ครั้งที่ 1: บริษัท ทริปเพิ้ล เอ็ดดูเคชั่น, 2551.

[3] รศ.ดร.วิบูลย์ บุญธโรกุล.ปั๊มและระบบสูบน้ำ.พิมพ์ครั้งที่ 1: ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2540.

I 14497801