บทที่ 5

วิจารณ์ผลการพัฒนาโปรแกรม

การตรวจสอบสถานะของของไหล

การตรวจสอบสถานะของของไหล จากการหาค่าอุณหภูมิบับเบิล (Bubble point temperature) หรืออุณหภูมิกลั่นตัว (Dew point temperature) จากสมการที่ 2.50 ที่ค่าคงที่สมดุลเท่ากับหนึ่ง โดยใช้วิธี Newton-Raphson มีข้อจำกัดที่อัตราส่วนของอุณหภูมิวิกฤตต่ออุณหภูมิของของไหล (T_c/T > 1.2) ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิของของไหลมีค่าเข้าใกล้อุณหภูมิวิกฤต หรือของไหลที่มีค่าอุณหภูมิวิกฤตต่ำมาก จะทำให้ไม่สามารถตรวจสอบสถานะของของไหลโดยวิธีนี้ได้

การรวบรวมข้อมูลเพื่อการเลือกชนิดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

ฐานความรู้ของข้อกำหนดต่างๆ ดังตารางที่ 4.1 มาจากข้อสรุปดังนี้

1. Pressure

จากข้อมูลของ Carlson [13] และ Burley [15] ระบุความดันสูงสุดของ PHE คือ 2,500 kPa ซึ่งต่างจากข้อมูลของ Larowski และ Taylor [12] ส่วน SHE ข้อมูลของ Burley [15] ซึ่งระบุความดันที่ 2,100 kPa ข้อมูลของ Bailey [17] ระบุความดัน 2,410 kPa และข้อมูลของ Larowski และ Taylor [12] ระบุความดัน 1,725 kPa จากข้อมูลทั้งสามแหล่งไม่มีความสอดคล้องกัน ข้อมูลของ Bailey และข้อมูลของ Burley ตีพิมพ์ในวารสารล่าสุดกว่าข้อมูลของ Larowski และ Taylor จึงเลือกจากข้อมูลที่มีขอบเขตต่ำกว่า คือความดัน 2,100 kPa สำหรับ S&T จากข้อมูลของ Bailey ซึ่งระบุที่ 20,670 kPa ต่างจากข้อมูลของ Larowski และ Taylor ซึ่งระบุที่ 55,160 kPa ความดันสูงสุดของ S&T จะขึ้นกับรูปแบบของ S&T ด้วย ถ้าใช้แบบ Fixed tube ซึ่งกลุ่มท่อและแผ่นโลหะปิดส่วนเชลล์ (Tube sheet) เชื่อมกับเชลล์ สามารถใช้งานที่ความดันสูงมาก ดังนั้นจึงสรุปความดันตามข้อมูลของ Larowski และ Taylor

2. Temperature

อุณหภูมิของ PHE จะขึ้นกับชนิดของปะเก็นที่ใช้ จากข้อมูลของ Carlson [13] และ Burley [15] ระบุอุณหภูมิสูงสุดของ PHE คือ 175°C ส่วน SHE สามารถใช้งานที่อุณหภูมิถึง 815°C จากการอ้างอิงข้อมูลของ Burley [15] และ Bailey [17]

3. Max m^2/unit

ข้อจำกัดนี้ คือ พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนสูงสุดต่อเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 1 เครื่อง Larowski และ Taylor [12] แสดงถึงความเหมาะสมด้านเศรษฐศาสตร์ของ DP เมื่อความต้องการพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนมากกว่า 28 m^2 ค่าใช้จ่ายของ S&T จะน้อยกว่า DP จึงจำกัดพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของ DP เพียง 28 m^2 สำหรับ S&T ข้อมูลของ Bailey [17] สนับสนุนข้อมูลของ Larowski และ Taylor

4. Compactness

PHE และ SHE มีขนาดกระทัดรัดกว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบอื่นๆ ACHE ต้องการพื้นที่ในการติดตั้งมาก สำหรับ S&T นอกจากพื้นที่เนื่องจากขนาดเครื่องแล้ว ยังต้องการพื้นที่เผื่อสำหรับถอดท่อทำความสะอาด สำหรับ DP แม้ขนาดจะไม่ใหญ่มาก แต่เมื่อเปรียบเทียบโดยมีพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนเท่ากัน DP จะมีขนาดใหญ่กว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบอื่นๆ มาก

5. Cleanability

การทำความสะอาด พิจารณาจากทั้งเชิงเครื่องกลและวิธีทางเคมี ACHE สามารถทำความสะอาดภายนอก (ด้านอากาศ) ได้ง่าย แต่ขาดความสะดวกเนื่องจากท่อจะรวมกันเป็นกลุ่ม เช่นเดียวกับกลุ่มท่อของ S&T นอกจากนั้นยังสามารถทำความสะอาดท่อด้วยวิธีทางเคมีได้ จึงสรุปคะแนนข้อกำหนดนี้สูงกว่าข้อแนะนำของ Larowski และ Taylor [12] ส่วน PHE สามารถถอดเพลทมาทำความสะอาดได้ทุกส่วน จึงมีคะแนนส่วนนี้สูงที่สุด (100 คะแนน) แม้ SHE จะสามารถทำความสะอาดพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนได้ทั้งสองด้าน แต่การทำความสะอาดเมื่อเทียบกับ PHE แล้ว มีความสะดวกน้อยกว่า สำหรับ DP และ S&T มีลักษณะเป็นท่อเหมือนกัน คะแนนในข้อกำหนดนี้จึงเท่ากัน

6. Maintenance ease

จากข้อมูล ACHE ของ Heat Exchanger Design Handbook [10] แสดงว่าการดูแลบำรุงรักษา ACHE ขึ้นกับว่าใช้แบบ Forced draft หรือ Induced draft จึงให้คะแนน ACHE ในข้อกำหนดนี้ที่ค่ากลางๆ (60 คะแนน) และความสามารถในการซ่อมแซมจากข้อมูลของ Bailey [17] แสดงว่าการซ่อมแซม SHE ทำได้ยากกว่า S&T เพราะลักษณะของ SHE เป็นการม้วนและเชื่อมแผ่นโลหะเข้ากัน แต่ S&T สามารถเปลี่ยนท่อใหม่แทนท่อที่ชำรุดได้ ส่วน DP มีความยุ่งยากเรื่องข้อต่อต่างๆ สำหรับ PHE สามารถถอดเปลี่ยนแผ่นเพลทและปะเก็นใหม่แทนได้ง่าย

7. Corrosion risk

เนื่องจาก S&T มักเกิดปัญหาท่อสั่น (Vibration) ทำให้ส่วนของท่อที่ติดกับแผ่นกั้น (Baffle) เกิดการกัดกร่อนได้ง่าย

8. Fouling tendency

การเกิดแรงเค้นเฉือน (Shear) อย่างมากใน PHE และ SHE ซึ่งต้านทานการก่อตัวของตะกรันได้อย่างดี ลักษณะของ DP ซึ่งมีจุด dead zone น้อยกว่าแบบ ACHE และ S&T ทำให้มีคะแนนส่วนนี้สูงกว่า สำหรับ S&T มีจุดที่เป็น dead zone มาก ทำให้การจับตัวของตะกรันเกิดได้ง่าย และจากข้อมูลของ Burley [15] ในส่วน SHE อธิบายถึงลักษณะการเกิดตะกรันในท่อของ S&T เทียบกับ SHE ดังนั้นคะแนนของข้อกำหนดนี้ S&T จึงมีน้อยที่สุด (20 คะแนน)

9. Fouling effect

จากข้อมูลของ Heat Exchanger Design Handbook [10] และ Burley [15] PHE และ SHE มีกลไกทำความสะอาดตัวเองจากการเกิดแรงเค้นเฉือน

10. Leakage risk

ลักษณะของกลุ่มท่อที่ใช้ใน ACHE และ S&T มีความเสี่ยงต่อการรั่วไหลพอประมาณ ทำให้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งสองนี้มีคะแนน 40 เท่ากัน ส่วน PHE ใช้ปะเก็นเป็นส่วนควบคุมการไหลของของไหล ความเสี่ยงเนื่องจากปะเก็นเสื่อมสภาพมีสูง ทำให้คะแนนของ PHE ในข้อกำหนดนี้ต่ำที่สุด ด้าน SHE มีการเชื่อมส่วนหัวและท้าย ทำให้ความเสี่ยงจากการ

รั่วไหลน้อยมาก สำหรับ DP จากการใช้ข้อต่อแบบหน้าแปลน การรั่วไหลจึงน้อย แต่ยังมีความเสี่ยงอยู่ ดังนั้นคะแนนของ DP จึงน้อยกว่าของ SHE

11. Temperature cross

จากข้อมูลของ Burley [15] และ Bailey [17] ระบุถึงความเหมาะสมอย่างยิ่งของ SHE ต่อการใช้งานกรณีอุณหภูมิตัดกัน ความเหมาะสมรองลงไปคือ PHE เนื่องจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งสองแบบนี้ มีรูปแบบการไหลสวนกันอย่างแท้จริง ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนจึงสูงมาก การถ่ายโอนความร้อนจึงเกิดขึ้นอย่างมาก

12. Viscous flow

จากการเกิดแรงเค้นเฉือน (Shear) ทำให้สามารถลดความหนืดของของไหลได้ ซึ่งเกิดขึ้นในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ PHE และ SHE ดังนั้นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งสองแบบนี้จึงสามารถใช้กับของไหลที่มีความหนืดได้สูงถึง 30,000 cP และ 500,000 cP ตามลำดับ สำหรับ S&T สามารถใช้กับของไหลที่มีความหนืดสูงได้ โดยให้ไหลในด้านเชลล์ซึ่งมีพื้นที่ในการไหลมากกว่าในท่อ เช่นเดียวกับ DP ของไหลที่มีความหนืดสูงจะอยู่ในท่อด้านนอก (Annulus) ส่วน ACHE นั้น ของไหลต้องไหลผ่านท่อเท่านั้น จึงไม่เหมาะกับของไหลที่มีความหนืดสูง

13. Heat sensitive

จากข้อมูลในตารางที่ 2.3 ของ Burley [15] เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนใดที่ต้องใช้ปริมาณของไหลในเครื่องมาก แสดงว่ามีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงความร้อนน้อย ดังนั้น PHE จึงมีคะแนนในส่วนนี้สูง ในขณะที่ S&T มีคะแนนต่ำที่สุด เพราะต้องการปริมาณของไหลไหลผ่านเครื่องจำนวนมาก

14. Solid flowing

จากความสามารถในด้านความหนืดของของไหล การเกิดแรงเค้นเฉือนประกอบกับช่องว่างระหว่างแผ่นของ SHE มากกว่าของ PHE ทำให้ SHE ใช้งานกับของไหลที่มีของแข็งปน หรือของไหลประเภทเยื่อ ได้เหมาะสมกว่า PHE

15. Gases

จากข้อมูลในตารางที่ 2.3 ของ Burley [15] และตารางที่ 2.4 ของ Bailey [17] พบว่า PHE ไม่เหมาะกับของไหลในสถานะแก๊ส เนื่องจากช่องว่างระหว่างเพลทน้อยมาก ในขณะที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดอื่นๆ มีช่องว่างให้แก๊สไหลผ่านได้มากกว่า สำหรับ ACHE จากข้อมูลในตารางที่ 2.2 ของ Larowski และ Taylor [12] แสดงถึงความเหมาะสมของ ACHE กับของไหลที่มีสถานะแก๊ส เพราะด้านหนึ่งอย่างน้อยต้องคืออากาศนั่นเอง

16. Multi fluid exchange

จากลักษณะของ PHE ซึ่งใช้ปะเก็นในการบังคับทิศทางการไหล การปรับเปลี่ยนเพื่อให้ใช้กับกรณีของไหลมากกว่า 2 ชนิดจึงทำได้ง่าย คะแนนของข้อกำหนดนี้จึงมีค่าสูง ดังตารางที่ 2.2 สำหรับ ACHE ของไหลจะไหลผ่านกลุ่มท่อ ซึ่งสามารถกำหนดให้ของไหลต่างชนิดกันไหลผ่านท่อได้หลายส่วน คะแนนของข้อกำหนดนี้จึงเท่ากับของ PHE คือ 60 คะแนน

การเลือกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสม

วิธีการเลือกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสม ใช้วิธี SMART โดยเลือกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดที่มีค่าใช้งาน (Utility value) หรือคะแนนรวมสูงที่สุด เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสมที่สุด ทำให้อันดับของข้อกำหนดมีความสำคัญอย่างมาก โดยเฉพาะข้อกำหนดในอันดับที่ 1 และอันดับที่ 2 เพราะจะมีค่าน้ำหนัก (Weighting) เทียบเป็นร้อยละเท่ากับ 31.4 และ 15.7 ตามลำดับ เมื่อคูณกับคะแนนของข้อกำหนด จะทำให้คะแนนที่ได้จากข้อกำหนดในอันดับที่ 1 และอันดับที่ 2 เป็นคะแนนส่วนใหญ่ของค่าใช้งาน

เมื่อข้อกำหนดที่ผู้ใช้เลือกและข้อกำหนดที่สามารถพิจารณาได้จากข้อมูลที่ผู้ใช้ป้อน มีคะแนนเท่ากับ 20 โปรแกรม HEXPERT จะคัดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดนั้นออกจากการพิจารณา เพราะเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีความเหมาะสมต่อข้อกำหนดนั้นๆ น้อยมาก การคัดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแต่ละชนิดที่ไม่เหมาะสมออกขึ้นกับข้อกำหนด ดังนี้

1. Gases : PHE จะถูกคัดออก
2. Compactness : ACHE, DP และ S&T จะถูกคัดออก
3. Leakage risk : PHE จะถูกคัดออก
4. Solid flowing : ACHE และ S&T จะถูกคัดออก
5. Multi fluid exchange : DP และ SHE จะถูกคัดออก

สำหรับ ACHE จะพิจารณาเมื่อของไหลด้านเย็น คืออากาศเท่านั้น เนื่องจาก ACHE ใช้งานกับการหล่อเย็นด้วยอากาศเท่านั้น ซึ่งตรงข้ามกับ PHE ที่ไม่เหมาะกับของไหลสถานะแก๊ส ดังนั้นในการเลือกแต่ละครั้ง จะมีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอย่างน้อยหนึ่งชนิดถูกคัดออกตามข้อกำหนดของสถานะ

ในกรณีที่ไม่มีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนใดที่มีความเหมาะสม โปรแกรม HEXPERT จะทำการเลือกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสมอีกครั้ง และยกเว้นการคัดออกตามข้อกำหนดที่ผู้ใช้เลือก และมีข้อความแสดงถึงความไม่เหมาะสมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนั้นพร้อมด้วยเหตุผล ดังรูปที่ 4.17 ถึง 4.20

เมื่อเปรียบเทียบกับการเลือกโดยมนุษย์ มนุษย์มักจะตัดสินใจเลือกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจากข้อกำหนดที่คิดว่ามีความสำคัญมาก (เปรียบได้กับข้อกำหนดในอันดับที่ 1 และอันดับที่ 2) และคัดเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ไม่เหมาะสมต่อข้อกำหนดนี้ออกทั้งหมด ซึ่งส่วนนี้ โปรแกรม HEXPERT มีขั้นตอนการเลือกที่เหมือนกับการเลือกโดยมนุษย์ คือสัดส่วนคะแนนมาจากอันดับที่ 1 และอันดับที่ 2 เป็นหลัก แต่เมื่อมีข้อกำหนดที่ใช้ในการเลือกมากขึ้น มนุษย์จะเกิดความสับสนในการทำการเลือก และในบางครั้งอาจจะไม่สามารถเลือกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสมได้ หรือผลการเลือกในแต่ละครั้งที่มีข้อกำหนดและข้อมูลป้อนเข้าเหมือนกัน อาจได้ผลการเลือกที่ต่างกันได้ ในทางตรงกันข้าม โปรแกรม HEXPERT มีขั้นตอนวิธีการเลือกที่เป็นระบบ (วิธี SMART) และมีข้อกำหนดของความเหมาะสมต่างๆ ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจำนวนมากพอสมควร ดังตารางที่ 5.1 ในขั้นตอนการตัดสินใจ โปรแกรม HEXPERT นำข้อกำหนดทั้ง 13 ข้อ มาจัดลำดับความสำคัญ การตัดสินใจบนข้อกำหนดจำนวนมากอย่างนี้ มนุษย์ไม่สามารถทำได้ดีเท่าเครื่องคำนวณ ดังนั้นผลการเลือกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่เหมาะสมแต่ละครั้ง จะมีความคงเส้นคงวาและแน่นอนมากกว่าผลการเลือกจากมนุษย์

เนื่องจากข้อสรุปสุดท้ายสำหรับการตัดสินใจเลือกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนว่ามีความเหมาะสมเพียงใด จะพิจารณาจากความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ หรือค่าใช้จ่ายของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแต่ละชนิดเปรียบเทียบกัน ถ้าค่าใช้จ่ายของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนใดถูกที่สุด แสดงว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนั้นมีความเหมาะสมที่สุด โปรแกรม HEXPERT มิได้นำข้อกำหนดเกี่ยวกับค่าใช้จ่ายมาพิจารณาในการตัดสินใจ แต่มีการแสดงผลการคำนวณค่าใช้จ่ายโดยประมาณ ซึ่งคำนวณจากพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้

<u>การออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อ</u>

1. <u>สมการคำนวณหาค่าพลังงานสูญเสียในท่อ</u>

การใช้สมการคำนวณค่าพลังงานสูญเสียที่ถูกต้องมากขึ้น จะทำให้ผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ฟิล์มการถ่ายโอนความร้อนมีความถูกต้องยิ่งขึ้น ซึ่งมีผลต่อความแม่นยำของการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวมด้วย Kern [26] ได้เสนอสมการหาค่าพลังงานสูญเสียในท่อที่เป็นฟังก์ชั่นของสมบัติของสารและสัมประสิทธิ์ฟิล์มการถ่ายโอนความร้อนแบบการพาในท่อ ดังสมการ 5.1 ซึ่งตัวแปรต่างๆ นิยามเช่นเดียวกับสมการที่ 2.21 และ 2.21a

$$E_i = \psi_i h_i^{3.5} \qquad \text{... (5.1)}$$

เมื่อ $$\psi_i = B_i \left[\frac{12{,}200\, D_i^{1.5}\, \mu_i^{1.83} \left(\mu_{w_i}/\mu_i\right)^{0.63}}{g_c\, D_o\, \rho_i^2\, k_i^{2.33} Cp_i^{1.17}} \right] \qquad \text{... (5.1a)}$$

สมการหาค่าพลังงานสูญเสียในท่อที่ใช้ในโปรแกรม HEXPERT แตกต่างจากสมการของ Kern [26] ในส่วนของสัมประสิทธิ์ ψ_i และเลขยกกำลังของ h_i ดังสมการ 2.21 และ 2.21 a ขั้นตอนการหาสมการพลังงานสูญเสีย หรือสมการ 2.21 แสดงในภาคผนวก ก

$$E_i = \varphi_i h_i^{3.447} \qquad \text{... (2.21)}$$

เมื่อ $$\varphi_i = B_i \left(\frac{703.9\, \mu_i^3\, D_i^{1.4475}}{g_c\, D_o\, \rho_i^2\, k_i^{3.447} \left(\mu_{w_i}/\mu_i\right)^{0.14}} \frac{Pr^{-1.706}}{\left[\exp\left(-0.0225(\ln Pr)^2\right)\right]^{3.447}} \right)$$

... (2.21a)

จากการใช้สมการหาค่าพลังงานสูญเสียในท่อที่ต่างกัน ทำให้สมการหาค่าสัมประสิทธิ์ฟิล์มการถ่ายโอนความร้อนแบบการพาในท่อที่เหมาะสมแตกต่างกัน คือ สมการหาค่าสัมประสิทธิ์ฟิล์มการถ่ายโอนความร้อนแบบการพาในท่อที่เหมาะสม โดยวิธีของ Kern [26] ใช้สมการ 5.2 ส่วนโปรแกรม HEXPERT ใช้สมการ 2.35 ซึ่งขั้นตอนการหารูปสมการ แสดงในภาคผนวก ข

$$K_F C_{Ao} = h_{i,opt}^{3.5} H_y \left\{ 2.5\varphi_i C_i + \frac{3.5\varphi_i C_i D_i Rd_w}{D_o} h_{i,opt} + 2.9 \left(\frac{\varphi_i C_i D_i}{D_o} \right)^{0.83} \left(\varphi_o C_o \right)^{0.17} h_{i,opt}^{0.22} \right\} \quad \text{... (5.2)}$$

$$K_F C_{Ao} = h_{i,opt}^{3.447} H_y \left\{ 2.447\varphi_i C_i + \frac{3.447\varphi_i C_i D_i Rd_w}{D_o} h_{i,opt} + 2.878 \left(\frac{\varphi_i C_i D_i}{D_o} \right)^{0.826} \left(\varphi_o C_o \right)^{0.174} h_{i,opt}^{0.227} \right\} \quad \text{... (2.35)}$$

ความแตกต่างของสมการหาค่าพลังงานสูญเสีย เนื่องมาจากการใช้สมการหาค่า Nusselt number ที่แตกต่างกัน วิธีของ Kern ใช้สมการ Dittus-Boelter (1930) ดังสมการ 5.3 และโปรแกรม HEXPERT ใช้สมการของ Engineering Sciences Data Unit (1967) [7] ดังสมการ ก1

$$Nu = 0.023\,Re^{0.8}\,Pr^{0.4} \quad \text{... (5.3)}$$

เมื่อ $0.7 < Pr < 160$, $Re > 10^4$ และ $L/D > 10$

$$Nu = 0.0225\,Re^{0.795}\,Pr^{0.495}\exp\left[-0.0225\,(\ln Pr)^2\right] \quad \text{... (ก1)}$$

เมื่อ $0.3 < Pr < 300$ และ $4\times10^4 < Re < 10^6$

เมื่อเปรียบเทียบสมการ 5.2 กับสมการ 2.35 จะเห็นว่าสัมประสิทธิ์และเลขยกกำลังของตัวแปรต่างๆ มีความแตกต่างกันไม่มาก แต่เมื่อเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์ของสมการ 2.21a กับสมการ 5.51a พบว่าสัมประสิทธิ์ในสมการ 2.21a มีค่าต่ำกว่าสมการ 5.51a มาก ซึ่งมาจากการใช้สมการ Nusselt number แตกต่างกัน ดังนั้นค่า $h_{i,opt}$ ที่คำนวณได้จึงแตกต่างกัน รูป

แบบสมการ 5.51a มาจากสมการ 5.3 และมีข้อจำกัดของ Prandtl number, Reynold number และอัตราส่วนความยาวท่อต่อขนาดท่อ (L/D) ประกอบกับสมการ 5.3 มีการพัฒนามานานแล้ว (1930) เพื่อให้ได้ผลการคำนวณที่ความถูกต้องและแม่นยำมากขึ้นและสามารถใช้ในช่วงของ Prandtl number ที่กว้างกว่าสมการ 5.3 จึงใช้สมการ Nusselt number หรือสมการ ก1 ในการหาค่าพลังงานสูญเสีย ซึ่งจัดรูปแบบได้ดังสมการ 2.21, 2.21a และ 2.35

จากการใช้สมการ Nusselt number ของ Engineering Sciences Data Unit หรือสมการ ก1 ทำให้ค่า $h_{i,opt}$ ที่คำนวณได้ มีค่าสูงกว่าการใช้สมการของ Kern หรือ 5.3 ซึ่งมีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวมที่เหมาะสม ($U_{o,opt}$) ที่คำนวณได้ มีค่าสูงขึ้น

2. <u>การเปรียบเทียบผลการคำนวณจากโปรแกรม HEXPERT กับโปรแกรม HEXTRAN</u>

ผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวมจากโปรแกรม HEXPERT ในกรณีการแลกเปลี่ยนความร้อนของของเหลวกับของเหลว มีค่าสูงกว่าผลการคำนวณจากโปรแกรม HEXTRAN ประมาณ 11 เปอร์เซ็นต์ และ 15 เปอร์เซ็นต์ สำหรับจำนวนเที่ยวการไหลในท่อเท่ากับ 2 และ 4 เที่ยว ตามลำดับ

เมื่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวมมีค่าสูงขึ้น ความต้องการพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนจะน้อยลง ดังสมการ 2.2 ผลการคำนวณพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนจากโปรแกรม HEXPERT เทียบกับโปรแกรม HEXTRAN สำหรับกรณีของของเหลวกับของเหลว พบว่ามีค่าสูงกว่าประมาณ 9 เปอร์เซ็นต์ และ 13 เปอร์เซ็นต์ เมื่อจำนวนเที่ยวการไหลในท่อเท่ากับ 2 และ 4 เที่ยว ตามลำดับ

กรณีการแลกเปลี่ยนความร้อนของแก๊สกับแก๊ส เมื่อจำนวนเที่ยวการไหลในท่อเท่ากับ 2 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวมจากโปรแกรม HEXPERT เทียบกับโปรแกรม HEXTRAN พบว่ามีค่าต่ำกว่าประมาณ 37 เปอร์เซ็นต์ และมีผลทำให้พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าสูงกว่าประมาณ 61 เปอร์เซ็นต์

สำหรับกรณีการแลกเปลี่ยนความร้อนของของเหลวกับแก๊ส เมื่อจำนวนเที่ยวการไหลในท่อเท่ากับ 2 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวมจากโปรแกรม HEXPERT เทียบ

กับโปรแกรม HEXTRAN พบว่ามีค่าต่ำกว่าประมาณ 18 เปอร์เซ็นต์ และพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าสูงกว่าประมาณ 22 เปอร์เซ็นต์

ดังนั้น ผลการคำนวณจากโปรแกรม HEXPERT จะใกล้เคียงผลจากโปรแกรม HEXTRAN ในกรณีที่เป็นการแลกเปลี่ยนความร้อนของของเหลวกับของเหลว ที่จำนวนเที่ยวการไหลในท่อเท่าใดก็ตาม

3. <u>การวิเคราะห์ความไว</u> (Sensitivity analysis)

เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวมที่ได้จากโปรแกรม HEXPERT มีความแตกต่างจากโปรแกรม HEXTRAN ในกรณีที่ของไหลมีสถานะแก๊ส จึงทำการวิเคราะห์ความไวของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวมต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ (Sensitivity analysis) เพื่อหาว่าปัจจัยใดที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวม

จากการวิเคราะห์ความไวของตัวแปรผลลัพธ์ (ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวม) ต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ พบว่า

- ค่าแฟกเตอร์ความเสียดทาน (Friction factor) ที่เปลี่ยนแปลงไปหนึ่งหน่วย จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวมเปลี่ยนแปลงไป ในอัตราส่วนประมาณ 1:11,326
- การเปลี่ยนแปลงของค่าความปลอดภัยของการไหลในทางเลี่ยงในด้านเชลล์ (F_s) หนึ่งหน่วย มีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวมเปลี่ยนแปลงไป ในอัตราส่วนประมาณ 1:290
- การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนของค่าแก้ไขการเสียดทานในด้านเชลล์ต่อระยะห่างของแผ่นกั้น หรือ อัตราส่วนของ B_c/n_b มีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวมเปลี่ยนแปลงไป ในอัตราส่วนประมาณ 1:55
- การเปลี่ยนแปลงค่าแก้ไขการเสียดทานในด้านท่อ (B_t) ไม่มีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวมเปลี่ยนแปลงไป ในช่วงการคำนวณที่พิจารณา

ดังนั้นการปรับเปลี่ยนค่าของแฟกเตอร์เสียดทานและค่า F_s เพียงเล็กน้อย จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวมเปลี่ยนแปลงไปมาก โปรแกรม HEXPERT

อนุญาตให้ผู้ใช้เลือกปรับค่าแฟกเตอร์ได้ คือ F_s , B_i และ B_o/n_b ดังนั้นการเลือกปรับค่าแฟกเตอร์ใด ต้องกระทำอย่างระมัดระวัง เพราะจะมีผลต่อการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวมอย่างมาก

4. เปรียบเทียบสมการคำนวณค่าแฟกเตอร์ความเสียดทานในท่อ

สมการที่ใช้ในการคำนวณค่าแฟกเตอร์ความเสียดทานในท่อ มีรูปแบบแตกต่างกันมากมาย ได้มีผู้ทำการวิจัยและสรุปรูปแบบของสมการที่ใช้คำนวณค่าแฟกเตอร์ความเสียดทาน ในกรณีแก๊ส ดังภาคผนวก ช จากตาราง ช1 พบว่าที่ข้อมูลเดียวกัน ค่าแฟกเตอร์ความเสียดทานที่ได้จากสมการในโปรแกรม HEXPERT มีค่าน้อยกว่าจากสมการของ Weymouth, Panhandle และ Modified-Panhandle ดังนั้นถ้าแทนสมการหาค่าแฟกเตอร์ความเสียดทานด้วยสมการอื่นๆ ผลการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวม จะยิ่งมีความแตกต่างจากผลที่ได้จากโปรแกรม HEXTRAN เป็นอย่างมาก

สาเหตุที่อัตราส่วนการเปลี่ยนแปลงของค่าแฟกเตอร์ความเสียดทานต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวม มีค่าสูงมาก (1:11,326) เนื่องจากค่าแฟกเตอร์เสียดทานจากโปรแกรม HEXPERT ดังตาราง ช1 จะมีค่าประมาณ 10^{-4} แต่การวิเคราะห์ความไวของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนรวมต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าแฟกเตอร์ความเสียดทานเป็นการเปรียบเทียบต่อหนึ่งหน่วยของค่าแฟกเตอร์ความเสียดทาน จึงทำให้อัตราส่วนความไวมีค่าสูงกว่า 1: 10^4

ผลการคำนวณทั้งหมดต้องสอดคล้องกับข้อกำหนดของความดันลดโดยเฉพาะในด้านของท่อ ปัจจัยที่มีผลต่อการคำนวณค่าความดันลดในท่อ นอกเหนือจากสมบัติของของไหลแล้ว ก็คือ จำนวนและความยาวของท่อ จำนวนท่อที่เพิ่มขึ้นที่ความยาวท่อเดียวกัน ทำให้ความเร็วของของไหลลดลง (ค่า Reynold number ลดลง) พลังงานที่สูญเสียเนื่องจากความเสียดทานในท่อจึงลดลง มีผลทำให้ความดันลดในท่อลดลง การเพิ่มจำนวนท่อหมายถึงการเพิ่มพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่าย ดังนั้นวิธีการลดความดันลดในท่อจึงเริ่มจากขั้นตอนลดความยาวของท่อ และค่อยปรับจำนวนท่อในขั้นถัดไป เพื่อทำให้ค่าใช้จ่ายเนื่องจากพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนเพิ่มขึ้นน้อยที่สุด

ฐานข้อมูลสมบัติของของไหล

การคำนวณสมบัติของของไหล เป็นการประมาณค่า ดังนั้นย่อมมีความผิดพลาดเนื่องจากการประมาณ ขึ้นกับชนิดของของไหล โปรแกรม HEXPERT ส่วนการออกแบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อ มิได้พิจารณาถึงความผิดพลาดเนื่องจากสมบัติของของไหล

สำหรับฐานข้อมูลของวัสดุ ที่เหมาะสมกับของไหล เป็นการแนะนำการเลือกใช้วัสดุอย่างกว้างๆ มิได้ระบุถึงรายละเอียดหรือ Grade ของวัสดุ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย