

อิทธิพลของแผ่นกั้นต่อการไหลและการถ่ายโอนความร้อน ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ

Effects of Baffles on Flow and Heat Transfer of Shell-and-Tube Heat Exchanger

วาโย ช้างเจริญ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร 140 แขวงกระทู้มราย เขตหนองจอก
กรุงเทพฯ 10530 โทร 0-2988-3655 (ต่อ 3114)

E-mail: wayo@mut.ac.th

Manuscript received January 20, 2013

Revised May 15, 2013

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการรวบรวมงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของแผ่นกั้นรูปแบบต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการไหลและการถ่ายโอนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ (STHX) ซึ่งมีแผ่นกั้นติดตั้งทางด้านเปลือก แผ่นกั้นที่นำเสนอมีทั้งแผ่นกั้นเป็นปล้องแบบดั้งเดิม แผ่นกั้นแบบแผ่นบาง-โดนัท แผ่นกั้นแบบเกลียวซึ่งมีทั้งแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง STHX เปรียบประกอบที่มีแผ่นกั้นแบบเกลียวต่อเนื่อง และแผ่นกั้นเจาะรูสามแฉก โดยมีทั้งงานวิจัยที่ศึกษาด้วยการทดลองและการคำนวณเชิงตัวเลข สรุปได้ว่าแผ่นกั้นแบบเกลียวไม่ต่อเนื่องที่มีมุมเกลียว 40° เหมาะสมที่สุดต่อสมรรถนะของ STHX นอกจากนี้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขมีประสิทธิภาพสูงสำหรับการวิเคราะห์การไหลและการถ่ายโอนความร้อน

ABSTRACT

This paper presents a collection of research studies related to effect of baffle shapes on flow and heat transfer in shell-and-tube heat exchanger (STHX) with baffles installed the shell side. The

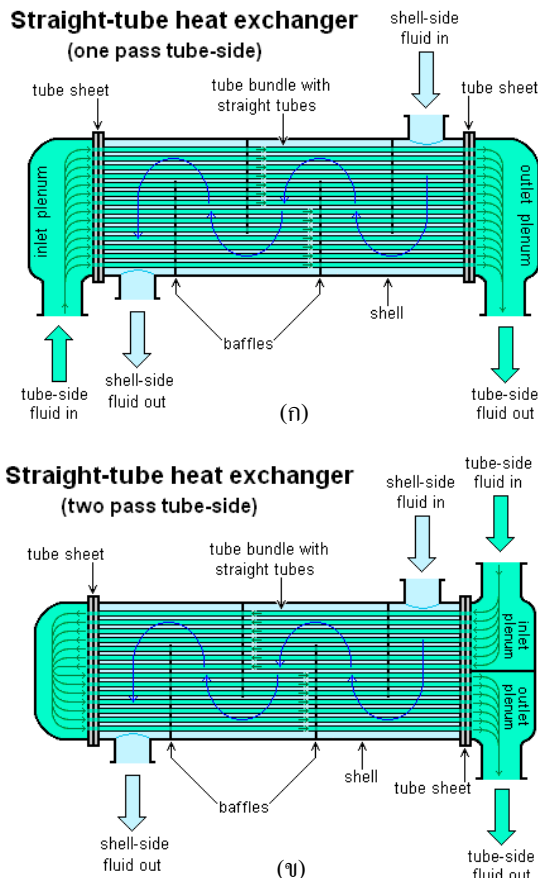
baffles are offered traditional segmental baffles, disc-and-doughnut baffles, continuous and noncontinuous helical baffles, combined multiple shell-pass STHX with continuous helical baffles, and trefoil-hole baffles. The research studied both experimental and numerical investigations. Conclusion, the noncontinuous helical baffles with helical angle of 40° optimize the performance of STHX. In addition, the numerical method is efficient for the analysis of fluid flow and heat transfer.

Keyword: Heat Transfer, Shell-and-Tube Heat Exchanger

1. บทนำ

ปัจจุบันจำนวนประชากรในแต่ละประเทศเพิ่มสูงขึ้นจึงต้องใช้พลังงานมากขึ้น ทั้งในภาคอุตสาหกรรมทั่วไป และด้านคมนาคมขนส่ง การใช้พลังงานเกี่ยวข้องกับระบบการถ่ายโอนความร้อน อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนพบได้ทั่วไป เช่น หม้อไอน้ำรถยนต์ หม้อไอน้ำ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ฯลฯ ซึ่งเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน [1] คืออุปกรณ์สำหรับถ่ายโอนความร้อนจากของไหลชนิดหนึ่งไปยังของไหลอีกชนิดหนึ่งที่มีอุณหภูมิ

ต่างกันโดยไม่จำเป็นต้องผสมกัน การพัฒนาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นสิ่งที่ต้องให้ความสำคัญเพื่อนำพลังงานความร้อนมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสามารถจำแนกได้ 3 แบบคือ (1) แบบท่อสองชั้น (concentric tube) โดยมีท่อสองท่อสวมเข้าด้วยกัน การไหลของของไหลอาจไหลสวนทาง หรือไหลในทิศทางเดียวกันก็ได้ (2) แบบที่ทิศทางการไหลของของไหลตั้งฉากกัน (cross flow) การสร้างนั้นอาจจะให้มีลักษณะการไหลแบบที่ขยวเดียว ไหลสองเที่ยว หรือมากกว่าก็ได้ และ (3) เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเปลือกและท่อ (shell-and-tube heat exchanger, STHX) ซึ่งของไหลชนิดหนึ่งจะไหลอยู่ในเปลือกของท่อใหญ่และอีกชนิดหนึ่งไหลอยู่ในกลุ่มท่อ ตัวอย่างของ STHX แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 (ก) STHX แบบท่อตรงไหลกลับเดียว และ (ข) STHX แบบท่อตรงไหลสองกลับ [2]

STHX มีใช้อย่างแพร่หลายในเชิงอุตสาหกรรม เช่น ในโรงไฟฟ้า วิศวกรรมเคมี การกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม กระบวนการผลิตอาหาร ฯลฯ ประมาณ 35-40% ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นชนิด STHX [3] ถึงแม้ว่า STHX ไม่ได้มีขนาดเล็กที่สุด แต่มีโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน แข็งแรงทนทาน ใช้ได้กับทั้งแก๊สและของเหลวที่มีความดันและอุณหภูมิในช่วงกว้าง และง่ายต่อการบำรุงรักษา ค่าความดันตกคร่อมและการถ่ายโอนความร้อนมีความเชื่อมโยงกัน การเพิ่มสมรรถนะ STHX ด้วยการวิเคราะห์ทางอุณหพลศาสตร์และพลศาสตร์ของไหล สะท้อนให้เห็นถึงความซับซ้อนซึ่งต้องใช้ความรู้เชิงลึกซึ่งในศาสตร์สาขาต่างๆ

ใน STHX มีแผ่นกั้น (baffles) เป็นองค์ประกอบที่สำคัญ นอกจากช่วยรองรับกลุ่มท่อแล้ว ยังใช้บังคับของไหลด้านเปลือกให้ไหลคดเคี้ยวไปมา (zigzag) เพิ่มความปั่นป่วน มีการไหลผสมและนำไปสู่การเพิ่มสมรรถนะของ STHX รูปร่างของแผ่นกั้นแบบดั้งเดิม (ในรูปที่ 1) เป็นแบบปล้อง (segmental baffles) ซึ่งมีข้อเสียหลักอยู่ 3 ประการคือ (1) แผ่นกั้นแบบปล้องเป็นสาเหตุให้เกิดค่าความดันตกคร่อมทางด้านเปลือกสูงมาก เนื่องจากเกิดการไหลแยกตัวที่ขอบของแผ่นกั้น (2) มีจุดบอดระหว่างแผ่นกั้นก่อให้เกิดความต้านทานจากความสกปรก (fouling resistance) และ (3) รูปแบบของการไหลแบบคดเคี้ยวไปมาก่อให้เกิดการสั่นและอาจสร้างความเสียหายต่อกลุ่มท่อได้ ดังนั้นแผ่นกั้นจึงมีบทบาทสำคัญต่อค่าสมรรถนะของ STHX ในบทความนี้ได้นำเสนองานวิจัยต่างๆโดยมุ่งเน้นถึงอิทธิพลจากรูปร่างของแผ่นกั้นที่ส่งผลต่อการไหลและการถ่ายโอนความร้อน ซึ่งวิธีที่ใช้ศึกษาของงานวิจัยมีทั้งการทดลองและการคำนวณเชิงตัวเลข

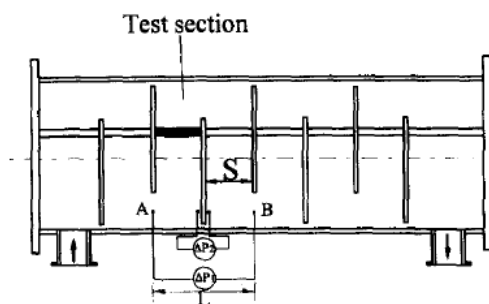
2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับแผ่นกั้นใน STHX

2.1 การวิเคราะห์เชิงทดลอง

การไหลด้านเปลือกของ STHX ขึ้นอยู่กับลักษณะเชิงเรขาคณิตของแผ่นกั้นเช่น ชนิด ระยะห่าง และขนาดของแผ่นกั้น ช่องว่างเล็ก ๆ ระหว่างแผ่นกั้นกับกลุ่มท่อ และช่องว่างระหว่างแผ่นกั้นกับเปลือก ซึ่งการไหลทางด้านเปลือกใน STHX มีความซับซ้อน เนื่องจากมีรูปแบบของการไหลโดยรวมเป็นรูปคลื่นไซน์ ไหลผ่านกลุ่มท่อ และมีอิทธิพลจากการรั่วไหลต่าง ๆ ผ่านช่องว่างระหว่างแผ่นกั้นแบบปล้องกับเปลือก ซึ่งเกิดจากเส้นผ่านศูนย์กลาง

ภายในเปลือกของท่อใหญ่ ใหญ่กว่าเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของมัดท่อทั้งนี้เพื่อความสะดวกในการติดตั้ง

ในช่วงแรก การปรับปรุง STHX เกี่ยวข้องกับการรั่วไหลผ่านช่องว่างระหว่างแผ่นกั้นแบบปล้องและเปลือก โดยมีงานวิจัย [4] ซึ่งใช้ชุดทดลองแสดงดังรูปที่ 2 ศึกษาการถ่ายโอนความร้อนและความดันตกคร่อมในด้านเปลือก ศึกษาระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น 3 ค่า วัดค่าการถ่ายโอนความร้อนบนพื้นผิวท่อที่อยู่ระหว่างแผ่นกั้นที่มีการไหลแบบพัฒนาอย่างสมบูรณ์ ใช้วิธีการวัดการถ่ายโอนความร้อนและมวลจากการดูดซับสารเคมีและปฏิกิริยาสีควบคู่ (chemical and coupled colour reaction) พบว่าที่เลขเรย์โนลด์ส์เดียวกัน ค่าความดันตกคร่อมและการถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มระยะห่างของแผ่นกั้น ซึ่งเป็นผลมาจากมีการรั่วไหลลดลงเนื่องจากความเร็วที่ไหลผ่านช่องเปิดระหว่างแผ่นกั้นมีค่าสูงขึ้น แต่ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาระยะห่างของแผ่นกั้นเพียง 3 ค่า ซึ่งค่าที่เหมาะสมที่สุดอาจอยู่นอกเหนือจากนี้

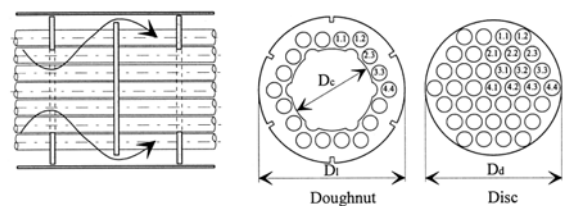


รูปที่ 2 STHX ของงานวิจัย [4]

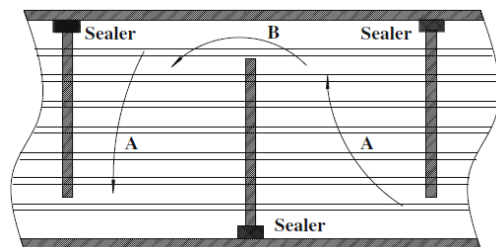
ในช่วงช่องแรกของแผ่นกั้น การไหลมีความแตกต่างจากส่วนอื่น ๆ เนื่องจากยังไม่เกิดการพัฒนาอย่างสมบูรณ์ และได้รับอิทธิพลจากการไหลพุ่งปะทะเข้าท่อใหญ่ จึงมีงานวิจัย [5] ได้นำเสนอการวิเคราะห์การไหลในช่วงช่องแรกทางด้านเปลือก ใช้วิธีการวัดเช่นเดียวกับ [4] โดยพบว่าการถ่ายโอนความร้อนในบริเวณใกล้กับทางเข้าท่อใหญ่มีค่าสูงกว่าที่บริเวณอื่น ๆ และค่าการถ่ายโอนความร้อนเฉพาะที่ในแนวเส้นรอบวงของท่อสูงกว่าค่าที่อยู่ในแนวแกนที่อยู่ด้านใน งานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่วิธีการวัดการถ่ายโอนความร้อนเฉพาะที่ในช่วงช่องแรกของแผ่นกั้น และสามารถระบุได้ว่าบริเวณใดมีการถ่ายโอนความร้อนสูง แต่ยังขาด

ตัวแปรที่ควรศึกษาเพื่อนำไปสู่การเพิ่มค่าสมรรถนะของ STHX จึงทำให้ขาดความน่าสนใจ

ในเวลาต่อมา แผ่นกั้นแบบแผ่นบาง-โดนัท ดังรูปที่ 3 ถูกนำมาใช้เพื่อปรับปรุงสมรรถนะของ STHX [6] ใช้วิธีการวัดเช่นเดียวกับ [4] ผลการทดลองพบว่าที่เลขเรย์โนลด์ส์และอัตราการใช้ความร้อนเท่ากัน ค่าการถ่ายโอนความร้อนและความดันตกคร่อมสำหรับแผ่นกั้นแบบแผ่นบาง-โดนัท มีค่า 78% และ 55% ของแผ่นกั้นแบบเป็นปล้อง ตามลำดับ ส่งผลให้ค่าการถ่ายโอนความร้อนต่อความดันตกคร่อมของแผ่นกั้นแบบแผ่นบาง-โดนัทสูงกว่าอย่างเด่นชัด โดยที่เลขเรย์โนลด์ส์ 8000 การรั่วไหลของแผ่นกั้นแบบเป็นปล้องมีค่าเป็นสองเท่าของแผ่นกั้นแบบแผ่นบาง-โดนัท ดังนั้นปริมาณของกระแสการไหลหลักของแผ่นกั้นแบบเป็นปล้องจึงมีค่าต่ำกว่า ซึ่งเป็นเหตุผลว่าทำไมแผ่นกั้นแบบแผ่นบาง-โดนัทมีค่าสมรรถนะสูงกว่า ในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงแนวทางการปรับปรุงค่าสมรรถนะของ STHX ที่เกิดจากอิทธิพลของรูปร่างแผ่นกั้นที่ส่งผลต่อค่าสมรรถนะของ STHX

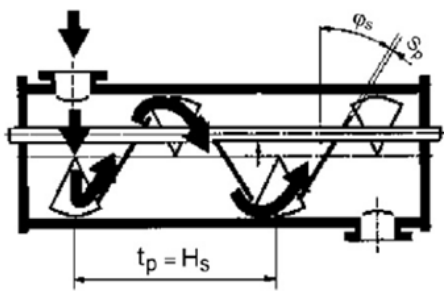


รูปที่ 3 แผ่นกั้นแบบแผ่นบาง-โดนัท ของงานวิจัย [6]



รูปที่ 4 แผ่นกั้นที่ติดตั้งตัวกันรั่วในงานวิจัยของ [7]

นอกจากนี้ Simin Wang และคณะ [7] ยังพบว่า การรั่วไหลลดประสิทธิภาพการระบายความร้อนใน STHX เนื่องจากของไหลที่รั่วไม่ได้มีส่วนร่วมต่อการแลกเปลี่ยนความร้อน พวกเขาแก้ปัญหานี้โดยการติดตั้งตัวกันรั่วทางด้านเปลือก ดังแสดงในรูปที่ 4 และพบว่าค่าการถ่ายโอนความร้อนทางด้านเปลือก การถ่ายโอนความร้อนรวมและค่าความดันตกคร่อมเพิ่มขึ้น 18.2-25.5%, 15.6-19.7% และ 44.6-48.8% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับการไม่ติดตั้ง และประสิทธิภาพของค่าคุณภาพพลังงาน (เอ็กเซอร์จี) เพิ่มขึ้น 12.9-14.1% การปรับปรุงการใช้พลังงานที่เป็นประโยชน์ช่วยเพิ่มการอนุรักษ์พลังงานซึ่งเป็นลักษณะการออกแบบที่ดีสำหรับ STHX ตัวกันรั่วมีราคาถูก แข็งแรง และสะดวกในการติดตั้ง สามารถใช้ใน STHX ทั้งใหม่และเก่า ถึงแม้ว่าตัวกันรั่วจะมีประโยชน์ตามที่ได้กล่าวมา แต่อาจเป็นสาเหตุให้เกิดความต้านทานจากความสกปรกได้

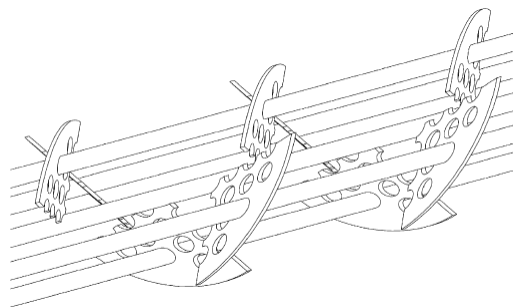


รูปที่ 5 แผ่นกันเกลียวแบบไม่ต่อเนื่อง [8]

นักวิจัยรุ่นต่อมา ([8] - [14]) ศึกษา STHX ที่มีแผ่นกันแบบเกลียว โดยได้รับการพัฒนาเป็นครั้งแรกในสโลวาเกีย และมีชื่อเรียกว่า helixchanger [8] แผ่นกันเกลียวมีทั้งแบบต่อเนื่องและแบบไม่ต่อเนื่อง ซึ่งแบบไม่ต่อเนื่อง มีลักษณะเป็นแผ่นเลี้ยว (หนึ่งในสี่ของวงกลม) แต่ละเลี้ยวติดตั้งโดยทำมุมกับแนวแกนของ STHX คงที่ เพื่อบังคับให้มีการไหลเวียนเป็นเกลียวทางด้านเปลือก โดยทั่วไปจะใช้แผ่นกัน 4 แผ่นต่อรอบ แผ่นกันที่ติดกันสามารถเชื่อมต่อกันได้หลายแบบ เช่น เชื่อมต่อกันที่เส้นรอบวง ด้านนอกหรืออาจมีการซ้อนทับกันในแนวแกน ตัวอย่างของแผ่นกันเกลียวแบบไม่ต่อเนื่องและการไหลแสดงดังรูปที่ 5

การออกแบบ STHX ที่มีแผ่นกันเกลียวนั้น ขึ้นอยู่กับการจัดเรียง ระยะห่างในหนึ่งช่วง และมุมเกลียวของแผ่นกัน, Φ (มุมระหว่างทิศการไหลกับพื้นผิวที่ตั้งฉากกับแกนของ STHX) แผ่นกันเกลียวเพิ่มสมรรถนะของการไหลได้เนื่องจาก ลดการรั่วไหล และลดการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันของการไหลที่มีผลจากการขยายตัวและการหดตัวของสนามการไหล มีการสันนิษฐานน้อยลงเนื่องจากมีบริเวณของจุดหยุดนิ่งน้อยกว่าเมื่อเทียบกับแผ่นกันแบบปล้อง แผ่นกันเกลียวยังมีศักยภาพในการเพิ่มสมรรถนะของการถ่ายโอนความร้อนในสองลักษณะคือ เกิดกระแสวนจากความเร็วเฉือนและมีรูปแบบของการไหลที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อน

มีงานวิจัยที่ศึกษาด้วยการทดลอง [9] เปรียบเทียบสมรรถนะของ STHX ที่มีแผ่นกันแบบปล้องกับแบบเกลียวไม่ต่อเนื่อง (แสดงดังรูปที่ 6) มีมุมเกลียว 20° , 30° , 40° และ 50° พบว่าที่อัตราไหลด้านเปลือกค่าเดียวกัน ค่าการถ่ายโอนความร้อนและค่าความดันตกคร่อมทางด้านเปลือกของ STHX ที่มีแผ่นกันเกลียวต่ำกว่าแบบแผ่นกันแบบปล้อง แต่เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนของค่าทั้งสองพบว่า แผ่นกันเกลียวมีค่าสมรรถนะสูงกว่า และค่าสมรรถนะของแผ่นกันเกลียว 30° ดีกว่าที่ 20° และที่ 40° ดีกว่าที่ 50° โดยที่แผ่นกันเกลียว 40° มีค่าสมรรถนะสูงที่สุด



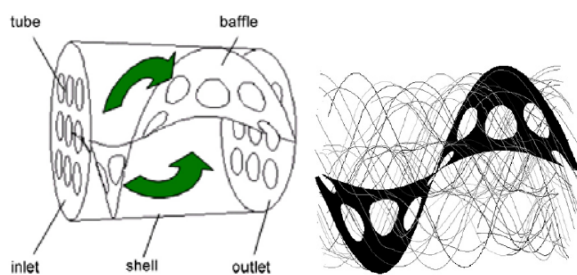
รูปที่ 6 แผ่นกันเกลียวแบบไม่ต่อเนื่องที่ใช้ในการทดลอง [9]

2.2 การวิเคราะห์เชิงตัวเลข

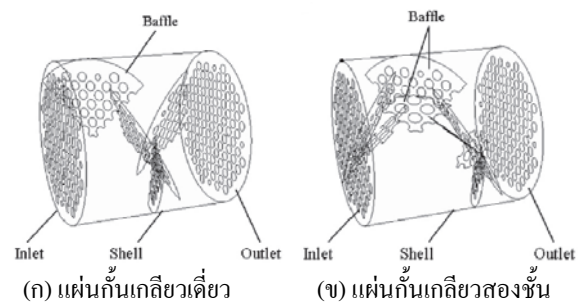
โดยทั่วไป ข้อมูลจากการศึกษาพฤติกรรมทางกายภาพของการไหลและการถ่ายโอนความร้อน ได้มาจากการทดลองและจากการคำนวณเชิงตัวเลข (computational fluid dynamics, CFD) การ

วัดค่าจากผลการทดลองโดยตรงนั้นเกือบจะเป็นไปไม่ได้ที่จะได้ข้อมูลที่มีความละเอียดตามต้องการ เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้มีขนาดใหญ่และมีค่าใช้จ่ายสูงมาก ส่วนวิธี CFD เป็นการจำลองทางคอมพิวเตอร์ที่ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์รวมถึงสมการต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง มีค่าใช้จ่ายต่ำ รวดเร็ว และสามารถจำลองได้ทั้งเงื่อนไขจริงและเงื่อนไขในทางอุดมคติ ซึ่งเป็นวิธีทางทฤษฎีวิเคราะห์ที่มีประโยชน์อย่างยิ่ง การใช้ CFD เปรียบเทียบกับการศึกษาเชิงทดลองเพื่อตรวจสอบความถูกต้องนั้น สามารถให้ข้อมูลด้านสนามการไหลและการถ่ายโอนความร้อนที่ทรงประสิทธิภาพ อีกทั้งความก้าวหน้าของคอมพิวเตอร์ฮาร์ดแวร์ ทำให้วิธี CFD นั้นมีความละเอียด แม่นยำ และน่าเชื่อถือมากขึ้น

การจำลองเชิงตัวเลขโดยใช้ CFD ศึกษาผลกระทบของมุมเอียงของแผ่นกั้นเกลียวต่อเนื่องมีค่ามุมเอียง 7 ค่า (ในช่วง 10° ถึง 50°) ต่อการไหลและการถ่ายโอนความร้อนใน STHX [10] โดยใช้เงื่อนไขขอบแบบซ้ำเป็นช่วง(periodic) โดเมนของการคำนวณแสดงดังรูปที่ 7 พบว่าค่าเลขนัสเซลที่เฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของมุมเอียงของแผ่นกั้น, Φ เมื่อ $\Phi < 30^\circ$ แต่มีค่าลดลงเมื่อ $\Phi > 30^\circ$ เมื่อเปรียบเทียบกับ STHX ที่มีแผ่นกั้นแบบปัดโค้ง พบว่า STHX ที่มีแผ่นกั้นเกลียวแบบต่อเนื่องมีค่าการถ่ายโอนความร้อนสูงกว่าที่ค่าความดันตกคร่อมเดียวกัน และมุมเอียงของแผ่นกั้นที่ดีที่สุดคือ 45° ซึ่งองค์ความรู้ของการถ่ายโอนความร้อนและการกระจายการไหลในงานวิจัยนี้จะเป็นพื้นฐานที่ดีต่อการเพิ่มสมรรถนะของ STHX

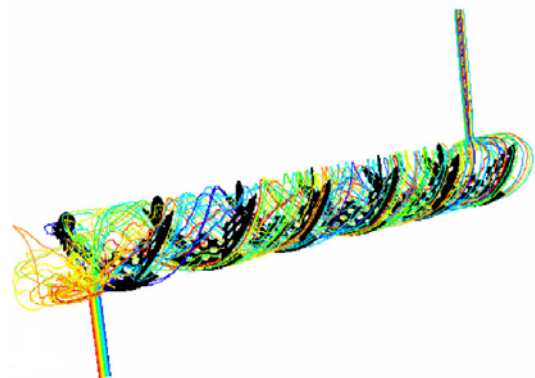


รูปที่ 7 โดเมนของการคำนวณและกระแสน้ำไหลผ่านแผ่นกั้นเกลียวแบบต่อเนื่องในงานของ [10]



รูปที่ 8 แผ่นกั้นเกลียวที่ใช้ในงานของ [11]

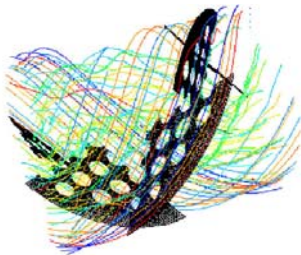
การศึกษาเชิงตัวเลขและเชิงทดลองกับแผ่นกั้นเกลียวเดี่ยวไม่ต่อเนื่องมีมุมเกลียว 40° และแผ่นกั้นแบบปัดโค้งใน STHX [11] แผ่นกั้นเกลียวเดี่ยวแสดงดังรูปที่ 8 (ก) จากการทดลองพบว่าค่าการถ่ายโอนความร้อนที่มีแผ่นกั้นเกลียวเดี่ยวมีค่า 75% ของแผ่นกั้นแบบปัดโค้ง แต่มีค่าความดันตกคร่อมเพียง 50% ดังนั้นอัตราส่วนของค่าการถ่ายโอนความร้อนต่อค่าความดันตกคร่อมของแผ่นกั้นเกลียวเดี่ยวจึงสูงกว่า และการใช้ CFD ยังสามารถทำนายผลการไหลและการถ่ายโอนความร้อนที่สอดคล้องกับผลการทดลองกับแผ่นกั้นเกลียวเดี่ยวได้ ซึ่งกล่าวได้ว่า CFD สามารถใช้ทำนายผลจากแผ่นกั้นแบบเกลียวสองชั้นดังรูปที่ 8(ข)ได้ด้วย โดยพบว่าสมรรถนะของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่มีแผ่นกั้นแบบเกลียวสองชั้นมีค่าสูงกว่า แผ่นกั้นแบบเกลียวเดี่ยวอยู่ 10%



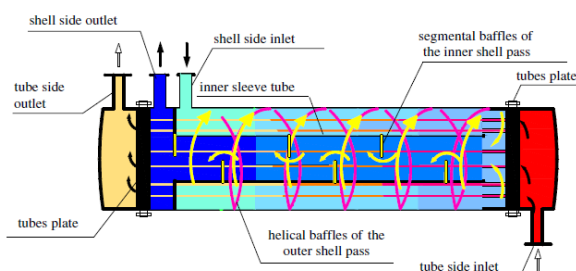
รูปที่ 9 เส้นกระแสใน STHX ในงานวิจัยของ [12]

นอกจากนี้[12] CFD ยังใช้ศึกษาการถ่ายโอนความร้อนด้วยการใช้แผ่นกั้นแบบเกลียวไม่ต่อเนื่อง วางซ้อนทับกันตรงกลางจำนวน 6 รอบ มีมุมเกลียว 40° และใช้จำนวนกริดเซลล์ถึง 13.5 ล้านเซลล์ โดยเปรียบเทียบค่า CFD กับผลการทดลองพบว่าผลที่ได้สอดคล้องกัน และพบว่าค่าความดันตกคร่อมและการถ่ายโอนความร้อน มีค่าต่างกันระหว่างรอบที่ 2 และรอบที่ 5 น้อยกว่า 2% ดังนั้นการจำลองการไหลแบบซ้ำเป็นช่วง สามารถนำมาใช้วิเคราะห์ได้โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำ เส้นกระแสในโดเมนของการคำนวณเชิงตัวเลขแสดงดังรูปที่ 9

งานวิจัยต่อเนื่องจาก [12] โดยจำลองการไหลแบบซ้ำเป็นช่วง [13] มีค่าของมุมเกลียวที่แตกต่างกัน 3 ค่า (30° , 40° และ 50°) เปรียบเทียบกับแผ่นกั้นเกลียวแบบต่อเนื่อง ซึ่งพบว่าค่าการถ่ายโอนความร้อนเฉลี่ยต่อค่าความดันตกคร่อมของมุมเกลียวที่ 40° มีค่าสูงที่สุดซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ [9] โดยมีเส้นกระแสดังรูปที่ 10 และยังพบว่าค่าการถ่ายโอนความร้อนต่อค่าความดันตกคร่อมของแผ่นกั้นเกลียวแบบไม่ต่อเนื่องสูงกว่าแผ่นกั้นเกลียวแบบต่อเนื่องอย่างเห็นได้ชัด



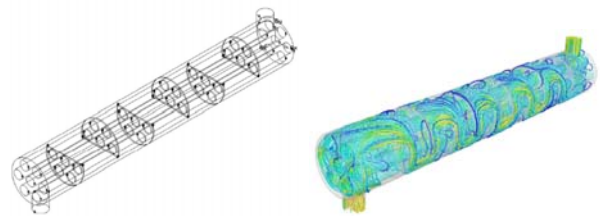
รูปที่ 10 เส้นกระแสในแผ่นกั้นเกลียวแบบไม่ต่อเนื่อง [13]



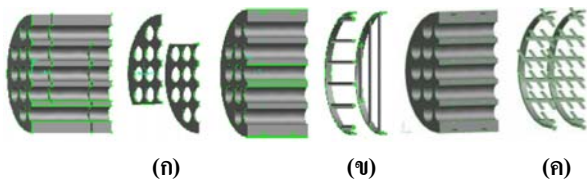
รูปที่ 11 เส้นกระแสในโดเมนของการคำนวณเชิงตัวเลขในงานของ [14]

STHX ที่ได้กล่าวมาข้างต้นเป็นแบบเชิงเดี่ยว แต่มีการวิเคราะห์ด้วย CFD ใน STHX เชิงประกอบด้วย[14] โดยมีแผ่นกั้นแบบเกลียวต่อเนื่องติดตั้งทางด้านนอกของเปลือกนอกเพื่อแสดงดังรูปที่ 11 ผลการคำนวณเปรียบเทียบกับ STHX ที่มีแผ่นกั้นแบบปล้อง พบว่าที่ค่าอัตราการไหลเดียวกัน ค่าความดันตกคร่อมของ STHX เชิงประกอบมีค่าต่ำกว่าแผ่นกั้นแบบปล้อง 13% แต่ที่ค่าความดันตกคร่อมทางด้านเปลือกเดียวกัน อัตราการถ่ายโอนความร้อนรวมมีค่าสูงกว่า 5.6% และค่าอัตราการไหลสูงกว่า 6.6% ดังนั้น STHX เชิงประกอบที่มีแผ่นกั้นเกลียวต่อเนื่องมีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน

[15] ศึกษา STHX ขนาดเล็กที่มีแผ่นกั้นแบบปล้อง ดังรูปที่ 12 มีจำนวนแผ่นกั้นในช่วง 6 ถึง 12 ชั้น และส่วนตัดของแผ่นกั้น 25% และ 36% ตรวจสอบด้วย CFD โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน 3 แบบจำลอง ได้แก่ Spalart-Allmaras, k- ϵ มาตรฐาน และ k- ϵ realizable ร่วมกับสมการการแปลงรูป 2 อันดับ และใช้ค่ากริดเซลล์ 2 ค่า พบว่าแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ k- ϵ realizable ร่วมกับสมการการแปลงรูปอันดับ 1 และใช้กริดเซลล์แบบละเอียดให้ผลการทำนายดีที่สุดเมื่อเทียบกับผลการทดลองซึ่งมีความแตกต่างน้อยกว่า 2% ในทุกกรณี โดยที่ค่าส่วนตัดของแผ่นกั้น 25% ให้ผลลัพธ์ดีกว่า 36% CFD ได้แสดงให้เห็นว่าจำนวนของแผ่นกั้นน้อย การไหลข้ามช่องเปิดของแผ่นกั้นจะให้เกิดลักษณะของการไหลที่ไม่ดีเนื่องจากเกิดการหมุนเวียนที่หลังแผ่นกั้น เมื่อจำนวนแผ่นกั้นเพิ่มขึ้นจะก่อให้เกิดการไหลผสมและค่าการถ่ายโอนความร้อนดีขึ้น และจำนวนแผ่นกั้น 12 ชั้นให้ลักษณะการไหลที่ดีที่สุด

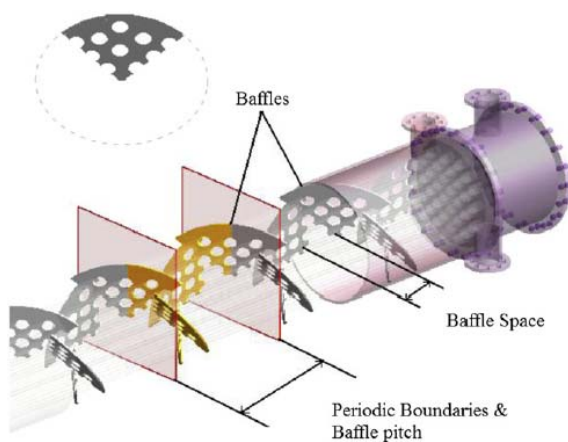


รูปที่ 12 โดเมนของการคำนวณเชิงตัวเลขเส้นกระแสการไหล ในงานของ [15]



รูปที่ 13 แผ่นกั้นที่ใช้ในงานของ [16] โดยที่ (ก) แผ่นกั้นแบบปปล้อง (ข) แผ่นกั้นแบบท้อ และ (ค) แผ่นกั้นรูป H

[16] เสนอ STHX ที่มีแผ่นกั้นรูป H แสดงดังรูปที่ 13 (ค) โดยใช้ CFD ที่มีการคำนวณแบบชั่วเป็นช่วง สำหรับ STHX ที่มีแผ่นกั้นแบบปปล้อง แบบท้อ และรูป H พบว่าที่เงื่อนไขการไหลเดียวกัน ทั้งค่าการถ่ายโอนความร้อนและความดันตกคร่อมทางด้านเปลือกของ STHX ที่มีแผ่นกั้นรูป H มีค่าอยู่ระหว่างค่าของแผ่นกั้นแบบปปล้องดั้งเดิมและแผ่นกั้นแบบท้อ ซึ่งได้รวมเอาข้อดีของแผ่นกั้นแบบปปล้องที่มีการไหลตามขวางและแผ่นกั้นแบบท้อที่มีการไหลตามยาวไว้ด้วยกัน ซึ่งควรมีการสนับสนุนให้มีการนำไปประยุกต์ใช้งานใน STHX

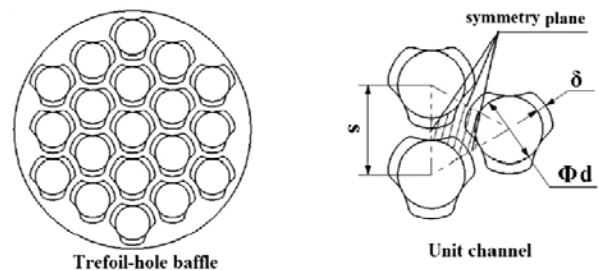


รูปที่ 14 โดเมนของการคำนวณเชิงตัวเลขในงานของ [17]

[17] ได้นำเสนอการใช้ CFD สำหรับ STHX ที่มีแผ่นกั้นแบบเกลียวไม่ต่อเนื่องมีมุมเกลียว 40° ดังรูปที่ 14 คำนวณแบบชั่วเป็นช่วง โดยศึกษาอิทธิพลของระยะห่างของแผ่นกั้นต่อการไหลและการถ่ายโอนความร้อนทางด้านเปลือก และมีระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น 5 ค่า โดยเทียบกับระยะห่างระหว่างเกลียว, P คือ กรณี A:

ระยะแคบที่สุด, กรณี B:P/16, กรณี C:P/8, กรณี D:3P/16 และกรณี E:P/4 พบว่าสำหรับอัตราการไหลเดียวกัน อัตราการถ่ายโอนความร้อนต่อหน่วยพื้นที่และเกรเดียนต์ของความดันจะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของระยะห่างระหว่างแผ่นกั้น และที่ค่าความดันตกคร่อมเดียวกัน ระยะห่างระหว่างแผ่นกั้นสูงสุด(กรณี E) จะให้ค่าการถ่ายโอนความร้อนสูงที่สุด แต่ในงานวิจัยนี้ไม่ได้แสดงสนามการไหลซึ่งเป็นจุดเด่นของการวิเคราะห์ด้วย CFD

นอกจากนี้ [18] เสนองานทดลองร่วมกับ CFD เพื่อตรวจสอบค่าสมรรถนะทางความร้อนทางด้านเปลือกที่มีแผ่นกั้นเจาะรูสามแฉก แสดงดังรูปที่ 15(ด้านซ้าย)ในสนามการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งพบว่าอัตราการถ่ายโอนความร้อนและความดันตกคร่อมการไหลมีค่าเพิ่มขึ้นทางด้านเปลือก ซึ่งการวิเคราะห์ด้วย CFD ที่มีโดเมนการไหลในหนึ่งช่องดังรูปที่ 15(ด้านขวา) แสดงให้เห็นว่าแผ่นกั้นแบบรูสามแฉกเป็นตัวสร้างการไหลความเร็วสูง มีการไหลวนที่เข้มข้นและมีความเข้มของความปั่นป่วนสูง



รูปที่ 15 แผ่นกั้นเจาะรูสามแฉกและ โดเมนของ CFD [18]

3. สรุป

แผ่นกั้นรูปแบบต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อลักษณะการไหลและการถ่ายโอนความร้อนของ STHX โดยติดตั้งแผ่นกั้นทางด้านเปลือก ซึ่งมีทั้งงานวิจัยที่ศึกษาในส่วนของทดลองและการคำนวณเชิงตัวเลข สรุปได้ว่าแผ่นกั้นแบบเกลียวไม่ต่อเนื่องที่มีมุมเกลียว 40° เหมาะสมที่สุดต่อการเพิ่มสมรรถนะของ STHX และวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงสำหรับการวิเคราะห์การไหลและการถ่ายโอนความร้อนใน STHX

เอกสารอ้างอิง

- [1] นักสิทธิ์ ภูวนาชัย, “การถ่ายโอนความร้อน”, หจก. สำนักพิมพ์ฟิสิกส์เซ็นเตอร์, กรุงเทพฯ, 2533.
- [2] [http://en.wikipedia.org/wiki/Shell and tube heat exchanger](http://en.wikipedia.org/wiki/Shell_and_tube_heat_exchanger).
- [3] Bashir I. Master, Kirishnan S. Chunangad, and V. Pushpanathan, “Fouling mitigation using helixchanger heat exchangers”, in: Proceedings of the ECI Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning: Fundamentals and Applications, Santa Fe, NM, May, 18–22, pp. 317–322, 2003.
- [4] Huadong Li and Volker Kottke, “Effect of baffle spacing on pressure drop and local heat transfer in shell-and-tube heat exchangers for staggered tube arrangement”, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 41, No. 10, pp. 1303–1311, 1998.
- [5] Huadong Li and Volker Kottke, “Local heat transfer in the first baffle compartment of the shell-and-tube heat exchangers for staggered tube arrangement”, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 16, pp. 342–348, 1998.
- [6] Huadong Li and Volker Kottke, “Analysis of local shellside heat and mass transfer in the shell-and-tube heat exchanger with disc-and-doughnut baffles”, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 42, pp. 3509–3521, 1999.
- [7] Simin Wang, Jian Wen and Yanzhong Li, “An experimental investigation of heat transfer enhancement for a shell-and-tube heat exchanger”, Applied Thermal Engineering, Vol. 29, pp. 2433–2438, 2009.
- [8] M.R. Jafari Nasr and A. Shafeghat, “Fluid flow analysis and extension of rapid design algorithm for helical baffle heat exchangers”, Applied Thermal Engineering, Vol. 28, pp. 1324–1332, 2008.
- [9] Jian-Fei Zhang, Bin Li, Wen-Jiang Huang, Yong-Gang Lei, Ya-Ling He and Wen-Quan Tao, “Experimental performance comparison of shell-side heat transfer for shell-and-tube heat exchangers with middle-overlapped helical baffles and segmental baffles”, Chemical Engineering Science, Vol. 64, pp. 1643–1653, 2009.
- [10] Yong-Gang Lei, Ya-Ling He, Rui Li and Ya-Fu Gao, “Effects of baffle inclination angle on flow and heat transfer of a heat exchanger with helical baffles”, Chemical Engineering and Processing, Vol. 47, pp. 2336–2345, 2008.
- [11] Yong-Gang Lei, Ya-Ling He, Pan Chu and Rui Li, “Design and optimization of heat exchangers with helical baffles”, Chemical Engineering Science, Vol. 63, pp. 4386 – 4395, 2008.
- [12] Jian-Fei Zhang, Ya-Ling He and Wen-Quan Tao, “3D numerical simulation on shell-and-tube heat exchangers with middle-overlapped helical baffles and continuous baffles – Part I: Numerical model and results of whole heat exchanger with middle-overlapped helical baffles”, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 52, pp. 5371–5380, 2009.
- [13] Jian-Fei Zhang, Ya-Ling He and Wen-Quan Tao, “3D numerical simulation on shell-and-tube heat exchangers with middle overlapped helical baffles and continuous baffles – Part II: Simulation results of periodic model and comparison between continuous and noncontinuous helical baffles”, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 52, pp. 5381–5389, 2009.
- [14] Qiuwang Wang, Qiuyang Chen, Guidong Chen and Min Zeng, “Numerical investigation on combined multiple shell-pass shell-and-tube heat exchanger with continuous helical baffles”, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 52, pp. 1214–1222, 2009.
- [15] Ender Ozden and Ilker Tari, “Shell side CFD analysis of a small shell-and-tube heat exchanger”, Energy Conversion and Management, Vol. 51, pp. 1004–1014, 2010.
- [16] Wang Yongqing, Gu Xin, Wang Ke and Dong Qiwu, “Numerical investigation of shell-side characteristics of H-shape baffle heat exchanger”, Procedia Engineering, Vol. 18, pp. 53–58, 2011.

- [17]Farhad Nemati Taher, Sirous Zeynnejad Movassag, Kazem Razmi and Reza Tasouji Azar, “*Baffle space impact on the performance of helical baffle shell and tube heat exchangers*”, Applied Thermal Engineering, Vol. 44, pp. 143–149, 2012.
- [18]Yonghua You, Aiwu Fan , Xuejiang Lai , Suyi Huang and Wei Liu, “*Experimental and numerical investigations of shell-side thermo-hydraulic performances for shell-and-tube heat exchanger with trefoil-hole baffles*”, Applied Thermal Engineering, Vol. 50, pp. 950-956, 2013.