บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 การจำลองการไหลเชิงพลศาสตร์ (Computational Fluid Dynamics, CFD)

ณัฐพล วิทยานุภากร [1] ทำการศึกษาการกระจายตัวของลมภายในเตาอบไม้ยางพาราทั้งแบบในห้องปฏิบัติการและแบบเตาอบในโรงงาน โดยใช้แบบจำลองด้วยคอมพิวเตอร์เปรียบเทียบกับการทดลอง เพื่อออกแบบและปรับปรุงให้เตาอบไม้ยางพารามีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น ความถูกต้องของแบบจำลองได้รับการทดสอบด้วยผลการทดลองที่วัดได้จากเตาอบไม้ทั้งในระดับห้องปฏิบัติการและระดับโรงงานอุตสาหกรรม แล้วนำแบบจำลองที่ได้คำนวณหาลักษณะของเตาอบที่มีประสิทธิภาพสูง โดยการเปรียบเทียบค่าและการกระจายของอัตราเร็วลมที่ระนาบด้านลมเข้ากองไม้ ผลการวิจัยพบว่าจากการปรับปรุงรูปแบบการเรียงไม้ในกองไม้ และการติดแผ่นกั้นลมในเตาอบ พร้อมทั้งปรับปรุงระบบควบคุมการอบให้ได้มาตรฐานและเพิ่มอุณหภูมิของการอบ ตั้งแต่ช่วงแรกของการอบ ผลจากการปรับปรุงดังกล่าวทำให้สามารถเพิ่มกองไม้ในเตาอบได้อีก 4 กอง (เพิ่มขึ้น 10 เปอร์เซ็นต์) อัตราเร็วลมเฉลี่ย ผ่านกองไม้เพิ่มขึ้นจาก 1.5 เมตรต่อวินาที เป็น 1.9 เมตรต่อวินาที ระยะเวลาของการอบลดลงก่อนการปรับปรุง 9 วัน เหลือ 7 วัน สำหรับไม้ความหนา 1.5 นิ้ว ไม้ในเตาอบมีค่าการกระจายความชื้นสุดท้ายหลังการอบลดลงจาก 27 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 12 เปอร์เซ็นต์

Tongruk [2] ได้ศึกษากระบวนการพลศาสตร์ของอากาศและการกระจายตัวของอุณหภูมิในห้องอบด้ายโดยใช้เทคนิคการจำลองการไหลเชิงตัวเลข ซึ่งลมร้อนที่ได้เป็นการนำลมร้อนที่ปล่อยทิ้งจากกระบวนการระบายความร้อนในเครื่องอัดอากาศกลับมาใช้ในกระบวนการอบแห้งเส้นด้าย เพื่อหารายละเอียดในการสร้างห้องอบด้าย เช่น จำนวน ขนาด และตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุดของทางเข้าและทางออกของลมร้อน และการวางพัดลมระบายอากาศ เป็นต้น อุณหภูมิลมร้อนเท่ากับ 52 องศาเซลเซียส จากผลการจำลองพบว่าตำแหน่ง จำนวน และขนาดของทางเข้าลมร้อนที่ทำให้ปริมาตรของอากาศในห้องมีความเร็วมากกว่า 1.4 เมตรต่อวินาที มากที่สุด สามารถลดเวลาในการอบแห้งจาก 2 วัน เหลือเพียง 89 นาที โดยประมาณ นอกจากนั้นเมื่อมีการติดตั้งพัดลมระบายอากาศ สามารถลดเวลาอบแห้งลงจาก 2 วัน เหลือเพียง 78 นาที แต่จะเสียค่าไฟฟ้าเพิ่มขึ้นประมาณ 590 บาทต่อเดือน

Amanlou และคณะ [3] ได้ศึกษาการออกแบบตู้อบแห้งผลไม้แบบถาด โดยใช้เทคนิคการคำนวณพลศาสตร์ของไหล (CFD) เพื่อศึกษาคุณลักษณะการไหลของอากาศ และการกระจายตัวของอุณหภูมิ ทำการทดลองออกแบบห้องอบต่างๆกัน เช่น ขนาดทางเข้าของอากาศ ขนาดทางออกของอากาศ ตำแหน่งของทางออกของอากาศ และรูปร่างของปล่องทางออกของอากาศ เป็นต้น โดยใช้สมการการไหลปั่นป่วนแบบ Standard $k-\varepsilon$ เปรียบเทียบผลการการจำลองกับผลที่ได้จากการวัดจริง พบว่าผลการจำลองการไหลของอากาศเทียบกับการวัดอัตราเร็วลม ณ ตำแหน่งเดียวกันเท่ากับ 99.9 เปอร์เซ็นต์ และผลการจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมิเทียบกับการวัดอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งเดียวกันเท่ากับ 86.5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งการใช้เทคนิคการคำนวณพลศาสตร์ของไหล มีประโยชน์ต่อการออกแบบเตาอบแห้งเป็นอย่างมาก

ปรเมนทร์ มาลีหวล และอดุลย์ จรรยาเลิศอดุลย์ [4] ศึกษาคุณลักษณะการไหลของอากาศ การกระจายตัวของอุณหภูมิของอากาศภายในตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์แบบรับรังสีโดยตรงและมีการไหลเวียนของอากาศโดยธรรมชาติ โดยใช้เทคนิคการจำลองการไหลเชิงพลศาสตร์ (CFD) แบบ 2 มิติ โดยนำผลที่ได้จากการจำลองด้วย CFD มาเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ในการทดลองได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างการจำลอง 2 กรณี โดยกรณีแรกให้ผิวใต้กระจกมีอุณหภูมิคงที่ และกรณีที่สองให้ผิวใต้กระจกมีฟลักซ์ความร้อนคงที่ จากผลการวิจัยพบว่า ผลการจำลองการไหลของอากาศ และการกระจายตัวของอุณหภูมิของอากาศภายในตู้อบแห้งพลังงานแสงอาทิตย์ที่ได้จากการกำหนดให้ผิวใต้กระจกมีอุณหภูมิคงที่ให้ผลการทดลองที่ใกล้เคียงกว่าการกำหนดให้ผิวใต้กระจกมีฟลักซ์ความร้อนคงที่

2.1.2 การอบแห้งแบบตู้

สุเมธ รุจินินนาท [5] ได้ทำการออกแบบและทดสอบเครื่องอบแห้งแบบตู้โดยใช้ก๊าซปิโตรเลียวเหลวเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อนแก่อากาศอบแห้ง โดยการทดลองใช้ห้องอบแห้งพื้นที่ขนาด 13 ตารางเมตร สามารถบรรจุรถเข็นได้ 2 คัน และอบแห้งผลไม้ได้ครั้งละ 100 - 200 กิโลกรัม การทดลองทำในระบบเปิดบางส่วน อุณหภูมิอบแห้งเฉลี่ย 60 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของอากาศ 0.95 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที สัดส่วนอากาศหมุนเวียนกลับ 81.6 เปอร์เซ็นต์ การทดลองอบแห้งกล้วยน้ำว้า น้ำหนักเริ่มต้น 202.8 กิโลกรัม ที่ความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 342 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง จนเหลือความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 52.6 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง ใช้เวลาในการอบแห้ง 35 ชั่วโมง อัตราการอบแห้งสูงสุดเท่ากับ

7.48 กิโลกรัมน้ำระเหยต่อชั่วโมง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำสุดเท่ากับ 5.76 เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำระเหย และประสิทธิภาพการอบแห้งสูงสุดเท่ากับ 45 เปอร์เซ็นต์ การทดลองอบแห้งเนื้อเงาะสด ความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 776 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง จนเหลือความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 48 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง และเนื้อเงาะแช่อิ่ม จากความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 496 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง จนเหลือความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 42 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง น้ำหนักรวม 56.4 กิโลกรัม ใช้เวลา 11 ชั่วโมง อัตราการอบแห้งสูงสุดเท่ากับ 4.06 กิโลกรัมน้ำระเหยต่อชั่วโมง ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะต่ำสุดเท่ากับ 9.12 เมกะจูลต่อกิโลกรัมน้ำระเหย และประสิทธิภาพการอบแห้งสูงสุดเท่ากับ 28.5 เปอร์เซ็นต์

ทัศวรรณ ปัญญาบุตร [6] ศึกษาอิทธิพลของอัตราการไหลและอุณหภูมิลมร้อนที่มีผลต่อความสิ้นเปลืองพลังงานและคุณภาพผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง โดยทดลองหาอัตราการอบแห้งที่อุณหภูมิ 50 - 90 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วลม 0.7 เมตรต่อวินาที และอัตราการไหลของอากาศที่ 86 และ 130 กิโลกรัมอากาศแห้งต่อชั่วโมง พบว่า ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส และอัตราการไหล 130 กิโลกรัมอากาศแห้งต่อชั่วโมง ประหยัดพลังงานที่สุด สำหรับผลการวิเคราะห์คุณภาพผลิตภัณฑ์ของลำไยหลังการอบแห้งโดยใช้ค่าสีเป็นบรรทัดฐาน พบว่า อุณหภูมิลมร้อนไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสีของเปลือกลำไย แต่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าสีของเนื้อลำไย และที่อุณหภูมิลมร้อนเดียวกันอัตราการไหลของอากาศไม่มีผลต่อค่าสีของผลิตภัณฑ์

วิบูลย์ เทเพนทร์ และคณะ [7] ได้ทำการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งผักและผลไม้เอนกประสงค์ที่ใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลวเป็นเชื้อเพลิงกำเนิดความร้อน ขนาดของตัวเครื่องอบ 1.22 x 2.44 x 1.22 เมตร (กว้าง x ยาว x สูง) มีถาดสเตนเลสขนาด 0.75 x 1 เมตร (กว้าง x ยาว) จำนวน 18 ถาด ใช้พัดลมแบบไหลตัดแนวแกน (กรงกระรอก) ที่ให้กำลังลมแรงที่รอบหมุนใบพัดต่ำ 617 รอบต่อนาที ขนาดมอเตอร์ไฟฟ้า 0.75 กิโลวัตต์ โดยทดสอบกับผักผลไม้ ได้แก่ ถั่วเขียว กล้วย พริก และลำไย เป็นต้น การทดลองจะพิจารณา อุณหภูมิลมร้อน เวลาในการอบแห้ง อัตราการลดความชื้น และคุณภาพผลิตภัณฑ์หลังการอบแห้ง ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงผลการอบแห้งของเตาอบแห้งอเนกประสงค์

หัวข้อ	ถั่วเขียว	กล้วย	พริก	ลำไย
น้ำหนักเริ่มต้น (กิโลกรัม)	72	150	60	140
ความชื้นเริ่มต้น (% มาตรฐานเปียก)	60	65	80	85
น้ำหนักผลิตภัณฑ์อบแห้ง (กิโลกรัม)	52	60	15	25
ความชื้นผลิตภัณฑ์อบแห้ง (% มาตรฐานเปียก)	45	22	12	14
อัตราส่วนน้ำหนัก (แห้ง : สด)	1 : 1.5	1 : 2.5	1 : 4	1 : 5.5
เวลาการอบแห้ง (ชั่วโมง)	1	16	14	10
อุณหภูมิลมร้อน (องศาเซลเซียส)	60	75	65	75
อัตราการใช้เชื้อเพลิงแอลพีจี (กิโลกรัม/ชั่วโมง)	0.5	1	0.85	1

2.1.3 เตาอบแห้งที่อาศัยการแลกเปลี่ยนความร้อนทางอ้อมในการสร้างอากาศร้อน

สุรศักดิ์ เทียบรัตน์ [8] ทำการศึกษาและออกแบบเครื่องอบแห้ง ที่นำน้ำร้อนเหลือทิ้งของโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนใต้พิภพ ซึ่งมีอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ผ่านเข้าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อติดครีบ (Finned tube) ขนาด 10 x 50 x 30 ลูกบาศก์เซนติเมตร จำนวน 4 แผง ในการอบแห้งใช้พัดลมขนาด 1.58 กิโลวัตต์ 1,420 รอบต่อนาที เป่าอากาศผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเข้าสู่ห้องอบแห้งขนาด 2.1 x 2.4 x 2.1 เมตร (กว้าง x ยาว x สูง) ในการศึกษาหาเงื่อนไขการทำงานที่เหมาะสมของการอบแห้งพริกและกระเทียม พบว่า การทดลองอบแห้งพริกหนัก 450 กิโลกรัม ที่มีความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 76 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก จนมีความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 13 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก อุณหภูมิอบแห้งเฉลี่ยเท่ากับ 50.4 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการอบแห้งเท่ากับ 46 ชั่วโมง ที่อัตราการไหลของน้ำร้อนและอากาศเท่ากับ 1 กิโลกรัมต่อวินาที และการทดลองอบแห้งกระเทียมหนัก 245 กิโลกรัม ที่มีความชื้นเริ่มต้นเท่ากับ 75 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก จนความชื้นสุดท้ายเท่ากับ 55 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก อุณหภูมิอบแห้งเฉลี่ยเท่ากับ 34.8 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการอบแห้งเท่ากับ 94 ชั่วโมง ที่อัตราการไหลของน้ำร้อนและอากาศเท่ากับ 0.04 กิโลกรัมต่อวินาที และ 1 กิโลกรัมต่อวินาที ตามลำดับ

เกรียงศักดิ์ นักผูก และชวนชื่น เดี่ยววิไล [9] ศึกษาออกแบบตู้อบแห้งชาเขียวลมร้อนที่สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิลมร้อนไม่ต่ำกว่า 120 องศาเซลเซียส โดยตัวตู้อบมีส่วนประกอบหลัก 4 ส่วน คือ ชุดแลกเปลี่ยนความร้อนแบบอากาศสู่อากาศ ชุดพัดลมเป่าลมร้อน โครงตู้อบ และตู้ควบคุม ผลการทดลองอบแห้งชาเขียวที่ทำการนวดลดความชื้นเสร็จแล้วจำนวน 20 กิโลกรัม อุณหภูมิอบแห้ง 120 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิแวดล้อม 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 80 เปอร์เซ็นต์ พบว่า ความชื้นเริ่มต้นก่อนการอบแห้ง 34 เปอร์เซ็นมาตรฐานเปียก ความชื้นสุดท้าย 13 เปอร์เซ็นมาตรฐานเปียก เวลาในการอบแห้ง 70 นาที ใช้ก๊าซหุงต้ม 0.8 กิโลกรัม

2.1.4 ปัจจัยที่ส่งผลต่อการอบแห้ง

จันทรา ดิษฐนา [10] ศึกษาความสัมพันธ์ของระยะเวลาและคุณภาพสีในการอบแห้งดอกกุหลาบ ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 40 – 45 องศาเซลเซียส 45 – 50 องศาเซลเซียส และ 50 – 55 องศาเซลเซียส อบแห้งดอกกุหลาบ 3 สี คือ ดอกกุหลาบสีขาว ดอกกุหลาบสีแสด และดอกกุหลาบสีชมพู โดยเปรียบเทียบกับการอบแห้งด้วยสารดูดความชื้นเป็นเวลา 1 อาทิตย์ ให้เป็นค่ามาตรฐานในงานวิจัยนี้ พบว่า เมื่ออบแห้งดอกกุหลาบสีขาว ดอกกุหลาบสีแสด และดอกกุหลาบสีชมพู ที่อุณหภูมิ 40 – 45 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการอบแห้ง 35 40 และ 40 ชั่วโมง ตามลำดับ มีค่าความชื้น 15 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก ที่อุณหภูมิ 45 – 50 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการอบแห้ง 25 ชั่วโมง มีค่าความชื้น 14 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก และที่อุณหภูมิ 50 – 55 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการอบแห้ง 20 ชั่วโมง มีค่าความชื้น 14 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก จากการทดลองพบว่า ที่อุณหภูมิ 50 – 55 องศาเซลเซียส จะใช้เวลาในการอบแห้งดอกกุหลาบทั้งสามสีน้อยที่สุด และพบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของดอกกุหลาบทั้งสามสี โดยอุณหภูมิสูงจะทำให้สีเข้มขึ้น

จินดาพร จำรัสเลิศลักษณ์ และสมชาติ โสภณรณฤทธิ์ [11] ทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ ความเร็วลม และลักษณะพื้นผิวของวัสดุ ที่มีผลต่อการอบแห้ง โดยทำการทดลองอบแห้งเผือกหอมขนาดกว้างและยาวด้านละ 3 เซนติเมตร หนา 2 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิอบแห้ง 50 – 70 องศาเซลเซียส และความเร็วลม 0.5 – 1 เมตรต่อวินาที จนความชื้นสุดท้ายอยู่ในช่วง 4 – 9 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานแห้ง จากผลการทดลองพบว่า การอบแห้งที่อุณหภูมิและความเร็วลมสูงจะให้อัตราการอบแห้งที่สูงกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิและความเร็วลมต่ำ และที่อุณหภูมิและความเร็วลมที่ใช้ในการอบแห้งเดียวกัน อย่างไรก็ตามความเร็วลมไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าสีของผลิตภัณฑ์

2.2 คาโมมายล์ (Chamomile)

รูปที่ 2.1 แสดงดอกคาโมมายล์

คาโมมายล์ (Chamomile) [12] เป็นพืชล้มลุก มีกลิ่นหอม ลำต้นมีกิ่งก้านสาขามากเหมือนขนนก ดอกเล็กสีครีมคล้ายดอกเดซี่ มีถิ่นกำเนิดในแถบทวีปยุโรปตั้งแต่ตอนกลางถึงตอนเหนือ เช่น ฮังการี บัลแกเรีย เยอรมัน เบลเยียม สเปน ยังพบได้ในอเมริกาเหนือ เอเชียตะวันตก แอฟริกาเหนือ และอียิปต์ เป็นต้น ซึ่งน้ำมันหอมระเหยที่อยู่ภายในดอกคาโมมายล์มีสรรพคุณ กระตุ้นการทำงานของระบบภูมิคุ้มกัน ช่วยฆ่าเชื้อแบคทีเรีย ลดอาการปวดประจำเดือน อาการท้องอืดท้องเฟ้อ ผ่อนคลายความเครียด บรรเทาอาการกระวนกระวาย ช่วยให้หลับสบายขึ้น ช่วยรักษาแผลในระบบย่อยอาหาร กระเพาะอาหาร ต้านการอักเสบ และยังลดอาการบวมแดงของผิวได้อีกด้วย

2.3 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchangers)

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน คือ อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับถ่ายเทความร้อนจากของไหลชนิดหนึ่งไปยังของไหลอีกชนิดหนึ่ง โดยที่ของไหลไม่จำเป็นต้องผสมกัน อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญมากอย่างหนึ่ง เพราะเป็นเครื่องมือที่ใช้ในระบบต่างๆ ทางวิศวกรรมศาสตร์อย่างกว้างขวาง วิศวกรควรมีความรู้ที่จะคำนวณการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนได้ ในการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน วิศวกรต้องมีความรู้ในการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อน การส่งผ่านของความร้อน และความรู้ทางกลศาสตร์ของไหล

ในปัจจุบัน กระบวนการอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับพลังงานความร้อน ส่วนใหญ่มีเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นองค์ประกอบ เช่น อุตสาหกรรมน้ำมัน เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะถูกใช้สำหรับการเพิ่มอุณหภูมิของน้ำมันดิบ สำหรับเปลี่ยนสภาวะของไอที่ออกมาจากหอกลั่นให้เป็นของเหลว และสำหรับการลดอุณหภูมิของน้ำมันหรือก๊าซ ในทำนองเดียวกันกับในอุตสาหกรรมปุ๋ย อุตสาหกรรมเส้นใยสังเคราะห์ และอุตสาหกรรมอื่นๆ ก็ใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับเพิ่มอุณหภูมิ ลดอุณหภูมิ หรือหมุนเวียนความร้อนจากของไหลกลับมาใช้ใหม่

หน้าที่หลักของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนก็คือ การนำเอาพลังงานความร้อนมาใช้อย่างถูกหลักการและมีประสิทธิภาพ ดังนั้น วิธีใช้และเลือกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งสัมพันธ์กับต้นทุนของกระบวนการ และอาจมีผลต่อราคาของผลิตภัณฑ์ การเลือกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะต้องทำอย่างระมัดระวัง เงื่อนไขที่สำคัญอย่างหนึ่งในการเลือกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ในอุตสาหกรรมก็คือ ความมีประสิทธิภาพในการทำงานที่สูงและราคาถูก โดยปกติทั่วไปการใช้งานอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในระบบงานทางวิศวกรรม เพื่อวัตถุประสงค์ให้เกิดการถ่ายเทความร้อนหรือแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหลสองชนิดที่เป็นของไหลร้อนและของไหลเย็น

2.4 ชนิดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Types of Heat Exchangers)

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีหลายแบบ การจำแนกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนอาจทำได้โดยอาศัยทิศทางการไหลในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน และลักษณะของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเป็นหลัก โดยทั่วไปแล้ว การแบ่งประเภทของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมสามารถกระทำได้ 2 วิธี คือ แบ่งตามสภาวะของของไหลที่ใช้ และแบ่งตามลักษณะการใช้งาน ดังนี้คือ

2.4.1 การแบ่งประเภทตามสภาวะของไหลที่ใช้

2.4.1.1 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของเหลว-ของเหลว เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนประเภทที่ไม่มีการ เปลี่ยนแปลงสภาวะของของไหลทั้ง 2 ชนิด เช่น น้ำมันก้นหอกลั่นและน้ำมันดิบที่ป้อนเข้าหอกลั่น เป็นต้น

2.4.1.2 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของเหลว-ของเหลว ชนิดที่มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะของของไหลทั้ง 2 ชนิด โดยของเหลวชนิดหนึ่งจะเปลี่ยนสภาวะเป็นก๊าซหรือระเหยเป็นไอในระหว่างแลก เปลี่ยนความร้อน เช่น หม้อต้มซ้ำ (Re-boiler) ของหอกลั่นน้ำมัน ซึ่งใช้น้ำมันอุณหภูมิสูงเป็นแหล่งความร้อน

2.4.1.3 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซ-ก๊าซ ชนิดไม่มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะ ไม่เกิดการควบแน่นเป็นของเหลว เช่น เครื่องอุ่นอากาศที่ใช้ก๊าซทิ้งเป็นแหล่งความร้อน

2.4.1.4 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซ-ก๊าซ ชนิดที่มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะ โดยชนิดหนึ่งจะมีการควบแน่นเป็นของเหลว เช่น เครื่องกระจายความร้อน (Radiator) สำหรับทำความอบอุ่นในห้อง โดยทำอากาศให้อุ่นด้วยไอน้ำ

2.4.1.5 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซ-ของเหลว ชนิดไม่มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะ โดยชนิดหนึ่งเป็นก๊าซและอีกชนิดหนึ่งเป็นของเหลว เช่น เครื่องอุ่นน้ำป้อน ที่ใช้ก๊าซทิ้งจากหม้อไอน้ำเป็นแหล่งความร้อน

2.4.1.6 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างก๊าซ-ของเหลว ชนิดที่มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะ เช่น หม้อไอน้ำแบบท่อ ซึ่งระเหยน้ำให้เป็นไอน้ำด้วยก๊าซสันดาป และเครื่องควบแน่น ซึ่งควบแน่นไอให้เป็นของเหลวด้วยน้ำระบายความร้อน

2.4.2 การแบ่งประเภทตามจุดประสงค์การใช้งาน

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนสามารถแบ่งตามประเภทจุดประสงค์การใช้งานหรือลักษณะการใช้งานนั้น ได้แก่

2.4.2.1 เครื่องระเหย (Evaporator) หรือหม้อเดี่ยว (Concentrator) การใช้งานคือการระเหยของเหลวให้เป็นไอเพื่อใช้ไอที่เกิดขึ้นให้เป็นประโยชน์ หรือเพื่อให้ได้ของเหลวที่เข้มข้นขึ้น

2.4.2.2 เครื่องอุ่น หรือเครื่องทำให้ร้อนล่วงหน้า (Preheater) จุดประสงค์ก็เพื่อทำให้ของไหลร้อนล่วงหน้า ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพเชิงความร้อนของกระบวนการ โดยทั่วไปมักจะเรียกชื่อตามตำแหน่งข้างหน้าของการใช้งานหรือตามประเภทของของไหลที่ถูกอุ่นให้ร้อน เช่น เครื่องอุ่นน้ำป้อนหม้อไอน้ำ (Boiler feed water preheater) เป็นต้น

2.4.2.3 เครื่องทำให้ร้อน (Heater) จุดประสงค์ก็เพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้กับของไหลให้มีอุณหภูมิสูงขึ้น

2.4.2.4 เครื่องทำให้ร้อนยิ่งยวด (Superheat-heater) เครื่องนี้จะทำหน้าที่เพิ่มความร้อนให้กับของไหลที่ถูกทำให้ร้อนมาแล้ว เพื่อที่จะทำให้อยู่ในสภาพร้อนยิ่งยวด เช่น เครื่องดงไอ (Steam super-heater)

2.4.2.5 หม้อต้มซ้ำ (Re-boiler) เครื่องนี้ทำหน้าที่ให้ความร้อนให้กับของเหลวเพื่อที่จะระเหยให้เป็นไออีก ครั้ง

2.4.2.6 เครื่องควบแน่น (Condenser) จุดประสงค์ที่สำคัญก็เพื่อควบไอให้กลายเป็นของเหลว เช่น เครื่องควบแน่นไอน้ำ

2.4.2.7 เครื่องควบแน่นหมด (Total condenser) เครื่องนี้เป็นเครื่องควบแน่นชนิดหนึ่ง ที่ใช้กับหอกลั่นได้รับการออกแบบให้สามารถควบแน่นไอที่ออกมาจากยอดหอกลั่นได้ทั้งหมด

2.4.2.8 เครื่องควบแน่นบางส่วน (Partial condenser) เครื่องควบแน่นประเภทผลิตขึ้นใช้กับหอกลั่น มีจุดประสงค์เพื่อควบแน่นบางส่วนให้กลายเป็นของเหลว

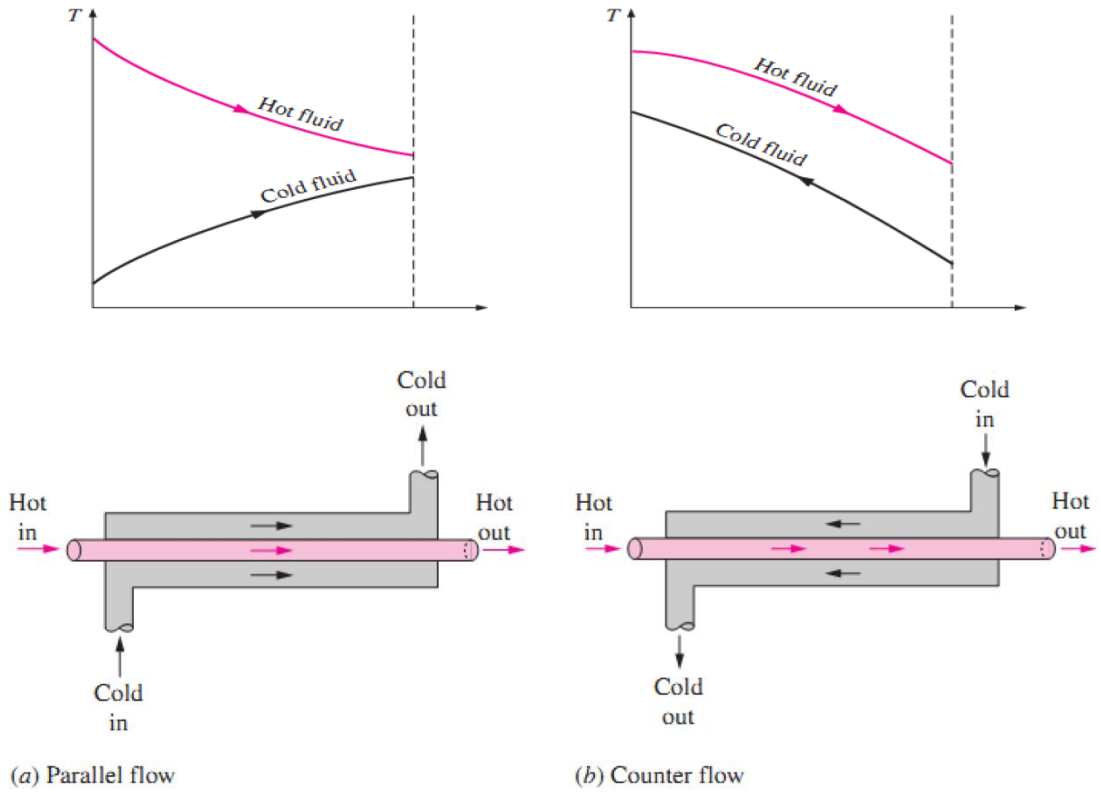
2.4.2.9 เครื่องระบายความร้อน (Cooler) เครื่องนี้ทำหน้าที่ระบายความร้อนให้กับของไหลเพื่อลดอุณหภูมิของของไหล

2.4.2.10 เครื่องทำให้เย็นจัด (Chiller) ทำหน้าที่ลดอุณหภูมิของของไหลให้ต่ำลงมาก โดยใช้สารทำความเย็น (Refrigerants) เช่น ฟรีออน แอมโมเนีย เป็นต้น

2.4.3 การจำแนกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

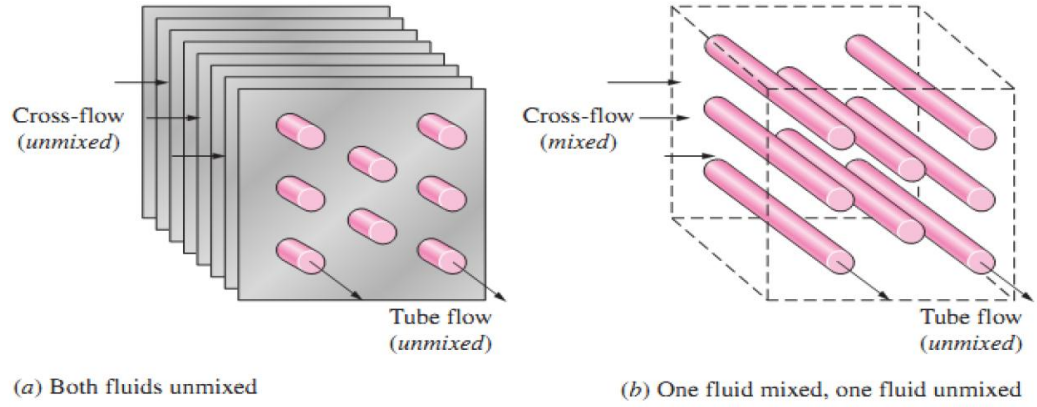
การจำแนกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีหลายแบบการจำแนก เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอาจทำได้โดยอาศัยทิศทางการเคลื่อนที่ของของไหลในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน และลักษณะของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเป็นหลัก ดังที่กล่าวไปข้างต้น โดยทั่วไปแล้วจำแนกเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนสรุปออกได้เป็น 3 แบบ คือ

2.4.3.1 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น (Concentric tube or Double pipe) อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดนี้อาจอยู่ในลักษณะที่ท่อสองท่อสวมเข้าด้วยกันดังรูปที่ 2.2 ส่วนการไหลของของไหล อาจไหลสวนทางกัน เรียกว่า Counter flow หรือไหลขนานกัน เรียกว่า Parallel flow



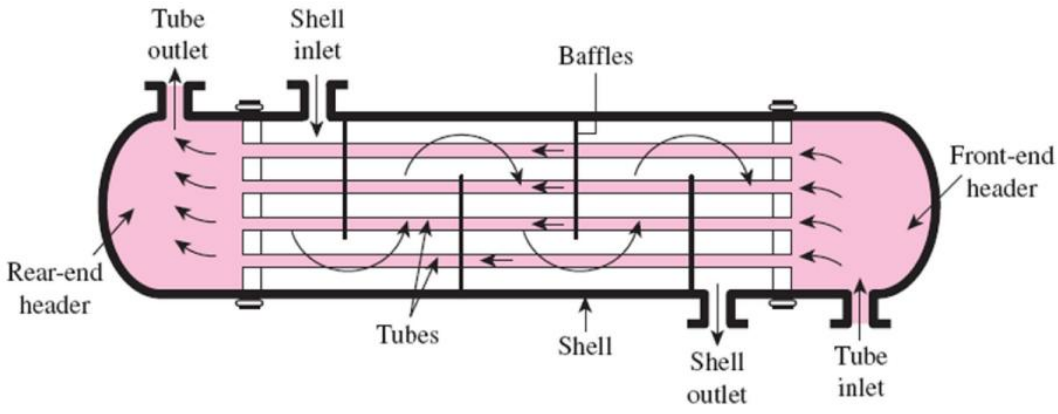
รูปที่ 2.2 ลักษณะการไหลที่แตกต่างกันและการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อสองชั้น (Double-pipe heat exchanger) [13]

2.4.3.2 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบที่ของไหลมีทิศทางตั้งฉากกัน (Cross flow) ในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้ ของไหลจะไหลในทิศทางตั้งฉากกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.3 การสร้างนั้นอาจให้อยู่ในลักษณะของไหลเที่ยวเดียว (Single pass) หรือไหลสองเที่ยว (Double pass) หรือมากกว่าก็ได้

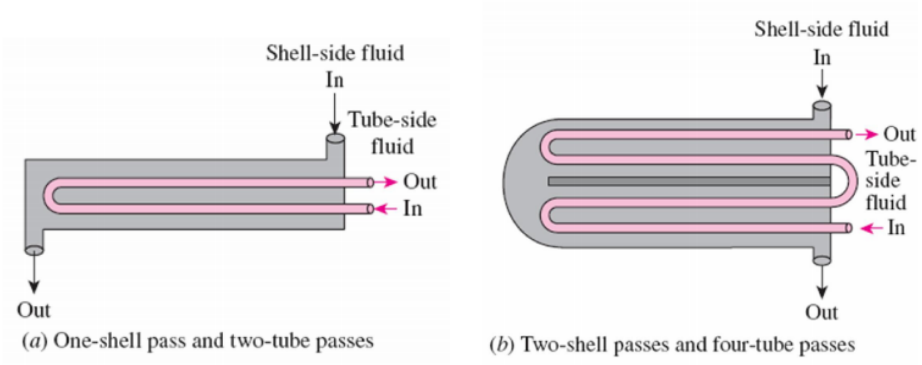


รูปที่ 2.3 การไหลที่แตกต่างกันในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบที่ของไหลมีทิศทางตั้งฉากกัน [13]

2.4.3.3 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อ (Shell and tube) อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดนี้ของไหลอย่างหนึ่งจะอยู่ในเชลล์ และอีกอย่างหนึ่งจะอยู่ในท่อ สำหรับการไหลนั้นจะอยู่ในลักษณะไหลสวนทาง หรือไหลขนานก็ได้ หรือทั้งสองอย่างในเครื่องเดียวกันก็ได้ นอกจากนี้อาจออกแบบให้ของไหลมีทิศทางตั้งฉากกับท่อก็ได้ ดังรูปที่ 2.4 และ 2.5



รูปที่ 2.4 แผนผังของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อ (One-shell pass and one-tube pass) [13]



รูปที่ 2.5 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อ

(Multi flow arrangements in shell-and-tube heat exchangers) [13]

2.5 การวิเคราะห์อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Analysis of Heat Exchangers)

ในการออกแบบหรือเลือกอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมาใช้ในงานทางวิศวกรรม เพื่อให้สามารถคาดคะเนอุณหภูมิตรงทางออกของของไหลร้อนและเย็น และสามารถหาอัตราการถ่ายเทความร้อนทั้งหมดระหว่างของของไหลร้อนและเย็นได้ เมื่อทราบอัตราการไหลของมวลของของไหล ในที่นี้จะกล่าวถึงการหาความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยแบบล็อก (Log mean temperature difference, LMTD)

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนโดยปกติมักใช้เป็นเวลานาน โดยไม่เปลี่ยนแปลงเงื่อนไขในการทำงาน ดังนั้นอาจสมมุติว่าอุปกรณ์มีการไหลแบบสภาวะคงที่ คุณสมบัติของไหล เช่น อุณหภูมิ ความเร็วที่ทางออก หรือทางเข้ามีค่าคงที่ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ และพลังงานศักย์ ความร้อนจำเพาะของของไหลจะใช้ค่าเฉลี่ยเป็นค่าคงที่ การนำความร้อนตามแนวแกนของท่อจะไม่นำมาคิดก็ได้ สุดท้ายสมมุติให้ผิวนอกสุดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนหุ้มด้วยฉนวนเป็นอย่างดีจนไม่มีการสูญเสียความร้อนให้แก่สิ่งแวดล้อม มีการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลทั้ง 2 ชนิดเท่านั้น ดังนั้นจากกฎการอนุรักษ์พลังงานจะได้ว่า อัตราการถ่ายโอนความร้อนจากของไหลที่ร้อน เท่ากับ อัตราการถ่ายโอนความร้อนของไหลเย็น ดังสมการ

$$\dot{Q} = \dot{m}_c c_{pc} (T_{c,out} - T_{c,in}) \qquad (2\text{-}1)$$

และ

$$\dot{Q} = \dot{m}_h c_{ph} (T_{h,out} - T_{h,in}) \qquad (2\text{-}2)$$

โดยที่ ตัวแปรระบุ c และ h หมายถึง ของไหลเย็นและของไหลร้อน ตามลำดับ และ

$\dot{m}_c$, $\dot{m}_h$ = อัตราการไหลของมวล (kg/s)

c_{pc}, c_{ph} = ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (kJ/kg·K)

$T_{c,out}$, $T_{h,out}$ = อุณหภูมิเฉลี่ยที่ทางออกจากท่อ (K)

$T_{c,in}$, $T_{h,in}$ = อุณหภูมิเฉลี่ยที่ทางเข้าท่อ (K)

ในการวิเคราะห์อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อความสะดวกมักรวมอัตราการไหลของมวลและความร้อนจำเพาะของของไหลเข้าด้วยกันเป็นจำนวนหนึ่งที่เรียกว่า “ อัตราความจุความร้อน (Heat Capacity Rate), C (kW/K)” ดังนี้

$$C = \dot{m}c_p \tag{2-3}$$

สำหรับของไหลเย็น $C_c = \dot{m}_c c_{pc}$ และสำหรับของไหลร้อน $C_h = \dot{m}_h c_{ph}$ (2-4)

เขียนสมการ (2-3) และ (2-4) ในรูปของอัตราความจุความร้อน คือ

$$\dot{Q} = C_c(T_{c,out} - T_{c,in}) \tag{2-5}$$

$$\dot{Q} = C_h(T_{h,out} - T_{h,in}) \tag{2-6}$$

ดังนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนในอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนจะมีค่าเท่ากับอัตราความจุความร้อนของของไหลคูณกับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของของไหล อัตราการถ่ายเทความร้อนสามารถเขียนได้ในรูปของความแตกต่างของอุณหภูมิ ΔT ระหว่างของไหลที่ร้อนและเย็น อัตราการถ่ายเทความร้อนนี้หาจากกฎการเย็นตัวของนิวตันโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม U แทนสัมประสิทธิ์การพาความร้อน h แต่เนื่องจาก ΔT อาจเปลี่ยนแปลงได้ตามตำแหน่งต่างๆ ในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน จึงมีรูปสมการเป็น

$$\dot{Q} = UA_s\Delta T_m \tag{2-7}$$

โดยที่

U = ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม ($W/m^2 \cdot K$)

A_s = พื้นที่ของการถ่ายเทความร้อน (m^2)

ΔT_m = ค่าความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยระหว่างของไหล 2 ชนิด (K)

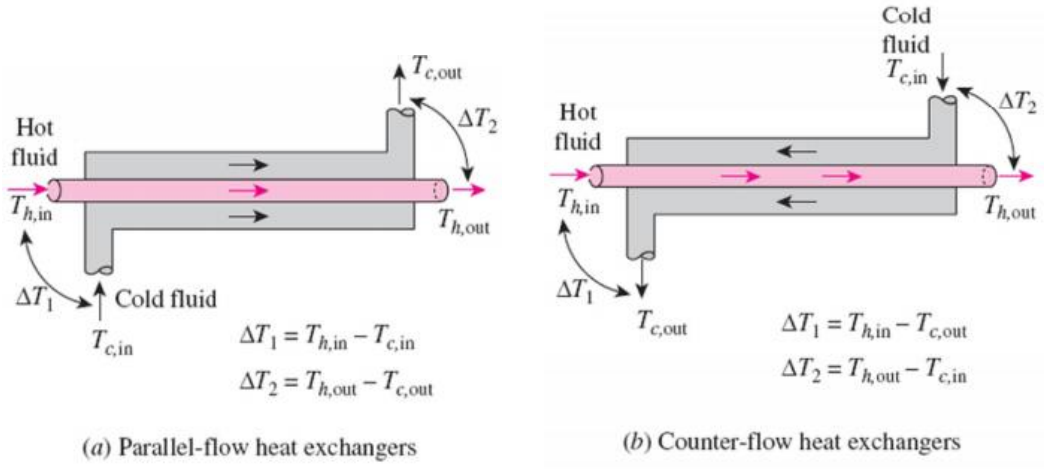
2.6 วิธีหาความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยแบบล็อก (The Log Mean Temperature Difference (LMTD) Method)

ในการหาอัตราการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบต่างๆ ที่กล่าวมานี้นั้นล้วนแต่ต้องหาโดยการอินทิเกรตจากอัตราการถ่ายเทความร้อน ที่ไหลผ่านพื้นที่ dA ซึ่งเป็นพื้นที่เล็กๆ ให้ทั่วพื้นที่ A ที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนตลอดความยาวของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจากสมการที่ (2-8)

$$\dot{Q} = UA_s\Delta T_{lm} \tag{2-8}$$

เมื่อ

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\Delta T_1 / \Delta T_2\right)} \tag{2-9}$$



รูปที่ 2.6 แสดงค่า ΔT_1 และ ΔT_2 ในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบ (a) ไหลทิศทางเดียว (b) ไหลสวนทาง [13]

2.7 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลผ่านหลายครั้งและแบบไหลตั้งฉาก (Multi-pass and Cross-Flow Heat Exchangers: Use of a Correction Factor)

ค่า LMTD มีประโยชน์เพียงแค่ใช้ในการคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อนอย่างหยาบ ๆ ทั้งนี้เพราะโดยปกติแล้วค่าของ U นี้จะไม่คงที่ อย่างไรก็ตามในการออกแบบนั้นมักจะนำเอาค่า U ของหน้าตัดที่อยู่กึ่งกลางปลายทั้งสอง ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมาใช้ในการคำนวณโดยถือว่ามีค่าคงที่ แต่ถ้าหากค่า U นี้แปรค่ามากก็จะต้องคำนวณหาทีละขั้นตอนโดยการนำค่า U นั้นไปแทนค่าลงในสมการแล้วอินทิเกรตหาอัตราการถ่ายเทความร้อนอีกทีหนึ่ง สำหรับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ซับซ้อน เช่น แบบท่อกับเซลล์ที่ของไหลในท่อและในเซลล์ไหลผ่านเครื่องหลายเที่ยว หรือหลายกลับ หรืออุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตั้งฉากที่ของไหลมีการคลุกเคล้าปนกัน และไม่คลุกเคล้า จะหาความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยโดยวิธีคณิตศาสตร์ได้ยากมาก วิธีที่นิยมใช้กันก็คือ ให้ดัดแปลงค่า LMTD ที่จะนำไปใช้งานโดยการคูณด้วยแฟคเตอร์แก้ F ที่อยู่ในรูปเส้นกราฟ ในการหาความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยที่แท้จริงของอุปกรณ์และเปลี่ยนความร้อนที่ไหลซับซ้อนนั้น ให้คูณค่า LMTD ของอุปกรณ์และเปลี่ยนความร้อนแบบไหลสวนทางกันที่ใช้ข้อมูลอุณหภูมิของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ไหลซับซ้อนนั้นด้วยแฟคเตอร์แก้ (F) ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแต่ละระบบดังนั้น

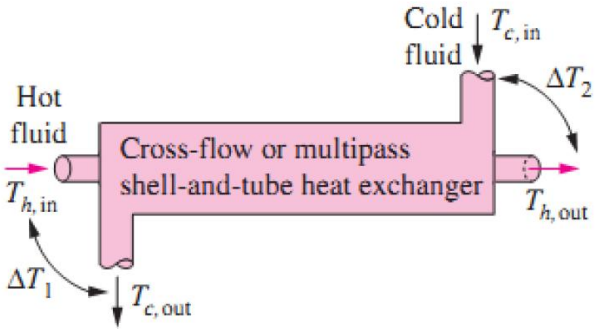
$$\Delta T_{lm} = F \Delta T_{lm,CF} \tag{2-10}$$

โดยที่

ΔT_{lm} = ค่าความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยจริง (^{o}C)

F = แฟคเตอร์แก้

$\Delta T_{lm,CF}$ = ความแตกต่างอุณหภูมิเฉลี่ยของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบที่ของไหลมีทิศทางตั้งฉากกัน (^{o}C)



รูปที่ 2.7 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลผ่านหลายครั้ง (Cross-flow and multipass shell-and-tube heat exchanger) [13]

อัตราการถ่ายเทความร้อน

$$\dot{Q} = UA_s F \Delta T_{lm,CF} \tag{2-11}$$

เมื่อ

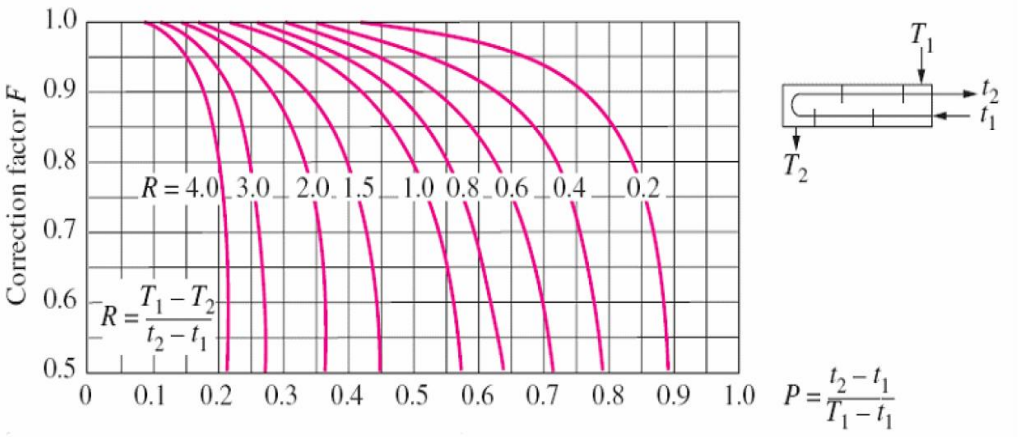
$$\Delta T_{lm,CF} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\Delta T_1 / \Delta T_2\right)} \tag{2-12}$$

$$\Delta T_1 = T_{h,in} - T_{c,out} \tag{2-13}$$

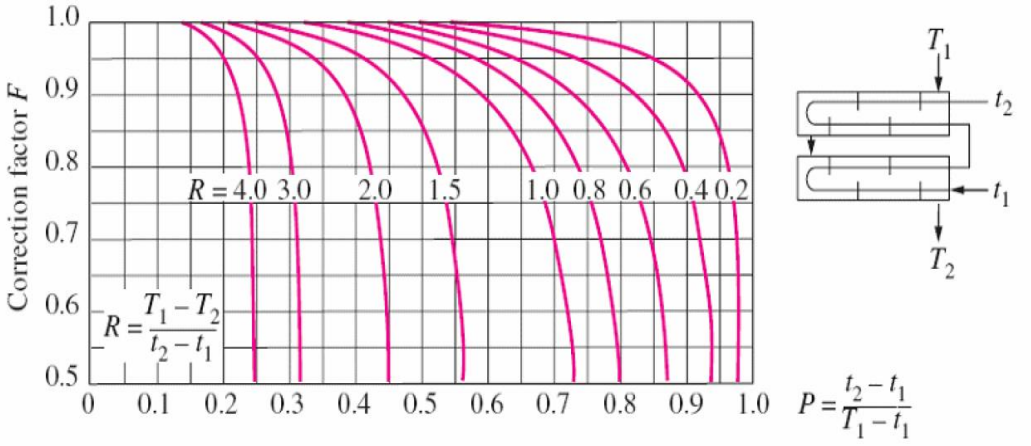
$$\Delta T_2 = T_{h,out} - T_{c,in} \tag{2-14}$$

และ

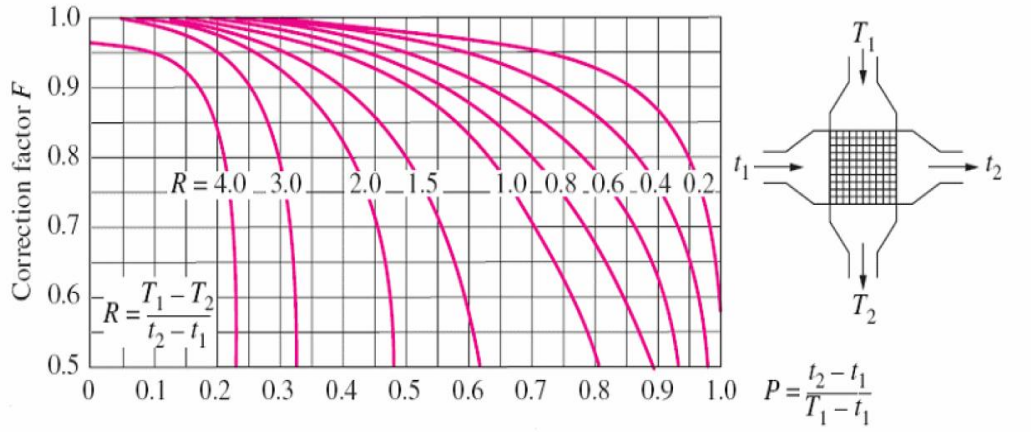
$$F = \ldots (Fig.\ 2.8 - 2.11) \tag{2-15}$$



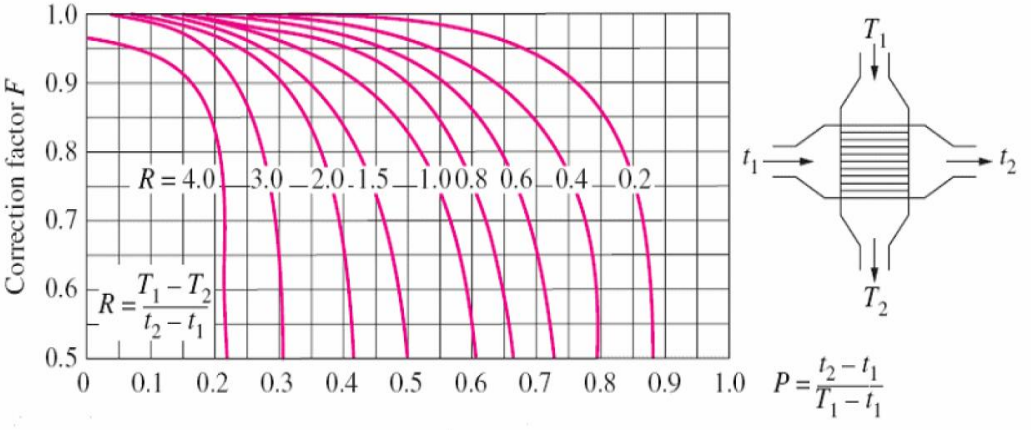
รูปที่ 2.8 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลซับซ้อนที่ของไหลในเชลล์ไหลผ่านเครื่องเที่ยวเดียว ส่วนในท่อไหลผ่านเครื่อง 2 4 6 และอื่นๆ เที่ยว [13]



รูปที่ 2.9 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลซับซ้อนที่ของไหลในเชลล์ไหลผ่านเครื่อง 2 เที่ยว ส่วนในท่อไหลผ่านเครื่อง 4 8 12 และอื่นๆ เที่ยว [13]



รูปที่ 2.10 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตั้งฉากที่ของไหลแต่ละชนิดไม่มีการคลุกเคล้าปนกัน [13]



รูปที่ 2.11 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตั้งฉากที่ของไหลในเชลล์มีการคลุกเคล้าปนกัน ส่วนของไหลในท่อไม่มีการคลุกเคล้าปนกันและไหลผ่านเครื่องเพียงเที่ยวเดียว [13]

ส่วนค่าที่อยู่ในแกนนอนของกราฟนั้นก็คืออัตราส่วนของความแตกต่างของอุณหภูมิที่อยู่ในสมการ

$$P = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} \tag{2-16}$$

เมื่อ ตัวห้อย 1 และ 2 คือ ทางเข้า (inlet) และทางออก (outlet) ตามลำดับ สำหรับ shell-and-tube heat exchangers: T และ t คือ ของไหลในท่อ (tube) และของไหลในเชลล์ (shell)

อัตราส่วน P นี้เป็นตัวที่จะชี้ให้ทราบว่าของไหลนั้นร้อนขึ้นหรือเย็นตัวลงอย่างแท้จริง และ P นี้จะมีค่าตั้งแต่ 0 - 1.0 เมื่อเป็นกรณีที่อุณหภูมิที่ไหลเข้าของของไหลร้อนเท่ากับอุณหภูมิที่ไหลออกของของไหลเย็น สำหรับ R ของเส้นกราฟแต่ละเส้นนั้นเป็นอัตราส่วนระหว่างผลคูณของอัตราการไหลโดยมวลกับ ความร้อนจำเพาะของของไหลทั้งสอง อัตราส่วนนี้ยังมีอัตราส่วนเท่ากับค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของของไหลในเชลล์หารด้วยค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของของไหลในท่อด้วยฉะนั้น

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} = \frac{(\dot{m}c_p)_{tube\ side}}{(\dot{m}c_p)_{shell\ side}} \tag{2-17}$$

สำหรับค่า R มาใช้งานนั้นก็ไม่ต้องคำนึงถึงเลยว่าของไหลร้อนจะไหลในเชลล์หรือไหลในท่อ และถ้าหากของไหลชนิดหนึ่งชนิดใดมีอุณหภูมิคงที่แล้ว ก็ไม่คำนึงถึงทิศทางการไหลของของไหลที่มีอุณหภูมิคงที่นั้น ทั้งนี้เพราะ F จะมีค่าเท่ากับ 1 และสามารถนำเอาค่า LMTD ไปใช้งานได้เลย

2.8 ทฤษฎีพื้นฐานการอบแห้ง

กระบวนการอบแห้งส่วนมากใช้อากาศเป็นตัวกลางในการถ่ายเทความร้อนจากอากาศไปยังผลิตภัณฑ์และการถ่ายเทมวลความชื้นจากผลิตภัณฑ์ไปยังอากาศ ความร้อนจากอากาศที่ผลิตภัณฑ์ได้รับไปจะถูกใช้ในการระเหยน้ำจากผลิตภัณฑ์ ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่มีชีวิต เช่น เมล็ดพืชส่วนใหญ่มีโครงสร้างภายในที่มีลักษณะเป็นรูพรุน เมื่อถูกทำให้แห้งในลักษณะของชั้นบางที่สภาวะอากาศคงที่ (อุณหภูมิ, ความชื้นสัมพัทธ์ และความเร็วลมร้อน) โดยอาศัยหลักการดังนี้

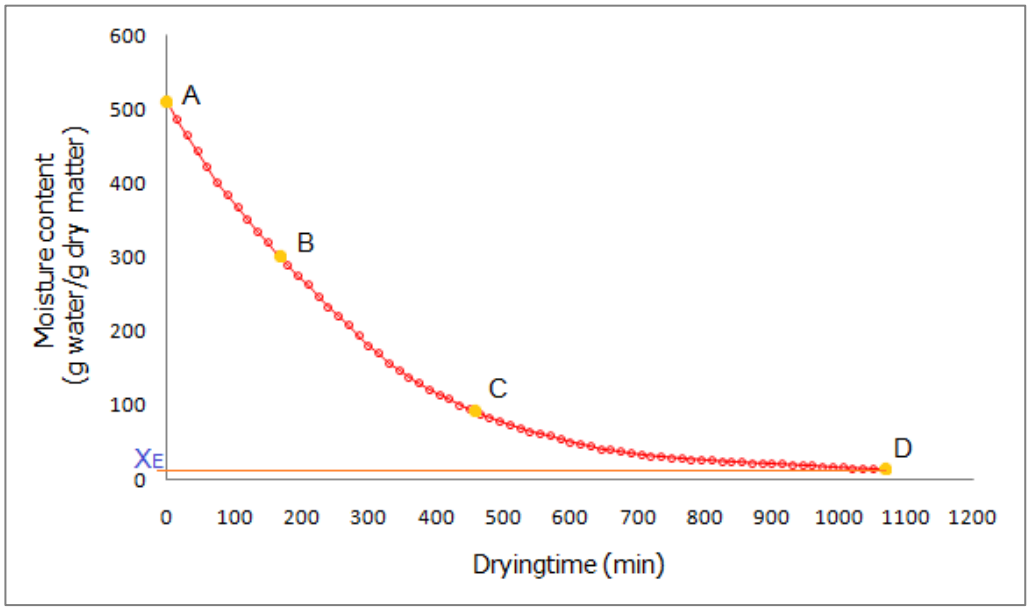
2.8.1 การถ่ายเทความร้อนและมวล

2.8.1.1 การนำความร้อน เป็นการถ่ายเทความร้อนจากโมเลกุลหนึ่งไปยังอีกโมเลกุลหนึ่งที่อยู่ข้างเคียง สภาพนำความร้อน เป็นคุณสมบัติของสารที่ประกอบกันขึ้นเป็นวัตถุซึ่งจะมีค่าแตกต่างกันสภาพนำความร้อนขึ้นกับอุณหภูมิและความร้อน ค่าสภาพนำความร้อนของน้ำจะมีค่ามากกว่าค่าของวัตถุแห้งที่เป็นอาหาร ซึ่งจะเกิดอาหารที่ลักษณะเป็นของแข็ง

2.8.1.2 การพาความร้อน จะเกิดกับอาหารที่เป็นของเหลวโดยกระแสความร้อนจะถูกพาผ่านช่องว่างที่เป็นอากาศหรือแก๊สจากของเหลวชนิดหนึ่งไปยังของเหลวอีกชนิดหนึ่ง

2.8.1.3 การแผ่รังสี เป็นการถ่ายเทความร้อน โดยการแผ่รังสีความร้อนไปยังอาหารซึ่งจะเกิดขึ้นในกรณีอบอาหารในสุญญากาศและการอบแห้งแบบเยือกแข็ง

ในทางปฏิบัติการถ่ายเทความร้อนในการอบแห้งอาจเกิดขึ้นพร้อมกันทั้ง 2 หรือ 3 แบบก็ได้ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะอาหารที่นำไปอบแห้ง โดยการทำแห้งสมุนไพรเป็นการถ่ายเทความร้อน 3 แบบ ระหว่างการพาความร้อนและการนำความร้อนโดยอัตราการอบแห้ง (Drying rate) และความชื้นในสารนั้น (Moisture content) แบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นมาตรฐานแห้งกับเวลา

ช่วงการปรับสภาวะเบื้องต้น (Initial adjustment period -AB) เป็นช่วงเริ่มต้นที่อาหารที่ใช้ในการอบแห้ง มีความชื้นเริ่มต้น (A) ของอาหารยังสูงอยู่ ผิวของอาหารจะมีลักษณะเปียกชื้นมาก เกิดการถ่ายเทความร้อนระหว่างตัวกลางลมร้อนกับอาหาร ทำให้อุณหภูมิพื้นผิวอาหาร มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิกระเปาะเปียก (Wet bulb temperature) ของกระแสลมร้อนที่ใช้เป็นตัวกลางอัตราการทำแห้งค่อยๆ เพิ่มขึ้น จนถึงช่วงอัตราทำแห้งคงที่ (Constant rate)

ช่วงอัตราการแห้งคงที่ (Constant rate period-BC) เป็นช่วงที่น้ำภายในวัสดุเคลื่อนที่มาที่ผิวหน้าพลังงานความร้อนที่วัสดุได้รับจะใช้ในการระเหยน้ำออกจากของวัสดุ อย่างต่อเนื่อง ความชื้นเฉลี่ยของวัสดุ จะลดลงเป็นสัดส่วนกับเวลาในการอบแห้ง จุดสุดท้ายของช่วงการอบแห้งความเร็วคงที่ อัตราเร็วในการอบแห้งจะเริ่มลดลง ความชื้นของวัสดุ ณ เวลานี้ เรียกว่า ความชื้นวิกฤต (Critical moisture content)

ช่วงอัตราการอบแห้งลดลง (Falling rate period CD และ DE) เป็นช่วงที่ความชื้นในอาหารเหลือน้อยจนแพร่ไปยังผิวหน้าอาหารอย่างไม่ต่อเนื่อง ผิวหน้าของอาหารเริ่มแห้ง ทำให้อุณหภูมิที่ผิวของอาหารสูงขึ้นเรื่อยๆ อัตราการอบแห้งจะลดลง ความชื้นจะลดลงเรื่อยๆจนถึงค่าความชื้นสมดุล (Equilibrium Moisture Content, XE) ซึ่งเป็นความชื้นที่ต่ำสุด ภายใต้สภาวะที่ใช้อยู่ในขณะนั้น ที่ความชื้นนี้ อัตราการทำแห้งเป็นศูนย์ น้ำในอาหารไม่สามารถระเหยออกมาได้อีก

2.8.2 กระบวนการอบแห้ง

การอบแห้ง [14] คือ กระบวนการลดความชื้นซึ่งส่วนใหญ่ใช้การถ่ายเทความร้อนไปยังวัสดุที่ชื้น เพื่อไล่ความชื้นออกโดยการระเหย โดยใช้ความร้อนที่ได้รับเป็นความร้อนแฝงของการระเหย ประโยชน์ของการอบแห้งสามารถสรุปได้ตามลำดับความสำคัญดังต่อไปนี้ 1. เพื่อการถนอมรักษาอาหาร ให้สามารถเก็บไว้ได้นาน โดยไม่เสียเนื่องจากการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์มีน้อย 2. เพื่อลดปริมาตรและน้ำหนักอาหารที่แห้งแล้วมีปริมาตรและน้ำหนักลดลง ทำให้สามารถลดต้นทุนในการเก็บรักษาและขนส่ง 3. เพื่อช่วยให้กระบวนการผลิตดีขึ้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตนั้นๆ

โดยทั่วไปปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในวัสดุอบแห้งจะนิยามในรูปของอัตราการส่วนของน้ำต่อมวลทั้งหมด นั่นคือ ใช้มวลของวัสดุชื้นเป็นมาตรฐานการคำนวณค่าความชื้น ซึ่งเป็นการหาค่าความชื้นมาตรฐานเปียก (M_w) แต่ในกระบวนการอบแห้ง มวลของวัสดุชื้นจะเปลี่ยนค่าอยู่ตลอดเวลา ดังนั้น จึงเป็นการสะดวกที่จะใช้มวลของวัสดุแห้งเป็นมาตรฐานในการคำนวณหาค่าความชื้นมาตรฐานแห้ง (M_d) สามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

ความชื้นมาตรฐานเปียก

$$M_w = \frac{(w-d)\times 100}{w} \tag{2-18}$$

ความชื้นมาตรฐานแห้ง

$$M_d = \frac{(w-d)\times 100}{d} \tag{2-19}$$

โดยที่

M_w = ความชื้นมาตรฐานเปียก (%wet basis)

M_d = ความชื้นมาตรฐานแห้ง (%dry basis)

w = มวลของวัสดุ (kg)

d = มวลของวัสดุแห้ง (kg)

.

2.8.3 การประเมินประสิทธิภาพเชิงความร้อน

การประเมินประสิทธิภาพหัวเผาแก๊ส ประสิทธิผลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน และประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการสร้างลมร้อน มีดังต่อไปนี้

2.8.3.1 ประสิทธิภาพหัวเผาแก๊ส (Burner efficiency)

$$\eta_b = \frac{\dot{m}_w c_{p,w}(T_{w,o} - T_{w,i})}{\dot{m}_{lpg} \cdot LHV_{lpg}} \times 100 \tag{2-20}$$

โดยที่

η_b = ประสิทธิภาพหัวเผา (%)

$\dot{m}_w$ = อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำ (kg/s)

$c_{p,w}$ = ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (kJ/kg · K)

$T_{w,o}$ = อุณหภูมิน้ำขาออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (^{o}C)

$T_{w,i}$ = อุณหภูมิน้ำขาเข้าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (^{o}C)

$\dot{m}_{lpg}$ = อัตราการใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลว (kg/s)

LHV_{lpg} = ค่าความร้อนของก๊าซปิโตรเลียมเหลว (MJ/kg)

2.8.3.2 ประสิทธิผลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Effectiveness of heat exchanger)

$$\varepsilon = \frac{\dot{m}_a c_{p,a}(T_{a,i} - T_{amb})}{\dot{m}_{hw} c_{p,hw}(T_{hw,i} - T_{hw,o})} \tag{2-21}$$

โดยที่

ε = ประสิทธิผลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

$\dot{m}_a$ = อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (kg/s)

$c_{p,a}$ = ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ (kJ/kg · K)

$T_{a,i}$ = อุณหภูมิลมร้อนเข้าห้องอบ (^{o}C)

T_{amb} = อุณหภูมิอากาศแวดล้อม (^{o}C)

$\dot{m}_{hw}$ = อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำร้อน (kg/s)

$c_{p,hw}$ = ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำร้อน (kJ/kg · K)

$T_{hw,i}$ = อุณหภูมิน้ำร้อนขาเข้าอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (^{o}C)

$T_{hw,o}$ = อุณหภูมิน้ำร้อนขาออกจากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (^{o}C)

2.8.3.3 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการสร้างลมร้อน (Thermal efficiency)

$$\eta_{th} = \frac{\dot{m}_a c_{p,a}(T_{a,i} - T_{amb})}{\dot{m}_{lpg} \cdot LHV_{lpg}} \times 100 \qquad (2\text{-}22)$$

โดยที่

η_{th} = ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของการสร้างลมร้อน (%)

$\dot{m}_a$ = อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศ (kg/s)

$c_{p,a}$ = ค่าความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ (kJ/kg · K)

$T_{a,i}$ = อุณหภูมิลมร้อนเข้าห้องอบ (^{o}C)

T_{amb} = อุณหภูมิอากาศแวดล้อม (^{o}C)

$\dot{m}_{lpg}$ = อัตราการใช้ก๊าซปิโตรเลียมเหลว (kg/s)

LHV_{lpg} = ค่าความร้อนของก๊าซปิโตรเลียมเหลว (MJ/kg)

2.8.4 การประเมินสมรรถนะ

การประเมินสมรรถนะของเตาอบแห้งสามารถแบ่งการประเมินได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

2.8.4.1 อัตราการอบแห้ง (Drying rate)

$$DR = \frac{m_w}{t} \qquad (2\text{-}23)$$

โดยที่

DR = อัตราการอบแห้ง (kg water evap/h)

m_w = มวลของน้ำที่ระเหย (kg water evap)

t = เวลาที่ใช้ในการอบแห้ง (h)

2.8.4.2 การสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption)

$$SEC = \frac{\left(m_{lpg} \cdot LHV_{lpg}\right) + P_{elec}}{m_w} \quad (2\text{-}24)$$

โดยที่

SEC = การสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (MJ/kg water evap)

m_{lpg} = มวลของก๊าซปิโตรเลียมเหลวที่ใช้ (kg)

LHV_{lpg} = ค่าความร้อนของก๊าซปิโตรเลียมเหลว (MJ/kg)

P_{elec} = พลังงานปฐมภูมิคิดเทียบจากไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ คูณ factor = 2.5 (ประสิทธิภาพโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนเท่ากับ 40 %) (MJ)

m_w = มวลของน้ำที่ระเหย (kg water evap)