Received: Apr 30, 2026 **Revised:** Sep 30, 2026 **Accepted:** Aug 28, 2026

การประเมินสมรรถนะของหัวกระจายน้ำแบบแผ่นคู่ที่ไม่มีรูด้วย CFD ภายใต้อัตราการไหลแปรผันในถังเก็บน้ำเย็นแบบแบ่งชั้นอุณหภูมิ

PERFORMANCE ASSESSMENT OF A NON-PERFORATED DOUBLE-PLATE DIFFUSER USING CFD UNDER VARIABLE FLOW RATES IN A STRATIFIED CHILLED-WATER STORAGE TANK

พัฒนะ เมฆขำ[1*] ปรเมษฐ์ สิทธิสันติ์[1] กวีวัฒน์ วรแสน[2] นพรัตน์ เกตุขาว[3]

[1] สาขาวิชาการจัดการพลังงานและนวัตกรรม คณะพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยพะเยา จังหวัดพะเยา 56000

[2] ภาควิชาวิศวกรรมการผลิตและหุ่นยนต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพมหานคร 10800

[3] คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา จังหวัดพะเยา 56000

Pattana Mekkhum[1*] Poramate Sittisun[1] Kaweewat Worasaen[2] Nopparat Katkhaw[3]

[1] School of Energy and Environment, University of Phayao, Phayao 56000, Thailand

[2] Department of Production & Robotics Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok 10800, Thailand

[3] School of Engineering, University of Phayao, Phayao 56000, Thailand

* Corresponding author: 66140973@up.ac.th

บทคัดย่อ

ถังเก็บน้ำเย็นแบบแบ่งชั้นอุณหภูมิเป็นเทคโนโลยีกักเก็บพลังงานความเย็นที่มีบทบาทสำคัญต่อการลดความต้องการไฟฟ้าสูงสุดของระบบปรับอากาศ เนื่องจากสามารถเลื่อนภาระการผลิตน้ำเย็นจากช่วงเวลาที่มีภาระไฟฟ้าสูงไปสู่ช่วงนอกพีกได้อย่างมีประสิทธิภาพ สมรรถนะของถังชนิดนี้ขึ้นอยู่กับความคมชัดของชั้นรอยต่ออุณหภูมิหรือเทอร์โมไคลน์ (Thermocline) ซึ่งถูกกำหนดโดยโครงสร้างการไหลบริเวณทางเข้า–ออกและลักษณะของหัวกระจายน้ำเป็นสำคัญ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินสมรรถนะของหัวกระจายน้ำแบบแผ่นคู่ที่ไม่มีรูภายใต้อัตราการไหลแปรผัน โดยใช้รูปทรงอ้างอิงที่มีอัตราส่วน dp/D = 0.75 และ hp/di ≈ 0.455 ซึ่งได้จากการศึกษาขั้นก่อนหน้า จากนั้นทำการจำลองกระบวนการนำน้ำเย็นไปใช้ด้วยแบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณแบบสองมิติไม่คงตัวในโปรแกรม ANSYS Fluent ที่อัตราการไหล 1.5, 2.5 และ 3.5 L/min ภายใต้สภาวะเริ่มต้นของถังที่อุณหภูมิ 5 °C และอุณหภูมิน้ำกลับ 15 °C ผลการจำลองถูกนำมาวิเคราะห์เพื่อคำนวณความหนาชั้นเทอร์โมไคลน์ภายในช่วงวิเคราะห์ 0.40–0.77 m ตัวเลขไร้มิติ Re และ Ri รวมถึงตัวชี้วัดสมรรถนะเชิงพลังงาน ได้แก่ ดัชนีสมรรถนะครึ่งวัฏจักร (Half-cycle Figure of Merit: ½FOM) ความจุพลังงานที่สูญเสีย (Lost Capacity) และความสูงสูญเสียเทียบเท่า (Equivalent Lost Height: ELH) ผลการศึกษาพบว่าอัตราการไหล 3.5 L/min ให้สมรรถนะโดยรวมดีที่สุดในช่วงที่ศึกษา โดยมีค่าความหนาชั้นเทอร์โมไคลน์ต่ำที่สุดเท่ากับ 0.1516 m ค่า ½FOM สูงที่สุดเท่ากับ 0.748 และมีค่าความจุพลังงานที่สูญเสียและค่าความสูงสูญเสียเทียบเท่าต่ำที่สุดเท่ากับ 1.962 MJ และ 0.093 m ตามลำดับ ขณะที่อัตราการไหล 2.5 L/min ให้ผลด้อยที่สุดในชุดข้อมูลนี้ ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การเลือกอัตราการไหลที่เหมาะสมร่วมกับ

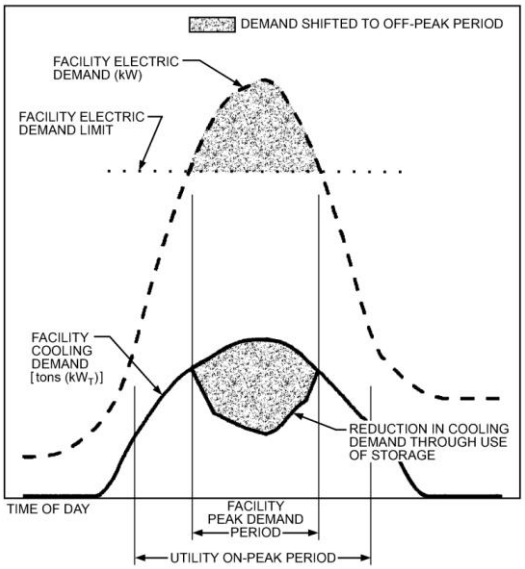
รูปทรงของหัวกระจายน้ำมีผลต่อการลดการผสมภายในถัง การรักษาความคมชัดของเทอร์โมไคลน์ และการเพิ่มสมรรถนะเชิงพลังงานของถังเก็บน้ำเย็นแบบแบ่งชั้นอุณหภูมิ
คำสำคัญ: ถังเก็บน้ำเย็น การแบ่งชั้นอุณหภูมิ หัวกระจายน้ำแบบแผ่นคู่ที่ไม่มีรู พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ สมรรถนะถังเก็บพลังงาน

Abstract

A stratified chilled-water storage tank is an important cool thermal energy storage technology for reducing peak electricity demand in air-conditioning systems because it can shift chilled-water production from high-demand periods to off-peak periods. The performance of this type of tank depends strongly on the sharpness of the thermocline, which is mainly governed by the flow structure near the inlet–outlet region and the diffuser configuration. This study aims to evaluate the performance of a non-perforated double-plate diffuser under variable flow rates using a reference geometry with $dp/D = 0.75$ and $hp/di \approx 0.455$, obtained from a preceding study. Transient two-dimensional computational fluid dynamics simulations were performed in ANSYS Fluent for the discharge process at flow rates of 1.5, 2.5, and 3.5 L/min, with an initial tank temperature of 5 °C and return-water temperature of 15 °C. The simulation results were analyzed to determine the thermocline thickness within the 0.40–0.77 m evaluation window, the dimensionless Re and Ri, and the energy-based performance indices, including ½FOM, lost capacity, and Equivalent Lost Height (ELH). The results showed that the flow rate of 3.5 L/min provided the best overall performance within the investigated range, with the minimum thermocline thickness of 0.1516 m, the highest ½FOM of 0.748, and the lowest lost capacity and ELH of 1.962 MJ and 0.093 m, respectively. In contrast, the flow rate of 2.5 L/min showed the least favorable performance in the present dataset. These results indicate that selecting an appropriate flow rate together with the diffuser geometry affects the reduction of mixing inside the tank, the preservation of a sharper thermocline, and the improvement of the energy performance of a stratified chilled-water storage tank.
Keywords: chilled-water thermal energy storage, thermal stratification, non-perforated double-plate diffuser, computational fluid dynamics, thermal energy storage performance

บทนำ

อาคารขนาดใหญ่ โดยเฉพาะอาคารสำนักงานและอาคารสาธารณะในเขตร้อนชื้น มีภาระไฟฟ้าจากระบบปรับอากาศอยู่ในระดับสูง และภาระดังกล่าวมักเกิดขึ้นอย่างเด่นชัดในช่วงเวลากลางวันซึ่งตรงกับช่วงความต้องการไฟฟ้าสูงสุดของระบบไฟฟ้า ด้วยเหตุนี้ การบริหารจัดการภาระไฟฟ้าจากระบบปรับอากาศจึงเป็นประเด็นสำคัญต่อการประหยัดพลังงาน การลดต้นทุนการดำเนินงาน และการเพิ่มเสถียรภาพของระบบไฟฟ้าโดยรวม เทคโนโลยีถังเก็บน้ำเย็น (chilled-water thermal energy storage) เป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพในการเลื่อนภาระการผลิตน้ำเย็นจากช่วงเวลาที่มีความต้องการไฟฟ้าสูงสุดไปสู่ช่วงนอกเวลาที่ต้องการไฟฟ้าสูงสุด โดยผลิตน้ำเย็นในเวลากลางคืนและนำพลังงานความเย็นที่กักเก็บไว้มาจ่ายให้กับระบบในเวลากลางวัน ส่งผลให้สามารถลดกำลังไฟฟ้าสูงสุดของระบบปรับอากาศได้อย่างมีนัยสำคัญ (Glazer, 2019; Abd Majid et al., 2020) ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แนวคิดการทำงานของระบบถังเก็บน้ำเย็นในระบบปรับอากาศเพื่อเลื่อนภาระความเย็น (Glazer, 2019)

สำหรับถังเก็บน้ำเย็นแบบแบ่งชั้นอุณหภูมิ หลักการสำคัญอยู่ที่การอาศัยความแตกต่างของความหนาแน่นของน้ำเพื่อคงชั้นน้ำเย็นไว้ด้านล่างและชั้นน้ำร้อนไว้ด้านบน โดยมีบริเวณเปลี่ยนผ่านระหว่างสองชั้นเรียกว่าเทอร์โมไคลน์ (thermocline) ซึ่งถือเป็นตัวบ่งชี้สำคัญของคุณภาพการแบ่งชั้น หากเทอร์โมไคลน์มีความบางและคงรูปได้ดี จะส่งผลให้ถังสามารถกักเก็บและจ่ายพลังงานความเย็นได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ในทางตรงกันข้าม หากเกิดการผสมภายในถังมากเกินไป จะทำให้เทอร์โมไคลน์หนาตัวขึ้นและลดปริมาตรน้ำเย็นที่สามารถนำไปใช้งานได้จริง วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องจึงมักใช้ความหนาของเทอร์โมไคลน์เป็นตัวชี้วัดหลักในการประเมินคุณภาพการแบ่งชั้นและสมรรถนะของถังเก็บพลังงานความเย็น (Karim, 2011; Li et al., 2022; Alesbe et al., 2023; Jodeiri et al., 2024)

งานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นอย่างสอดคล้องกันว่า การผสมบริเวณทางเข้า–ออกเป็นกลไกสำคัญที่ทำให้เทอร์โมไคลน์หนาตัวและลดสมรรถนะของถัง ดังนั้น หัวกระจายน้ำจึงมีบทบาทอย่างมากต่อคุณภาพการแบ่งชั้น เนื่องจากเป็นองค์ประกอบที่กำหนดความเร็ว ทิศทาง และการแผ่ตัวของการไหลเมื่อของไหลเข้าสู่ถัง งานทดลองและงานจำลองหลายฉบับรายงานว่า หัวกระจายน้ำที่สามารถลดโมเมนตัมของเจ็ตและส่งเสริมการแผ่ตัวของการไหลในแนวราบได้อย่างเหมาะสม จะช่วยลดการพัดพาเข้าร่วม (entrainment) ลดการไหลวนกลับ และช่วยรักษาเทอร์โมไคลน์ให้คมชัดขึ้นได้ ไม่ว่าจะเป็นหัวกระจายน้ำแบบรัศมี แบบแผ่น แบบครึ่งทรงกลม หรือโครงสร้างทางเข้าแบบปรับแต่งเฉพาะทาง ทั้งนี้ ผลลัพธ์ที่ได้ขึ้นอยู่กับทั้งรูปแบบของหัวกระจายน้ำและสภาวะการทำงานร่วมกัน (Yaïci et al., 2013; Moncho-Esteve et al., 2017; Deng et al., 2021; Weiss et al., 2021; Parida et al., 2022; Xu et al., 2022; Xing et al., 2024) งานวิจัยล่าสุดยังแสดงให้เห็นว่า โครงสร้างและทิศทางการจ่ายน้ำมีผลต่อความหนาของเทอร์โมไคลน์และประสิทธิภาพการกักเก็บพลังงาน ขณะที่ผลของอัตราการไหลต่อคุณภาพการแบ่งชั้นยังขึ้นอยู่กับรูปแบบของทางเข้าที่ใช้ร่วมกัน (Wang et al., 2025; Kereikulova et al., 2026)

ในเชิงกลไกการไหล ตัวเลขไร้มิติที่นิยมใช้เพื่ออธิบายสมดุลของแรงที่เกิดขึ้นภายในถัง ได้แก่ ตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number: Re) และตัวเลขริชาร์ดสัน (Richardson number: Ri) โดย Re ใช้สะท้อนอิทธิพลของแรงเฉื่อยและแนวโน้มความปั่นป่วนของการไหล ส่วน Ri ใช้สะท้อนสัดส่วนของแรงลอยตัวต่อแรงเฉื่อยของการไหล โดยทั่วไป ค่า Ri ที่สูงมีแนวโน้มเอื้อต่อการคงตัวของชั้นอุณหภูมิ ขณะที่ค่า Re ที่สูงและค่า Ri ที่ต่ำมักสัมพันธ์กับการไหลแบบเจ็ตที่ก่อให้เกิดการผสมมากขึ้น อย่างไรก็ตาม วรรณกรรมหลายฉบับชี้ให้เห็นว่าเทอร์โมไคลน์ไม่สามารถอธิบายได้ด้วยค่า Re หรือ Ri เพียงลำพัง เนื่องจากผลลัพธ์สุดท้ายยังขึ้นอยู่กับรูปแบบการแผ่ตัวของการไหล การเกิดกระแสไหลย้อน การปะทะผนังถัง และปฏิสัมพันธ์ระหว่างหัว

กระจายน้ำกับรูปทรงของถังด้วย ดังนั้น การใช้ Re และ Ri จึงเหมาะสำหรับอธิบายกลไกการไหลควบคู่กับการประเมินผลเชิงสมรรถนะ มากกว่าการใช้เป็นตัวแปรตัดสินผลเพียงตัวเดียว (Tipasri and Wongwuttanasatian, 2019; Xu et al., 2022; Lou et al., 2023; Xing et al., 2024)

ในด้านการประเมินสมรรถนะเชิงพลังงาน งานวิจัยด้านถังเก็บน้ำเย็นได้มีการใช้ดัชนีหลายรูปแบบร่วมกับการประเมินเทอร์โมไคลน์ เพื่อสะท้อนความสามารถของถังในการรักษาและส่งคืนพลังงานความเย็นอย่างมีประสิทธิภาพ หนึ่งในดัชนีที่ได้รับการใช้อย่างชัดเจนคือดัชนีสมรรถนะครึ่งวัฏจักร (Half-cycle Figure of Merit: ½FOM) ซึ่งใช้ประเมินสมรรถนะของถังจากการกระจายอุณหภูมิภายในถังโดยตรง ขณะเดียวกัน วรรณกรรมด้านถังเก็บน้ำเย็นยังให้ความสำคัญกับตัวแปรเชิงความสูญเสีย ได้แก่ ความจุพลังงานที่สูญเสีย (lost capacity) และความสูงสูญเสียเทียบเท่า (Equivalent Lost Height: ELH) ซึ่งสามารถใช้สะท้อนผลของการผสมและการเสื่อมสภาพของการแบ่งชั้นได้ในเชิงปริมาณ โดยเฉพาะในกรณีที่ต้องการเปรียบเทียบสมรรถนะของถังภายใต้สภาวะการทำงานที่แตกต่างกันอย่างเป็นระบบ (Bahnfleth and Musser, 1998; Bahnfleth et al., 2003; Abd Majid et al., 2020)

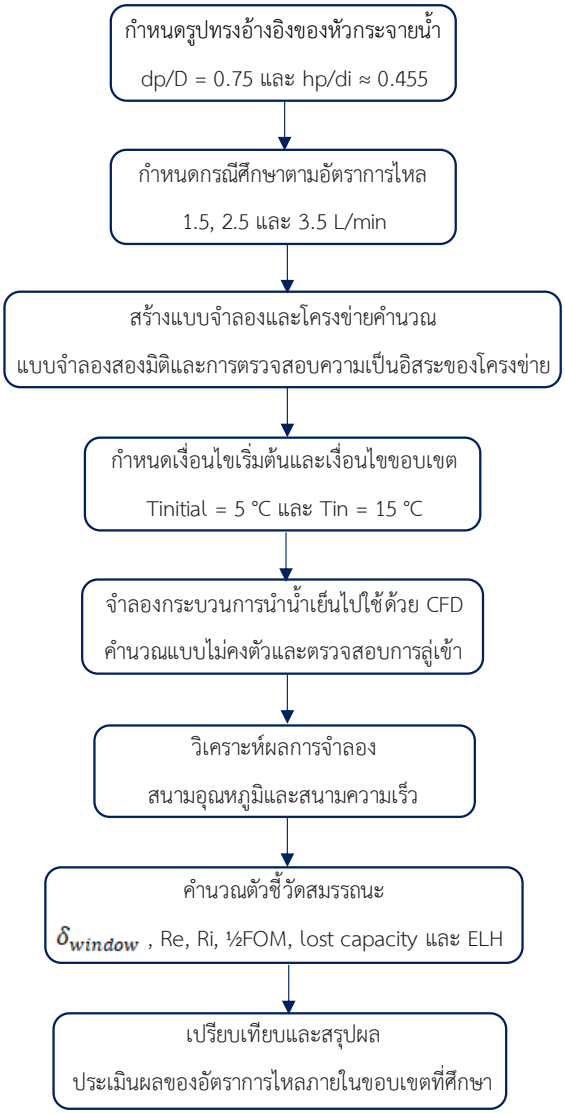
จากการศึกษาขั้นก่อนหน้าของงานวิจัยชุดนี้ ซึ่งมุ่งวิเคราะห์ผลของพารามิเตอร์รูปทรงของหัวกระจายน้ำแบบแผ่นคู่ที่ไม่มีรูภายใต้สภาวะอัตราการไหลคงที่ พบว่ารูปทรงที่มีอัตราส่วน dp/D = 0.75 และ hp/di ≈ 0.455 ให้ค่าความหนาชั้นเทอร์โมไคลน์ต่ำที่สุดภายในช่วงพารามิเตอร์ที่ศึกษา จึงถูกเลือกเป็นรูปทรงอ้างอิงสำหรับการศึกษาขั้นถัดไป อย่างไรก็ตาม ข้อมูลเกี่ยวกับสมรรถนะของหัวกระจายน้ำรูปทรงดังกล่าวภายใต้อัตราการไหลที่แตกต่างกัน โดยประเมินด้วยตัวชี้วัดเชิงอุณหภูมิและพลังงานร่วมกันยังมีอยู่อย่างจำกัด บทความวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินผลของอัตราการไหลต่อสมรรถนะของรูปทรงดังกล่าว โดยใช้แบบจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics: CFD) แบบสองมิติไม่คงตัว และวิเคราะห์ผลร่วมกันด้วยความหนาชั้นเทอร์โมไคลน์ Re, Ri, ½FOM, lost capacity และ ELH เพื่อสังเคราะห์แนวโน้มของสมรรถนะภายใต้อัตราการไหล 1.5, 2.5 และ 3.5 L/min และใช้เป็นข้อมูลประกอบการเลือกอัตราการไหลสำหรับหัวกระจายน้ำรูปทรงนี้ภายในขอบเขตที่ศึกษา

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อประเมินสมรรถนะของหัวกระจายน้ำแบบแผ่นคู่ที่ไม่มีรูภายใต้อัตราการไหลแปรผัน

วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินการวิจัยเริ่มจากการกำหนดรูปทรงอ้างอิงของหัวกระจายน้ำ กำหนดกรณีศึกษาตามอัตราการไหล สร้างโครงข่ายคำนวณและกำหนดเงื่อนไขของแบบจำลอง ดำเนินการจำลองด้วย **CFD** และวิเคราะห์ผลด้วยตัวชี้วัดสมรรถนะที่กำหนด โดยมีขั้นตอนการดำเนินการวิจัยดังแสดงในรูปที่ 2



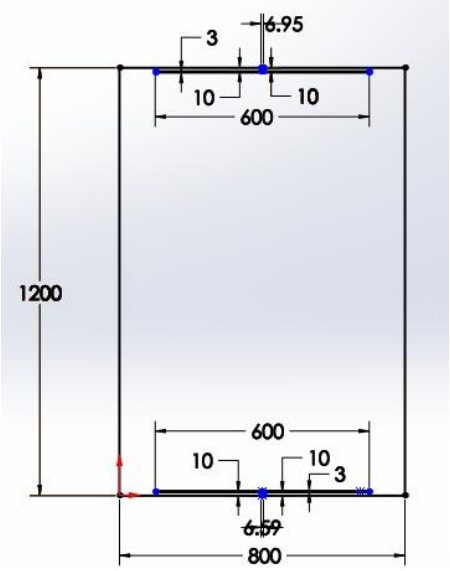
รูปที่ 2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

แบบจำลองถังและหัวกระจายน้ำ

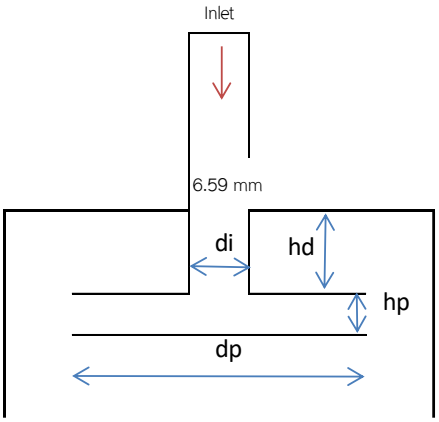
ถังเก็บน้ำเย็นที่ใช้ในการจำลองเป็นถังทรงกระบอกแนวตั้ง มีเส้นผ่านศูนย์กลางถัง D = 0.80 m และความสูง H = 1.20 m โดยติดตั้งท่อทางเข้าและท่อทางออกตามแนวแกนกลางของถัง และกำหนดให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางท่อทางเข้า di = 6.59 mm ซึ่งใช้ค่าเดียวกันกับท่อทางออก สำหรับกระบวนการนำน้ำเย็นไปใช้ น้ำกลับจากระบบไหลเข้าสู่ถังทางด้านบนและน้ำเย็นไหลออกจากถังทางด้านล่าง หัวกระจายน้ำที่ใช้ศึกษาเป็นหัวกระจายน้ำแบบแผ่นคู่ที่ไม่มีรู ซึ่งประกอบด้วยแผ่นกลมสองแผ่นวางขนานกัน ทำให้ของไหลไหลเข้าสู่ช่องว่างระหว่างแผ่นและไหลออกที่ขอบแผ่นในลักษณะการไหลแบบแผ่รัศมี หลักการดังกล่าวมีวัตถุประสงค์เพื่อลดความเร็วเฉพาะที่ของเจ็ตบริเวณทางจ่าย ลดการรบกวนชั้นอุณหภูมิภายในถัง และส่งเสริมการคงตัวของการแบ่งชั้นอุณหภูมิ (Yaïci et al., 2013; Deng et al., 2021; Parida et al., 2022; Xu et al., 2022)

เรขาคณิตที่ใช้ในบทความนี้เป็นรูปทรงอ้างอิงที่ได้จากการศึกษาขั้นก่อนหน้าของงานวิจัยชุดเดียวกัน โดยพบว่ารูปทรงที่มีอัตราส่วน dp/D = 0.75 และ hp/di ≈ 0.455 ให้ค่าความหนาชั้นเทอร์โมไคลน์ต่ำที่สุดภายใต้เงื่อนไขที่ศึกษา ดังนั้น

ในบทความฉบับนี้จึงกำหนดให้ใช้รูปทรงดังกล่าวเป็นกรณีอ้างอิงสำหรับการประเมินผลของอัตราการไหล โดยมีค่าเทียบเท่ากับ dp = 600 mm และ hp = 3 mm ทั้งนี้ หัวกระจายน้ำลักษณะเดียวกันถูกติดตั้งทั้งที่ทางเข้าและทางออก เพื่อให้การเปรียบเทียบผลของอัตราการไหลในแต่ละกรณีดำเนินไปภายใต้เงื่อนไขทางเรขาคณิตที่สอดคล้องกัน และเพื่อให้ผลที่ได้สะท้อนอิทธิพลของอัตราการไหลต่อสมรรถนะของระบบได้อย่างชัดเจน แบบจำลองในการศึกษานี้พิจารณาเฉพาะโดเมนของไหลภายในถัง โดยกำหนดผนังถังและพื้นผิวของหัวกระจายน้ำเป็นผนังไม่ลื่นไถลและไม่ถ่ายเทความร้อน ดังนั้น วัสดุและความหนาของผนังถังจึงไม่ได้กำหนดเป็นตัวแปรในการคำนวณ ทั้งนี้ เพื่อให้ผลการวิเคราะห์สะท้อนอิทธิพลของรูปทรงหัวกระจายน้ำและอัตราการไหลต่อการแบ่งชั้นอุณหภูมิภายในถังเป็นหลัก



รูปที่ 3 เรขาคณิตของถังเก็บน้ำเย็นและตำแหน่งติดตั้งหัวกระจายน้ำแบบแผ่นคู่ที่ไม่มีรู



รูปที่ 4 รายละเอียดเรขาคณิตของหัวกระจายน้ำแบบแผ่นคู่ที่ไม่มีรูสำหรับกรณีอ้างอิง

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์เรขาคณิตของถังและหัวกระจายน้ำกรณีอ้างอิงที่ใช้ในบทความนี้

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	ขนาด	หน่วย	อัตราส่วน	หมายเหตุ
เส้นผ่านศูนย์กลางถัง	D	0.80	m	-	ถังทรงกระบอกแนวตั้ง
ความสูงถัง	H	1.20	m	H/D = 1.50	-
เส้นผ่านศูนย์กลางท่อเข้า	di	6.59	mm	-	ท่อเข้า–ออกขนาดเท่ากัน
เส้นผ่านศูนย์กลางแผ่น	dp	600	mm	dp/D = 0.75	รูปทรงอ้างอิง
ระยะห่างระหว่างแผ่น	hp	3	mm	hp/di ≈ 0.455	รูปทรงอ้างอิง

เงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขต

การจำลองในบทความนี้พิจารณาเฉพาะกระบวนการจ่ายน้ำเย็น (discharging process) โดยกำหนดให้ถังอยู่ในสภาวะเริ่มต้นแบบมีน้ำเย็นเต็มถัง กล่าวคือ อุณหภูมิน้ำภายในถังทั้งหมดถูกกำหนดให้มีค่าเริ่มต้นสม่ำเสมอที่ 5 °C จากนั้นกำหนดให้น้ำกลับจากโหลดที่อุณหภูมิคงที่ 15 °C ไหลเข้าสู่ถังทางด้านบนผ่านหัวกระจายน้ำแบบแผ่นคู่ที่ไม่มีรู ขณะเดียวกันน้ำเย็นไหลออกจากถังทางด้านล่างผ่านหัวกระจายน้ำรูปแบบเดียวกัน อัตราการไหลเชิงปริมาตรถูกกำหนดเป็นค่าคงที่ 3 ระดับ ได้แก่ 1.5, 2.5 และ 3.5 L/min โดยกำหนดให้อัตราการไหลทางออกสอดคล้องกับอัตราการไหลทางเข้า เพื่อรักษาสมดุลมวลและปริมาตรน้ำภายในถังให้คงที่ตลอดการคำนวณ

ผนังถังและพื้นผิวของหัวกระจายน้ำกำหนดเป็นเงื่อนไขผนังไม่ลื่นไถล (no-slip wall) และสมมติให้เป็นผนังแบบไม่ถ่ายเทความร้อน (adiabatic wall) เพื่อแยกผลของเรขาคณิตและอัตราการไหลออกจากผลของการถ่ายเทความร้อนระหว่างถังกับสิ่งแวดล้อม แนวทางดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยเชิง CFD หลายฉบับที่มุ่งวิเคราะห์ผลของโครงสร้างการไหลและการแบ่งชั้นอุณหภูมิภายในถังเป็นหลัก โดยลดอิทธิพลของการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังถังออกจากการพิจารณา (Karim, 2011; Yaïci et al., 2013; Abd Majid et al., 2020; Lou et al., 2023)

เพื่อให้การเปรียบเทียบผลของแต่ละกรณีเป็นไปอย่างสอดคล้องกัน ทุกกรณีจึงใช้รูปทรงอ้างอิงเดียวกัน สภาวะเริ่มต้นเดียวกัน และเกณฑ์การประเมินผลภายในช่วงวิเคราะห์เดียวกัน โดยความแตกต่างเพียงตัวแปรเดียวระหว่างกรณีศึกษาคืออัตราการไหลที่กำหนดเข้าสู่หัวกระจายน้ำ ทำให้สามารถพิจารณาอิทธิพลของอัตราการไหลต่อพฤติกรรมการไหล การก่อตัวของชั้นเทอร์โมไคลน์ และสมรรถนะเชิงพลังงานของถังได้โดยตรง ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ชุดกรณีศึกษาและเงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขตหลัก

กรณี	Q (L/min)	T_{in} (°C)	$T_{initial}$ (°C)	ผนังถัง	หมายเหตุ
F1	1.5	15	5	Adiabatic, no-slip	Discharge
F2	2.5	15	5	Adiabatic, no-slip	Discharge
F3	3.5	15	5	Adiabatic, no-slip	Discharge

แบบจำลองเชิงตัวเลขและการตั้งค่าการคำนวณ CFD

การคำนวณเชิงตัวเลขดำเนินการด้วยโปรแกรม ANSYS Fluent โดยใช้ pressure-based solver ในโหมด transient เพื่อแก้สมการอนุรักษ์มวล โมเมนตัม และพลังงานสำหรับการไหลภายในถังเก็บน้ำเย็นแบบแบ่งชั้นอุณหภูมิ โดยใช้แบบจำลองสองมิติแบบสมมาตร ทั้งนี้ เพื่อพิจารณาผลของแรงลอยตัวที่เกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิภายในถัง งานวิจัย

นี้ใช้ Boussinesq approximation ซึ่งเหมาะสำหรับปัญหาการไหลที่มีความแปรผันของความหนาแน่นไม่มาก แต่มีผลต่อการเกิด buoyancy อย่างมีนัยสำคัญ (Yaïci et al., 2013; Alesbe et al., 2023; Lou et al., 2023)

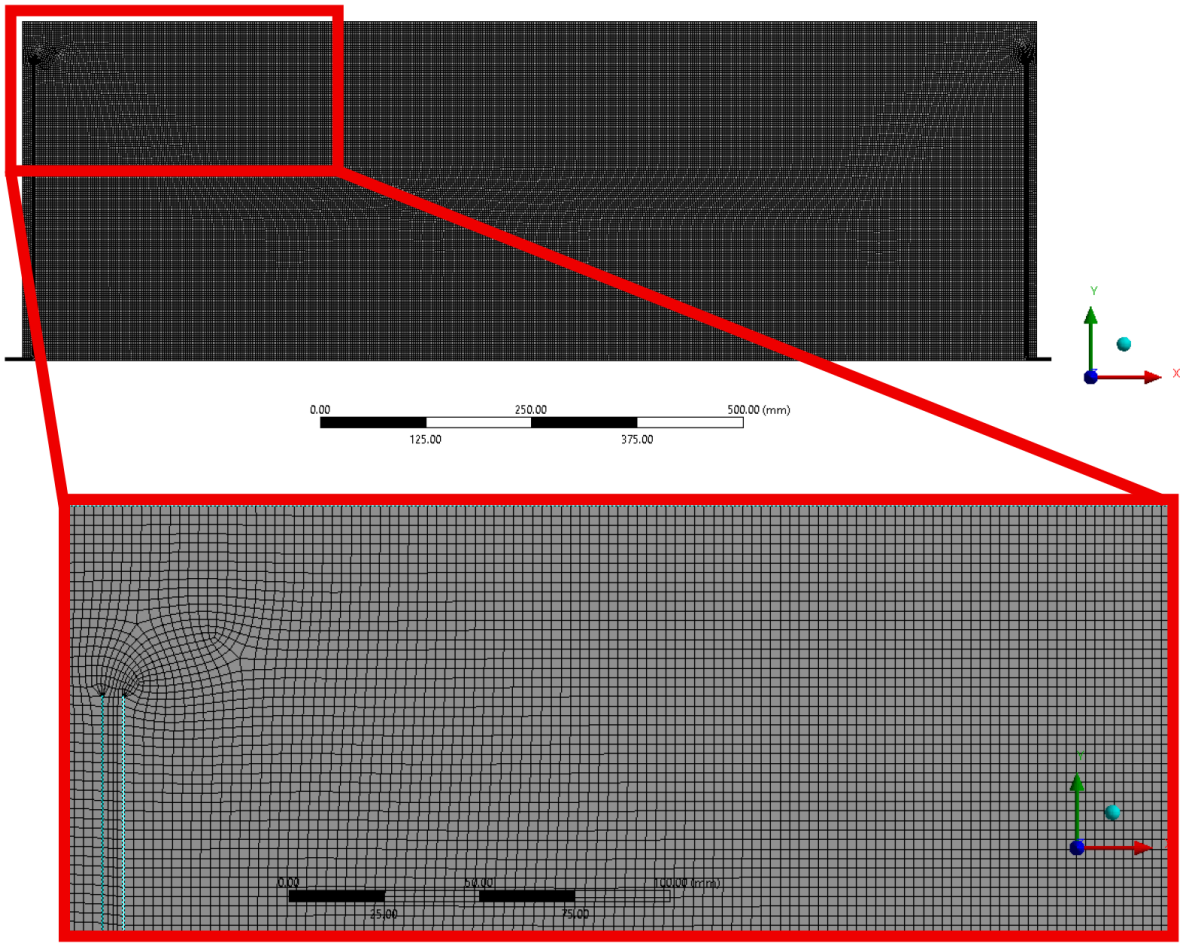
สำหรับเงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขต กำหนดให้น้ำภายในถังมีอุณหภูมิเริ่มต้นสม่ำเสมอเท่ากับ 5 °C เพื่อแทนสภาวะถังที่กักเก็บน้ำเย็นเต็มถังก่อนเริ่มกระบวนการนำน้ำเย็นไปใช้ น้ำกลับที่อุณหภูมิ 15 °C ไหลเข้าสู่ถังผ่านหัวกระจายน้ำด้านบนด้วยอัตราการไหล 1.5, 2.5 และ 3.5 L/min ตามกรณีศึกษา ขณะที่น้ำเย็นไหลออกทางหัวกระจายน้ำด้านล่างด้วยอัตราการไหลที่สอดคล้องกับอัตราการไหลเข้าเพื่อรักษาสมดุลมวลและปริมาตรน้ำภายในถัง ผนังถังและพื้นผิวของหัวกระจายน้ำกำหนดเป็น no-slip และ adiabatic โดยไม่พิจารณาการถ่ายเทความร้อนระหว่างถังกับสิ่งแวดล้อมภายนอก ส่วนแนวสมมาตรของแบบจำลองกำหนดเป็น symmetry boundary condition แนวทางการกำหนดเงื่อนไขดังกล่าวสอดคล้องกับการศึกษาถังเก็บพลังงานแบบแบ่งชั้นอุณหภูมิที่ใช้เงื่อนไขการไหลเข้า–ออก การไม่ลื่นไถลที่ผนัง และการพิจารณาผนังเป็นฉนวนในการจำลอง (Yaïci et al., 2013; Alesbe et al., 2023; Xing et al., 2024)

แบบจำลองความปั่นป่วนถูกกำหนดเป็น realizable k–**ε** ร่วมกับ scalable wall functions เพื่อใช้แทนพฤติกรรมการไหลที่อาจมีการเกิดวังวน การแพร่ของเจ็ต และการไหลย้อนในบริเวณใกล้หัวกระจายน้ำและผนังถัง ซึ่งเป็นบริเวณที่ได้รับอิทธิพลร่วมกันระหว่างแรงเฉื่อยและแรงลอยตัว การเลือกแบบจำลองดังกล่าวอยู่บนพื้นฐานของความสามารถของแบบจำลองกลุ่ม k–**ε** ในการอธิบายการไหลที่มีการแผ่ตัวของเจ็ต การไหลวน และการผสมบริเวณทางเข้าของถัง โดยงานจำลองถังเก็บพลังงานแบบแบ่งชั้นอุณหภูมิที่ผ่านมาได้ประยุกต์ใช้แบบจำลองกลุ่ม k–**ε** ในการศึกษาพฤติกรรมการไหลและการแบ่งชั้นอุณหภูมิ (Yaïci et al., 2013; Moncho-Esteve et al., 2017; Alesbe et al., 2023)

การจับคู่ความดันและความเร็วใช้ coupled scheme การคำนวณ gradient ใช้ least squares cell-based ขณะที่การอินเตอร์โพเลตความดันใช้ body-force-weighted scheme เพื่อให้เกิดบทบาทของแรงลอยตัวในการคำนวณสนามการไหล สำหรับการดิสครีไทซ์เชิงพื้นที่ ใช้ second-order upwind scheme สำหรับสมการโมเมนตัม พลังงาน พลังงานจลน์ของความปั่นป่วน และอัตราการสลายตัวของความปั่นป่วน เพื่อลดผลของ numerical diffusion ที่อาจทำให้การทำนายการกระจายอุณหภูมิและความหนาชั้นเทอร์โมไคลน์ แตกต่างจากพฤติกรรมทางกายภาพ ส่วนการอินทิเกรตเชิงเวลาใช้ second-order implicit scheme เพื่อให้สามารถติดตามพัฒนาการของสนามอุณหภูมิและโครงสร้างการไหลภายในถังได้อย่างเหมาะสม แนวทางการคำนวณแบบ transient ร่วมกับการดิสครีไทซ์อันดับสองถูกใช้ในการศึกษาถังเก็บพลังงานแบบแบ่งชั้นอุณหภูมิหลายงานเพื่อจำลองการเปลี่ยนแปลงของสนามการไหลและอุณหภูมิตามเวลา (Yaïci et al., 2013; Alesbe et al., 2023; Xing et al., 2024)

เมชของแบบจำลองถูกสร้างด้วย ANSYS Meshing โดยกำหนดให้เป็นเมชแบบ quadrilateral และเพิ่มความละเอียดเฉพาะบริเวณใกล้หัวกระจายน้ำและบริเวณที่คาดว่าจะเกิดเกรเดียนต์ของความเร็วและอุณหภูมิสูง ทั้งนี้ การตั้งค่าเมชยึดตามแนวทางเดียวกับการศึกษาขั้นก่อนหน้าของงานวิจัยชุดเดียวกัน โดยกำหนด minimum element size เท่ากับ 0.50 mm และใช้ Fine relevance center เพื่อให้สามารถจับลักษณะการไหลและการก่อตัวของเทอร์โมไคลน์ได้อย่างชัดเจน การเพิ่มความละเอียดของเมชบริเวณทางเข้า–ออกและหัวกระจายน้ำเป็นแนวทางที่ใช้ในงาน CFD ของถังเก็บพลังงานเพื่อให้สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของสนามความเร็วและอุณหภูมิในบริเวณที่มีเกรเดียนต์สูงได้ดีขึ้น (Yaïci et al., 2013; Parida et al., 2022; Xing et al., 2024) เมชสุดท้ายที่เลือกใช้ประกอบด้วย 77,772 เซลล์ และ 78,988 โหนด และใช้ชุดเมชเดียวกันในทุกกรณีศึกษา เพื่อให้ผลการเปรียบเทียบอัตราการไหลเกิดขึ้นภายใต้เงื่อนไขเชิงตัวเลขที่สอดคล้องกัน

เกณฑ์การลู่เข้าของ residual ถูกกำหนดให้มีค่าไม่เกิน 10^{-5} สำหรับสมการความต่อเนื่องและโมเมนตัม และ 10^{-7} สำหรับสมการพลังงาน โดยเกณฑ์ดังกล่าวอยู่ในระดับใกล้เคียงกับที่ใช้ในงานจำลองเชิง CFD ของถังเก็บพลังงานแบบแบ่งชั้นอุณหภูมิ (Yaïci et al., 2013; Weiss et al., 2021) เพื่อให้มั่นใจว่าผลการคำนวณมีเสถียรภาพเพียงพอในแต่ละ time step ลักษณะของเมชที่ใช้ในการคำนวณและบริเวณที่เพิ่มความละเอียดใกล้หัวกระจายน้ำแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 เมชของแบบจำลอง CFD แบบสองมิติและรายละเอียดการเพิ่มความละเอียดบริเวณใกล้หัวกระจายน้ำ

การทดสอบความเป็นอิสระของกริด

เพื่อให้ผลการคำนวณมีความน่าเชื่อถือและลดอิทธิพลของจำนวนเซลล์ของเมชต่อผลการจำลอง งานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบความเป็นอิสระของกริดก่อนเลือกเมชสำหรับใช้ในการคำนวณจริง โดยพิจารณาเมชจำนวน 3 ระดับ ได้แก่ เมชหยาบ (Coarse) จำนวน 14,791 เซลล์ และ 15,331 โหนด เมชปานกลาง (Medium) จำนวน 37,571 เซลล์ และ 38,446 โหนด และเมชละเอียด (Fine) จำนวน 77,772 เซลล์ และ 78,988 โหนด ภายใต้เงื่อนไขทางเรขาคณิต เงื่อนไขขอบเขต และวิธีการคำนวณเดียวกัน

การเปรียบเทียบผลพิจารณาจากโปรไฟล์อุณหภูมิในแนวตั้งภายในถังและค่าความหนาชั้นเทอร์โมไคลน์ภายในช่วงวิเคราะห์เดียวกัน เนื่องจากตัวแปรดังกล่าวมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการกระจายอุณหภูมิและคุณภาพการแบ่งชั้นภายในถัง รวมทั้งมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของสนามการไหลบริเวณหัวกระจายน้ำ แนวทางการตรวจสอบโดยเปรียบเทียบผลตอบสนองของแบบจำลองภายใต้เมชหลายระดับเป็นแนวทางที่ใช้ในงาน CFD ของถังเก็บพลังงานแบบแบ่งชั้นอุณหภูมิที่ผ่านมา (Yaïci et al., 2013; Parida et al., 2022; Alesbe et al., 2023; Xing et al., 2024)

ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มความละเอียดของเมชจากระดับหยาบไปสู่ระดับปานกลาง การเปลี่ยนแปลงของโปรไฟล์อุณหภูมิและค่าความหนาชั้นเทอร์โมไคลน์ มีมากกว่าการเพิ่มความละเอียดจากระดับปานกลางไปสู่ระดับละเอียด ขณะที่ผลจากเมชปานกลางและเมชละเอียดมีแนวโน้มใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของความละเอียดของกริดต่อ

ผลลัพธ์ลดลงเมื่อจำนวนเซลล์เพิ่มขึ้น เพื่อลดความไม่แน่นอนจากความละเอียดของกริดในการเปรียบเทียบผลระหว่างอัตราการไหล งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้เมชระดับละเอียดจำนวน 77,772 เซลล์ และ 78,988 โหนด สำหรับการคำนวณในทุกกรณีศึกษา โดยใช้รูปแบบและความละเอียดของเมชเดียวกันตลอดการวิเคราะห์ เพื่อให้ผลการเปรียบเทียบอัตราการไหล 1.5, 2.5 และ 3.5 L/min อยู่ภายใต้เงื่อนไขเชิงตัวเลขที่สอดคล้องกัน

การนิยามอุณหภูมิไร้มิติและการประเมินความหนาชั้นเทอร์โมไคลน์

เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิระหว่างแต่ละกรณีศึกษาได้อย่างสอดคล้องกัน งานวิจัยนี้กำหนดอุณหภูมิไร้มิติตามสมการที่ (1)

$$\theta = \frac{T - T_c}{T_h - T_c} \quad (1)$$

เมื่อ T คืออุณหภูมิ ณ ตำแหน่งที่พิจารณา T_c คืออุณหภูมิน้ำเย็นเริ่มต้นภายในถัง ซึ่งในงานวิจัยนี้มีค่าเท่ากับ 5 °C และ T_h คืออุณหภูมิน้ำร้อนที่ไหลเข้าสู่ถัง ซึ่งกำหนดให้มีค่า 15 °C การนิยามดังกล่าวช่วยให้ทำให้อุณหภูมิภายในถังอยู่ในรูประดับไร้มิติ โดยมีค่าเข้าใกล้ 0 ในบริเวณน้ำเย็นและเข้าใกล้ 1 ในบริเวณน้ำร้อน ทำให้สามารถเปรียบเทียบลักษณะของชั้นอุณหภูมิระหว่างแต่ละกรณีได้อย่างชัดเจน

ขอบเขตของเทอร์โมไคลน์ อ้างอิงจากเกณฑ์อุณหภูมิไร้มิติที่ θ=0.85 และ θ=0.15 ซึ่งเป็นแนวทางที่ใช้ในการศึกษาพฤติกรรมของความหนาชั้นเทอร์โมไคลน์ ในถังเก็บพลังงาน (Xu et al., 2022) กำหนดตำแหน่งขอบเขตของเทอร์โมไคลน์ จากระดับ θ=0.85 และ θ=0.15 และคำนวณความหนาจากระยะห่างระหว่างสองตำแหน่งดังกล่าว ขณะที่งานวิจัยที่เกี่ยวข้องอื่น ๆ ได้ใช้แนวคิด dimensionless temperature cut-off ในการกำหนดขอบเขตของเทอร์โมไคลน์เช่นเดียวกัน แม้ว่าค่า cut-off ที่เลือกใช้อาจแตกต่างกันตามลักษณะของระบบและวิธีการประเมิน (Abd Majid et al., 2020; Xu et al., 2022) การเลือกค่า 0.85 และ 0.15 ในงานวิจัยนี้จึงใช้เพื่อกำหนดช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหลักของเทอร์โมไคลน์ โดยตัดช่วงใกล้อุณหภูมิปลายทั้งสองด้านออกด้านละ 15% และใช้เกณฑ์เดียวกันกับการศึกษาขั้นก่อนหน้าของงานวิจัยชุดนี้ เพื่อให้ผลสามารถเปรียบเทียบกันได้โดยตรง

เมื่อกำหนด T_c ที่ 5 °C และ T_h ที่ 15 °C ค่า θ=0.85 และ θ=0.15 จึงสอดคล้องกับอุณหภูมิ 13.5 และ 6.5 °C ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากข้อมูลอุณหภูมิจากการประมวลผล CFD ในงานวิจัยนี้ถูกบันทึกไว้เฉพาะในช่วง 0.40–0.77 m วัดลงจากด้านบนของถัง จึงกำหนดให้ช่วงดังกล่าวเป็น common evaluation window สำหรับทุกกรณีศึกษา เพื่อให้การเปรียบเทียบผลเกิดขึ้นภายใต้ฐานข้อมูลเดียวกัน

จากผลการศึกษาขั้นก่อนหน้าพบว่า อุณหภูมิที่ขอบบนของช่วงวิเคราะห์มีค่าใกล้เคียงกับ 13.5 °C แต่ยังต่ำกว่าเล็กน้อย แสดงว่าระดับอุณหภูมิที่สอดคล้องกับ θ=0.85 อยู่เหนือช่วงข้อมูลที่บันทึกไว้เล็กน้อย ดังนั้น ในการประเมินครั้งนี้จึงกำหนดให้ขอบบนของเทอร์โมไคลน์ภายในช่วงวิเคราะห์เท่ากับ 0.40 m และกำหนดขอบล่างจากตำแหน่งที่อุณหภูมิเท่ากับ 6.5 °C ซึ่งสอดคล้องกับ θ=0.15 วิธีดังกล่าวทำให้การประเมินความหนาชั้นเทอร์โมไคลน์ ยังคงสอดคล้องกับหลักเกณฑ์เดิม ขณะเดียวกันก็เหมาะสมกับลักษณะข้อมูลที่มีอยู่จริงในช่วงวิเคราะห์ของงานวิจัยนี้ ดังนั้น ความหนาชั้นเทอร์โมไคลน์ภายในช่วงวิเคราะห์จึงนิยามเป็น $\delta window$ และคำนวณจากสมการที่ (2)

$$\delta_{window} = Z_{T@6.5°C} - 0.40 \quad (2)$$

เมื่อ $Z_{T@6.5°C}$ คือระดับตำแหน่งในแนวดิ่งที่อุณหภูมิภายในถังลดลงถึง 6.5 °C ภายในช่วงวิเคราะห์ ค่าของ δ_{window} ที่ต่ำแสดงถึงชั้นเทอร์โมไคลน์ที่บางและคมชัดกว่า ซึ่งสะท้อนถึงการผสมภายในถังที่ลดลงและคุณภาพการแบ่งชั้นอุณหภูมิที่ดีขึ้น แนวทางดังกล่าวสอดคล้องกับวิธีการประเมินที่ใช้ในการศึกษาขั้นก่อนหน้าของงานวิจัยชุดเดียวกัน

การประเมินแบบ window-based ในงานวิจัยนี้พิจารณาเฉพาะช่วงความสูง 0.40–0.77 m ซึ่งมีข้อดีคือทำให้ทุกกรณีศึกษาถูกเปรียบเทียบภายใต้ช่วงข้อมูลเดียวกัน อย่างไรก็ตาม วิธีดังกล่าวแตกต่างจากการประเมินความหนาเทอร์โมไคลน์แบบเต็มช่วง ซึ่งคำนวณจากระยะห่างระหว่างตำแหน่งที่ θ=0.85 และ θ=0.15 ตลอดความสูงของถัง เนื่องจากตำแหน่งที่สอดคล้องกับ θ=0.85 อยู่เหนือช่วงข้อมูลที่บันทึกไว้เล็กน้อย ค่า δ_{window} จึงเป็นความหนาของเทอร์โมไคลน์เฉพาะภายในช่วงวิเคราะห์ และอาจมีค่าต่ำกว่าความหนาเทอร์โมไคลน์แบบเต็มช่วง ดังนั้น ผลที่ได้ควรใช้สำหรับการเปรียบเทียบเชิงสัมพัทธ์ระหว่างกรณีภายใต้ช่วงวิเคราะห์เดียวกัน และไม่ควรตีความว่าเป็นความหนาเทอร์โมไคลน์ทั้งหมดของถัง

การคำนวณตัวเลขไร้มิติ Re และ Ri

เพื่อใช้ตีความพฤติกรรมการไหลบริเวณหัวกระจายน้ำและเชื่อมโยงผลการจำลองกับกลไกการแบ่งชั้นอุณหภูมิ งานวิจัยนี้เลือกใช้ตัวเลขไร้มิติ Re และ Ri ตามกรอบการนิยามเดียวกับการศึกษาขั้นก่อนหน้าของงานวิจัยชุดนี้ กล่าวคือ ตัวแปรทั้งสองถูกนิยามจากสภาวะการระบายของหัวกระจายน้ำแบบแผ่นคู่ที่ไม่มีรู ซึ่งของไหลหลังออกจากท่อทางเข้าจะไหลแผ่รัศมีภายในช่องว่างระหว่างแผ่นก่อนระบายออกที่ขอบแผ่น ดังนั้น ตัวแปรลักษณะที่ใช้ในการวิเคราะห์จึงอ้างอิงอัตราการไหลต่อหนึ่งหน่วยความยาวขอบของแผ่นและความเร็วลักษณะของการไหลภายในช่องว่างระหว่างแผ่น [Deng et al., 2021; Xu et al., 2022]

ความยาวขอบที่มีผลต่อการระบายของไหลสามารถเขียนได้เป็น

$$L_d = \pi d_p \tag{3}$$

เมื่อ Ld คือความยาวขอบที่มีผลต่อการระบายของไหล และ dp คือเส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นกระจายน้ำ

อัตราการไหลต่อหนึ่งหน่วยความยาวขอบของหัวกระจายน้ำจึงนิยามได้เป็น

$$q = \frac{Q}{L_d} = \frac{Q}{\pi d_p} \tag{4}$$

เมื่อ q คืออัตราการไหลปริมาตรต่อความยาวขอบของหัวกระจายน้ำ และ Q คืออัตราการไหลปริมาตรทั้งหมดของระบบ

เมื่อพิจารณาว่าของไหลระบายออกผ่านช่องเปิดแบบวงแหวนที่มีความกว้าง h_p รอบขอบแผ่น ความเร็วลักษณะของการไหลบริเวณช่องว่างระหว่างแผ่นสามารถเขียนได้เป็น

$$U = \frac{q}{h_p} = \frac{Q}{\pi d_p h_p} \tag{5}$$

ดังนั้น Reynolds number สามารถนิยามได้เป็น

$$Re = \frac{q}{\nu} \tag{6}$$

และเมื่อแทน $\nu = \mu/\rho$ และจัดรูป จะได้ว่า

$$Re = \frac{\rho U h_p}{\mu} = \frac{\rho Q}{\pi \mu d_p} \tag{7}$$

เมื่อ ν คือความหนืดจลน์ของน้ำ ρ คือความหนาแน่นของน้ำ และ μ คือความหนืดพลวัตของน้ำ

สำหรับ Richardson number ในงานวิจัยนี้ นิยามตามความเร็วลักษณะของการไหลบริเวณช่องว่างระหว่างแผ่น U ระยะห่างระหว่างแผ่น h_p และผลต่างอุณหภูมิที่เป็นตัวแทนของสภาวะ buoyancy ภายในถัง ดังนั้น Richardson number สามารถเขียนได้เป็น

$$Ri = \frac{g\beta\Delta T h_p}{U^2} \tag{8}$$

เมื่อ g คือความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง β คือสัมประสิทธิ์การขยายตัวเนื่องจากความร้อนของน้ำ และ ΔT คือผลต่างอุณหภูมิที่เป็นตัวแทนของความแตกต่างระหว่างน้ำที่ไหลเข้าสู่หัวกระจายน้ำกับน้ำแวดล้อมภายในถัง

นิยามตามสมการ (7) และ (8) สอดคล้องกับกรอบการวิเคราะห์ที่ใช้ในบทความก่อนหน้าของงานวิจัยชุดเดียวกัน โดยค่า Re ใช้สะท้อนระดับของแรงเฉือยที่สัมพันธ์กับสภาวะการระบายของหัวกระจายน้ำและเส้นผ่านศูนย์กลางแผ่นเป็นหลัก ขณะที่ค่า Ri ใช้สะท้อนอิทธิพลของแรงลอยตัวต่อแรงเฉือยของการไหลผ่านความเร็วลักษณะ U ระยะห่างระหว่างแผ่น h_p และผลต่างอุณหภูมิที่ได้จากผลการจำลอง (Karim, 2011; Lou et al., 2023)

การประเมินสมรรถนะเชิงพลังงานด้วย ½FOM, lost capacity และ ELH

นอกจากการประเมินความหนาชั้นเทอร์โมไคลน์ แล้ว งานวิจัยนี้ยังประเมินสมรรถนะเชิงพลังงานของถังเก็บน้ำเย็นร่วมด้วย เพื่อให้การตีความผลของการไหลและการแบ่งชั้นอุณหภูมิเชื่อมโยงกับศักยภาพในการใช้งานจริงของระบบปรับอากาศได้ชัดเจนยิ่งขึ้น ตัวชี้วัดที่ใช้ประกอบด้วย ½FOM, lost capacity และ Equivalent Lost Height (ELH) ซึ่งเป็นดัชนีที่สะท้อนผลของการผสมและการเสื่อมสภาพของการแบ่งชั้นในเชิงปริมาณ (Bahnfleth et al., 2003; Abd Majid et al., 2020)

ในการศึกษานี้ การประเมินเชิงพลังงานดำเนินการจากข้อมูลโปรไฟล์อุณหภูมิในช่วงวิเคราะห์เดียวกันกับที่ใช้คำนวณ $\delta window$ คือช่วง 0.40–0.77 m วัดลงจากด้านบนของถัง ทั้งนี้เพื่อให้การเปรียบเทียบระหว่างแต่ละกรณีศึกษาเกิดขึ้นภายใต้โดเมนเดียวกันและลดผลของความแตกต่างจากบริเวณนอกช่วงข้อมูลที่ใช้วิเคราะห์ ดังนั้น ตัวชี้วัดเชิงพลังงานทั้งหมดในบทความนี้จึงเป็นการประเมินในลักษณะ window-based performance indices

กำหนดให้ความสูงของช่วงวิเคราะห์เท่ากับ

$$H_w = 0.77 - 0.40 \tag{9}$$

และกำหนดให้มวลรวมของน้ำภายในช่วงวิเคราะห์เป็น

$$M_w = \rho A H_w \tag{10}$$

เมื่อ A คือพื้นที่หน้าตัดของถัง และ ρ คือความหนาแน่นของน้ำ
ความจุความเย็นเชิงทฤษฎีสูงสุดภายในช่วงวิเคราะห์สามารถเขียนได้เป็น

$$C_{max} = M_w c_p (T_h - T_c) \tag{11}$$

เมื่อ c_p คือความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ T_h คืออุณหภูมิน้ำร้อนที่ไหลเข้าสู่ถัง และ T_c คืออุณหภูมิน้ำเย็นเริ่มต้นภายในถัง

สำหรับความจุความเย็นที่สูญเสียไปภายในช่วงวิเคราะห์ หรือ lost capacity งานวิจัยนี้คำนวณจากผลรวมของพลังงานส่วนที่เบี่ยงเบนจากสภาวะน้ำเย็นอ้างอิงในแต่ละชั้นข้อมูลอุณหภูมิ ดังสมการ

$$C_{lost} = \sum_{j=1}^{n} m_j c_p (T_j - T_c) \tag{12}$$

เมื่อ m_j คือมวลขององค์ประกอบชั้นข้อมูลที่ j ภายในช่วงวิเคราะห์ T_j คืออุณหภูมิขององค์ประกอบนั้น และ n คือจำนวนชั้นข้อมูลที่ใช้ในการประเมิน จากสมการนี้ หากอุณหภูมิในช่วงวิเคราะห์ยังคงใกล้เคียงกับ T_c ค่า C_{lost} จะต่ำ แสดงว่าการสูญเสียสมรรถนะจากการผสมยังมีน้อย ในทางตรงกันข้าม หากอุณหภูมิภายในช่วงวิเคราะห์เพิ่มสูงขึ้น ค่า C_{lost} จะเพิ่มขึ้นตามไป

จากนั้น ½FOM ถูกนิยามในรูปของอัตราส่วนระหว่างความจุความเย็นที่ยังคงใช้งานได้จริงต่อความจุความเย็นเชิงทฤษฎีสูงสุดในช่วงวิเคราะห์ โดยสามารถเขียนได้เป็น

$$½FOM = 1 - \frac{C_{lost}}{C_{max}} \quad (13)$$

นิยามดังกล่าวทำให้ค่า ½FOM เข้าใกล้ 1 เมื่อการสูญเสียสมรรถนะมีค่าน้อย และลดลงเมื่อเกิดการผสมหรือการกระจายตัวของอุณหภูมิมากขึ้น จึงสามารถใช้เป็นตัวแทนของคุณภาพการกักเก็บและคายพลังงานความเย็นภายในช่วงวิเคราะห์ได้อย่างเหมาะสม

สำหรับ Equivalent Lost Height หรือ ELH ใช้เพื่อแปลง lost capacity ให้อยู่ในรูปของความสูงสูญเสียเทียบเท่า ซึ่งช่วยให้การเปรียบเทียบสมรรถนะระหว่างแต่ละกรณีมีความชัดเจนมากขึ้น โดยนิยามได้เป็น

$$ELH = \frac{C_{lost}}{\rho A c_p (T_h - T_c)} \quad (14)$$

ค่า ELH ที่ต่ำแสดงถึงการสูญเสียสมรรถนะที่น้อยกว่า หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือถังสามารถรักษาสภาพการแบ่งชั้นอุณหภูมิไว้ได้ดีกว่า ในขณะที่ค่า ELH ที่สูงสะท้อนว่ามีความสูญเสียจากการผสมและการเสื่อมสภาพของชั้นเทอร์โมไคลน์มากขึ้น

ตัวชี้วัดทั้งสามนี้ถูกใช้ร่วมกับค่า δ_{window}, Re และ Ri เพื่ออธิบายสมรรถนะของหัวกระจายน้ำแบบแผ่นคู่ที่ไม่มีรูภายใต้อัตราการไหลที่ต่างกันในมิติที่เชื่อมโยงทั้งโครงสร้างการไหล คุณภาพการแบ่งชั้นและผลกระทบเชิงพลังงานเข้าด้วยกัน

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

ในบทนี้นำเสนอผลการจำลองเชิง CFD ของหัวกระจายน้ำแบบแผ่นคู่ที่ไม่มีรูภายใต้อัตราการไหล 1.5, 2.5 และ 3.5 L/min โดยพิจารณารูปทรงอ้างอิงที่มีอัตราส่วน dp/D = 0.75 และ hp/di ≈ 0.455 ซึ่งได้จากการศึกษาขั้นก่อนหน้าเป็นกรณีฐานสำหรับการเปรียบเทียบ ผลการวิเคราะห์มุ่งเน้นทั้งในมิติของโครงสร้างการไหล การกระจายอุณหภูมิ และสมรรถนะเชิงพลังงาน เพื่ออธิบายว่าการเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหลส่งผลต่อการพัฒนาของชั้นเทอร์โมไคลน์และพฤติกรรมการผสมภายในถังอย่างไร โดยผลการศึกษาในบทนี้ถูกจัดเรียงจากการพิจารณาเชิงฟิสิกส์ของสนามการไหลและสนามอุณหภูมิ ไปสู่การวิเคราะห์เชิงปริมาณด้วยค่าความหนาชั้นเทอร์โมไคลน์ ตัวเลขไร้มิติ Re และ Ri ตลอดจนตัวชี้วัดเชิงพลังงาน ได้แก่ ½FOM, lost capacity และ ELH เพื่อให้สามารถเชื่อมโยงผลลัพธ์เชิงกลไกเข้ากับสมรรถนะของถังเก็บน้ำเย็นในบริบทการใช้งานจริงได้อย่างชัดเจน

การตีความพฤติกรรมการไหลและสนามอุณหภูมิภายในถัง

ผลการจำลองเชิง CFD แสดงให้เห็นว่า อัตราการไหลมีผลต่อโครงสร้างการไหลบริเวณหัวกระจายน้ำและการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในถังอย่างชัดเจน เมื่อของไหลอุ่นไหลเข้าสู่ถังผ่านหัวกระจายน้ำด้านบน การไหลจะถูกบังคับให้แผ่รัศมีออกจากขอบแผ่นและเคลื่อนตัวไปตามแนวระดับก่อนพัฒนาเป็นสนามการไหลภายในโดเมนของถัง ลักษณะดังกล่าวสอดคล้องกับหน้าที่พื้นฐานของหัวกระจายน้ำในถังแบบแบ่งชั้นอุณหภูมิ ซึ่งมีบทบาทในการลดโมเมนตัมเฉพาะที่ของเจ็ตและช่วยให้การกระจายการไหลเป็นไปอย่างสม่ำเสมอมากขึ้น (Yaïci et al., 2013; Deng et al., 2021; Xu et al., 2022)

เมื่อเพิ่มอัตราการไหลจาก 1.5 เป็น 2.5 และ 3.5 L/min ความเร็วลักษณะบริเวณช่องว่างระหว่างแผ่นเพิ่มขึ้นตามลำดับ ส่งผลให้แรงเฉื่อยมีบทบาทเพิ่มขึ้น ขณะที่อิทธิพลของแรงลอยตัวเมื่อเทียบกับแรงเฉื่อยลดลง อย่างไรก็ตาม ผลของความหนาชั้นเทอร์โมไคลน์ไม่ได้เปลี่ยนแปลงตามอัตราการไหลในลักษณะเชิงเส้น โดยกรณี 2.5 L/min ให้ความหนาชั้นเทอร์โมไคลน์สูงที่สุดเท่ากับ 0.1989 m ขณะที่กรณี 1.5 และ 3.5 L/min ให้ค่า 0.1721 และ 0.1516 m ตามลำดับ ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การเพิ่มหรือลดอัตราการไหลเพียงอย่างเดียวไม่สามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้คุณภาพการแบ่งชั้นได้โดยตรง เนื่องจาก

ผลลัพธ์ยังขึ้นอยู่กับการกระจายโมเมนตัมและลักษณะการไหลที่เกิดจากหัวกระจายน้ำร่วมด้วย ซึ่งสอดคล้องกับ (Moncho-Esteve et al., 2017) ที่พบว่าความเร็วหรือโมเมนตัมของเจ็ตเพียงอย่างเดียวไม่สามารถใช้ทำนายระดับการผสมได้อย่างสมบูรณ์ เนื่องจากรูปแบบและทิศทางการไหลจากอุปกรณ์ทางเข้ามีบทบาทร่วมกัน

สำหรับกรณี 2.5 L/min ซึ่งให้ผลด้อยที่สุดในชุดข้อมูลนี้ ค่า Re และ Ri อยู่ระหว่างอีกสองกรณี คือ Re = 14.56 และ Ri = 0.466 จึงสะท้อนให้เห็นว่า เทอร์โมไคลน์ที่หนาขึ้นในกรณีนี้ไม่สามารถอธิบายจากแรงเฉื่อยหรือแรงลอยตัวเพียงตัวใดตัวหนึ่งได้ แต่มีแนวโน้มเกิดจากผลร่วมระหว่างการแผ่ตัวในแนวรัศมี การพัดพาของไหลบริเวณข้างเคียงเข้าสู่กระแสหลัก และการแทนที่ของน้ำภายในช่วงวิเคราะห์ ภายใต้รูปทรงหัวกระจายน้ำที่กำหนด ลักษณะดังกล่าวสอดคล้องกับงานของ Lou et al. (2023) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า jet entrainment และโครงสร้างการไหลบริเวณอุปกรณ์กระจายน้ำมีผลโดยตรงต่อการผสมและการพัฒนาของเทอร์โมไคลน์ ดังนั้น ผลที่ 2.5 L/min จึงควรตีความว่าเป็นสภาวะที่การทำงานร่วมกันระหว่างอัตราการไหลและรูปทรงหัวกระจายน้ำไม่เอื้อต่อการรักษาชั้นอุณหภูมิเท่ากับอีกสองกรณี มากกว่าการพิจารณาจากค่า Re หรือ Ri เพียงอย่างเดียว

แม้กรณีอัตราการไหล 3.5 L/min จะมีแรงเฉื่อยสูงกว่า แต่กลับให้ชั้นเทอร์โมไคลน์บางที่สุดในช่วงที่ศึกษา แสดงให้เห็นว่าผลของอัตราการไหลขึ้นอยู่กับรูปทรงและลักษณะการกระจายการไหลของหัวกระจายน้ำร่วมด้วย ในงานวิจัยนี้ กลไกการผสมตีความจากความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหล ความเร็วลักษณะ ค่า Re และ Ri ร่วมกับโปรไฟล์อุณหภูมิและค่า δ_{window} ผลที่ได้แสดงว่าอัตราการไหล 2.5 L/min ให้ค่า δ_{window} สูงที่สุด ขณะที่อัตราการไหล 3.5 L/min ให้ค่า δ_{window} ต่ำที่สุด จึงสะท้อนว่าผลของอัตราการไหลต่อการผสมและความหนาของชั้นเทอร์โมไคลน์มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้นภายใต้รูปทรงหัวกระจายน้ำที่ศึกษา

โปรไฟล์อุณหภูมิแนวตั้งและความหนาชั้นเทอร์โมไคลน์

เมื่อพิจารณาโปรไฟล์อุณหภูมิแนวตั้งภายในช่วงวิเคราะห์ 0.40–0.77 m พบว่าอัตราการไหลมีผลโดยตรงต่อความชันของโปรไฟล์อุณหภูมิและความหนาชั้นเทอร์โมไคลน์ภายในถังอย่างชัดเจน โดยกรณีที่ให้การเปลี่ยนผ่านของอุณหภูมิชันกว่าจะแสดงถึงการแบ่งชั้นที่คมชัดและการผสมภายในถังที่ต่ำกว่า ขณะที่กรณีที่โปรไฟล์อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงอย่างค่อยเป็นค่อยไปในแนวดิ่ง จะพบว่าชั้นเทอร์โมไคลน์หนาตัวขึ้นและปริมาตรน้ำเย็นที่สามารถนำไปใช้งานได้จริงลดลง

ผลการคำนวณจากช่วงวิเคราะห์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ค่า δ_{window} ของทั้งสามกรณีมีความแตกต่างกันตามอัตราการไหลที่กำหนด โดยกรณีที่ให้ค่า δ_{window} ต่ำที่สุดคืออัตราการไหล 3.5 L/min ซึ่งมีค่าความหนาเทอร์โมไคลน์เท่ากับ 0.1516 m ขณะที่กรณีที่ให้ค่า δ_{window} สูงที่สุดคืออัตราการไหล 2.5 L/min โดยมีค่าเท่ากับ 0.1989 m แนวโน้มดังกล่าวสะท้อนว่า การเลือกอัตราการไหลที่เหมาะสมมีผลอย่างมากต่อความสามารถของหัวกระจายน้ำในการลดการผสมและรักษาความคมชัดของชั้นอุณหภูมิภายในถัง

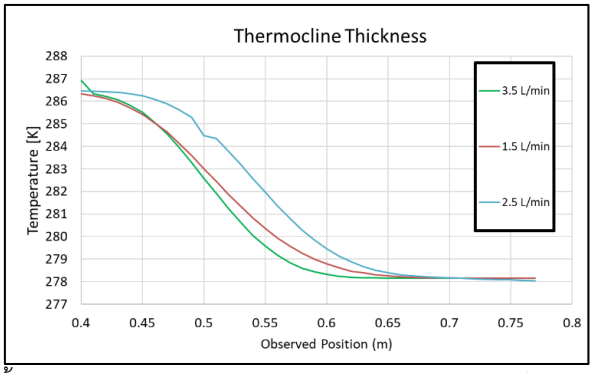
เมื่อพิจารณาในรายละเอียดพบว่า กรณีอัตราการไหล 2.5 L/min ให้ตำแหน่ง $Z_{T@6.5°C}$ ต่ำลงไปมากที่สุดภายในช่วงวิเคราะห์ ส่งผลให้ค่า δ_{window} มีค่ามากที่สุดในสามกรณี แสดงถึงการกระจายตัวของอุณหภูมิในแนวดิ่งที่กว้างกว่าและการหนาตัวของชั้นเทอร์โมไคลน์มากกว่าอีกสองกรณี ในทางตรงกันข้าม กรณีอัตราการไหล 3.5 L/min ให้ตำแหน่ง $Z_{T@6.5°C}$ ใกล้ขอบบนของช่วงวิเคราะห์มากกว่า ส่งผลให้ค่า δ_{window} ต่ำที่สุด และแสดงให้เห็นว่าภายใต้ช่วงข้อมูลที่ใช้ประเมิน กรณีนี้สามารถรักษาการเปลี่ยนผ่านของอุณหภูมิให้อยู่ในช่วงแคบกว่าได้

สำหรับกรณีอัตราการไหล 1.5 L/min ค่า δ_{window} อยู่ในระดับปานกลางระหว่างอีกสองกรณี แสดงว่าการลดอัตราการไหลช่วยลดแรงเฉื่อยของเจ็ตได้ระดับหนึ่ง แต่ยังไม่ได้ให้ความคมชัดของชั้นอุณหภูมิสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับทั้งสามกรณีในชุดข้อมูลนี้ ผลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าอัตราการไหลที่ต่ำลงไม่ได้หมายความว่าจะให้ชั้นเทอร์โมไคลน์บางที่สุดเสมอไป เนื่องจาก

สมรรถนะของหัวกระจายน้ำยังขึ้นอยู่กับสมดุลระหว่างการแผ่ตัวของการไหล การครอบคลุมพื้นที่หน้าตัดของถัง และการจำกัดการผสมภายในโดเมนด้วย

ข้อค้นพบดังกล่าวสอดคล้องกับวรรณกรรมที่รายงานว่า ความหนาชั้นเทอร์โมไคลน์เป็นตัวชี้วัดสำคัญของสมรรถนะถังเก็บน้ำเย็นแบบแบ่งชั้นอุณหภูมิ และมีความไวต่อสภาวะการไหลอย่างชัดเจน โดยเฉพาะในช่วงกระบวนการนำน้ำเย็นไปใช้ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหลสามารถส่งผลต่อระดับการผสมและความชัดของขอบเขตชั้นอุณหภูมิได้โดยตรง (Karim, 2011; Tipasri & Wongwuttanasatian, 2019; Alesbe et al., 2023) ขณะเดียวกัน ผลของงานวิจัยนี้ยังสนับสนุนข้อสังเกตจากการศึกษาขั้นก่อนหน้าของงานวิจัยชุดเดียวกันว่า รูปทรงของหัวกระจายน้ำและสภาวะการเดินระบบต้องได้รับการพิจารณาร่วมกัน เนื่องจากการเลือกรูปทรงที่เหมาะสมเพียงอย่างเดียวอาจยังไม่เพียงพอ หากอัตราการไหลที่ใช้จริงก่อให้เกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิในแนวดิ่งมากเกินไป

เพื่อแสดงความแตกต่างของโปรไฟล์อุณหภูมิในแต่ละกรณีและอธิบายที่มาของการคำนวณค่า δ_{window} โปรไฟล์อุณหภูมิแนวตั้งภายในช่วงวิเคราะห์ของอัตราการไหล 1.5, 2.5 และ 3.5 L/min ถูกนำมาเปรียบเทียบร่วมกัน ดังแสดงในรูปที่ 6 โดยในรูปดังกล่าวแสดงเส้นอ้างอิงที่อุณหภูมิ 6.5 °C และขอบบนของช่วงวิเคราะห์ที่ระดับ 0.40 m เพื่อให้เห็นขอบเขตที่ใช้ในการคำนวณค่า δ_{window} ได้อย่างชัดเจน



รูปที่ 6 โปรไฟล์อุณหภูมิแนวตั้งภายในช่วงวิเคราะห์ 0.40–0.77 m สำหรับอัตราการไหล 1.5, 2.5 และ 3.5 L/min และเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินค่า δ_{window}

ตารางที่ 3 ค่าตำแหน่ง $Z_{T@6.5°C}$ และค่า δ_{window} ของอัตราการไหล 1.5, 2.5 และ 3.5 L/min

กรณี	Q (L/min)	$Z_{T@6.5°C}$ (m)	δ_{window} (m)
F1	1.5	0.5721	0.1721
F2	2.5	0.5989	0.1989
F3	3.5	0.5516	0.1516

พฤติกรรมของ Re และ Ri ภายใต้อัตราการไหลแปรผัน

จากนิยามในหัวข้อ 2.6 พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหล Q ค่า U และ Re จะเพิ่มขึ้นตามลำดับ ขณะที่ค่า Ri จะมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากแรงเฉื่อยของการไหลมีบทบาทเด่นมากขึ้นเมื่อเทียบกับแรงลอยตัว ผลการคำนวณในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า กรณีอัตราการไหล 1.5 L/min ให้ค่า Re ต่ำที่สุดเท่ากับ 8.74 และให้ค่า Ri สูงที่สุดเท่ากับ 1.270 ขณะที่กรณีอัตราการไหล 3.5 L/min ให้ค่า Re สูงที่สุดเท่ากับ 20.38 และให้ค่า Ri ต่ำที่สุดเท่ากับ 0.250 ส่วนกรณีอัตราการไหล 2.5 L/min ให้ค่า Re และ Ri เท่ากับ 14.56 และ 0.466 ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในระดับกึ่งกลางระหว่างอีกสองกรณี

แนวโน้มดังกล่าวแสดงถึงความสัมพันธ์เชิงกายภาพของการไหลบริเวณหัวกระจายน้ำแบบแผ่นคู่ที่ไม่มีรูได้อย่างชัดเจน กล่าวคือ เมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น ความเร็วลักษณะของการไหลในช่องว่างระหว่างแผ่นจะเพิ่มขึ้นโดยตรง ส่งผลให้แรงเฉื่อยของเจ็ตมีอิทธิพลมากขึ้น และทำให้ค่า Re เพิ่มขึ้นตามอัตราการไหล ในเวลาเดียวกัน เมื่อแรงเฉื่อยเพิ่มขึ้นเร็วกว่าผล

ของแรงลอยตัว ค่า Ri จึงลดลงตามไปด้วย ซึ่งหมายความว่าระบบมีแนวโน้มถูกครอบงำด้วยแรงเฉื่อยมากขึ้นเมื่อใช้อัตราการไหลสูงขึ้น

เมื่อพิจารณาร่วมกับผลในหัวข้อ 3.1 และ 3.2 จะเห็นได้ว่าแนวโน้มของ Re และ Ri สอดคล้องกับลักษณะของสนามการไหลและการกระจายอุณหภูมิภายในถัง กล่าวคือ กรณีที่มีค่า Re สูงและค่า Ri ต่ำ มีแนวโน้มเกิดการพัดพาแบบ entrainment และการกระจายตัวของอุณหภูมิในแนวดิ่งเด่นชัดขึ้น ขณะที่กรณีที่มีค่า Re ต่ำและค่า Ri สูง จะมีแนวโน้มที่แรงลอยตัวมีบทบาทเด่นกว่าและการไหลมีความรุนแรงน้อยกว่า อย่างไรก็ตาม ผลการศึกษาในงานวิจัยนี้ยังแสดงให้เห็นว่าเทอร์โมไคลน์ไม่ได้ขึ้นอยู่กับค่า Re หรือ Ri เพียงตัวใดตัวหนึ่งเท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับรูปแบบการแผ่ตัวของเจ็ต การครอบคลุมพื้นที่หน้าตัดของถัง และปฏิสัมพันธ์ระหว่างการไหลกับรูปทรงของหัวกระจายน้ำด้วย

ข้อสังเกตนี้มีความสำคัญ เนื่องจากแม้ในทางทฤษฎีค่า Ri ที่สูงมักสัมพันธ์กับการคงตัวของชั้นอุณหภูมิ แต่ในทางปฏิบัติสมรรถนะของถังอาจไม่ได้ดีที่สุดเสมอไปหากการแผ่ตัวของการไหลยังไม่เหมาะสม ในทางตรงกันข้าม กรณีที่มีค่า Re สูงกว่าอาจยังให้ค่า δ_{window} ต่ำได้ หากหัวกระจายน้ำสามารถควบคุมทิศทางและการกระจายของการไหลได้ดีเพียงพอ ผลดังกล่าวสอดคล้องกับวรรณกรรมที่รายงานว่า Re และ Ri เป็นตัวแปรที่มีประโยชน์ในการอธิบายกลไกการไหล แต่ไม่ควรใช้เป็นเกณฑ์ตัดสินสมรรถนะของถังเพียงลำพัง เนื่องจากผลสุดท้ายยังขึ้นอยู่กับพฤติกรรมการไหลที่เกิดขึ้นจริงภายในถัง (Karim, 2011; Lou et al., 2023; Xu et al., 2022)

โดยสรุป ค่า Re และ Ri ในงานวิจัยนี้ทำหน้าที่เป็นตัวแปรเชิงกลไกที่ช่วยอธิบายผลของอัตราการไหลต่อพฤติกรรมการไหลบริเวณหัวกระจายน้ำและการพัฒนาของเทอร์โมไคลน์ภายในถังได้อย่างเป็นระบบ และเมื่อพิจารณาร่วมกับค่า δ_{window} จะช่วยให้สามารถตีความสมรรถนะของรูปทรงอ้างอิงภายใต้สภาวะการไหลที่แตกต่างกันได้ชัดเจนมากขึ้น ทั้งนี้ ผลของตัวเลขไร้มิติดังกล่าวจะถูกนำไปพิจารณาร่วมกับตัวชี้วัดเชิงพลังงานในหัวข้อถัดไป เพื่อประเมินว่าสภาวะการไหลที่แตกต่างกันส่งผลต่อความสามารถในการรักษาและคายพลังงานความเย็นของถังอย่างไรในเชิงปริมาณ

ตารางที่ 4 ค่าความเร็วลักษณะ U และตัวเลขไร้มิติ Re และ Ri ของอัตราการไหล 1.5, 2.5 และ 3.5 L/min

กรณี	Q **(L/min)**	U **(m/s)**	**Re**	**Ri**
F1	1.5	0.00442	8.74	1.270
F2	2.5	0.00737	14.56	0.466
F3	3.5	0.01032	20.38	0.250

ผลการประเมิน ½FOM, lost capacity และ ELH

นอกจากการพิจารณาเชิงกลไกผ่านสนามการไหล โปรไฟล์อุณหภูมิแนวตั้ง และค่าตัวเลขไร้มิติ Re และ Ri แล้ว งานวิจัยนี้ยังประเมินสมรรถนะเชิงพลังงานของถังเก็บน้ำเย็นร่วมด้วย เพื่อสะท้อนผลกระทบของอัตราการไหลต่อความสามารถของระบบในการรักษาและส่งคืนพลังงานความเย็นภายในช่วงวิเคราะห์ 0.40–0.77 m ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ตัวชี้วัดที่ใช้ประกอบด้วย ½FOM, lost capacity และ Equivalent Lost Height (ELH) ซึ่งเป็นตัวชี้วัดที่ช่วยอธิบายผลของการผสมและการเสื่อมสภาพของการแบ่งชั้นอุณหภูมิในเชิงปริมาณได้อย่างชัดเจน โดยในการศึกษานี้ ตัวชี้วัดดังกล่าวถูกประเมินในลักษณะ window-based performance indices เพื่อให้สอดคล้องกับขอบเขตข้อมูลอุณหภูมิที่ใช้วิเคราะห์จริงในงานวิจัยนี้ แนวคิดการใช้ lost capacity และ equivalent lost height เป็นตัวชี้วัดสมรรถนะของถังเก็บน้ำเย็นสอดคล้องกับวรรณกรรมด้าน TES ที่ใช้ตัวชี้วัดเชิงพลังงานร่วมกับความหนาชั้นเทอร์โมไคลน์ในการอธิบายคุณภาพของการแบ่งชั้นและความสูญเสียจากการผสม

ผลการคำนวณแสดงให้เห็นว่า ค่า ½FOM, lost capacity และ ELH ของทั้งสามกรณีมีความแตกต่างกันตามอัตราการไหลที่กำหนด โดยกรณีที่ให้ค่า ½FOM สูงที่สุดคืออัตราการไหล 3.5 L/min ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.748 ขณะที่กรณีที่ให้ค่า

½FOM ต่ำที่สุดคืออัตราการไหล 2.5 L/min เท่ากับ 0.658 ส่วนกรณีอัตราการไหล 1.5 L/min ให้ค่า ½FOM เท่ากับ 0.726 แนวโน้มดังกล่าวสะท้อนว่า กรณีที่สามารถรักษาการกระจายอุณหภูมิภายในช่วงวิเคราะห์ให้ใกล้เคียงกับสภาวะน้ำเย็นอ้างอิงได้มากกว่า จะมีการสูญเสียความสามารถในการกักเก็บพลังงานความเย็นน้อยกว่า และส่งผลให้ค่า ½FOM สูงขึ้นตามไปด้วย

ในส่วนของ lost capacity พบว่า กรณีที่มีการผสมภายในช่วงวิเคราะห์มากกว่า จะให้ค่า lost capacity สูงกว่าอย่างชัดเจน เนื่องจากอุณหภูมิภายในโดเมนที่ใช้ประเมินเบี่ยงเบนออกจากสภาวะน้ำเย็นอ้างอิงมากขึ้น ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าอัตราการไหล 2.5 L/min ให้ค่า lost capacity สูงที่สุดเท่ากับ 2.659 MJ ขณะที่อัตราการไหล 3.5 L/min ให้ค่า lost capacity ต่ำที่สุดเท่ากับ 1.962 MJ ส่วนกรณีอัตราการไหล 1.5 L/min ให้ค่า lost capacity เท่ากับ 2.132 MJ แนวโน้มดังกล่าวสอดคล้องกับผลของค่า δ_{window} ในหัวข้อก่อนหน้า กล่าวคือ กรณีที่เทอร์โมไคลน์หนาตัวขึ้นมักมีแนวโน้มสูญเสียศักยภาพในการรักษาพลังงานความเย็นมากขึ้น ขณะที่กรณีที่เทอร์โมไคลน์บางและคมชัดกว่า จะสามารถจำกัดการสูญเสียสมรรถนะภายในช่วงวิเคราะห์ได้ดีกว่า

สำหรับค่า ELH ซึ่งเป็นตัวแทนของความสูงสูญเสียเทียบเท่า พบว่าแนวโน้มของผลลัพธ์สอดคล้องกับ lost capacity โดยกรณีที่มีค่า ELH ต่ำกว่าจะสะท้อนว่าความสูญเสียเชิงพลังงานเมื่อเทียบในรูปของความสูงสมมูลของถังมีค่าน้อยกว่า และแสดงถึงคุณภาพการแบ่งชั้นที่ดีกว่าในเชิงการใช้งานจริง ในงานวิจัยนี้ อัตราการไหล 3.5 L/min ให้ค่า ELH ต่ำที่สุดเท่ากับ 0.093 m ในขณะที่อัตราการไหล 2.5 L/min ให้ค่า ELH สูงที่สุดเท่ากับ 0.126 m ส่วนกรณีอัตราการไหล 1.5 L/min ให้ค่า ELH เท่ากับ 0.101 m ผลดังกล่าวยืนยันว่า การพิจารณาความหนาเทอร์โมไคลน์เพียงอย่างเดียวอาจยังไม่เพียงพอ หากต้องการอธิบายผลของการผสมในเชิงสมรรถนะพลังงานอย่างครบถ้วน เนื่องจาก ELH และ lost capacity สามารถสะท้อนผลกระทบดังกล่าวได้ในมิติที่แปลความหมายต่อการใช้งานจริงได้ง่ายกว่า

เมื่อพิจารณาร่วมกับผลในหัวข้อ 3.2 และ 3.3 จะเห็นได้ว่า ในชุดข้อมูลนี้กรณีอัตราการไหล 3.5 L/min ให้ทั้งค่า δ_{window} ต่ำที่สุด ค่า ½FOM สูงที่สุด และค่า lost capacity กับ ELH ต่ำที่สุดพร้อมกัน จึงสามารถตีความได้ว่าเป็นกรณีที่ให้สมรรถนะโดยรวมดีที่สุดภายใต้รูปทรงอ้างอิงนี้ ในทางตรงกันข้าม กรณีอัตราการไหล 2.5 L/min ให้ค่า δ_{window} สูงที่สุดร่วมกับค่า ½FOM ต่ำที่สุด และค่า lost capacity กับ ELH สูงที่สุด จึงสะท้อนถึงการสูญเสียสมรรถนะเชิงพลังงานมากที่สุดในสามกรณีศึกษา ส่วนกรณีอัตราการไหล 1.5 L/min ให้ผลอยู่ในระดับปานกลาง ทั้งในด้านความหนาชั้นเทอร์โมไคลน์และตัวชี้วัดเชิงพลังงาน

ข้อค้นพบนี้สอดคล้องกับวรรณกรรมที่ชี้ว่า การประเมินสมรรถนะของถังเก็บน้ำเย็นแบบแบ่งชั้นอุณหภูมิควรพิจารณาร่วมกันทั้งตัวชี้วัดเชิงการแบ่งชั้นและตัวชี้วัดเชิงพลังงาน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของสนามการไหลอาจส่งผลต่อการสูญเสียพลังงานสะสมภายในถังในลักษณะที่ไม่สามารถอธิบายได้จากความหนาชั้นเทอร์โมไคลน์เพียงอย่างเดียวขณะเดียวกัน วรรณกรรมยังรายงานด้วยว่าอัตราการไหลที่สูงขึ้นมักทำให้การผสมเพิ่มขึ้นและลดประสิทธิภาพการเก็บพลังงานในหลายกรณี แต่ผลที่ได้จริงยังขึ้นกับรูปแบบหัวกระจายน้ำและโครงสร้างการไหลภายในถังอย่างมีนัยสำคัญ

เพื่อสรุปผลเชิงปริมาณของสมรรถนะเชิงพลังงานในแต่ละกรณีศึกษา ค่า ½FOM, lost capacity และ ELH ของอัตราการไหล 1.5, 2.5 และ 3.5 L/min แสดงไว้ในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ค่า ½FOM, lost capacity และ ELH ของอัตราการไหล 1.5, 2.5 และ 3.5 L/min

กรณี	Q **(L/min)**	½FOM	**lost capacity (MJ)**	**ELH (m)**
F1	1.5	0.726	2.132	0.101
F2	2.5	0.658	2.659	0.126
F3	3.5	0.748	1.962	0.093

การสังเคราะห์ผลและข้อเสนอแนะเชิงออกแบบ

เมื่อพิจารณาผลจากการศึกษาขั้นก่อนหน้าร่วมกับผลการจำลองในงานวิจัยฉบับนี้ พบว่าสมรรถนะของหัวกระจายน้ำแบบแผ่นคู่ที่ไม่มีรูในถังเก็บน้ำเย็นแบบแบ่งชั้นอุณหภูมิเป็นผลร่วมของทั้งรูปทรงหัวกระจายน้ำและอัตราการไหล โดยรูปทรงอ้างอิงที่มีอัตราส่วน dp/D = 0.75 และ hp/di ≈ 0.455 ซึ่งได้จากการศึกษาขั้นก่อนหน้า ถูกนำมาใช้เป็นกรณีฐานสำหรับประเมินผลของอัตราการไหล 1.5, 2.5 และ 3.5 L/min ในงานวิจัยฉบับนี้

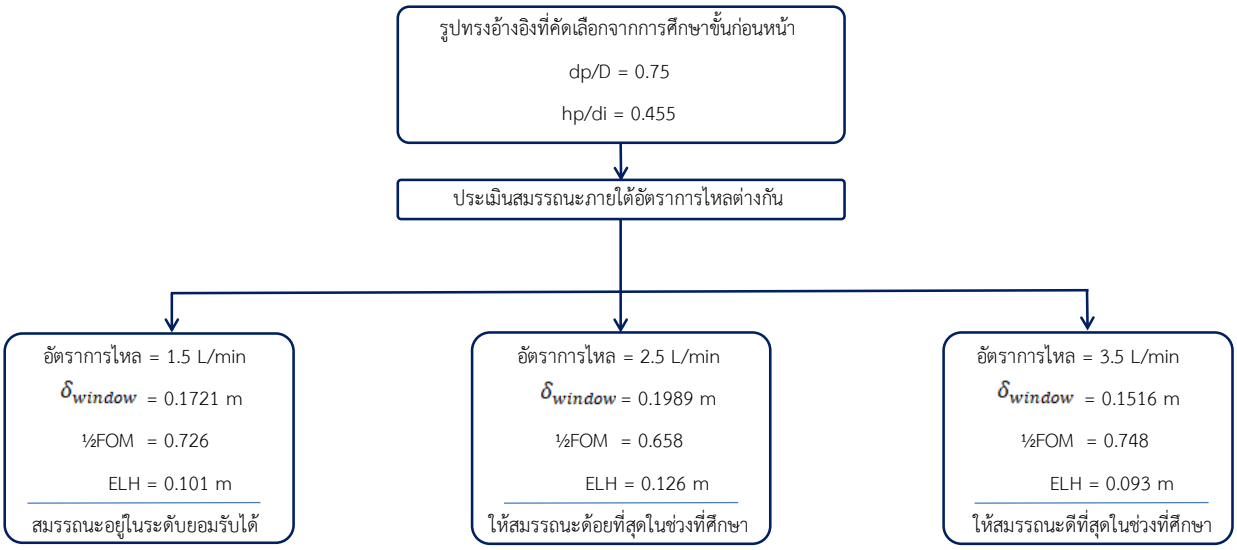
ผลการศึกษาภายใต้รูปทรงอ้างอิงดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า อัตราการไหล 3.5 L/min ให้สมรรถนะโดยรวมดีที่สุดในชุดข้อมูลนี้ โดยมีค่า δ_{window} ต่ำที่สุดเท่ากับ 0.1516 m ค่า ½FOM สูงที่สุดเท่ากับ 0.748 และค่า lost capacity กับ ELH ต่ำที่สุดเท่ากับ 1.962 MJ และ 0.093 m ตามลำดับ ขณะที่อัตราการไหล 2.5 L/min ให้ผลด้อยที่สุด โดยมีค่า δ_{window} สูงที่สุดเท่ากับ 0.1989 m ค่า ½FOM ต่ำที่สุดเท่ากับ 0.658 และค่า lost capacity กับ ELH สูงที่สุดเท่ากับ 2.659 MJ และ 0.126 m ตามลำดับ ส่วนอัตราการไหล 1.5 L/min ให้ผลอยู่ในระดับปานกลาง โดยมีค่า δ_{window} เท่ากับ 0.1721 m ค่า ½FOM เท่ากับ 0.726 และค่า ELH เท่ากับ 0.101 m

เมื่อพิจารณาร่วมกับค่า Re และ Ri พบว่า อัตราการไหล 3.5 L/min แม้จะให้ค่า Re สูงที่สุดและค่า Ri ต่ำที่สุด แต่กลับให้ค่า δ_{window} ต่ำที่สุดและให้สมรรถนะเชิงพลังงานดีที่สุดในช่วงที่ศึกษา แสดงให้เห็นว่า Re และ Ri ไม่สามารถใช้ตัดสินสมรรถนะของถังได้เพียงลำพัง แต่ต้องพิจารณาร่วมกับลักษณะการกระจายอุณหภูมิและตัวชี้วัดเชิงพลังงานด้วย ผลดังกล่าวสะท้อนว่า การเลือกอัตราการไหลที่เหมาะสมควรพิจารณาร่วมกับรูปทรงของหัวกระจายน้ำ เนื่องจากทั้งสองปัจจัยมีผลต่อพฤติกรรมการไหล การผสม และการรักษาชั้นเทอร์โมไคลน์ภายในถัง

จากผลข้างต้น สามารถสังเคราะห์เป็นแผนภาพข้อเสนอแนะเชิงออกแบบเบื้องต้น ดังแสดงในรูปที่ 7 โดยแบ่งการพิจารณาเป็นสองขั้นตอน คือ การเลือกรูปทรงอ้างอิงของหัวกระจายน้ำจากผลการศึกษาขั้นก่อนหน้า และการเลือกอัตราการไหลภายใต้รูปทรงดังกล่าวจากผลของงานวิจัยฉบับนี้ สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในทางปฏิบัติ รูปทรงที่มีอัตราส่วน dp/D = 0.75 และ hp/di ≈ 0.455 สามารถใช้เป็นรูปทรงอ้างอิงเบื้องต้น สำหรับการออกแบบหัวกระจายน้ำแบบแผ่นคู่ที่ไม่มีรูในถังที่มีลักษณะใกล้เคียงกับกรณีศึกษา โดยควรประเมินอัตราการไหลร่วมกับโปรไฟล์อุณหภูมิ ความหนาชั้นเทอร์โมไคลน์และสมรรถนะเชิงพลังงานของถัง ไม่ควรเลือกอัตราการไหลจากค่า Re หรือ Ri เพียงอย่างเดียว

โดยแผนภาพข้อเสนอแนะเชิงออกแบบที่นำเสนอควรตีความภายใต้ขอบเขตของกรณีศึกษานี้เท่านั้น กล่าวคือ ใช้สำหรับถังทรงกระบอกขนาดอ้างอิงในงานวิจัยนี้ หัวกระจายน้ำแบบแผ่นคู่ที่ไม่มีรูที่มีอัตราส่วน dp/D = 0.75 และ hp/di ≈ 0.455 และช่วงอัตราการไหล 1.5, 2.5 และ 3.5 L/min โดยตัวชี้วัดเชิงพลังงานเป็นการประเมินแบบ window-based ภายในช่วงวิเคราะห์ 0.40–0.77 m ดังนั้น การนำผลไปใช้อ้างอิงกับถังขนาดอื่น รูปทรงหัวกระจายน้ำอื่น หรือช่วงอัตราการไหลอื่นควรพิจารณาภายใต้ข้อจำกัดดังกล่าว ซึ่งในภาพรวม ที่อัตราการไหล 3.5 L/min เป็นสภาวะการเดินระบบที่เหมาะสมที่สุดในช่วงที่ศึกษา อัตราการไหล 1.5 L/min ให้ผลอยู่ในระดับยอมรับได้ ส่วนอัตราการไหล 2.5 L/min ให้ผลด้อยที่สุดทั้งในด้านความหนาชั้นและตัวชี้วัดเชิงพลังงาน ข้อค้นพบดังกล่าวช่วยให้สามารถเชื่อมโยงผลของการคัดเลือกรูปทรงและผลของอัตราการไหลไปสู่ข้อเสนอแนะเชิงออกแบบสำหรับหัวกระจายน้ำแบบแผ่นคู่ที่ไม่มีรูได้อย่างเป็นระบบ

การตีความผลการศึกษานี้อยู่ภายใต้ขอบเขตของแบบจำลองสองมิติแบบสมมาตร โดยกำหนดผนังถังเป็นแบบไม่ถ่ายเทความร้อน และกำหนดอุณหภูมิทางเข้าและอัตราการไหลให้คงที่ในแต่ละกรณี เงื่อนไขดังกล่าวถูกกำหนดเพื่อแยกอิทธิพลของอัตราการไหลและรูปทรงหัวกระจายน้ำออกจากปัจจัยแวดล้อมอื่น ทำให้สามารถเปรียบเทียบสมรรถนะของแต่ละกรณีภายใต้เงื่อนไขเดียวกันได้อย่างชัดเจน ดังนั้น ผลที่ได้จึงเหมาะสำหรับใช้เป็นแนวทางในการเลือกอัตราการไหลร่วมกับรูปทรงหัวกระจายน้ำภายในขอบเขตของถังและช่วงอัตราการไหลที่ศึกษา



รูปที่ 7 แผนภาพข้อเสนอแนะเชิงออกแบบแบบบูรณาการสำหรับการเลือกรูปทรงและอัตราการไหลของหัวกระจายน้ำแบบแผ่นคู่ที่ไม่มีรูในถังเก็บน้ำเย็นแบบแบ่งชั้นอุณหภูมิ

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้ศึกษาผลของอัตราการไหลต่อสมรรถนะของหัวกระจายน้ำแบบแผ่นคู่ที่ไม่มีรูในถังเก็บน้ำเย็นแบบแบ่งชั้นอุณหภูมิ โดยใช้รูปทรงอ้างอิงที่มีอัตราส่วน dp/D = 0.75 และ hp/di ≈ 0.455 จากการศึกษาขั้นก่อนหน้า และทำการจำลองเชิง CFD ภายใต้อัตราการไหล 1.5, 2.5 และ 3.5 L/min เพื่อประเมินความหนาชั้นเทอร์โมไคลน์ ตัวเลขไร้มิติ Re และ Ri รวมถึงตัวชี้วัดเชิงพลังงาน ได้แก่ ½FOM, lost capacity และ ELH

ผลการศึกษาพบว่า อัตราการไหลมีผลต่อคุณภาพการแบ่งชั้นอุณหภูมิและสมรรถนะเชิงพลังงานของถังอย่างชัดเจน โดยอัตราการไหล 3.5 L/min ให้ผลดีที่สุดในช่วงที่ศึกษา มีค่า δ_{window} ต่ำที่สุดเท่ากับ 0.1516 m ค่า ½FOM สูงที่สุดเท่ากับ 0.748 และค่า lost capacity กับ ELH ต่ำที่สุดเท่ากับ 1.962 MJ และ 0.093 m ตามลำดับ ส่วนอัตราการไหล 1.5 L/min ให้ผลอยู่ในระดับยอมรับได้ โดยมีค่า δ_{window} เท่ากับ 0.1721 m ค่า ½FOM เท่ากับ 0.726 และค่า ELH เท่ากับ 0.101 m ขณะที่อัตราการไหล 2.5 L/min ให้ผลด้อยที่สุด โดยมีค่า δ_{window} สูงที่สุดเท่ากับ 0.1989 m ค่า ½FOM ต่ำที่สุดเท่ากับ 0.658 และค่า lost capacity กับ ELH สูงที่สุดเท่ากับ 2.659 MJ และ 0.126 m ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาร่วมกับค่า Re และ Ri พบว่า การเพิ่มอัตราการไหลทำให้ Re เพิ่มขึ้นและ Ri ลดลงตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ค่า Re และ Ri ไม่สามารถใช้เป็นเกณฑ์ตัดสินสมรรถนะได้เพียงลำพัง เนื่องจากผลที่เกิดขึ้นเป็นผลร่วมระหว่างสภาวะการไหลและรูปทรงของหัวกระจายน้ำ ดังนั้น การประเมินสมรรถนะควรพิจารณาร่วมกันทั้งโปรไฟล์อุณหภูมิ ความหนาชั้นเทอร์โมไคลน์และตัวชี้วัดเชิงพลังงาน

โดยสรุป ภายใต้รูปทรงอ้างอิง dp/D = 0.75 และ hp/di ≈ 0.455 อัตราการไหล 3.5 L/min เป็นสภาวะการเดินระบบที่เหมาะสมที่สุดในขอบเขตที่ศึกษา ขณะที่อัตราการไหล 1.5 L/min สามารถพิจารณาเป็นทางเลือกที่ยอมรับได้ และอัตราการไหล 2.5 L/min ไม่ใช่สภาวะที่เหมาะสมสำหรับรูปทรงอ้างอิงนี้ ผลการศึกษานี้จึงสามารถใช้เป็นแนวทางเบื้องต้นในการเลือกอัตราการไหลร่วมกับรูปทรงของหัวกระจายน้ำแบบแผ่นคู่ที่ไม่มีรูสำหรับถังเก็บน้ำเย็นแบบแบ่งชั้นอุณหภูมิได้

เอกสารอ้างอิง

Abd Majid, M. A., Muhammad, M., Hampo, C. C., & Akmar, A. B. (2020). Analysis of a thermal energy storage tank in a large district cooling system: A case study. *Processes,* 8(9), 1158. https://doi.org/10.3390/pr8091158

Alesbe, I., Abdul Wahhab, H. A., & Aljabair, S. (2023). Transient study of thermal stratification of full-scale chilled water storage tank during optimum discharge condition. *Journal of Energy Storage,* 65, 107236. https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107236

Bahnfleth, W. P., & Musser, A. (1998). Thermal performance of a full-scale stratified chilled-water thermal storage tank. *ASHRAE Transactions,* 104(2), 377–388.

Bahnfleth, W. P., Song, J., & Cimbala, J. M. (2003). Measured and modeled charging of a stratified chilled water thermal storage tank with slotted pipe diffusers. *HVAC&R Research,* 9(4), 467–491. https://doi.org/10.1080/10789669.2003.10391075

Deng, Y., Sun, D., Niu, M., Yu, B., & Bian, R. (2021). Performance assessment of a novel diffuser for stratified thermal energy storage tanks—The nonequal-diameter radial diffuser. *Journal of Energy Storage,* 35, 102276. https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102276

Glazer, J. (2019). *ASHRAE design guide for cool thermal storage* (2nd ed.). ASHRAE.

Jodeiri, A. M., Soppelsa, A., Turrin, F., Pipiciello, M., Cozzini, M., & Fedrizzi, R. (2024). Numerical and experimental investigation of stratified water storage tanks: An enhanced adaptive-grid model. *Applied Thermal Engineering,* 248, 123113. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123113

Karim, M. A. (2011). Experimental investigation of a stratified chilled-water thermal storage system. *Applied Thermal Engineering,* 31(11–12), 1853–1860. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.12.019

Kereikulova, A., Yerdesh, Y., Belyayev, Y., Toleukhanov, A., Botella, O., Kheiri, A., & Khalij, M. (2026). Impact of inlet configuration and flow rates on thermal storage stratification and efficiency. *Thermo,* 6(1), 16. https://doi.org/10.3390/thermo6010016

Li, Q., Lin, W., Huang, X., Tai, Y., Ding, X., Zhang, Y., & Gao, W. (2022). Thermocline dynamics in a thermally stratified water tank under different operation modes. *Applied Thermal Engineering,* 212, 118560. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118560

Lou, W., Baudin, N., Roux, S., Fan, Y., & Luo, L. (2023). Impact of buoyant jet entrainment on the thermocline behavior in a single-medium thermal energy storage tank. *Journal of Energy Storage,* 71, 108017. https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108017

Moncho-Esteve, I. J., Gasque, M., González-Altozano, P., & Palau-Salvador, G. (2017). Simple inlet devices and their influence on thermal stratification in a hot water storage tank. *Energy and Buildings,* 150, 625–638. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.06.012

Parida, D. R., Advaith, S., Dani, N., & Basu, S. (2022). Assessing the impact of a novel hemispherical diffuser on a single-tank sensible thermal energy storage system. *Renewable Energy,* 183, 202–218. https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.10.099

Tipasri, W., & Wongwuttanasatian, T. (2019). Effect of height to diameter ratio of chilled water storage tank on temperature gradient during discharging. *Energy Procedia,* 156, 254–258. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.138

Wang, X., Duan, L., Gao, G., Zheng, W., Sun, D., Li, J., Fu, J., & Lin, R. (2025). Analysis and optimization of thermal storage performance of thermocline storage tank with different water distribution structures. *Processes,* 13(3), 629. https://doi.org/10.3390/pr13030629

Weiss, J., Ortega-Fernández, I., Müller, R., Bielsa, D., & Fluri, T. (2021). Improved thermocline initialization through optimized inlet design for single-tank thermal energy storage systems. *Journal of Energy Storage,* 42, 103088. https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103088

Xing, Y., Zhang, X., Zhang, Z., & Liu, F. (2024). The impact of inlet structure on stratification performance in thermal storage tanks: A study through simulation and experimental analysis. *Applied Sciences,* 14(12), 5248. https://doi.org/10.3390/app14125248

Xu, C., Liu, M., Jiao, S., Tang, H., & Yan, J. (2022). Experimental study and analytical modeling on the thermocline hot water storage tank with radial plate-type diffuser. *International Journal of Heat and Mass Transfer,* 186, 122478. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122478

Yaïci, W., Ghorab, M., Entchev, E., & Hayden, S. (2013). Three-dimensional unsteady CFD simulations of a thermal storage tank performance for optimum design. *Applied Thermal Engineering,* 60(1–2), 152–163. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.07.001