



วารสารวิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม Journal of Engineering and Innovation

บทความวิจัย

การวิเคราะห์ระบบถ่ายเทความร้อนของห้องปฏิบัติการสอบเทียบเคลื่อนที่ ด้วยวิธีไฟไนต์ เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ

Analysis of heat transfer of mobile calibration laboratory using 3-D finite element method

อิสราภรณ์ อมรสวัสดิ์วัฒนา

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือวัดและอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ แขวงวงศ์สว่าง
เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

Issaraporn Amornsawatwattana

Department of Instrumentation and Electronics Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology
North Bangkok, Bangkok 10800

Corresponding author.

E-mail: issaraporn.a@eng.kmutnb.ac.th; Telephone: 08 9453 8344

วันที่รับบทความ 6 พฤษภาคม 2564; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 24 มิถุนายน 2564 ; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 2 สิงหาคม 2564

วันที่ตอบรับบทความ 28 สิงหาคม 2564

บทคัดย่อ

ปัจจุบันตามมาตรฐานห้องปฏิบัติการสอบเทียบเคลื่อนที่จะต้องมีการควบคุมสภาวะภายใน เช่น อุณหภูมิ ความชื้น และความร้อน ซึ่งการควบคุมอุณหภูมิให้เหมาะสมทำให้มั่นใจได้ว่าห้องปฏิบัติการสอบเทียบเคลื่อนที่นั้นทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ดังนั้นถ้าทราบถึงอุณหภูมิภายในห้องปฏิบัติการสอบเทียบเคลื่อนที่ จะสามารถจัดระบบภายในห้องปฏิบัติการสอบเทียบเคลื่อนที่ให้มีคุณภาพยิ่งขึ้น นอกจากนี้ระยะเวลาเป็นสิ่งที่สำคัญในการออกแบบห้องปฏิบัติการสอบเทียบเคลื่อนที่ ถ้าอุณหภูมิเข้าสู่สมดุลทางความร้อนในเวลาเร็วที่สุดก็จะสามารถทำงานได้ทันเวลาที่ลูกค้าต้องการและเพิ่มความพอใจกับลูกค้ามากขึ้น บทความวิจัยนี้ได้นำเสนอแบบจำลองคณิตศาสตร์ในห้องปฏิบัติการสอบเทียบเคลื่อนที่ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยอันดับสอง การจำลองผลได้ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ซึ่งพัฒนาขึ้นเองด้วยโปรแกรม MATLAB รวมทั้งประยุกต์ใช้การประมาณค่าแบบย้อนหลังที่ขึ้นกับเวลา โดยพิจารณาฉนวนที่ใช้เป็นผนังห้องปฏิบัติการสอบเทียบเคลื่อนที่ 3 ชนิด คือ ฉนวนโพลียูรีเทน ฉนวนโพลีสไตรีน และฉนวนใยแก้ว พบว่าฉนวนโพลียูรีเทนทำให้อุณหภูมิภายในห้องปฏิบัติการสอบเทียบเคลื่อนที่เข้าสู่สมดุลทางความร้อนเร็วที่สุดใช้เวลา 20 นาที ที่อุณหภูมิ 25 °C รองมาเป็นฉนวนโพลีสไตรีนและฉนวนใยแก้ว ตามลำดับเนื่องจากฉนวนโพลียูรีเทนนั้นมีค่าความสามารถในการแพร่ความร้อนที่น้อยที่สุด ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนจากภายนอกห้องปฏิบัติการสอบเทียบเคลื่อนที่ที่ไม่สามารถถ่ายเทความร้อนเข้ามาภายในห้องปฏิบัติการสอบเทียบเคลื่อนที่ได้หรือถ่ายเทเข้ามาได้น้อย [1-2,14]

คำสำคัญ

ฉนวนกันความร้อน ห้องปฏิบัติการสอบเทียบเคลื่อนที่ อุณหภูมิ การถ่ายเทความร้อน วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ

Abstract

Nowadays, an internal environment of mobile calibration laboratory should be controlled which the internal environment impact factors are temperature, humidity and thermal for the highest efficiency of mobile calibration laboratory following the standard. Therefore, the temperature distribution monitoring of mobile calibration laboratory can improve the efficiency of internal system. So that, designing of the mobile calibration laboratory must immediately control thermal to maintain equilibrium. This paper presents the second-order partial differential equation and the mathematical model of mobile calibration laboratories. The problem was solved by 3-D finite element method with backward time

evaluation which developed and applied in MATLAB programming. The sample of insulator for simulation consist of polyurethane, polystyrene and glass wool. The simulation result shows the ability of insulation to thermal controlling of mobile calibration laboratories which polyurethane into thermal equilibrium of mobile calibration laboratory within 20 minutes at 25 °C. A polystyrene and glass wool into thermal equilibrium within 25 minutes and 30 minutes at 25 °C, respectively. Due to thermal diffusivity of polyurethane is lowest so that, the external thermal can be less transfer into internal laboratory than another insulator [1-2,14]

Keywords

insulation; mobile calibration laboratories; temperature; heat transfer; 3-D finite element method (3-D FEM)

1. บทนำ

ในปัจจุบันมาตรฐานห้องปฏิบัติการในสอบเทียบอ้างอิง มาตรฐาน ISO 17025 ข้อที่ 6.3.3 โดยกล่าวไว้ว่า “ห้องปฏิบัติการสอบเทียบต้องเฝ้าระวัง ควบคุม และบันทึก สภาพแวดล้อมตามเกณฑ์ที่กำหนด วิธีการ หรือขั้นตอนการ ดำเนินงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง หรือในกรณีที่สภาวะแวดล้อม ต่างๆ นั้นมีอิทธิพลต่อความใช้ได้ของผล” [21] ซึ่งบทความนี้ได้ ทำการควบคุมอุณหภูมิให้เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดไว้เพื่อ ใช้สอบเทียบเครื่องมือวัด อุณหภูมินั้นมีอิทธิพลต่อคุณภาพของ ผลสอบเทียบ เพราะจะทำให้ผลสอบเทียบเสียหายได้ เพราะฉะนั้นการควบคุมอุณหภูมิเป็นสิ่งที่สำคัญที่จะมั่นใจได้ว่า ห้องปฏิบัติการสอบเทียบเคลื่อนที่ทำงานได้อย่างมี ประสิทธิภาพ นอกจากนี้ระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุลทางความ ร้อนเป็นสิ่งที่สำคัญมากเช่นกัน ถ้าใช้ระยะเวลาที่รวดเร็วก็จะ สามารถทำงานได้ทันเวลาที่ลูกค้าต้องการและเพิ่มความพอใจ ให้กับลูกค้ามากขึ้น ดังนั้นบทความวิจัยนี้จึงวิเคราะห์ ประสิทธิภาพของฉนวนกันความร้อนภายในห้องปฏิบัติการ สอบเทียบเคลื่อนที่ ว่าฉนวนชนิดใดทำให้ห้องปฏิบัติการสอบ เทียบเคลื่อนที่เข้าสู่สมดุลทางความร้อนเร็วที่สุด ซึ่งทำให้มั่นใจ ได้ว่าห้องปฏิบัติการสอบเทียบเคลื่อนที่นั้นทำงานได้อย่างมี ประสิทธิภาพและทันเวลาที่ลูกค้าต้องการ [1-5]

จากการทบทวนปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องสามารถ สรุปทฤษฎี หลักการ และวิธีการดำเนินงานวิจัยต่าง ๆ ที่ใช้ พิจารณาผลการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องปฏิบัติการ สอบเทียบเคลื่อนที่ ได้ดังนี้ วิศรา ผานาค (2561) ได้ศึกษาผล ของการปรับความเร็วของเครื่องปรับอากาศที่มุมต่างๆ ที่ส่งผล ต่ออุณหภูมิภายในห้องปฏิบัติการสอบเทียบเคลื่อนที่ โดยใช้วิธี ไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ผลที่ได้พบว่าความเร็วของ เครื่องปรับอากาศที่ 6.738 m/s สามารถทำให้อุณหภูมิเข้าสู่

สภาวะคงตัวเร็วที่สุด [1], ภาคภูมิ สุภาพชาติ, อติศักดิ์ นาคกรณ กุล และณัฐ กาศยพนันท์ (2550) ได้ศึกษาการกระจายลม เย็นภายในรถตู้โดยสาร ซึ่งการไหลของอากาศที่ปล่อยออกมา จากช่องปล่อยสู่ภายในห้องโดยสาร แล้วถูกดูดกลับไปห้องดูด อากาศกลับ ทำให้อากาศไหลเวียนไปทั่วห้อง โดยใช้ระเบียบวิธี ไฟไนต์โวลุ่ม (Finite Volume Method: FVM) ในการหา คำตอบ [19], ปิยกันต์ หาญสมศรี, เอกลักษณ์ พรหมภักดี และ กิรติ สุลักษณ์ (2557) ได้ศึกษาการกระจายอุณหภูมิ ภายในรถโดยสารปรับอากาศ ที่ความเร็ว 80 กิโลเมตร/ชั่วโมง อุณหภูมิที่ช่องจ่ายลมเย็นเข้าห้องโดยสาร 25 °C ความเร็วลมที่ ช่องจ่ายลมเย็น 6.738 m/s โดยใช้วิธีไฟไนต์โวลุ่ม (Finite Volume Method: FVM) ในการวิเคราะห์ [20] ซึ่งจากการ ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องทั้งหมดนี้ พบว่ายังไม่มีบทความ วิจัยใดที่เคยศึกษาประสิทธิภาพของฉนวนกันความร้อนที่ใช้ เป็นผนังภายในห้องปฏิบัติการสอบเทียบเคลื่อนที่ ด้วยการ พัฒนาวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ โดยการพัฒนาโปรแกรม ขึ้นเองด้วยโปรแกรม MATLAB ซึ่งการพัฒนาโปรแกรมขึ้นเอง นั้นมีความยืดหยุ่นสูง ทำให้วิเคราะห์อุณหภูมิภายใน ห้องปฏิบัติการสอบเทียบเคลื่อนที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การวิเคราะห์ปัญหาของอุณหภูมินั้นจะสามารถอธิบายได้ ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์หรือสมการอินทิกรัล เป็นไปได้ยาก ที่จะหาผลเฉลยแม่นยำตรง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้วิธีการหาผล เฉลยโดยประมาณด้วยวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข อีกทั้ง สมรรถนะของคอมพิวเตอร์ที่สูงขึ้นจึงทำให้การคำนวณเชิง ตัวเลขสามารถทำได้อย่างรวดเร็ว วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method: FEM) เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมอย่าง แพร่หลายและมีประสิทธิภาพสูงสุดในทางวิศวกรรม และใช้กับ สมการที่อยู่ในรูปอนุพันธ์ย่อย (partial differential equation: PDE) เช่นสมการของอุณหภูมิ ซึ่งในบทความวิจัยนี้

ได้ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ (3-D FEM) เพื่อวิเคราะห์ประสิทธิภาพของฉนวนกันความร้อนภายในห้องปฏิบัติการสอบเทียบเคลื่อนที่ ว่าฉนวนชนิดใดทำให้อุณหภูมิภายในห้องปฏิบัติการสอบเทียบเคลื่อนที่เข้าสู่สมดุลทางความร้อนเร็วที่สุด [6-8]

2. ห้องปฏิบัติการสอบเทียบเคลื่อนที่

การสอบเทียบ หมายถึง ชุดของการดำเนินการซึ่งสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าการชี้บอก โดยเครื่องมือวัดหรือค่าที่แสดงโดยเครื่องวัดที่เป็นวัสดุกับค่าสมนัยที่รู้ค่าของปริมาณที่วัดภายใต้ภาวะเฉพาะที่บ่งไว้ จากความหมายดังกล่าวขยายให้เข้าใจง่ายขึ้นก็คือ การสอบเทียบเป็นชุดการดำเนินการภายใต้สภาวะเฉพาะเพื่อหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างเครื่องมือวัดเพื่อเปรียบเทียบกับค่าที่รู้ของปริมาณที่วัด ผลการสอบเทียบให้ข้อมูลว่าเครื่องมือวัดที่ใช้ในการสำรวจยังคงมีคุณลักษณะทางด้านมาตรวิทยาที่เหมาะสมในการใช้งานต่อไปหรือไม่ การควบคุมสภาวะแวดล้อมห้องปฏิบัติการให้มีความเหมาะสม ในด้านอุณหภูมิ ความชื้น และการสั่นสะเทือน จะส่งผลต่อประสิทธิภาพและความถูกต้องของการสอบเทียบ ผลจากการสอบเทียบเมื่อนำมาวิเคราะห์ จะทำให้สามารถกำหนดได้ว่าเครื่องมือวัดควรจะใช้ต่อไปหรือจำเป็นต้องปรับแต่งผลจากการสอบเทียบ [1-3,18] สถานภาพของห้องปฏิบัติการมีดังนี้ ห้องปฏิบัติการถาวร ห้องปฏิบัติการนอกสถานที่ ห้องปฏิบัติการชั่วคราว ห้องปฏิบัติการเคลื่อนที่ สำหรับบทความวิจัยนี้จะทำการออกแบบห้องปฏิบัติการสอบเทียบแบบเคลื่อนที่ แสดงดังรูปที่ 1 [4-5,10]

ห้องปฏิบัติการสอบเทียบเคลื่อนที่แตกต่างจากห้องปฏิบัติการสอบเทียบทั่วไป คือ สามารถนำไปสอบเทียบในสถานที่ต่างๆได้ โดยต้องคำนึงถึงระยะเวลาในเข้าสู่สมดุลทางความร้อน ถ้าใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุลทางความร้อนเร็วที่สุดก็จะสามารถทำงานได้ทันเวลาที่ลูกค้าต้องการและเพิ่มความพอใจกับลูกค้ามากขึ้น ดังนั้นถ้าเลือกใช้ฉนวนกันความร้อนที่ทำให้เข้าสู่สมดุลทางความร้อนได้เร็วที่สุด จะทำให้สอบเทียบได้แม่นยำภายในเวลาที่จำกัด



รูปที่ 1 ห้องปฏิบัติการสอบเทียบเคลื่อนที่ [1]

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอุณหภูมิภายในห้องปฏิบัติการสอบเทียบเคลื่อนที่

ปัญหาการถ่ายเทความร้อนนั้นจะแสดงอยู่ในรูปของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การกระจายตัวของอุณหภูมิแบบ 3 มิติ แสดงในสมการที่ (1) ซึ่งอยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ย่อย ดังนั้นเราจึงเลือกใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาคำนวณ [6-7]

โดยกำหนดให้ผนังของห้องปฏิบัติการสอบเทียบเคลื่อนที่เป็นแบบอะเดียแบติก คือ ไม่มีการถ่ายเทความร้อนและไม่มีการแผ่รังสีระหว่างห้องปฏิบัติการสอบเทียบเคลื่อนที่กับสิ่งแวดล้อมภายนอก [1]

$$k \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + k \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial T}{\partial z} - \rho c \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

โดยที่

k คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ($\text{W/m}\cdot\text{K}$)

Q คือ ปริมาณความร้อนที่ผลิตได้เอง (W/m^3)

T คือ อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)

c คือ ความร้อนจำเพาะ ($\text{J/kg}\cdot\text{K}$)

ρ คือ ความหนาแน่นมวล (kg/m^3)

u คือ ความเร็วในทิศทาง x (m/s)

v คือ ความเร็วในทิศทาง y (m/s)

w คือ ความเร็วในทิศทาง z (m/s)

4. การคำนวณของอุณหภูมิภายในห้องปฏิบัติการสอบเทียบเคลื่อนที่ด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ

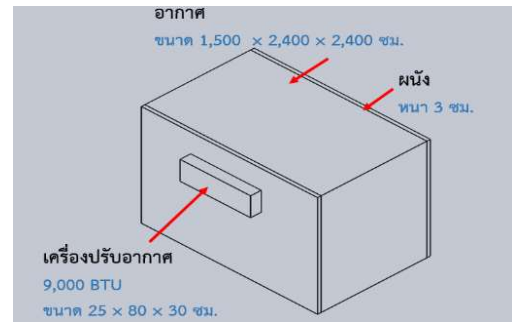
ในการคำนวณอุณหภูมิด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์นั้นจะต้องอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย ซึ่งได้แสดงไว้ในสมการที่ (1) ดังนั้นการหาค่าผลเฉลยโดยประมาณด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์จึงถูกนำมาใช้ ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

4.1 เอลิเมนต์ของระบบศึกษา

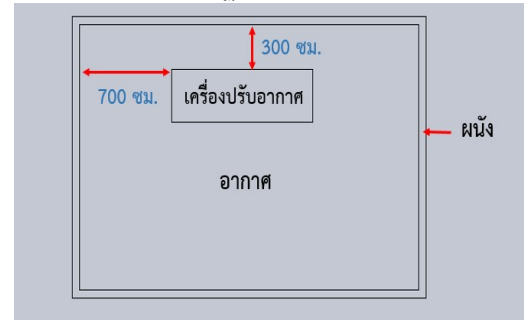
ในการออกแบบพื้นที่ของปัญหาที่ใช้ในการจำลองผลค่าอุณหภูมิด้วยวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์ จะครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมดของแบบจำลอง ซึ่งบทความวิจัยนี้ได้พิจารณาห้องปฏิบัติการสอบเทียบเคลื่อนที่ที่มีความกว้าง 1,500 ซม. ความยาว 2,400 ซม. และสูง 1,500 ซม. เครื่องปรับอากาศ 9,000 BTU มีความกว้าง 25 ซม. ความยาว 100 ซม. และสูง 30 ซม. และมีผนังหนา 3 ซม. โดยแบ่งพื้นที่ของปัญหาเป็นเอลิเมนต์รูปทรงสี่หน้าสี่จุดต่อ (tetrahedral) ด้วยโปรแกรมการสร้างกริด ชื่อว่า Solidworks ประกอบด้วยจำนวนจุดต่อ 3,155 จุดต่อ และจำนวนเอลิเมนต์ 14,219 เอลิเมนต์ ซึ่งเป็นจำนวนจุดต่อและเอลิเมนต์ที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากถ้ามีจำนวนจุดต่อและเอลิเมนต์มากกว่าค่าดังกล่าว ผลการจำลองจะไม่เปลี่ยนแปลงจากเดิมและทำให้ใช้เวลาในการจำลองผลนานขึ้น ส่วนถ้าจำนวนจุดต่อและเอลิเมนต์น้อยกว่าค่าดังกล่าว ทำให้โปรแกรม Solidworks ไม่สามารถสร้างกริดได้และจุดต่อไม่ต่อกัน ดังนั้นจึงไม่เกิดการกระจายตัวของอุณหภูมิระหว่างเอลิเมนต์ เครื่องปรับอากาศและเอลิเมนต์อากาศ จึงไม่เป็นไปตามทฤษฎี เพราะเครื่องปรับอากาศไม่สามารถกระจายความเย็นไปทั่วห้องปฏิบัติการสอบเทียบเคลื่อนที่ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2 [1-2]

4.2 การสร้างสมการของเอลิเมนต์

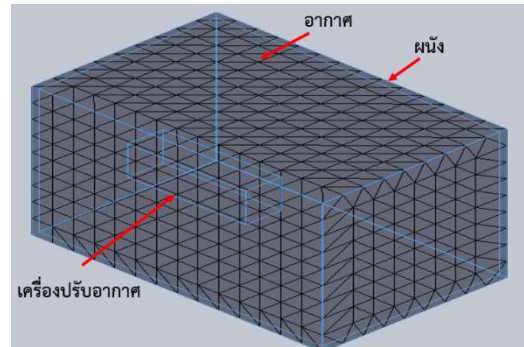
การสร้างสมการระดับเอลิเมนต์ได้ประยุกต์ใช้วิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง (method of weighted residuals) ของกาเลอร์คิน (Galerkin) โดยฟังก์ชันน้ำหนักจะมีค่าเท่ากับฟังก์ชันประมาณภายใน (shape function) โดยผลลัพธ์ที่พิกัดใด ๆ สามารถแสดงในสมการที่ (2) [6,11]



ก) ส่วนประกอบห้องปฏิบัติการในสอบเทียบเคลื่อนที่ [1-2]



ข) ส่วนประกอบห้องปฏิบัติการในสอบเทียบเคลื่อนที่แบบ 2 มิติ



ค) การแบ่งเอลิเมนต์ห้องปฏิบัติการในสอบเทียบเคลื่อนที่

รูปที่ 2 ส่วนประกอบห้องปฏิบัติการในสอบเทียบเคลื่อนที่

$$T(x, y, z) = T_1 N_1 + T_2 N_2 + T_3 N_3 + T_4 N_4 \quad (2)$$

โดยที่

N_n , $n = 1, 2, 3$, และ 4 คือฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์

T_n , $n = 1, 2, 3$, และ 4 คือ ผลลัพธ์ของอุณหภูมิในแต่ละจุดต่อ

ซึ่งในกรณีเอลิเมนต์รูปทรงสี่หน้าสี่จุดต่อแสดงในสมการที่ (3)

$$N_i = \frac{1}{6V} (a_i + b_i x + c_i y + d_i z) \quad (3)$$

และ V คือปริมาตรของรูปทรงสี่หน้าของแต่ละเอลิเมนต์ หาได้จากดีเทอร์มิแนนต์ของสัมประสิทธิ์แสดงในสมการที่ (4)

$$V = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} \quad (4)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} a_1 &= x_4(y_2z_3 - y_3z_2) + x_3(y_4z_2 - y_2z_4) + x_2(y_3z_4 - y_4z_3) \\ a_2 &= x_4(y_3z_1 - y_1z_3) + x_3(y_1z_4 - y_4z_1) + x_1(y_4z_3 - y_3z_4) \\ a_3 &= x_4(y_1z_2 - y_2z_1) + x_2(y_4z_1 - y_1z_4) + x_1(y_2z_4 - y_4z_2) \\ a_4 &= x_3(y_2z_1 - y_1z_2) + x_2(y_1z_3 - y_3z_1) + x_1(y_3z_2 - y_2z_3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b_1 &= y_4(z_3 - z_2) + y_3(z_2 - z_4) + y_2(z_4 - z_3) \\ b_2 &= y_4(z_3 - z_2) + y_1(z_3 - z_4) + y_3(z_4 - z_1) \\ b_3 &= y_4(z_3 - z_2) + y_2(z_1 - z_4) + y_1(z_4 - z_2) \\ b_4 &= y_3(z_3 - z_2) + y_1(z_2 - z_3) + y_2(z_3 - z_1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c_1 &= x_4(z_2 - z_3) + x_2(z_3 - z_4) + x_3(z_4 - z_2) \\ c_2 &= x_4(z_3 - z_1) + x_3(z_1 - z_4) + x_1(z_4 - z_3) \\ c_3 &= x_4(z_1 - z_2) + x_1(z_2 - z_4) + x_2(z_4 - z_1) \\ c_4 &= x_3(z_2 - z_1) + x_2(z_1 - z_3) + x_1(z_3 - z_2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} d_1 &= x_4(y_3 - y_2) + x_3(y_2 - y_4) + x_2(y_4 - y_3) \\ d_2 &= x_4(y_1 - y_3) + x_1(y_3 - y_4) + x_3(y_4 - y_1) \\ d_3 &= x_4(y_2 - y_1) + x_2(y_1 - y_4) + x_1(y_4 - y_2) \\ d_4 &= x_3(y_1 - y_2) + x_1(y_2 - y_3) + x_2(y_3 - y_1) \end{aligned}$$

สมการที่ (5) เป็นสมการอนุพันธ์อันดับหนึ่ง โดยค่าของอุณหภูมิจะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา เกิดจากการอินทิเกรตและจะได้ผลลัพธ์ของอุณหภูมิซึ่งแสดงอยู่ในรูปของเมตริกซ์ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้การแก้ปัญหามาภายใต้สถานะชั่วคราวนี้ด้วยวิธีผลต่างสืบเนื่องย้อนหลัง [12-13]

$$[C]_{4 \times 4} \left\{ \dot{T} \right\}_{4 \times 1} + [[K_c] + [K_v] + [K_h]]_{4 \times 4} \{T\}_{4 \times 1} = \{Q_e\}_{4 \times 1} + \{Q_h\}_{4 \times 1} \quad (5)$$

$$[C]_{4 \times 4} = \frac{\rho c V}{20} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$[K_c]_{4 \times 4} = \frac{k}{36V} \begin{bmatrix} b_1b_1 + c_1c_1 + d_1d_1 & b_1b_2 + c_1c_2 + d_1d_2 & b_1b_3 + c_1c_3 + d_1d_3 & b_1b_4 + c_1c_4 + d_1d_4 \\ b_2b_2 + c_2c_2 + d_2d_2 & b_2b_3 + c_2c_3 + d_2d_3 & b_2b_4 + c_2c_4 + d_2d_4 \\ b_3b_3 + c_3c_3 + d_3d_3 & b_3b_4 + c_3c_4 + d_3d_4 \\ b_4b_4 + c_4c_4 + d_4d_4 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Sym

$$[K_h]_{4 \times 4} = \frac{hV}{20} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$[K_v]_{4 \times 4} = \frac{\rho c}{36} \begin{bmatrix} ub_1 + vc_1 + wd_1 & ub_2 + vc_2 + wd_2 & ub_3 + vc_3 + wd_3 & ub_4 + vc_4 + wd_4 \\ ub_1 + vc_1 + wd_1 & ub_2 + vc_2 + wd_2 & ub_3 + vc_3 + wd_3 & ub_4 + vc_4 + wd_4 \\ ub_1 + vc_1 + wd_1 & ub_2 + vc_2 + wd_2 & ub_3 + vc_3 + wd_3 & ub_4 + vc_4 + wd_4 \\ ub_1 + vc_1 + wd_1 & ub_2 + vc_2 + wd_2 & ub_3 + vc_3 + wd_3 & ub_4 + vc_4 + wd_4 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\{Q_e\}_{4 \times 1} = \frac{hT_\infty V}{4} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\{Q_e\}_{4 \times 1} = \frac{QV}{4} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

โดยที่ h คือ ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (W/m^2K)

T_∞ คือ อุณหภูมิของตัวกลางสำหรับการพาความร้อน ($^{\circ}C$)

เนื่องจากอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ในบทความนี้เป็นการแก้ปัญหามาภายใต้สถานะชั่วคราว ซึ่งใช้วิธีความสัมพัทธ์เวียนบังเกิด โดยจะมีลักษณะของผลลัพธ์ขึ้นอยู่กับค่า β ที่เลือกใช้ แสดงในสมการที่ (12) โดย Δt คือค่าของช่วงเวลา (time step) โดยให้ $\beta = 1$ เรียกว่าวิธีผลต่างสืบเนื่องย้อนหลัง (backward difference) แสดงดังสมการที่ (13)

เนื่องจากวิธีนี้รับประกันการลู่เข้าของผลลัพธ์ และผลลัพธ์จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง [6-7,13]

$$\beta \left\{ \dot{T} \right\}^{t+\Delta t} + (1/\beta) \left\{ \dot{T} \right\}^t = \frac{\{T\}^{t+\Delta t} - \{T\}^t}{\Delta t} \quad (12)$$

$$\left\{ \dot{T} \right\}^{t+\Delta t} = \frac{\{T\}^{t+\Delta t} - \{T\}^t}{\Delta t} \quad (13)$$

จากการเลือกใช้วิธีผลต่างสืบเนื่องย้อนหลังสมการที่ (5) จึงพัฒนามาเป็นสมการที่ (14) จากนั้นแทนค่าสมการที่ (13) ลงในสมการที่ (14) จะได้สมการเชิงเส้นเมื่อพิจารณาปัญหาภายใต้สถานะชั่วคราว ดังสมการที่ (15) [9]

$$[C] \left\{ \dot{T} \right\}^{t+\Delta t} + [[K_c] + [K_h] + [K_v]] \{T\}^{t+\Delta t} = \{\{Q_o\} + \{Q_h\}\}^{t+\Delta t} \quad (14)$$

$$\left(\frac{1}{\Delta t} [C] + [[K_c] + [K_h] + [K_v]] \right) \{T\}^{t+\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} [C] \{T\}^t + \{\{Q_o\} + \{Q_h\}\}^{t+\Delta t} \quad (15)$$

โดยสมการที่ (1) - (15) จะนำไปประมวลผลในโปรแกรม Matlab โดยการพัฒนาโปรแกรมขึ้นเอง

5. พารามิเตอร์และเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการจำลองผล

พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองผลและและเงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการจำลองผลของห้องปฏิบัติการสอบเทียบเคลื่อนที่แสดงในตารางที่ 1 และตารางที่ 2 ตามลำดับ

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองผล [14-15]

วัสดุ	k (W/m·K)	c (J/kg·K)	ρ (kg/m ³)
อากาศ	0.024	1,005	1.2
มวลของ เครื่องปรับอากาศ	0.024	1,005	1.2
ฉนวนโพลียูรีเทน	0.017	1,590	35
ฉนวนโพลีสไตรีน	0.035	1,430	34
ฉนวนใยแก้ว	0.041	840	65

จากตารางที่ 2 ความเร็วของเครื่องปรับอากาศเท่ากับ 6.738 m/s ซึ่งเป็นความเร็วลมที่ออกจากช่องกระจายลมของเครื่องปรับอากาศ [19-20]

ตารางที่ 2 เงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขต

เงื่อนไขเริ่มต้นและเงื่อนไขขอบเขต	
อุณหภูมิเริ่มต้น $T(t=0)$ [1]	35° C
อุณหภูมิโดยรอบอากาศภายนอก (T_∞) [1]	35° C
สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศภายใน [11]	5 W/m ² ·K
สัมประสิทธิ์การพาความร้อนของอากาศภายนอก [11]	20 W/m ² ·K
เงื่อนไขขอบเขตของเครื่องปรับอากาศ [1]	25 °C
ความเร็วลมของเครื่องปรับอากาศ [19-20]	6.738 m/s

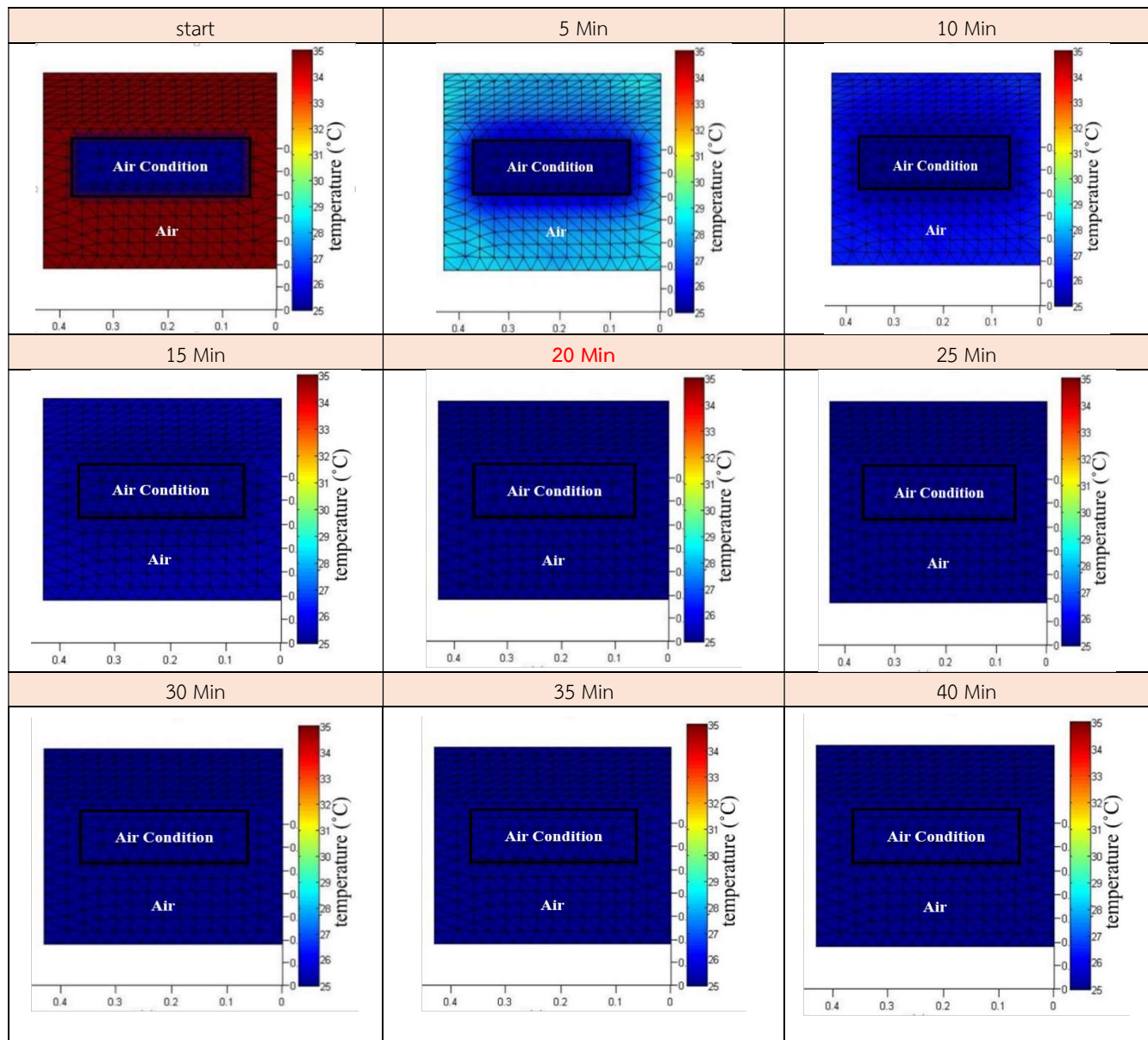
6. ผลการจำลองการกระจายตัวของอุณหภูมิห้องปฏิบัติการสอบเทียบเคลื่อนที่

สำหรับหัวข้อนี้จะนำเสนอผลการจำลองของอุณหภูมิภายในห้องปฏิบัติการสอบเทียบเคลื่อนที่ด้วยระเบียบวิธีไฟไนท์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ พร้อมทั้งแสดงผลทางกราฟิกของอุณหภูมิที่แปรตามเวลาที่เกิดขึ้น ซึ่งตารางที่ 3, ตารางที่ 4, และตารางที่ 5 แสดงค่าการกระจายตัวของอุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องปฏิบัติการสอบเทียบเคลื่อนที่ เมื่อพิจารณาฉนวนโพลียูรีเทน ฉนวนโพลีสไตรีน และฉนวนใยแก้ว ตามลำดับ รูปที่ 3, รูปที่ 4, และรูปที่ 5 แสดงผลการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องปฏิบัติการสอบเทียบเคลื่อนที่ เมื่อพิจารณาฉนวนโพลียูรีเทน ฉนวนโพลีสไตรีน และฉนวนใยแก้ว ตามลำดับ และเวลาที่เข้าสู่สมดุลทางความร้อนภายในห้องปฏิบัติการสอบเทียบเคลื่อนที่ ที่อุณหภูมิ 25 °C แสดงดังตารางที่ 6

จากตารางที่ 3 แสดงผลการกระจายตัวของอุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องปฏิบัติการสอบเทียบเคลื่อนที่ เมื่อพิจารณาฉนวนโพลียูรีเทน และรูปที่ 3 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องปฏิบัติการสอบเทียบเคลื่อนที่ เมื่อพิจารณาฉนวนโพลียูรีเทน โดยกำหนดให้ค่าเงื่อนไขเริ่มต้น เท่ากับ 35 °C และอุณหภูมิของเครื่องปรับอากาศเท่ากับ 25 °C และเมื่อเวลาผ่านไปอุณหภูมิของอากาศจะเริ่มต่ำลงเรื่อยๆ โดยอากาศสะสมความเย็นหรือสะสมอุณหภูมิที่ต่ำทุกๆ วินาที ซึ่งเครื่องปรับอากาศจะกระจายความเย็นไปทั่วห้อง จนเข้าสู่สมดุลทางความร้อน ที่อุณหภูมิ 25 °C ซึ่งใช้เวลา 20 นาที [1,14]

ตารางที่ 3 ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องปฏิบัติการสอบเทียบเคลื่อนที่ เมื่อพิจารณาณวินโพลียูรีเทน

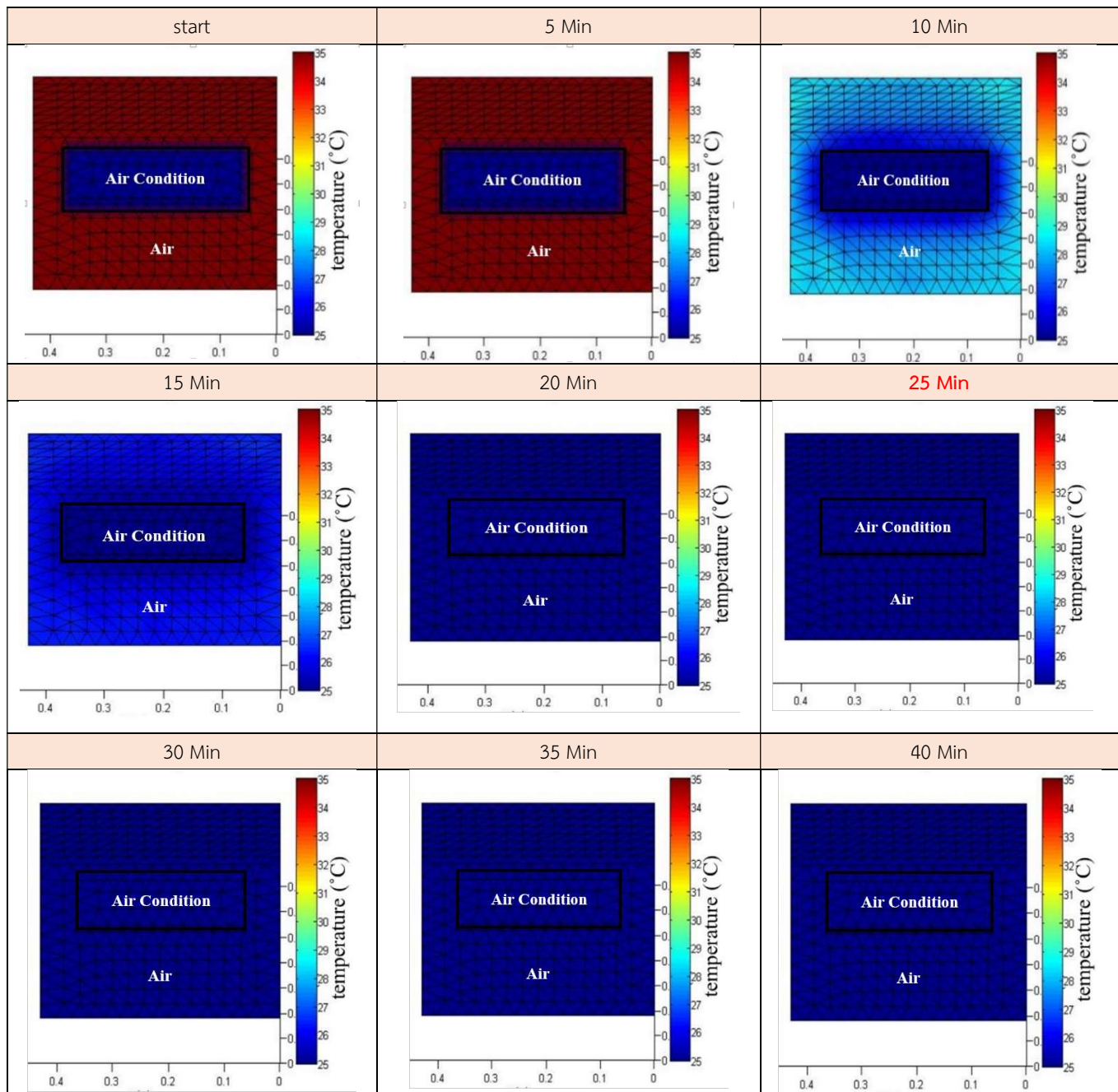
Time	start	5 Min	10 Min	15 Min	20Min	25 Min	30 Min	35 Min
Temp	35 °C	27.63 °C	26.18 °C	25.64 °C	25 °C	25 °C	25 °C	25 °C



รูปที่ 3 ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องปฏิบัติการสอบเทียบเคลื่อนที่ เมื่อพิจารณาณวินโพลียูรีเทน

ตารางที่ 4 ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องปฏิบัติการสอบเทียบเคลื่อนที่ เมื่อพิจารณาณวินโพลีสไตรีน

Time	start	5 Min	10 Min	15 Min	20Min	25 Min	30 Min	35 Min
Temp	35 °C	30.12 °C	28.31 °C	26.34 °C	25.73 °C	25 °C	25 °C	25 °C



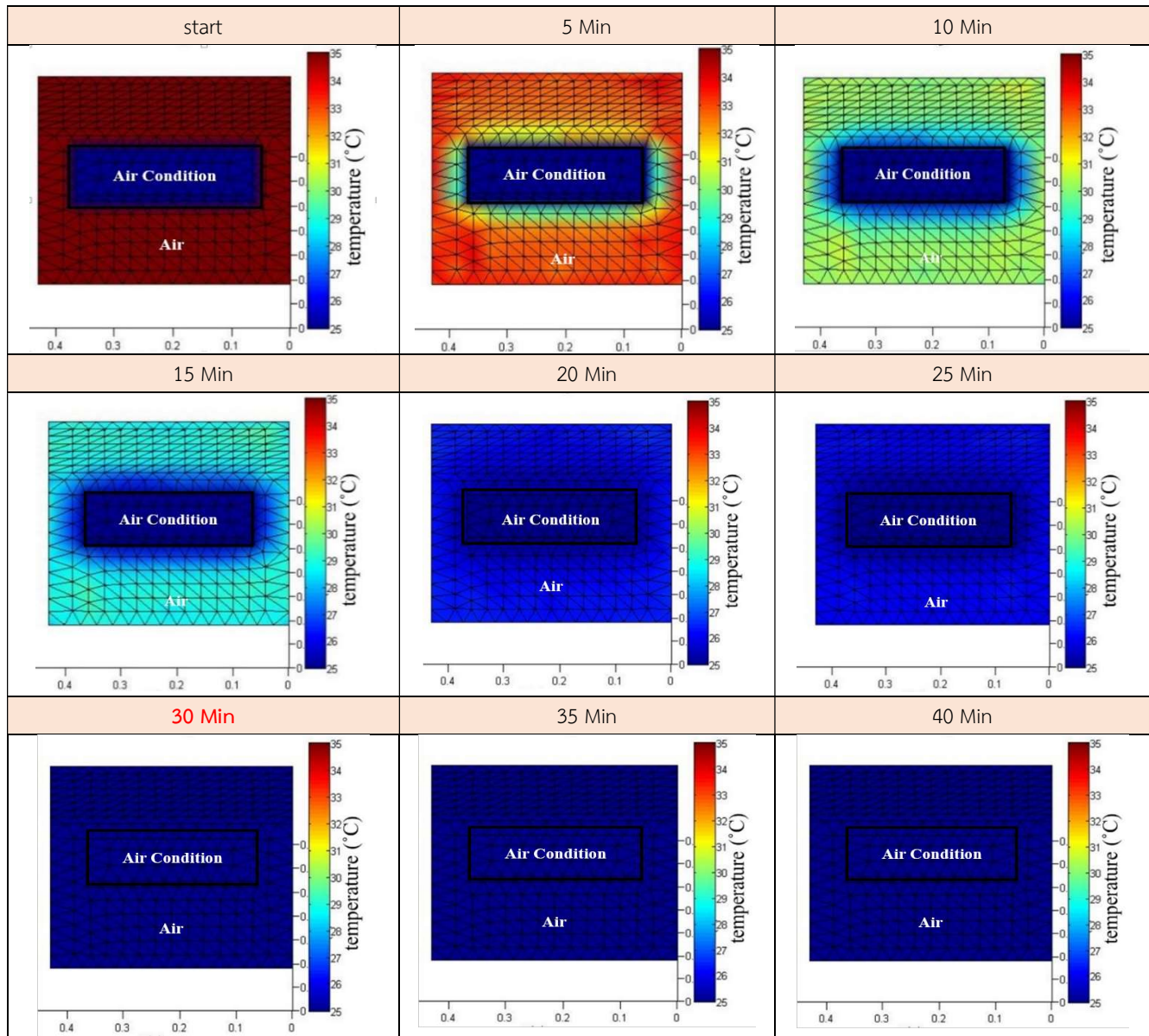
รูปที่ 4 ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องปฏิบัติการสอบเทียบเคลื่อนที่ เมื่อพิจารณาณวนโพลีสไตรีน

จากตารางที่ 4 แสดงผลการกระจายตัวอุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องปฏิบัติการสอบเทียบเคลื่อนที่ เมื่อพิจารณาณวนโพลีสไตรีน และรูปที่ 4 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องปฏิบัติการสอบเทียบเมื่อพิจารณาณวนโพลีสไตรีน โดยกำหนดให้ค่าเงื่อนไขเริ่มต้น เท่ากับ 35°C และอุณหภูมิ

ของเครื่องปรับอากาศเท่ากับ 25°C และเมื่อเวลาผ่านไป อุณหภูมิของอากาศจะเริ่มต่ำลงเรื่อยๆ โดยอากาศสะสมความเย็นหรือสะสมอุณหภูมิที่ต่ำทุกๆ วินาที ซึ่งเครื่องปรับอากาศจะกระจายความเย็นไปทั่วห้อง จนเข้าสู่สมดุลทางความร้อน ที่อุณหภูมิ 25°C ซึ่งใช้เวลา 25 นาที [1,14]

ตารางที่ 5 ผลการกระจายตัวอุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องปฏิบัติการสอบเทียบเคลื่อนที่ เมื่อพิจารณาณวินาที

Time	start	5 Min	10 Min	15 Min	20Min	25 Min	30 Min	35 Min
Temp	35 °C	33.17 °C	30.51 °C	29.78 °C	26.45 °C	25.31 °C	25 °C	25 °C



รูปที่ 5 ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องปฏิบัติการสอบเทียบเคลื่อนที่ เมื่อพิจารณาณวินาที

จากตารางที่ 5 แสดงผลการกระจายตัวอุณหภูมิเฉลี่ยภายในห้องปฏิบัติการสอบเทียบเคลื่อนที่ เมื่อพิจารณาณวินาที และรูปที่ 5 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องปฏิบัติการสอบเทียบเคลื่อนที่ เมื่อพิจารณาณวินาที โดยกำหนดให้ค่าเงื่อนไขเริ่มต้น เท่ากับ 35 °C และอุณหภูมิของเครื่องปรับอากาศเท่ากับ 25 °C และเมื่อเวลาผ่านไป

อุณหภูมิของอากาศจะเริ่มต่ำลงเรื่อยๆ โดยอากาศสะสมความเย็นหรือสะสมอุณหภูมิที่ต่ำทุกๆ วินาที ซึ่งเครื่องปรับอากาศจะกระจายความเย็นไปทั่วห้อง จนเข้าสู่สมดุลทางความร้อน ที่อุณหภูมิ 25 °C ซึ่งใช้เวลา 30 นาที [1,14]

ตารางที่ 6 เวลาที่เข้าสู่สมดุลทางความร้อนภายในห้องปฏิบัติการสอบเทียบเคลื่อนที่ ที่อุณหภูมิ 25 °C [1,14]

ผลการจำลอง	เวลาที่เข้าสู่สมดุลทางความร้อน ที่อุณหภูมิ ° 25C
ฉนวนโพลียูรีเทน	20 นาที
ฉนวนโพลีสไตรีน	25 นาที
ฉนวนใยแก้ว	30 นาที

จากตารางที่ 6 แสดงเวลาที่เข้าสู่สมดุลทางความร้อนภายในห้องปฏิบัติการสอบเทียบเคลื่อนที่ พบว่าฉนวนกันความร้อนโพลียูรีเทน ฉนวนโพลีสไตรีน และฉนวนใยแก้ว จะเข้าสู่สมดุลทางความร้อนที่อุณหภูมิ 25 °C ณ เวลา 20 นาที, 25 นาที และ 30 นาที ตามลำดับ [1,15,19] ซึ่งผลการจำลองนั้นสอดคล้องกับหลักการทำงานของห้องปฏิบัติการสอบเทียบเคลื่อนที่ โดยอากาศภายในห้องปฏิบัติการสอบเทียบเคลื่อนที่ จะสะสมความเย็นหรือสะสมอุณหภูมิที่ต่ำทุกๆ วินาที ซึ่งเครื่องปรับอากาศจะเป็นตัวกระจายความเย็นไปทั่วห้องปฏิบัติการสอบเทียบเคลื่อนที่ [1,14] โดยที่อุณหภูมิภายในห้องปฏิบัติการสอบเทียบเคลื่อนที่โดยทั่วไปจะเข้าสู่สมดุลทางความร้อนที่ 20 นาที [1,14] และการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องปฏิบัติการสอบเทียบเคลื่อนที่โดยทั่วไปจะมีอุณหภูมิอยู่ที่ 25 °C [1,15,19] และสามารถอธิบายเหตุผลที่ฉนวนกันความร้อนแต่ละชนิดมีผลต่อการกระจายตัวของอากาศภายในภายในห้องปฏิบัติการสอบเทียบได้จากค่าความสามารถในการแพร่ความร้อน (thermal diffusivity:) [4] ดังสมการที่ (16)

$$\alpha = \frac{k}{\rho c} \quad (16)$$

โดยที่ α คือ ค่าความสามารถในการแพร่ความร้อน (m^2/s)

ค่าความสามารถในการแพร่ความร้อนจะมีค่าพารามิเตอร์ k , ρ , และ c มาเกี่ยวข้องแสดงได้ดังสมการที่ (16) โดยฉนวนกันความร้อนที่ดีควรมีค่าแพร่กระจายความร้อนน้อย เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ k , ρ , และ c ของฉนวนกันความร้อนทั้ง 3 ชนิด จากตารางที่ 1 มาแทนลงในสมการที่ (16) จะได้ค่าความสามารถในการแพร่ความร้อนของฉนวนโพลียูรีเทน

ฉนวนโพลีสไตรีนและฉนวนใยแก้ว เท่ากับ $3.055 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, $7.199 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ และ $7.509 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ ตามลำดับ โดยฉนวนโพลียูรีเทนนั้นมีค่าความสามารถในการแพร่ความร้อนที่น้อยที่สุด ส่งผลทำให้การถ่ายเทความร้อนจากภายนอกห้องปฏิบัติการสอบเทียบเคลื่อนที่ไม่สามารถถ่ายเทความร้อนเข้ามาภายในห้องปฏิบัติการสอบเทียบเคลื่อนที่ได้ หรือถ่ายเทเข้ามาได้น้อย ส่งผลให้การเข้าสู่สมดุลทางความร้อนของห้องปฏิบัติการสอบเทียบเคลื่อนที่ เมื่อพิจารณาฉนวนโพลียูรีเทนเข้าสู่สมดุลทางความร้อนเร็วที่สุด ที่อุณหภูมิ 25 °C เมื่อเปรียบเทียบกับฉนวนโพลีสไตรีนและฉนวนใยแก้ว

7. สรุป

บทความนี้ได้ศึกษาถึงการกระจายตัวอุณหภูมิภายในห้องปฏิบัติการสอบเทียบเคลื่อนที่ การจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์ได้ประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ที่พัฒนาขึ้นเองด้วยโปรแกรม MATLAB ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองพบว่าทางเลือกใช้ฉนวนโพลียูรีเทน ทำให้ห้องปฏิบัติการสอบเทียบเคลื่อนที่เข้าสู่สมดุลทางความร้อนที่อุณหภูมิ 25 °C ณ เวลา 20 นาที ซึ่งใช้เวลาเร็วที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับฉนวนโพลีสไตรีนและฉนวนใยแก้ว โดยพิจารณาจากค่าความสามารถในการแพร่ความร้อน ซึ่งฉนวนโพลียูรีเทนนั้นมีค่าความสามารถในการแพร่ความร้อนที่น้อยที่สุด ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนจากภายนอกห้องปฏิบัติการสอบเทียบเคลื่อนที่ไม่สามารถถ่ายเทความร้อนเข้ามาภายในห้องปฏิบัติการสอบเทียบเคลื่อนที่ได้หรือถ่ายเทเข้ามาได้น้อย ดังนั้นการเลือกใช้ฉนวนโพลียูรีเทนสามารถลดการสิ้นเปลืองพลังงานได้อีกด้วย ซึ่งผลการจำลองนั้นสอดคล้องกับหลักการทำงานของห้องปฏิบัติการสอบเทียบเคลื่อนที่ โดยอากาศภายในห้องปฏิบัติการสอบเทียบเคลื่อนที่ จะสะสมความเย็นหรือสะสมอุณหภูมิที่ต่ำทุกๆ วินาที ซึ่งเครื่องปรับอากาศจะเป็นตัวกระจายความเย็นไปทั่วห้องปฏิบัติการสอบเทียบเคลื่อนที่ [1,14] โดยที่อุณหภูมิภายในห้องปฏิบัติการสอบเทียบเคลื่อนที่โดยทั่วไปจะเข้าสู่สมดุลทางความร้อนที่ 20 นาที [1,14] และการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องปฏิบัติการสอบเทียบเคลื่อนที่โดยทั่วไปจะมีอุณหภูมิอยู่ที่ 25 °C [1,15,19]

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องมือวัดและอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ สถานที่ทดลอง และอำนวยความสะดวกในการวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] วริศรา ฆานาค. การออกแบบห้องปฏิบัติการสอบเทียบเคลื่อนที่ด้วยวิธีไฟไนท์อีลีเมนต์ 3 มิติ [วิทยานิพนธ์]. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี; 2561.
- [2] Karius V, Yimvuthikul S. Experiences with stationary and mobile calibration laboratories. *1999 Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering*. 1999; 1(1): 189-192, 1999.
- [3] Bräutigam B, González JH, Schwerdt M, Bachmann M. TerraSAR-X instrument calibration results and extension for TanDEM-X. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2010; 48(2): 702–715.
- [4] Xie L, Yin X, Lu C, Yang L, Zhao H, Li S. Hybrid analog–digital antenna array with built-in image injection calibration. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2014; 62(11): 5513 – 5523.
- [5] Wu L, Leung HF, Li A, Luong HC. A 4-element 60-GHz CMOS phasedarray receiver with beamforming calibration. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*. 2017; 64(3):642–652.
- [6] Amornsawatwattana I, Poa-la-or P. Analysis of temperature in solar thermal by 3- D finite element method. *5th International Electrical Engineering Congress*. 2017; pp. 208-211.
- [7] Bhatti M. *Advanced Topics in Finite Element Analysis of Structures*. USA: John Wiley & Sons; 2006.
- [8] Sukumar N, Moran B, Belytschko T. The natural element method in solid mechanics. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 1998;43(5): 839–887.
- [9] Kattan P. *MATLAB Guide to Finite Elements*. Springer Berlin Heidelberg, USA, 2007.
- [10] Patcharee S. *A Design of Calibration Scheduling Methodology for Measuring Instrument. Management Engineering*, Burapha University; 2559.
- [11] Lewis R, Nithiarasu P, Seetharamu K. *Fundamentals of the Finite Element Method for Heat and Fluid Flow*. US: John Wiley & Sons; 2004.
- [12] Vacharakup S, Peerasaksophol M, Kulworawanichpong T, Pao-la-or P. Study of natural frequencies and characteristics of piezoelectric transformers by using 3- D finite element method. *Applied Mechanics and Materials*. 2012: 61-66.
- [13] Amornsawatwattana I. Increasing the efficiency of solar thermal by 3-D finite element method. *The 12th Conference of Electrical Engineering Network 2020 (EENET 2020, Nakornnayok, Thailand, 26-28 August 2020*. 2020. p. 254-257.
- [14] Nattawut S, Padej P. Analysis of insulation performance in various types inside freezer of the refrigerator by 3-D finite element method. *14th Conference on Energy Network of Thailand (E-NETT), Rayong, Thailand, 19-15 June 2018*. 2020. p. 55-58.
- [15] Australian urethane systems. Product information bulletin. *Austhane SFE 282 Rigid Polyurethane Insulation Foam System*. Australian urethane systems PTY limited. A.C.N. 000 168 874. Australia.
- [16] Engineering ToolBox. (2003). *Convective Heat Transfer*. Available from: https://www.engineeringtoolbox.com/convective-heat-transferd_430.html. [Accessed on 1/04/2018].

- [17] Phanayingphaisal W. *Reduce Maintenance Cost and Improve Availability of Calibration Tester in Calibration Room: A Case Study Measure Engineering Co., Ltd.* Industrial Management Engineering King Mongkut's University of Technology North Bangkok. 2008.
- [18] Pal RK, Parveen G, Shankar S. Effect of cellulose fibre based insulation on thermal performance of buildings. *Materialstoday: Proceedings* Available online 22 March 2021.
- [19] ภาคภูมิ สุภชาติ, อติศักดิ์ นาถรณกุลณัฐ กาศย , .นันทน์การศึกษาพฤติกรรมการไหลของลมร้อนโดยการจำลองด้วย EasyFEM และเทคนิคชาร์โดว์กราฟ. การประชุมวิชาการด้านพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุครั้งที่ 1; 2550.
- [20] ปิยกานต์ หาญสมักร, เอกลักษณ์ พรหมภักดี, กิรติ สุลักษณ์ (2557). การทำนายพฤติกรรมการระบายอากาศและการกระจายอุณหภูมิ ภายในห้องโดยสารของรถโดยสารปรับอากาศ. *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย. ครั้งที่ 28 15-17 ตุลาคม 2557 จังหวัดขอนแก่น.* 2557.
- [21] สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมกระทรวงอุตสาหกรรม. *การรับรองห้องปฏิบัติการ ข้อเสนอแนะประกอบมาตรฐานประเมินตาม มอก. .2561-17025*