

การศึกษาพฤติกรรมการไหลของลมร้อนโดยการจำลองด้วย EasyFEM และเทคนิคชาร์โดว์กราฟ

Study of Hot Air Flow Behavior using EasyFEM Simulation and Shadowgraph Techniques

วุฒิชัย สิตธิวงษ์

คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์ 32000

Wuttichai Sittiwong

Faculty of Agriculture and Technology, Rajamangala University of Technology Isan Surin Campus 32000

Tel : 0-4415-3093 E-mail: sittiwong@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการไหลของลมร้อนด้วยการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ชื่อ Easy Finite Element (EasyFEM) และทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองจากภาพถ่ายที่ใช้เทคนิคชาร์โดว์กราฟ (Shadowgraph technique) โดยกำหนดให้ลมร้อนไหลผ่านวัตถุหน้าตัดสามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม และวงกลม ที่จัดวางไว้เป็นแบบเดี่ยวและแบบกลุ่ม อุณหภูมิลมร้อนที่ใช้ในการจำลองและการทดลองจะถูกเปลี่ยนแปลง 3 ค่าคือ 60°C 80°C และ 100°C ความเร็วของลมร้อนคงที่ที่ 2 m/s ทุกกรณี จากผลการทดลองพบว่า เทคนิคชาร์โดว์กราฟสามารถแสดงพฤติกรรมการไหลของลมร้อนได้อย่างชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จาก EasyFEM จากมุมการเปลี่ยนแปลงของอากาศร้อนที่ไหลผ่านวัตถุ หรือมุม Separation point ของทั้ง 2 วิธี ได้ผลแตกต่างกันเฉลี่ย 2 องศา อย่างไรก็ตาม ผลการจำลองของไหลพลศาสตร์จะแสดงรายละเอียดของพฤติกรรมการไหลของลมร้อนมากกว่าแต่ผลที่ได้จากเทคนิคชาร์โดว์กราฟให้รายละเอียดที่สามารถมองเห็นพฤติกรรมได้ต่อเนื่องด้วยตาเปล่า

คำหลัก การไหลของลมร้อน การจำลองพลศาสตร์ของไหล โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ เทคนิคชาร์โดว์กราฟ

Abstract

This research aims to study hot air flow behavior using Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation. This was accomplished using the finite element software which is formally known as Easy Finite Element (EasyFEM). Results of the EasyFEM simulations were compared with those from visualization using shadowgraph technique. The various studies all involved hot air flow at a constant velocity of 2 m/s and at variable temperatures of 60°C 80°C and 100°C through solid objects of various shapes and quantities. The cross section shapes used in these studies include are triangle, square and circle. From the experimental results, it was found that shadowgraph techniques obviously revealed the hot air flow behaviors. When comparing with EasyFEM results, the angles of hot air flow separation were different about 2 degrees. However, the detail behavior of the air flow obtained from EasyFEM is higher than that from shadowgraph technique. The detail behavior at continuous air flow can be seen with naked eye in the shadowgraph.

Keywords: Hot air flow, computational fluid dynamics, finite element software, shadowgraph technique

1. บทนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีทางคอมพิวเตอร์เข้ามามีบทบาทในการพัฒนาประเทศไม่ว่าจะเป็นด้านวิศวกรรม การทหาร ธรณีวิทยา การแพทย์ ซึ่งแตกต่างจากอดีตที่ผ่านมา เช่น ในทางการแพทย์ การศึกษาพฤติกรรมของการไหลของเลือดในร่างกายมนุษย์ไม่สามารถกระทำได้จากของจริง การจำลองการไหลของเลือดโดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์มาช่วยวิเคราะห์ จึงเป็นหนึ่งในวิธีการที่สามารถจำลองให้ได้เสมือนจริง [1] ด้านการป้องกันภัยธรรมชาติ พฤติกรรมด้านชลศาสตร์การไหลของน้ำทั้งในแม่น้ำ ท่งน้ำหลาก และการไหลผ่านสิ่งกีดขวางหรือโครงสร้างทางชลศาสตร์ภายใต้สภาวะการไหลแบบคงที่และแบบไม่คงที่ สามารถใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ชนิดสองมิติโดยใช้สมการการไหลต่อเนื่องและสมการโมเมนตัมของการไหล [2] ที่กล่าวมาเหล่านี้เป็นตัวอย่างการช่วยแก้ปัญหาในการออกแบบผ่านการทดลอง (experiment) ลดเวลาการทำงาน ลดต้นทุน และลดความเสี่ยงต่อความเสียหาย

ประพันธ์พงษ์ สมศิลา และอำไพศักดิ์ ธิบุญมา [3] ศึกษาอิทธิพลของอัตราส่วนสมมูลต่อประสิทธิภาพการไหลเวียนอากาศภายในเครื่องอบแห้งแสงอาทิตย์ ที่สร้างขึ้นโดยการวัดอุณหภูมิและความเร็วของอากาศภายในเครื่องอบแห้ง เท่านั้น จากผลการวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งแสงอาทิตย์ให้มีประสิทธิภาพสูง นอกจากนี้ ยังศึกษาพฤติกรรมการไหลเวียนของอากาศภายในโรงอบแห้งแบบต่างๆ โดยใช้การคำนวณเชิงพลศาสตร์ของไหลภายในโรงเรือน และนำเสนอในรูปของ temperature contour กับ velocity vector ซึ่งพอสรุปได้ว่าการกระจายตัวของอุณหภูมิค่อนข้างสูงบริเวณใต้หลังคา [4-5]

อำไพศักดิ์ ธิบุญมา และประพันธ์พงษ์ สมศิลา [6] สร้างบ้านจำลอง ขนาด $1 \times 1.5 \times 1.2$ m และปล่องความร้อน ขนาด $0.8 \times 0.5 \times 0.1$ m เพื่อศึกษาผลของปล่องความร้อนที่มีต่อการปรับอากาศของบ้านพักอาศัยในฤดูหนาว โดยที่ปล่องความร้อนวางเอียงกับแนวระดับ 20 องศาตามมุมเอียงของหลังคา จากผลการทดลองพบว่า เมื่อติดตั้งปล่องความร้อน อุณหภูมิของบ้านสูงขึ้นร้อยละ 14.5 จากงานวิจัยที่กล่าวในข้างต้นพบว่ามีการทดลองโดยการวิเคราะห์ผลเชิงข้อมูลตัวเลขและการจำลองของ

ไหลพลศาสตร์ แต่ยังไม่มีการศึกษาพฤติกรรมการไหลของอากาศในเครื่องอบแห้งหรือปล่องความร้อน ด้วยภาพจริง อย่างไรก็ตาม พฤติกรรมการไหลของอากาศยังมีความสำคัญในงานด้านอื่นๆ เช่น การออกแบบรูปทรงวัตถุเพื่อลดหรือเพิ่มแรงต้านจากอากาศพลศาสตร์ ดังเช่นปรัชญา มุขตา และคณะ [7] ศึกษาอากาศพลศาสตร์ในการวิ่งตามกันของรถบรรทุกขนาดเล็ก โดยวิธีคำนวณของไหลพลศาสตร์ การศึกษาทำการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์แรงต้านของวัตถุทรงกลมโดยการทดสอบในอุโมงค์ลมและ CFD ทดสอบสัมประสิทธิ์แรงต้านของรถบรรทุกขนาดเล็กจำลองอัตราส่วน 1:20 ของรถจริง เช่นเดียวกับ ยุทธชัย เกียรติชนะ และประโยชน์ ชมพูนุตร [8] ที่ศึกษาการลดอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงของรถกระบะโดยการคลุมผ้าใบที่ช่วงท้ายกระบะด้วยการจำลองสภาพการไหลของอากาศผ่านตัวรถกระบะโดยใช้โปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณร่วมกับการทดลองโดยใช้รถกระบะจริง

นอกจากนี้ ภาคภูมิ สุภาชาติ และคณะ [9] ทำการศึกษาวิธีการกระจายลมเย็นภายในรถตู้โดยสาร ด้วยวิธีคำนวณพลศาสตร์ของไหล 2 มิติ โดยมีความยาวของรถตู้ 4.2 เมตร สูง 1.3 เมตร เงื่อนไขความเร็วลมที่ออกจากช่องกระจายลมเย็น 2, 3 และ 4 เมตรต่อวินาที จากการศึกษพบว่าความเร็วลม 4 m/s ทิศทางของลมเย็นที่ออกจากช่องลมทำมุม 0° จากด้านหน้า และ 90° จากหลังคา

ปพน พุทธธนาศักดิ์ [10] ศึกษาปัญหาการไหลของห้องสะอาดสำหรับกระบวนการประกอบหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ โดยใช้แบบจำลองคอมพิวเตอร์ ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์โวลุ่มที่ใช้แบบจำลองการไหลปั่นป่วน k- ϵ และเก็บข้อมูลความเร็ว อุณหภูมิและความดันในห้องสะอาดขณะใช้งานจากการศึกษาพบว่าความเร็วลมที่ออกจากหัวจ่ายลมมีค่าเกินมาตรฐานและลดความปั่นป่วนของอากาศบริเวณเครื่องด้วยการเพิ่มความยาวท่อพลาสติก

ทองเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ และคณะ [11] ศึกษาผลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนในของเหลวไดอิเล็กทริก การทดลองพบว่าของเหลวมีการหมุนวน โดยสังเกตเม็ดพลาสติกเล็กๆ ที่ลอยในของเหลว การหมุนวนจะรุนแรงขึ้นเมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าสูงขึ้น ขวัญชัย ไกรทอง และ อติพงศ์ นันทพันธุ์ [12] ประยุกต์ใช้

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตามขวางดัดแปลงจากคอนเดนเซอร์ระบบปรับอากาศรถยนต์ เพื่อใช้แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 65°C กับอากาศที่อุณหภูมิห้อง และยังพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ประเมินค่าประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ในการทดลองใช้อุโมงค์ลมเป็นอุปกรณ์หลัก ทำหน้าที่ส่งอากาศผ่านคอนเดนเซอร์รถยนต์ที่อัตราการไหลของอากาศที่ 0.1-0.4 กก./วินาที น้ำร้อนอุณหภูมิ 65°C ทำการวัดอุณหภูมิอากาศและน้ำ พบว่าค่าประสิทธิภาพของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนอยู่ระหว่าง 0.4 และ 0.9

อุทัย ประสพชิงชนะ และคณะ [13] วิเคราะห์อัตราการถ่ายเทความร้อนในสภาวะคงตัวผ่านแผ่นครีบลีเหลียมผิวน้ำด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เทียบกับผลการทดลองที่ใช้แผ่นครีบลีเหลียมผิวน้ำตรง ทำจากเหล็กคาร์บอน และอลูมิเนียม ให้ลมร้อนไหลผ่านวัตถุอุณหภูมิและความเร็วลม ซึ่งพอสรุปผลได้ว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านแผ่นครีบลีมีค่าแตกต่างจากผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณวิธีการเชิงวิเคราะห์เป็นร้อยละ 11.8 ขณะที่ค่าความแตกต่างกรณี 3 มิติ เป็นร้อยละ 5.4

การศึกษาเพื่อแก้ปัญหาการถ่ายเทความร้อน ปัญหาการเคลื่อนที่ของความร้อน ปัญหาของแข็ง ปัญหาของแข็งเนื่องจากอุณหภูมิ ปัญหาการไหลแบบศักย์ ปัญหาการไหลแบบหนืด ปัญหาการไหลความเร็วสูง และอื่นๆ ด้วยวิธีการหาคำตอบโดยประมาณ (approximate solution) ของระบบสมการโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (numerical method) มาช่วยในการคำนวณหรือพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (computational fluid dynamics, CFD) จึงเป็นวิธีการหรือเครื่องมือที่มีบทบาทในปัจจุบันอย่างมาก [14-17] จึงทำให้เกิดการสร้างโปรแกรมสำเร็จรูปขึ้นมากมาย แต่ปัญหาของการใช้งานโปรแกรมสำเร็จรูปคือผู้ใช้ต้องกำหนด สภาวะเริ่มต้น (initial condition) ขบวนการ (pre-process) ตัวแปร (parameter setup) ให้ถูกต้อง และการวิเคราะห์ผลลัพธ์ผู้ใช้งานต้องมีความรู้เป็นอย่างดีจึงจะสามารถวิเคราะห์ผลข้อมูลได้อย่างถูกต้อง [14] ดังนั้น CFD จึงเป็นเพียงเครื่องมือ ไม่ได้เข้ามาทดแทนทฤษฎี (theory) และใช้ผลการทดลอง (experimental results) เพื่อยืนยันหรือเปรียบเทียบ (calibration) ผลที่ได้จาก CFD จึงจะเชื่อมั่นได้ถึงความ

เที่ยงตรง นั่นคือปัญหาของการใช้ CFD และปัญหาอีกประการหนึ่งคือซอฟต์แวร์ที่ใช้เพื่อจำลองปัญหาทางวิศวกรรมส่วนใหญ่เป็นซอฟต์แวร์ที่มีลิขสิทธิ์ ราคาสูง สำหรับการศึกษาและการพัฒนาต่อยอด เนื่องจากเป็นลิขสิทธิ์ของต่างชาติ

จากงานวิจัยและปัญหาดังกล่าวข้างต้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเคลื่อนที่ของลมร้อนผ่านวัตถุรูปทรงต่างๆ โดยใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์อย่างง่าย (easy finite element) หรือ EasyFEM ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ที่คนไทยสร้างและพัฒนา [15] มาใช้เปรียบเทียบกับเทคนิคชาร์โดว์กราฟ (shadowgraph technique) ซึ่งเป็นเทคนิคที่สามารถทำให้มองเห็นการเคลื่อนที่ของลมร้อนที่เป็นตัวกลางโปร่งใส (transparent media) [18-20] ซึ่งแตกต่างจากการทดลองอื่นที่ใช้เปรียบเทียบผลการทดลองกับผลของ CFD ด้วยข้อมูลเชิงตัวเลข เช่น เปรียบเทียบด้วยค่าของอุณหภูมิที่จุดต่างๆ ซึ่งไม่สามารถมองเห็นพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงหรือการเคลื่อนที่ของของไหลนั้นได้ ซึ่งเหมาะสำหรับการจำลองการอบแห้ง การถ่ายเทความร้อน การออกแบบครีบบระบายความร้อน การศึกษาอากาศพลศาสตร์ การเคลื่อนที่ของอากาศเพื่อออกแบบหัวจ่าย หรืออื่นๆ ที่เกิดความแตกต่างของความหนาแน่นของของไหล เป็นต้น

2. อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองการเคลื่อนที่ของลมร้อนผ่านวัตถุรูปหน้าตัดรูปทรงต่างๆ ด้วยภาพถ่ายที่ได้จากเทคนิคชาร์โดว์กราฟ กับผลของการคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขจากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์อย่างง่าย หรือ EasyFEM [15] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงแบ่งเป็น 2 ส่วน คือ

1. การถ่ายภาพลมร้อนผ่านวัตถุหน้าตัดรูปทรงต่างๆ ด้วยเทคนิคชาร์โดว์กราฟ
2. การจำลองการไหลของลมร้อนผ่านวัตถุหน้าตัดรูปทรงต่างๆ ด้วยโปรแกรม EasyFEM

การเปรียบเทียบผลจากการทดลองและผลจาก EasyFEM ภายใต้สภาวะเดียวกัน คือ ลมร้อนอุณหภูมิของลมร้อนที่ไหลผ่านวัตถุเป็น 60°C , 80°C และ 100°C ไหลผ่านท่อหน้าตัดสามเหลี่ยม ขนาด 2.5×2.5 cm ท่อกลม เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 cm และท่อหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 2.5×2.5 cm ด้วยความเร็ว 2 m/s การเปรียบเทียบ

ผลการทดลองและการจำลองด้วยมุมของลมร้อนที่เคลื่อนที่ผ่านวัตถุโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปวิธีการวัดระยะหรือมุมของการไหลของลมร้อนใช้โปรแกรมสำเร็จรูปวิธีการวัดจะทำการเปรียบเทียบค่าขนาดของวัตถุกับรูปที่บันทึกได้ก่อนทำการวัดระยะการเคลื่อนที่ของลมร้อน แต่การแสดงผลในภาพการทดลองเป็นเพียงการแสดงให้เห็นมุมและตำแหน่งที่ใช้วัดเท่านั้น

การทดลอง ชั้นทดสอบทั้ง 3 แบบ มีความยาวตลอดพื้นที่หน้าตัดการไหลของลมร้อน ทำให้การไหลของลมร้อนผ่านวัตถุเป็นแบบ 2 มิติ และความเร็วของลมร้อนถูกวัดและควบคุมที่ทางออกของปล่อง

2.1 เทคนิคชาร์โดว์กราฟ

สิ่งที่ได้จากเทคนิคชาร์โดว์กราฟ (Shadowgraph Technique) หรือ shadowgram ไม่ใช่ภาพถ่ายของวัตถุ แต่เป็นภาพเงา [18] ซึ่งเป็นเทคนิคที่เหมาะสมกับการใช้เพื่อศึกษาพฤติกรรมหรือปรากฏการณ์ของ transparent media ดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น เทคนิคชาร์โดว์กราฟ อาศัยหลักการการหักเหของแสงที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่มีความหนาแน่นแตกต่างกันทำให้เกิดเงา ซึ่งไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า เช่นในรูปที่ 1 ภาพถ่ายเทียนไข (ก) ถ่ายโดยตรง (ข) ถ่ายด้วยเทคนิคชาร์โดว์กราฟ



รูปที่ 1 ภาพถ่ายเทียนไข (ก) ถ่ายโดยตรง (ข) ถ่ายด้วยเทคนิคชาร์โดว์กราฟ

รูปที่ 1(ก) แสดงภาพถ่ายเทียนไขที่จุดไฟแล้วด้วยกล้องถ่ายภาพโดยตรง จากรูปจะเห็นเพียงแสงจากเปลวเทียนและไส้เทียนเล็กน้อยเท่านั้นไม่สามารถมองเห็นพฤติกรรมหรือปรากฏการณ์รอบๆ เปลวเทียนได้ ซึ่ง

แตกต่างจากรูปที่ 1(ข) เป็นภาพถ่ายเทียนไขเล่มเดิมด้วยเทคนิคชาร์โดว์กราฟ สามารถมองเห็นพฤติกรรมของอากาศรอบๆ เปลวเทียนได้อย่างชัดเจน นอกจากนั้นยังมองเห็นไส้เทียนไขได้อย่างชัดเจน

งานวิจัยนี้ จัดชุดทดลองกำเนิดลมร้อน และชุดชาร์โดว์กราฟ วางเป็นแบบตัว Z ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งประกอบด้วย ชุดชาร์โดว์กราฟ หมายเลข 1 ถึง 7 และชุดทดลองลมร้อนหมายเลข 8 ถึง 11 โดยมีรายละเอียดดังนี้

หมายเลข 1 ชุดกำเนิดแสง (light source) ประกอบด้วย ส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ ตัวกำเนิดแสงใช้หลอดไฟซีนอน (HID xenon) ค่า Kelvin scale (K) 4,300 K ค่าความส่องสว่าง 3,500 lumen และเลนส์นูนสองด้าน (convex lens) มีระยะจตุรวมแสง (focus) 20 cm

หมายเลข 2 รูเข็ม (pin-hole) หรือรูรับแสงแบบ Diaphragm ขนาดรูรับแสงเล็กสุด 2 mm ทำหน้าที่กรองแสง รูรับแสงยิ่งแคบ ภาพยิ่งชัดลึก

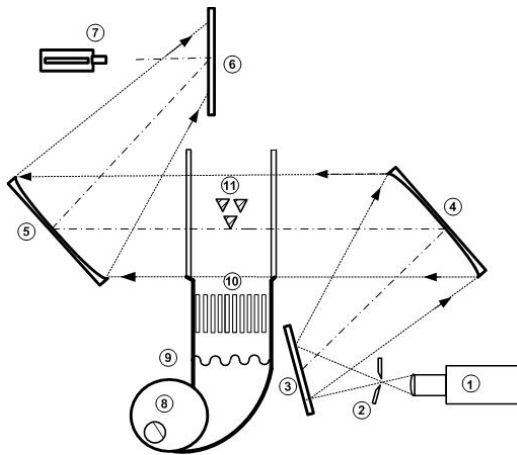
หมายเลข 3 กระจกเงา (plane mirror) เส้นผ่านศูนย์กลาง 30 cm ทำหน้าที่สะท้อนแสง ลดพื้นที่ทดลอง

หมายเลข 4 และ 5 กระจกเงาโค้ง (parabolic mirror) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 cm ระยะรวมแสง 150 cm จำนวน 2 บาน ทำหน้าที่เปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ของแสงที่กระจายในแนวรัศมีจากแหล่งกำเนิดแสงเป็นแนวขนานผ่านห้องทดสอบ และเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ของแสงในแนวขนานเป็นรวมแสง

หมายเลข 6 จอรับภาพสีพื้นดำด้าน ทำหน้าที่เป็นจอรับภาพเพื่อศึกษาพฤติกรรมของลมร้อนที่ไหลผ่านวัตถุรูปทรงต่างๆ

หมายเลข 7 กล้องถ่ายภาพ HS (high speed) ยี่ห้อ Casio รุ่น EX-FH20 ถ่ายภาพเคลื่อนไหว 1,000 fps ภาพนิ่งต่อเนื่อง 40 fps

หมายเลข 8, 9, 10 และ 11 เป็นชุดทดลองซึ่งประกอบด้วย ชุดพัดลมหอยโข่ง (centrifugal fan) หรือโบลเวอร์ (blower) ทำหน้าที่กำเนิดลมให้ไหลผ่านวัตถุ ชุดตัวให้ความร้อนแบบครีป (coil finned heater) ทำหน้าที่เป็นแหล่งความร้อนเพื่อเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของอากาศที่ไหลผ่านวัตถุ ท่อรังผึ้ง (honeycomb) ทำหน้าที่เรียงกระแสมจากโบลเวอร์ให้เคลื่อนที่แบบราบเรียบ (laminar) และสุดท้ายคือห้องทดสอบที่มีวัตถุรูปทรงต่างๆ วางขวางการเคลื่อนที่ของลมเพื่อศึกษาพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลง ตามลำดับ



รูปที่ 2 ชุดทดลองเพื่อถ่ายภาพด้วยเทคนิคชาร์โดว์กราฟ

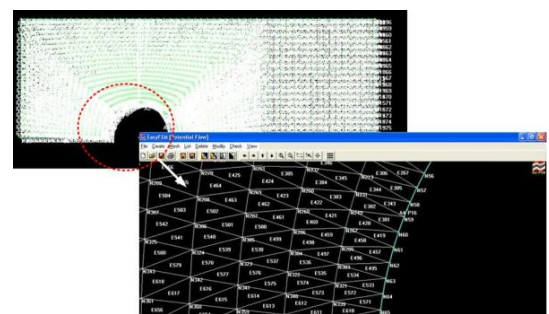
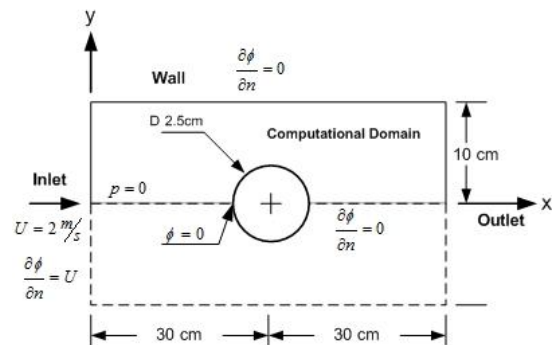
หลักการทำงานของเทคนิคชาร์โดว์กราฟ เริ่มจากแสงที่มีค่าความสว่างสูงกระจายตัวในแนวรัศมีจากแหล่งกำเนิด (หลอด xenon) ผ่านเลนส์นูนทำให้แสงเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่เข้าหาจุดรวมแสงที่ระยะ 20 cm จากเลนส์ ที่จุดรวมแสง แสงจะผ่านรูเข็มเพื่อตัดแสงหรือกรองแสงเพื่อให้ภาพมีความคมชัด แสงจากจุดรวมแสงจะกระจายออกอีกครั้ง (กลับหัว) ตกกระทบลงบนกระจกเงาที่ทำหน้าที่เปลี่ยนทิศทางของแสงเพื่อลดพื้นที่การทดลอง แสงสะท้อนผ่านกระจกเงาตกกระทบกระจกเว้าโค้งที่ระยะ 1,500 cm (จากรูเข็ม) แสงจะเปลี่ยนแนวเคลื่อนที่จากรัศมีเป็นแนวขนาน แสงแนวขนานผ่านห้องทดสอบตกกระทบกระจกโค้งแบนที่ 2 และสะท้อนตกลงบนพื้นจอสีดำ และบันทึกภาพด้วยกล้องถ่ายภาพวิดีโอความเร็วสูง

2.2 ซอฟต์แวร์ Easy Finite Element

การจำลองการไหลของลมร้อนในงานวิจัยนี้ใช้ EasyFEM เวอร์ชัน 1.0 เป็นไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ (finite element software) แก้ปัญหาการไหลแบบศักย์ (potential flow) ที่สามารถสร้างรูปร่างปัญหา (geometry) จนถึงแสดงผลลัพธ์ (displaying results)

จากคู่มือการใช้งานสำหรับงานวิจัยนี้ เป็นการวิเคราะห์ปัญหาการไหลแบบศักย์ (potential flow) ภายใต้สมมุติฐานว่าเป็นการไหลแบบไร้ความหนืด (inviscid flow) ที่ไม่มีการไหลแบบหมุนวน (irrotational flow) ของไหลมีความหนาแน่นคงที่ (incompressible flow) อุณหภูมิของวัตถุที่ลมนร้อนไหลผ่านมีอุณหภูมิคงที่ กำหนดความเร็วของลมเข้า (velocity inlet) 2 m/s กำหนดให้

velocity potential ที่ด้านหน้าวัตถุ ค่าความหนาแน่นเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ ค่าความดัน (fluid pressure) มีค่าเป็นศูนย์ ขอบเขตด้านออก (pressure outlet) กำหนดให้ภาวะไหลด normal velocity potential derivative (U) ผันทางเข้าเป็น 2 ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ขอบเขตของแบบจำลองและรูปร่างของ Mesh

การวิเคราะห์ปัญหาการไหลแบบศักย์ทั้งหมดจะแบ่งโมเดลด้วยเอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบมีระเบียบ ดังแสดงในรูปที่ 3 ที่มี Number of node และ Number of TRIANGLE ดังตารางที่ 1

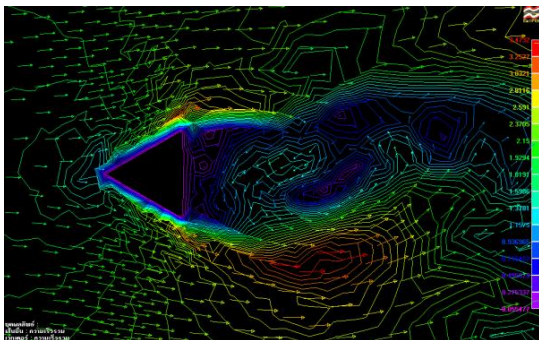
โดยคำแนะนำของคู่มือการใช้งาน EasyFEM ในการกำหนดค่าช่องไฟของจุดต่อเป็น 1 คือการแบ่งระยะช่องไฟของจุดต่อจะเท่ากันตลอดขอบเขตของ wall (ในรูปที่ 3) และค่า number of node กำหนดจากคำสั่ง mesh size ที่ต้องกำหนดขนาด size (ต่ำสุด 0.1 หน่วย) และ minimum element จะเป็นค่าที่กำหนดขึ้น โปรแกรมจะ generate mesh เมื่อค่าที่กำหนดให้สามารถเกิดเอลิเมนต์ที่มีขนาดเล็กกว่าค่าๆ นั้น และการกำหนดกระบวนการคำนวณการทำซ้ำ (iteration process) จะแสดงผลได้เมื่อค่าร้อยละของการเปลี่ยนแปลงในแต่ละเอลิเมนต์นั้นน้อยกว่าค่าที่กำหนด ในการทดลองนี้ค่าที่กำหนดเริ่มต้นได้ค่า

ตัวเลขต่ำสุดของการกำหนดและอื่นๆ คือ Size 0.1 หน่วย minimum element เป็น 3 iteration process 6000 ค่าความเผื่อ 0.000001 แสดงผลทุก 10 ค่า เป็นต้น

ตารางที่ 1 เงื่อนไขการคำนวณและผลของการสร้างขอบเขตของแบบจำลอง

ลำดับ	แบบวัตถุ (ท่อน้ำตัด)	แบบการวาง	Number of node	Number of TRIANGLE
1	สามเหลี่ยม	เดี่ยว	3547	6923
2	สามเหลี่ยม	กลุ่ม	4056	7915
3	สี่เหลี่ยม	เดี่ยว	3744	7312
4	สี่เหลี่ยม	กลุ่ม	4514	8816
5	วงกลม	เดี่ยว	3803	7431
6	วงกลม	กลุ่ม	4474	8751

ผลลัพธ์ที่ได้จาก EasyFEM จะแสดงเป็นแถบสีแสดงค่าศักย์ แถบสีแสดงฟังก์ชันการไหล แถบสีแสดงค่าความดัน และเวกเตอร์ของความเร็ว ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 4



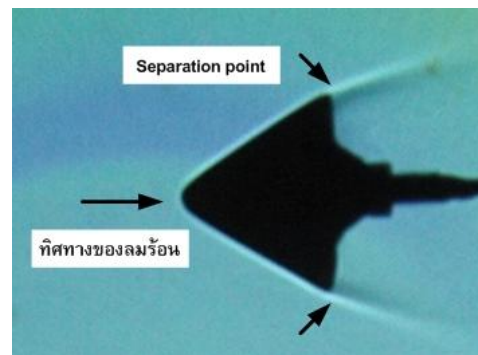
รูปที่ 4 เวกเตอร์ความเร็วลมผ่านวัตถุหน้าตัดรูปสามเหลี่ยม

3. ผลการวิจัย

3.1 ลมร้อนอุณหภูมิ 60°C ผ่านวัตถุรูปทรงสามเหลี่ยมแบบเดี่ยว

ในรูปที่ 5 แสดงภาพตัวอย่างกรณีของการทดลองลมร้อนไหลผ่านวัตถุหน้าตัดสามเหลี่ยม จะเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิลมร้อน 60°C (ค่าความหนาแน่นของอากาศ $\sim 1.06 \text{ kg/m}^3$) ความเร็วลม 2 m/s สามารถเห็นภาพเงาของลมร้อนที่กระจายอยู่บริเวณส่วนท้าย (separation point) ของวัตถุได้อย่างชัดเจน ส่วนท้ายของวัตถุมองเห็นภาพเงาที่แตกต่างกันได้ชัดเจน แสดงถึงความแตกต่างของความหนาแน่นของอากาศ และสันนิษฐานได้ว่า

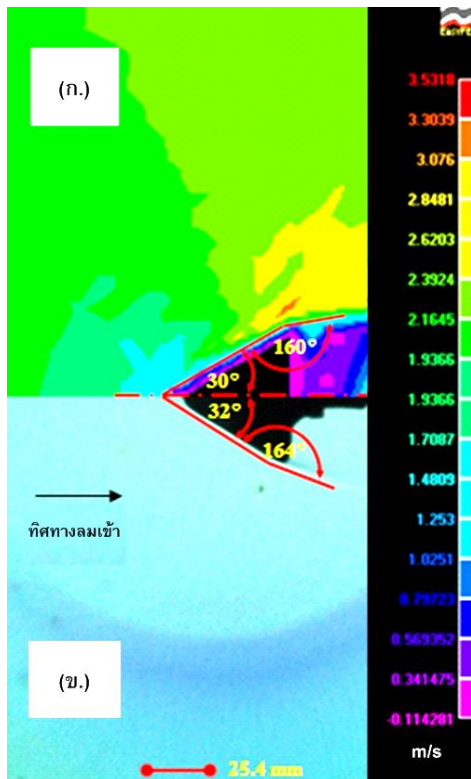
บริเวณดังกล่าวมีความหนาแน่นแตกต่างจากความหนาแน่นเริ่มต้น



รูปที่ 5 ภาพถ่ายด้วยเทคนิคชาร์โดว์กราฟ

รูปที่ 6 การไหลของลมร้อนอุณหภูมิ 60°C ผ่านวัตถุหน้าตัดรูปสามเหลี่ยม (ก) จาก EasyFEM (ข) จากเทคนิคชาร์โดว์กราฟ จะเห็นว่าพฤติกรรมของการเคลื่อนที่ของลมร้อนผ่านวัตถุมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยเฉพาะ separation point ส่วนหาง ผลจาก EasyFEM ดูได้จากแถบสีฟังก์ชันการไหลที่ใช้เทียบความเร็วลมที่ผ่านวัตถุ (ที่ความเร็วปกติ 2 m/s แสดงด้วยแถบสีเขียว) บริเวณ separation point ส่วนหางของวัตถุเส้นสีจะแสดงให้เห็นเป็นสีแดงแสดงถึงความเร็วลมที่สูงกว่าความเร็วเริ่มต้น ความเร็วสูงสุดของลมร้อนอยู่ที่ประมาณ 3.53 m/s บริเวณส่วนหลังของวัตถุเป็นสีม่วง แสดงถึงศักยภาพการไหลที่ต่ำกว่าเริ่มต้น ซึ่งเป็นพฤติกรรมของการไหลแบบปั่นป่วนหรืออากาศหมุนวน (wake) ขึ้น ตามหลัก aerodynamics เกิดจากการเหนี่ยวนำอากาศด้านหลังวัตถุ เป็นบริเวณที่ลมร้อนมีความเร็วต่ำสุด (0.114 m/s)

เปรียบเทียบผลที่ได้จาก EasyFEM กับการทดลองพบว่าผลจาก EasyFEM ขนาดมุมของลมร้อนส่วนหน้าหรือมุมของลมร้อนที่ Separation point มีค่า 30° และมุมของลมร้อนส่วนหาง 160° (40°จากแนวการเคลื่อนที่ของลมร้อน) และผลที่ได้จากการทดลอง พบว่าขนาดมุมของลมร้อนส่วนหน้า 32° และมุมของลมร้อนส่วนหาง 164° (42°จากแนวการเคลื่อนที่ของลมร้อน) จากผลทั้ง 2 การเคลื่อนที่ของลมร้อนมีมุมใกล้เคียงกันร้อยละ 97 การวิเคราะห์ผลจากภาพถ่ายสามารถมองเห็นพฤติกรรมของการเคลื่อนที่ของลมร้อนได้อย่างชัดเจน



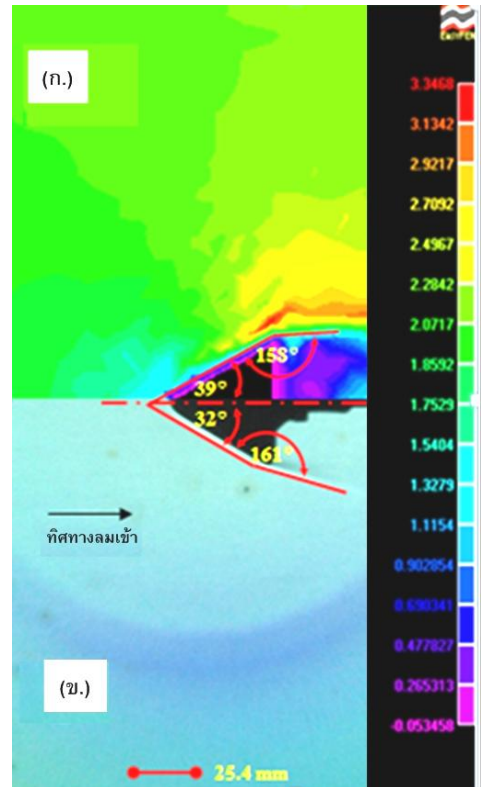
รูปที่ 6 การไหลของลมนร้อนอุณหภูมิ 60°C ผ่านวัตถุหน้าตัดสามเหลี่ยม (ก) ระดับแถบสีความเร็วของอากาศ (m/s) จาก EasyFEM (ข) จากเทคนิคชาร์โดว์กราฟ

3.2 ลมนร้อนอุณหภูมิ 80°C ผ่านวัตถุหน้าตัดสามเหลี่ยมแบบเดี่ยว

รูปที่ 7 การไหลของลมนร้อนอุณหภูมิ 80°C ผ่านวัตถุหน้าตัดสามเหลี่ยม (ก) ระดับแถบสีความเร็วของอากาศ (m/s) จาก EasyFEM (ข) จากเทคนิคชาร์โดว์กราฟ ความเร็วลม 2 m/s ที่อุณหภูมิ 80°C (ค่าความหนาแน่นของอากาศ $\sim 1.0004 \text{ kg/m}^3$)

จากรูปจะเห็นว่าพฤติกรรมของการเคลื่อนที่ของลมนร้อนผ่านวัตถุไม่แตกต่างกันมากนัก ผลจาก EasyFEM ซึ่งดูได้จากแถบสีฟังก์ชันการไหลที่ใช้เทียบความเร็วลมที่ไหลผ่านวัตถุ ในส่วนท้ายของวัตถุบริเวณ separation point ความเร็วสูงสุดประมาณ 3.34 m/s ความเร็วต่ำสุดประมาณ 0.05 m/s สาเหตุที่ทำให้ความเร็วต่ำดังที่ได้กล่าวไว้ในส่วนก่อนหน้านั้น คือ รูปทรงของวัตถุทำให้เกิดอากาศหมุนวนความเร็วจึงลดลงโดยเฉพาะวัตถุรูปทรงด้านการเคลื่อนที่หรือ bunt body ผลของการเคลื่อนที่ของลมนร้อนจาก EasyFEM ได้ขนาดมุมส่วนหน้าของวัตถุ 39° และส่วนท้าย

158° (29°จากแนวการเคลื่อนที่ของลมนร้อน) และผลจากการทดลองได้ ขนาดมุมส่วนหน้าของวัตถุ 32° และส่วนท้าย 161° (39°จากแนวการเคลื่อนที่ของลมนร้อน) จากการเปรียบเทียบผลของมุมการเคลื่อนที่ของลมนร้อนใกล้เคียงกันร้อยละ 98



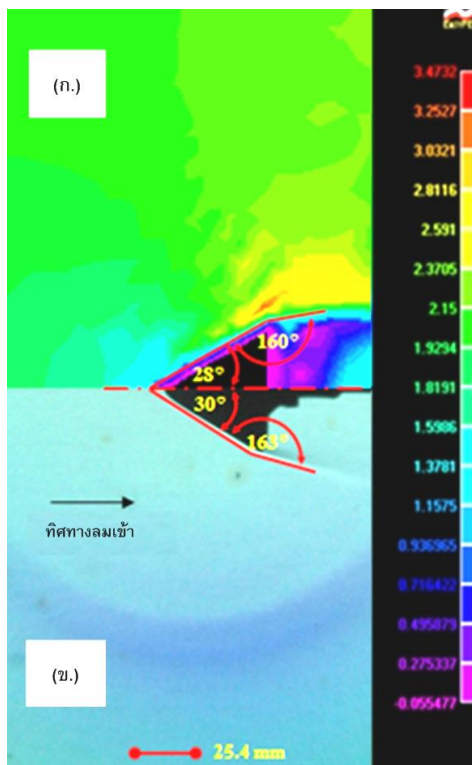
รูปที่ 7 การไหลของลมนร้อนอุณหภูมิ 80°C ผ่านวัตถุหน้าตัดสามเหลี่ยม (ก) ระดับแถบสีความเร็วของอากาศ (m/s) จาก EasyFEM (ข) จากเทคนิคชาร์โดว์กราฟ

3.3 ลมนร้อนอุณหภูมิ 100°C ผ่านวัตถุหน้าตัดสามเหลี่ยมแบบเดี่ยว

รูปที่ 8 การไหลของลมนร้อนอุณหภูมิ 100°C ผ่านวัตถุหน้าตัดสามเหลี่ยม (ก) ระดับแถบสีความเร็วของอากาศ (m/s) จาก EasyFEM (ข) จากเทคนิคชาร์โดว์กราฟ (ค่าความหนาแน่นของอากาศ $\sim 0.9467 \text{ kg/m}^3$)

พฤติกรรมของการเคลื่อนที่ของลมนร้อนอุณหภูมิ 100°C ผ่านวัตถุหน้าตัดสามเหลี่ยมไม่ต่างจากพฤติกรรมของการเคลื่อนที่ของลมนร้อนใน 2 กรณีแรก ความเร็วสูงสุดประมาณ 3.47 m/s ความเร็วต่ำสุดประมาณ 0.05 m/s แต่ความแตกต่างที่เห็นได้ชัดจากการใช้เทคนิคชาร์โดว์กราฟ คือ

เมื่ออุณหภูมิสูง ความคมชัดของภาพการเคลื่อนที่ของอากาศจะลดลง สาเหตุเนื่องจากความหนาแน่นของตัวกลางที่แสงส่องผ่านต่ำทำให้ภาพเงาไม่คมชัด ซึ่งสัมพันธ์กับผลที่ได้จาก EasyFEM ที่อุณหภูมิสูง ส่วนหาง separation point แถบสีแสดงกระจายตัวต่ำกว่าสองกรณีแรก สาเหตุจากความหนาแน่นต่ำทำให้การบีบอัดอากาศบริเวณ separation point ต่ำ ส่วนทิศทางและมุมระหว่างรูปภาพทั้งสองกรณี พบว่าผลจาก EasyFEM ได้มุมส่วนหน้าของวัตถุ 28° และส่วนท้าย 160° (42° จากแนวการเคลื่อนที่ของลมร้อน) กรณีการทดลอง ขนาดมุมส่วนหน้าของ 30° และส่วนท้าย 163° (43° จากแนวการเคลื่อนที่ของลมร้อน) จากการเปรียบเทียบผลของมุมการเคลื่อนที่ของลมร้อนใกล้เคียงกันร้อยละ 98

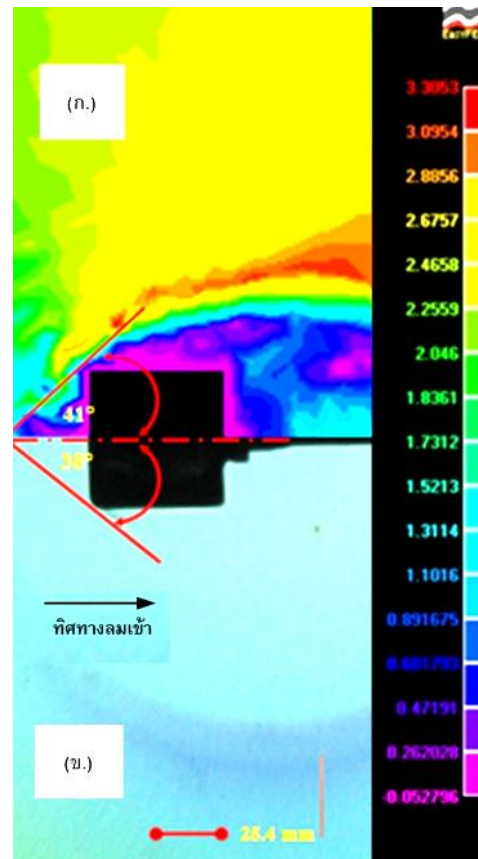


รูปที่ 8 การไหลของลมร้อนอุณหภูมิ 100°C ผ่านวัตถุหน้าตัดสามเหลี่ยม (ก) ระดับแถบสีความเร็วของอากาศ (m/s) จาก EasyFEM (ข) จากเทคนิคชาร์โดว์กราฟ

3.4 ลมร้อนผ่านวัตถุหน้าตัดสี่เหลี่ยมแบบเดี่ยว

รูปที่ 9 การไหลของลมร้อนอุณหภูมิ 60°C ผ่านวัตถุหน้าตัดสี่เหลี่ยม (ก) ระดับแถบสีความเร็วของอากาศ

(m/s) ภาพจาก EasyFEM (ข) ภาพจากเทคนิคชาร์โดว์กราฟ



รูปที่ 9 การไหลของลมร้อนอุณหภูมิ 60°C ผ่านวัตถุหน้าตัดสี่เหลี่ยม (ก) ระดับแถบสีความเร็วของอากาศ (m/s) จาก EasyFEM (ข) ภาพจากเทคนิคชาร์โดว์กราฟ

เมื่อทำการเปรียบเทียบผลทั้งสองแล้วจะเห็นว่าพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของลมร้อนผ่านวัตถุมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน ผลที่ได้จาก EasyFEM ซึ่งดูได้จากแถบสีพบว่าวัตถุรูปทรงสี่เหลี่ยมมีอิทธิพลต่อพฤติกรรมของลมร้อนมากกว่ารูปทรงสามเหลี่ยมตามหลัก aerodynamics วัตถุรูปทรงสี่เหลี่ยมมีค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน (drag coefficient, C_d) เท่ากับ 1.05 สูงกว่ารูปทรงสามเหลี่ยม (0.5) และทรงกลม (0.47) ดังนั้นผลจาก EasyFEM จึงเห็นการกระจายตัวของอากาศเมื่อผ่านวัตถุซึ่งได้ชัดเจนจากเส้นสีที่กระจายทั่ว (เมื่อเทียบกับวัตถุรูปทรงสามเหลี่ยม) มุมของลมร้อนที่ปะทะวัตถุที่ separation point จึงสูงกว่ากรณีรูปทรงอื่น

ที่ผิวรอบวัตถุ โดยเฉพาะด้านหลัง separation point แถบสีแสดงฟังก์ชันการไหลอยู่ระดับต่ำกว่าที่ความเร็วลมเริ่มต้นปกติมาก (ความเร็วต่ำสุดที่ 0.05 m/s) มุมการเคลื่อนที่ของลมร้อน ที่ separation point จาก EasyFEM เป็น 41° ส่วนการทดลองมีขนาดของมุมหักเหของลมร้อนเท่ากัน 38° จากการเปรียบเทียบผลบอกได้ว่ามีความเหมือนร้อยละ 93

กรณีของลมร้อนอุณหภูมิ 80°C และ 100°C เคลื่อนที่ผ่านวัตถุหน้าตัดสี่เหลี่ยมแบบเดียวกันนั้น พฤติกรรมของอากาศรอบๆ วัตถุไม่แตกต่างกันมากสรุปได้ดังนี้ กรณีอุณหภูมิ 80°C มุมการเคลื่อนที่ของลมร้อนจาก EasyFEM เป็น 34° ส่วนการทดลองมีขนาดของมุมหักเหของลมร้อนเท่ากัน 34° ในกรณีอุณหภูมิ 100°C มุมการเคลื่อนที่ของลมร้อนจาก EasyFEM เป็น 35° ส่วนการทดลองมีขนาดของมุมหักเหของลมร้อนเท่ากัน 35° จากผลการทดลองทั้งสามกรณีด้วยวิธีการทั้ง 2 แบบ การกระจายตัวของอากาศลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น สาเหตุที่เป็นไปได้ในการเพิ่มอุณหภูมิมีผลทำให้แรงต้านการเคลื่อนที่ (Drag force, F_d) ลดลงดังสมการ $1/2\rho V^2 C_d A$ เมื่อตัวแปรหลักของสมการนี้คือ ค่าความหนาแน่นของอากาศ (ρ) ที่เป็นที่ยอมรับเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ

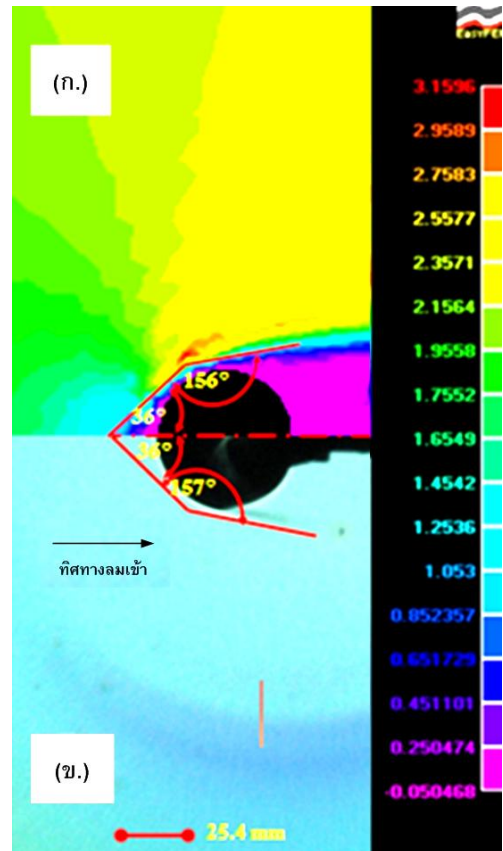
3.5 ลมร้อนผ่านวัตถุหน้าตัดวงกลมแบบเดี่ยว

รูปที่ 10 การไหลของลมร้อนอุณหภูมิ 60°C ผ่านวัตถุหน้าตัดวงกลม (ก) ระดับแถบสีความเร็วของอากาศ (m/s) ภาพจาก EasyFEM (ข) ภาพจากเทคนิคชาร์โดว์กราฟเมื่อทำการเปรียบเทียบผลแล้วจะเห็นว่า พฤติกรรม การเคลื่อนที่ของลมร้อนผ่านวัตถุมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน ผลจาก EasyFEM ซึ่งดูได้จากแถบสีและมุมที่วัดได้ พบว่าวัตถุรูปวงกลม มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมของลมร้อนน้อยกว่ารูปสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยม เนื่องจาก C_d ของวัตถุรูปทรงกลมมีค่าต่ำสุด (0.47, 0.5, 1.05 ตามลำดับ) ความเร็วลมที่ผิวและส่วนหลังวัตถุต่ำกว่าความเร็วเริ่มต้น (ความเร็วต่ำสุดที่ 0.05 m/s)

มุมของลมร้อนจาก EasyFEM แบ่งเป็น 2 มุม คือ มุมต้น 36° และมุมปลาย 156° จากมุมต้น (30° จากแนวแกน) ผลจากการทดลอง ได้ 36° กับ 157° (31° จากแนวแกน) เท่ากันดังรูป

กรณีของลมร้อนอุณหภูมิ 80°C และ 100°C เคลื่อนที่ผ่านวัตถุรูปทรงกลมแบบเดียวกันนั้น พฤติกรรมของอากาศที่ไหลผ่านวัตถุไม่แตกต่างกัน พอสรุปได้ดังนี้

กรณีอุณหภูมิ 80°C มุมการเคลื่อนที่ของลมร้อนจาก EasyFEM เป็น 37° และ 155° (28° จากแนวแกน) ผลจากการทดลองเป็น 38° และ 157° (29° จากแนวแกน) ที่ส่วนต้นกับส่วนหาง ตามลำดับ



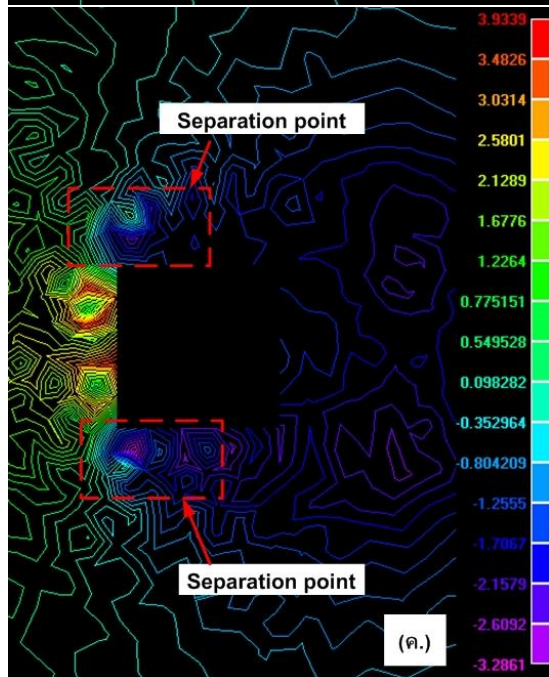
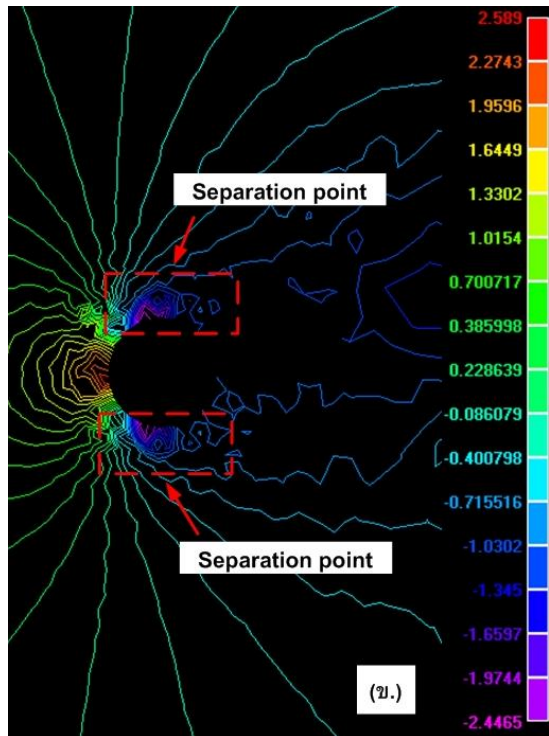
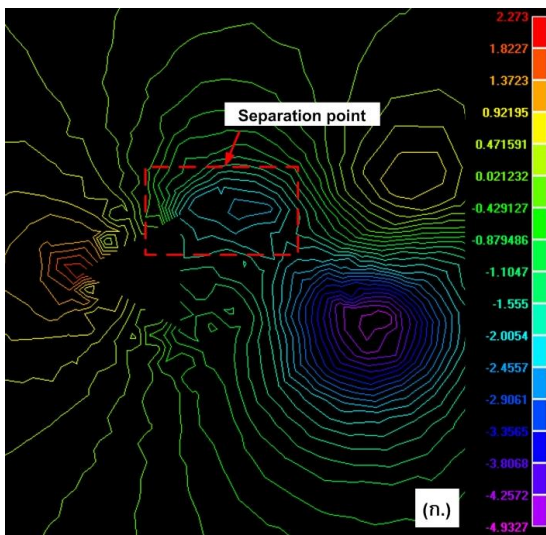
รูปที่ 10 การไหลของลมร้อนอุณหภูมิ 60°C ผ่านวัตถุหน้าตัดวงกลม (ก) ระดับแถบสีความเร็วของอากาศ (m/s) จาก EasyFEM (ข) ภาพจากเทคนิคชาร์โดว์กราฟ

กรณีอุณหภูมิ 100°C มุมการเคลื่อนที่ของลมร้อนจาก EasyFEM เป็น 38° และ 157° (29° จากแนวแกน) ผลจากการทดลองเป็น 37° และ 153° (26° จากแนวแกน) ที่ส่วนต้นกับส่วนหาง ตามลำดับ

3.6 เส้นชั้นความดันของลมร้อนผ่านวัตถุหน้าตัดรูปทรงต่างๆ

จากรูปที่ 11 แสดงเส้นชั้นความดัน (bar) ของลมร้อนอุณหภูมิ 100°C ผ่านวัตถุหน้าตัดสามเหลี่ยม (ก) หน้าตัดกลม (ข) และหน้าตัดสี่เหลี่ยม (ค) จาก EasyFEM เห็นได้ชัดถึงความแตกต่างของค่าความดันที่บริเวณส่วนหน้าของวัตถุจากระดับแถบสีความดัน คือ ความดันสูงสุดเกิดขึ้นกับวัตถุหน้าตัดสี่เหลี่ยม วงกลม และสามเหลี่ยม ตามลำดับ สาเหตุจากวัตถุรูปทรงสี่เหลี่ยมมีค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านสูงกว่าวัตถุรูปวงกลมและสามเหลี่ยม ดังที่ได้กล่าวในข้างต้นแล้ว

จากรูปที่ 11(ก) แสดงเส้นชั้นความดัน (bar) ของลมร้อนอุณหภูมิ 100°C ผ่านหน้าตัดสามเหลี่ยม จากแถบสีแสดงให้เห็นว่าความดันอากาศบริเวณด้านหน้าสูงและความดันด้านหลังต่ำกว่าความดันของอากาศรอบวัตถุ ส่วนท้ายของวัตถุเกิดการแยกตัวของชั้นความดัน หรือ Separation และเกิดการหมุนวนของอากาศความดันต่ำ (เส้นสีน้ำเงิน) บริเวณส่วนท้ายของวัตถุ ซึ่งแตกต่างจากพฤติกรรมของลมร้อนไหลผ่านวัตถุหน้าตัดวงกลม รูปที่ 11(ข) และสี่เหลี่ยมที่เกิด Separation บริเวณส่วนหน้าของวัตถุ รูปที่ 11(ค) เช่นเดียวกับภาพที่ได้จากเทคนิคซาร์ไดวกราฟ

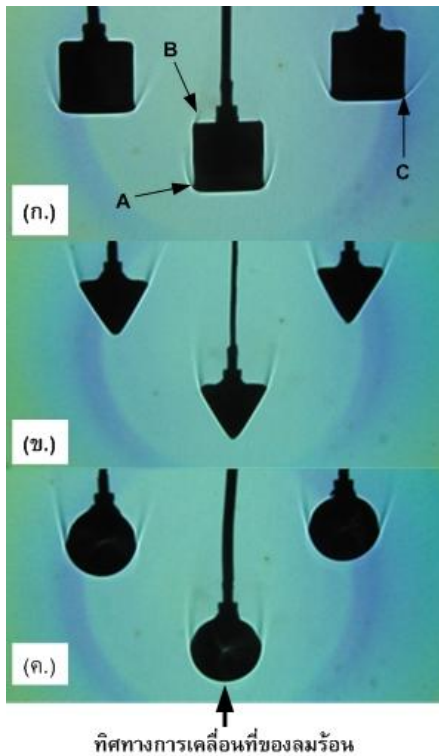


รูปที่ 11 เส้นชั้นความดัน (bar) ของลมร้อนอุณหภูมิ 100°C ผ่านวัตถุหน้าตัดสามเหลี่ยม (ก) ท่อกลม (ข) และสี่เหลี่ยม (ค) จาก EasyFEM

3.7 ลมร้อนไหลผ่านวัตถุรูปทรงต่างๆ แบบกลุ่ม

กรณีของลมร้อนไหลผ่านวัตถุหน้าตัดสี่เหลี่ยมสามเหลี่ยมและวงกลม ที่จัดไว้แบบกลุ่ม ดังแสดงให้เห็น

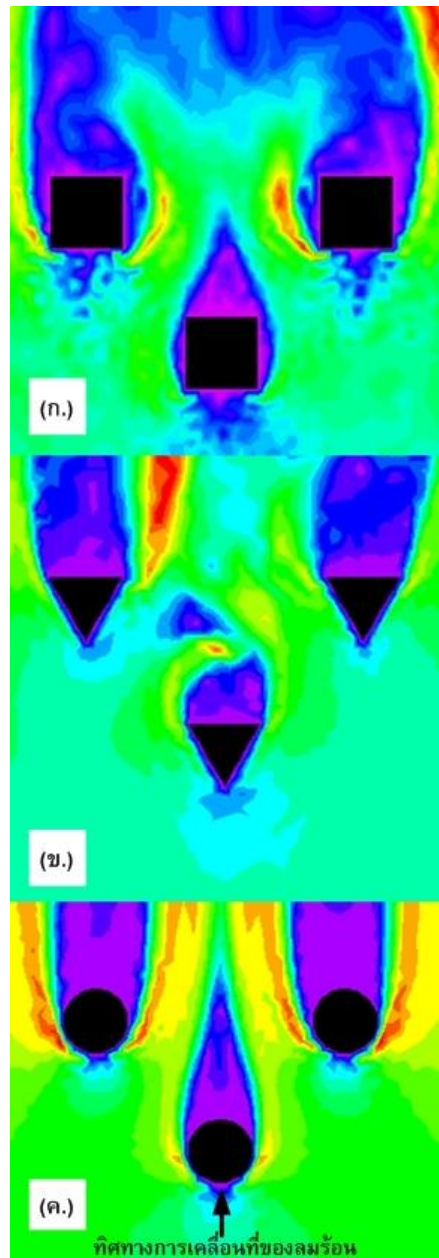
รูปที่ 12 การไหลของลมร้อนอุณหภูมิ 60°C ผ่านวัตถุหน้าตัดสี่เหลี่ยม (ก) สามเหลี่ยม (ข) วงกลม (ค) ด้วยเทคนิคชาร์โดว์กราฟ



รูปที่ 12 การไหลของลมร้อนอุณหภูมิ 60°C ผ่านวัตถุหน้าตัดสี่เหลี่ยม (ก) สามเหลี่ยม (ข) วงกลม (ค) ด้วยเทคนิคชาร์โดว์กราฟ

การทดลองใช้ความเร็วลมที่ไหลผ่านวัตถุแบบกลุ่มและอุณหภูมิของลมร้อนเท่ากับการทดลองในกรณีลมร้อนไหลผ่านวัตถุแบบเดี่ยว คือ 2 m/s อุณหภูมิ 60°C , 80°C และ 100°C จากรูปสามารถมองเห็นพฤติกรรมของการเคลื่อนที่ของลมร้อนความเร็ว 2 m/s อุณหภูมิ 60°C เคลื่อนที่จากด้านหน้าของวัตถุไปด้านหลังได้อย่างชัดเจน และชัดเจนในทุกกรณี จึงนำเสนอเฉพาะภาพถ่ายด้วยเทคนิคชาร์โดว์กราฟ ของอุณหภูมิ 60°C เท่านั้น จากรูปจะเห็นได้ว่าลมร้อนที่ไหลผ่านวัตถุมีพฤติกรรมทั่วไปไม่ต่างกับการไหลของลมร้อนผ่านวัตถุแบบเดี่ยว ความชัดเจนของการเคลื่อนที่ของลมร้อนเกิดขึ้นบริเวณส่วนท้ายของวัตถุที่ Separation point ได้อย่างชัดเจน โดยเฉพาะในรูปที่ 12(ก) จะเห็นแนวการเคลื่อนที่ของอากาศเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนหัว (A) และส่วนท้ายของวัตถุ (B) แยกออกจาก

ชัดเจนซึ่งไม่พบปรากฏการณ์นี้กับการเคลื่อนที่ของลมร้อนผ่านวัตถุแบบเดี่ยวทั้งด้วยวิธี EasyFEM และการทดลอง นอกจากนี้ จากภาพถ่ายยังพบว่ามุมของอากาศผ่านวัตถุด้านหน้าที่ยากอากาศไหลผ่านถูกบีบเข้าหาตัววัตถุหรือกล่าวได้ว่ามุมของอากาศที่ไหลผ่านวัตถุแถวหน้าทั้งสองด้าน (จุด A) แคบกว่าวัตถุแถวหลัง (จุด C)

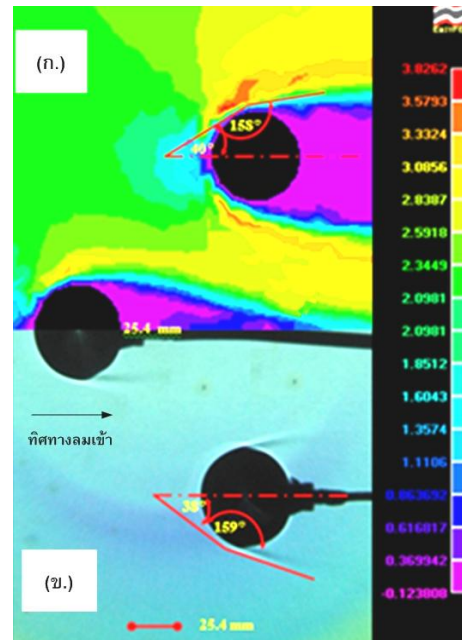


รูปที่ 13 ระดับสีความเร็วของลมร้อน (m/s) อุณหภูมิ 60°C ไหลผ่านวัตถุหน้าตัดสี่เหลี่ยม (ก) สามเหลี่ยม (ข) วงกลม (ค) ด้วย EasyFEM

รูปที่ 13 ระดับสีความเร็วของลมร้อน (m/s) อุณหภูมิ 60°C ไหลผ่านวัตถุหน้าตัดสี่เหลี่ยม (ก) สามเหลี่ยม (ข) วงกลม (ค) ด้วย EasyFEM ผลจากโปรแกรม EasyFEM แสดงพฤติกรรมเคลื่อนที่ของลมร้อนด้วยแถบสีแสดงเส้นฟังก์ชันการไหล รูปที่ 13(ก) ลมร้อนผ่านวัตถุรูปทรงสี่เหลี่ยมแบบกลุ่ม รูปที่ 13(ข) ลมร้อนผ่านวัตถุรูปทรงสามเหลี่ยมแบบกลุ่ม และรูปที่ 13(ค) ลมร้อนผ่านวัตถุรูปทรงกลมแบบกลุ่ม

จากผลที่ได้จะเห็น ชัดเจนว่าลมร้อนที่ผ่านวัตถุแถวแรกแล้วเส้นฟังก์ชันการไหลเปลี่ยนแปลงมีรูปทรงเหมือนหยดน้ำ (streamlined body) หรือ Airfoil สาเหตุเกิดจากพฤติกรรมไหลของของไหลผ่านวัตถุ เกิดการไหลแบบปั่นป่วน (turbulence) ด้านหลังวัตถุ ความดันด้านหลังต่ำตามหลัก Aerodynamics เกิดการเหนี่ยวนำอากาศด้านหลังวัตถุและอากาศจะไหลกลับมาบรรจบกัน (convergence point) ประกอบกับอากาศบริเวณ Separation point ของวัตถุแถวสอง (ทั้งสองด้านของวัตถุแถวหน้า) ที่กระจายตัวออกทำให้บีบเส้นทางการไหล Streamline ที่ผ่านวัตถุแถวแรก โดยเฉพาะวัตถุรูปทรงมน ที่อ (blunt body) เช่นเดียวกับวัตถุรูปทรงกลมที่พฤติกรรมเคลื่อนที่ของ streamline ที่ผ่านวัตถุเข้าแนวบรรจบกันอย่างชัดเจน

รูปที่ 14 การไหลของลมร้อนอุณหภูมิ 60°C ผ่านวัตถุหน้าตัดวงกลมแบบกลุ่ม (ก) จาก EasyFEM (ข) เทคนิคชาร์โดว์กราฟ จะเห็นว่าเห็นพฤติกรรมของลมร้อนชัดเจนทั้ง 2 วิธี แต่ผลของ EasyFEM ให้รายละเอียดพฤติกรรมที่เกิดขึ้นด้านหลังวัตถุได้ดีกว่า ส่วนความแตกต่างของมุมของอากาศร้อนที่เคลื่อนที่ผ่านวัตถุหรือมุมของเส้น streamline ที่ separation point ระหว่าง 2 วิธีการ ได้ผลการวิจัยทุกกรณีของการทดลองต่างกันไม่เกิน 2°



รูปที่ 14 การไหลของลมร้อนอุณหภูมิ 60°C ผ่านวัตถุหน้าตัดวงกลมแบบกลุ่ม (ก) ระดับแถบสีความเร็วของอากาศ (m/s) จาก EasyFEM (ข) เทคนิคชาร์โดว์กราฟ

4. สรุป

จากปัญหาที่มาของงานวิจัยนี้ คือการใช้โปรแกรมสำเร็จรูป CFD ที่มีลิขสิทธิ์หรือซื้อลิขสิทธิ์ของต่างชาติยากที่จะพัฒนาต่อยอดเพื่อการศึกษาไทย และปัญหาการเปรียบเทียบผล CFD เพื่อยืนยันความถูกต้องจะใช้ผลทางตัวเลขในการเปรียบเทียบซึ่งมองไม่เห็นพฤติกรรมเปลี่ยนแปลง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้โปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์อย่างง่าย (easy finite element) หรือ EasyFEM ที่เป็นซอฟต์แวร์ที่คนไทยสร้าง มาใช้เปรียบเทียบกับภาพถ่ายด้วยเทคนิคชาร์โดว์กราฟ ซึ่งเป็นเทคนิคที่สามารถทำให้มองเห็นการเคลื่อนที่ของลมร้อนได้ด้วยตาเปล่า ผลจาก CFD เปรียบเทียบกับผลการทดลองด้วยภาพถ่าย มีผลไม่แตกต่างกันมากในทุกกรณี

งานวิจัยนี้เปรียบเทียบผลของมุมของของไหลในบริเวณ separation point ที่ความเร็วของลมร้อน 2 m/s ผลเบื้องต้นที่ได้จาก CFD จะให้รายละเอียดและข้อมูลเชิงตัวเลขในมิติอื่นๆ ได้มากกว่าเทคนิคชาร์โดว์กราฟ แต่อย่างไรก็ตามผลการทดลองที่ได้เป็นรูปภาพ หรือ ภาพเคลื่อนไหว แสดงพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงที่สามารถมองเห็นได้ย่อมมีประโยชน์ในการวิเคราะห์ข้อมูล

ได้ดีกว่าข้อมูลเชิงตัวเลขเพียงอย่างเดียว และที่สำคัญคือสามารถมองเห็นพฤติกรรมเคลื่อนที่ของลมร้อนได้อย่างต่อเนื่องด้วยกล้องถ่ายภาพเคลื่อนไหว หรือกล้องวีดิโอ ผลที่เกิดขึ้นระหว่างการทดลองกับ CFD มีความแตกต่างกันบ้างเล็กน้อย พอสรุปได้ดังนี้

1. กรณี วัดอุณหภูมิตรงหน้าตัดสามเหลี่ยมแบบเดียว อุณหภูมิ 60°C 80°C และ 100°C เป็น $164^{\circ}/160^{\circ}$, $161^{\circ}/158^{\circ}$ และ $163^{\circ}/160^{\circ}$ ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างกันเฉลี่ย 3 องศา เช่นเดียวกันกับกรณีวัดอุณหภูมิสี่เหลี่ยม ส่วนของวัตถุหน้าตัดวงกลม แบ่งการแยกตัวของลมร้อนเป็น 2 มุม ที่มีค่า $30^{\circ}/36^{\circ}$ กับ $164^{\circ}/160^{\circ}$, $37^{\circ}/38^{\circ}$ กับ $155^{\circ}/157^{\circ}$ และ $38^{\circ}/37^{\circ}$ กับ $157^{\circ}/153^{\circ}$ ตามลำดับ

2. กรณี วัดรูปแบบกลุ่มได้ผลจากการทดลองกับ CFD ต่างกันไม่เกิน 2 องศา เช่น กรณีลมร้อนไหลผ่านวัตถุหน้าตัดวงกลมได้ผลการทดลองเป็น $38^{\circ}/40^{\circ}$ กับ $159^{\circ}/158^{\circ}$ เป็นต้น

จากผลการทดลองกับผลจากการจำลองมีความแตกต่างกันซึ่งสาเหตุเบื้องต้นพอสันนิษฐานได้ว่าการคลาดเคลื่อนจากการวัด แบบจำลองที่บางค่าที่ไม่ได้นำมาพิจารณา เช่น friction loss หรือค่าความหนาแน่นของอากาศที่มีค่าคลาดเคลื่อนระหว่างการใช้อากาศอุณหภูมิทางเข้าของลมร้อนก่อนไหลผ่านวัตถุซึ่งเปลี่ยนแปลงเมื่อลมร้อนสูญเสียความร้อนให้กับสิ่งแวดล้อมซึ่งแตกต่างกับการจำลองที่ถูกกำหนดให้อยู่ในสภาวะคงที่ เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามผลที่ได้จากพฤติกรรมไหลของลมร้อนจากผลที่ได้ทั้งสองวิธีสามารถนำมาเทียบกันและนำไปประยุกต์ใช้กับงานต่างๆ ที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสุรินทร์ และ รศ.ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้การสนับสนุนการทำวิจัยมา ณ โอกาสนี้ด้วย

เอกสารอ้างอิง

- [1] ขนิษฐา สุตพันธ์ และ มงคล มงคลวงศ์โรจน์. 2552. การจำลองเชิงคำนวณของการไหลในหลอดเลือดตีบ

และหลอดเลือดบายพาส. วิศวกรรมสาร มก. 69: 80-90.

- [2] สนิท วงษา และ ยาสุภกิ ชิมิชี. 2555. การประยุกต์ใช้โปรแกรม D Flood ในการจำลองสถานการณ์น้ำท่วมใหญ่ภาคกลางของประเทศไทยปี 2554. 7th THAICID NATIONAL SYMPOSIUM 2555, นนทบุรี, ประเทศไทย, 19 มิถุนายน 2555: 1-10.
- [3] ประพันธ์พงษ์ สมศิลา และ อำไพศักดิ์ ธิบุญมา. 2556. อิทธิพลของอัตราส่วนสมมูลต่อประสิทธิภาพการไหลเวียนอากาศภายในเครื่องอบแห้งแสงอาทิตย์. วารสารวิชาการ วิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ. 6: 46-54.
- [4] ประพันธ์พงษ์ สมศิลา และ อำไพศักดิ์ ธิบุญมา. 2556. ลักษณะของอุณหภูมิและความเร็วอากาศภายในโรงเรือนอบแห้งแสงอาทิตย์ชนิดหลังคาสามเหลี่ยมหน้าจั่ว. งานประชุมวิชาการ มหาวิทยาลัยมหาสารคามวิจัย ครั้งที่ 9, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม มหาสารคาม, ประเทศไทย, 12-13 กันยายน 2556.
- [5] ประพันธ์พงษ์ สมศิลา และ อำไพศักดิ์ ธิบุญมา. 2556. อิทธิพลของอากาศภายในโรงอบแห้งยางพาราพลังงานแสงอาทิตย์ชนิดหลังคามุมเอียง. งานประชุมวิชาการ มหาวิทยาลัยมหาสารคามวิจัย ครั้งที่ 9, มหาวิทยาลัยมหาสารคามมหาสารคาม, ประเทศไทย, 12-13 กันยายน 2556.
- [6] อำไพศักดิ์ ธิบุญมา และ ประพันธ์พงษ์ สมศิลา. 2556. ผลของปล่องความร้อนที่ต่อการปรับอากาศของบ้านพักอาศัยในฤดูหนาว. งานประชุมวิชาการ มหาวิทยาลัยมหาสารคามวิจัย ครั้งที่ 9, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม, ประเทศไทย, 12-13 กันยายน 2556.
- [7] ปรีชา มุขดา, กุลเชษฐ์ เพียรทอง และ วีระพันธ์ สีหนาม. 2551. การลดลงของสัมประสิทธิ์แรงต้านในกรณีวิ่งตามกันของรถบรรทุกเล็ก. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 22, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต, ประเทศไทย, 15-17 ตุลาคม 2551.
- [8] ยุทธชัย เกียวสันเทียะ และ ประโยชน์ ชมพุดตร. 2551. การลดอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงของรถกระบะโดยการคลุมผ้าใบที่ช่วงท้ายกระบะ. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต, ประเทศไทย, 15-17 ตุลาคม 2551.

- [9] ภาคภูมิ สุภาชาติ, อติศักดิ์ นาถกรณกุล และ ณัฏฐ์ กาศยปนนท์. การประชุมวิชาการด้านพลังงาน สิ่งแวดล้อมและวัสดุ ครั้งที่ 1, คณะพลังงาน สิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, ประเทศไทย, 31 สิงหาคม 2550.
- [10] ปพน พุทธธนาศักดิ์. 2553. การศึกษาการไหลของอากาศและการประหยัดพลังงานในห้องสะอาดที่ประกอบห้วอ่านฮาร์ดดิสก์, วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- [11] ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์, สันติ หวังนิพนพานโต และ จีรพรรณ เตียรย์สุวรรณ. 2542. ผลของการใช้สนามไฟฟ้าในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนในของเหลวไดอิเล็กทริก. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. 22: 93-106.
- [12] ขวัญชัย ไกรทอง และ อติพงศ์ นันทพันธ์. 2548. การประยุกต์ใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตามขวางดัดแปลงจากคอนเดนเซอร์ระบบปรับอากาศรถยนต์. วารสารมหาวิทยาลัยนเรศวร. 13(1): 13-23.
- [13] อุทัย ประสพชิงชนะ, วรเชษฐ์ ภิรมย์ภักดี, กิตติพงศ์ บุญโสง และ ปราโมทย์ ลายประดิษฐ์. 2555. การวิเคราะห์อัตราการถ่ายเทความร้อนในสภาวะคงตัวผ่านแผ่นครีบสี่เหลี่ยมผืนผ้าตรงด้วยวิธีผลต่างสืบเนื่องโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉพาะจุด และรวมผลของการแผ่รังสีความร้อน. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 22(3): 511-525.
- [14] FLUENT 6.3 User's guide. 2006. Lebanon: Fluent Inc.
- [15] ปราโมทย์ เดชะอำไพ. 2547. ไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิศวกรรม, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- [16] ปราโมทย์ เดชะอำไพ. 2546. ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิศวกรรม, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- [17] ปราโมทย์ เดชะอำไพ. 2548. ไฟไนต์เอลิเมนต์อย่างง่ายพร้อมซอฟต์แวร์, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- [18] G.S. Settle. 2001. Schliren and Shadowgraph technique. Springer-Verlag Berlin Heidelberg NewYork, Germany.
- [19] วุฒิชัย สิทธิวงษ์, กุลเชษฐ์ เพียรทอง, วิระพันธ์ สีหนาม, อนิรุตต์ มัทธจักร และชัยเดช เกษมนมิตรพร. 2554. ผลของอุณหภูมิต่อพฤติกรรมของลำฟุ้งน้ำมันดีเซลความเร็วสูง. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 13(1): 97-113.
- [20] วุฒิชัย สิทธิวงษ์, กุลเชษฐ์ เพียรทอง, วิระพันธ์ สีหนาม, อนิรุตต์ มัทธจักร และชัยเดช เกษมนมิตรพร. 2554. ผลของอุณหภูมิต่อพฤติกรรมของลำฟุ้งน้ำมันดีเซลความเร็วสูง. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 13(2): 33-43.