

การศึกษาการกระจายตัวของลำความร้อนจากแหล่งพื้นที่ความร้อน

Thermal Plume Development from an Area Source

อภิชาติ แจ้งบำรุง

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ 10900

โทร 0-2942-8555 ต่อ 1839, e-mail: fengacc@ku.ac.th

Apichart Chaengbarnung

Department of Mechanical Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, Thailand

Tel: 0-2942-8555 ext: 1839, e-mail: fengacc@ku.ac.th

บทคัดย่อ

การเปิดผิวหน้าของโลหะหลอมเหลวสู่บรรยากาศในระหว่างการผลิตหรือการดำเนินงานสามารถทำให้เกิดไอโลหะและควันลอยขึ้นมาและปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมรอบๆอันเนื่องมาจากผลของแรงลอยตัว (Buoyancy force) ในกรณีพื้นที่ที่ปฏิบัติงานเป็นพื้นที่ปิดการดักจับไอโลหะและฝุ่นควันที่เพียงพอตลอดจนการจัดสิ่งปนเปื้อนในอากาศมีความจำเป็นต่อสุขภาพและความสะดวกของผู้ปฏิบัติงาน ในปัจจุบันคู่มือในการออกแบบสำหรับระบบดูดไอโลหะและฝุ่นควันยังใช้ข้อมูลจากการประมาณ [1, 2, 3, 4] ของการกระจายตัวของลำความร้อน ดังนั้นรูปแบบของลำความร้อน (thermal plume) ที่เคลื่อนที่โดยผลของแรงลอยตัวอันได้แก่ การกระจายตัวของความเร็วการไหล, การกระจายตัวของอุณหภูมิ และความเข้มข้นของสิ่งปนเปื้อน จะต้องถูกทำความเข้าใจอย่างถี่ถ้วนเพื่อที่จะได้นำมาเป็นข้อมูลในการปรับปรุงคู่มือในการออกแบบ การศึกษาในครั้งนี้ โครงสร้างของลำความร้อนอันเนื่องมาจากพื้นที่ความร้อนซึ่งใช้แทนบริเวณเปิดของโลหะเหลวถูกศึกษาด้วยการทดลองและการคำนวณทางพลศาสตร์เชิงตัวเลขของของไหล (CFD) ในส่วนของการทดลองชุดอุปกรณ์ทดลองลำความร้อน (thermal plume) ได้ถูกสร้างและทดลอง ในส่วนของการคำนวณทางพลศาสตร์เชิงตัวเลขของของไหลถูกใช้ทดสอบเพื่อหาแบบจำลองความปั่นป่วน (turbulent modeling) ที่เหมาะสมในการศึกษาออกแบบสำหรับระบบที่เกี่ยวข้องกับลำความร้อน นอกจากนี้ในการพิจารณาพฤติกรรมการไหลของลำความร้อนโดยทั่วไปจะใช้หลักของ Boussinesq approximation และเป็นการพิจารณาการไหลของลำความร้อนที่ระยะไกลจากแหล่งกำเนิดการไหล (far-field flow) ซึ่งลำความร้อนจะเข้าสู่ self-similarity แต่ในการศึกษานี้จะสนใจในบริเวณที่ใกล้แหล่งกำเนิดการไหล (near-field flow) ผลของการศึกษาถูกแสดงเปรียบเทียบระหว่างการทดลองและการคำนวณทางพลศาสตร์เชิงตัวเลขของของไหล

คำสำคัญ: การคำนวณทางพลศาสตร์เชิงตัวเลขของของไหล (CFD), แรงลอยตัว (buoyancy force), LDV

Abstract

Exposure of hot metal to the atmosphere during processing and operation can generate metal fume and particulates that are dispersed in the surroundings via buoyancy-driven flows. In a confined space, efficient capture and extraction of the contaminated air is necessary from the operational health and safety point of view. Currently available guidelines for the design of local exhaust systems are often inadequate [1, 2, 3, 4]. The structure of the buoyancy-driven plume flow, in terms of velocity, temperature, and contaminant concentration fields, should be clearly understood in order to improve the guidelines. In this study, the structure of turbulent plumes generated by a horizontal area source of buoyancy that represents a liquid metal bath surface is investigated by experimental method and also numerical investigation. In the part of experimental method, the set of experiment was established that is the thermal plume modeling. Numerical investigations were used to find out the turbulent model that is suitable to model the plume flow. Because many analyses rely on the Boussinesq approximation and focus on the far-field region, where the self-similarity criterion is applicable therefore, the present study focuses on the near-field details of the plume structure. Results of both experimental and numerical investigations are presented

Keywords: CFD, Buoyancy force, LDV

1. บทนำ

งานวิจัยนี้ได้ใช้การทดลองและการคำนวณทางพลศาสตร์เชิงตัวเลขเพื่อที่จะศึกษาถึงลักษณะการกระจายตัวและพฤติกรรมของลำความร้อนอันเนื่องมาจากการเปิดผิวหน้าร้อนของโลหะเหลวสู่บรรยากาศระหว่างขั้นตอนกระบวนการผลิตและปฏิบัติงานเช่นในส่วนของ foundries, refineries, furnace tapping, charging และอื่นๆ ในสภาวะดังกล่าวไอของโลหะจะถูกสร้างขึ้นอันเนื่องมาจากผิวสัมผัสระหว่างโลหะเหลวกับบรรยากาศโดยรอบ[5] โดยไอโลหะและไอความร้อนจะมีการไหลลอยขึ้นเป็นลำความร้อน ซึ่งในงานวิจัยนี้จะศึกษาเฉพาะลักษณะทางกายภาพและโครงสร้างของลำความร้อนโดยทั้งการทดลองและการคำนวณทางพลศาสตร์เชิงตัวเลข ผลของการศึกษาสามารถช่วยผู้ออกแบบระบบชุดไอโลหะ (ไอความร้อน) ออกจากบริเวณที่ทำงานที่เกี่ยวข้องกับลำความร้อน (Thermal Plume) ได้เข้าใจโครงสร้างและลักษณะทางกายภาพของลำความร้อนได้ดียิ่งขึ้น

2. การศึกษาเกี่ยวกับลำความร้อนในอดีต และการดำเนินการศึกษาในครั้งนี้

การทดลองที่เกี่ยวข้องกับการไหลอันเนื่องมาจากแรงลอยตัว (buoyancy-driven flows) ที่เกิดขึ้นกับก๊าซที่มีความเร็วการไหลต่ำนั้นทำได้ยากอันเนื่องมาจากการใช้อุปกรณ์วัดจะทำให้เกิดการขวางการไหล ดังนั้นในการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการวัดความเร็วของลำการไหล (Plume) อุปกรณ์อันได้แก่ Pitot-static tube จึงไม่เหมาะสมเพียงพออันเนื่องมาจากการขวางของมันต่อการไหล ดังนั้นการที่จะทำการวัดความเร็วของการไหลในลักษณะที่การไหลมีความเร็วต่ำนั้นอุปกรณ์การวัดควรไม่ขวางการไหลซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวอาทิเช่น LDV และ PIV จึงมีความเหมาะสม แต่เนื่องมาจากการใช้ชุด LDV หรือ PIV การวัดความเร็วไม่สามารถกระทำได้อ่าไม่มีการใส่ (seed) อนุภาคที่คาดหมายว่าจะไหลโดยความเร็วเท่ากับความเร็วของการไหล จากการศึกษาจากงานวิจัยเบื้องต้นพบว่าการใช้ LDV และ PIV ในการวัดความเร็วนั้นมีจำกัดเช่นในการวัดความเร็วในของเหลว [6,7,8] เหตุผลที่สำคัญนั้นคือการใส่อนุภาคที่เหมาะสมและในปริมาณที่เหมาะสม โดยเฉพาะอย่างยิ่งการไหลของก๊าซอันเนื่องมาจากแรงลอยตัวอันเนื่องมาจากความต่างของความหนาแน่นนั้นการวัดความเร็วนั้นยังไม่ได้เก็บข้อมูลที่เพียงพอ [9]

ในทางทฤษฎีนั้นการไหลของอากาศอันเนื่องมาจาก Natural convection นั้นการไหลจะเกิดมาจากความแตกต่างกันของความหนาแน่นซึ่งหมายความว่าสมการโมเมนตัมและสมการพลังงานดังนั้นการแก้ปัญหาจะทำได้ง่ายขึ้นถ้า “Boussinesq approximation” ถูกนำมาใช้ แต่การแก้ปัญหาจะถูกจำกัดสำหรับของไหลที่ไม่อัดตัวหรือความหนาแน่นของของไหลคงที่ ซึ่งในความเป็นจริงการไหลของลำความร้อนที่มีแหล่งกำเนิดการไหลที่มีอุณหภูมิสูงทำให้เกิดความแตกต่างของความหนาแน่นสูงโดยเฉพาะบริเวณใกล้แหล่งความร้อน การศึกษาเกี่ยวกับลำ

ความร้อนในอดีตจะเน้นศึกษาลักษณะของลำความร้อนในบริเวณไกลจากแหล่งกำเนิดหรือที่เรียกว่า far-field ซึ่งลำความร้อนในบริเวณนี้จะเข้าสู่ “self-similarity” และยังเป็นลำความร้อนจากแหล่งกำเนิดที่เป็นจุด (point) หรือเส้น (line) ดังนั้นในการศึกษาในครั้งนี้จะทำการศึกษาลำความร้อนจากแหล่งกำเนิดที่เป็นพื้นที่โดยคาดหวังที่จะหาจุดกำเนิดเสมือน (virtual point source) ของลำความร้อน ซึ่งจะนำมาเปรียบเทียบกับการประมาณค่าจุดกำเนิดเสมือนจากวิธีที่เสนอจากงานวิจัยอื่นๆ การศึกษาในครั้งนี้เป็นการศึกษาการไหลของลำความร้อนโดยทำการทดลองควบคู่ไปกับการคำนวณทางพลศาสตร์เชิงตัวเลขของลำความร้อน ในส่วนของการทดลอง การวัดการกระจายตัวของความเร็วและการกระจายตัวของอุณหภูมิของลำความร้อนจะวัดโดยใช้ชุด LDV, และชุดของเทอร์โมคอปเปอร์ ในส่วนของการคำนวณทางพลศาสตร์เชิงตัวเลขโปรแกรม PHOENICS ถูกนำมาใช้ในการศึกษา

3. การทดลอง

ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาลำความร้อนประกอบไปด้วย จานความร้อนกลมที่ทำมาจากทองแดงซึ่งด้านข้างถูกขุดด้วยฉนวนกันความร้อนถูกรอบด้วยกล่องกระจกใสเพื่อเป็นการป้องกันไม่ให้การไหลถูกรบกวนจากภายนอก และอีกเหตุผลคือป้องกันไม่ให้ควันที่ใช้ในการวัดความเร็วการไหลโดยชุด LDV หลุดออกมาสู่ด้านนอกอันจะเป็นอันตรายต่อผู้ทดลอง

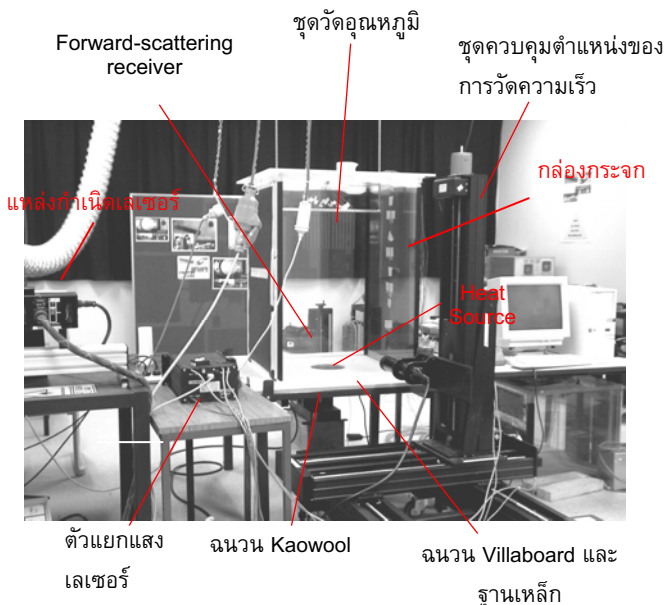
กล่องกระจกใสและตัวฐานรองรับ เนื่องจากข้อจำกัดของเลนส์ที่มีของชุด LDV และความกว้างของห้องทดลองจึงทำให้การออกแบบกล่องกระจกครอบมีความจำกัด ซึ่งจากข้อจำกัดดังกล่าวทำให้กล่องกระจกใสขนาด 0.76m.x0.76m. สูง 1 เมตร มีความเหมาะสมที่สุดในการทดลองในครั้งนี้ ด้านข้างทั้งสี่ด้านของกล่องกระจกทำมาจากกระจกแข็ง (Toughened optical glass) ซึ่งมีความหนา 10มม. ด้านบนของกล่องกระจกทำจากเพอस्पек (Perspex) ที่มีความหนา 10มม. ซึ่งมีการเจาะรูเพื่อใช้ในสองจุดประสงค์คือเป็นช่องไว้ใส่ควันสำหรับการวัดการกระจายตัวของความเร็วและเป็นช่องสำหรับการปรับชุดวัดอุณหภูมิในการวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ระดับต่างๆ รูเจาะนี้จะสามารถอุดได้ระหว่างการทดลอง กล่องกระจกถูกจัดวางไว้บนฐานสี่เหลี่ยมขนาดใหญ่ที่ทำมาจาก kaowool และแผ่น fiber-cement ซึ่งฐานนี้จะถูกเจาะรูไว้ที่ตำแหน่งกึ่งกลางเพื่อใส่จานความร้อนกลมที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดลำความร้อน ชุดทดลองทั้งหมดวางไว้บนที่รองรับที่ทำจากเหล็กเพื่อที่จะทำให้เกิดความแข็งแรงที่เพียงพอ

แหล่งกำเนิดลำความร้อน ทำมาจากแผ่นทองแดงที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.188ม. และมีความหนา 10มม. ขดลวดทำความร้อนที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ถูกติดตั้งที่ด้านล่างของแผ่นทองแดงโดยยึดด้วยสกรู และที่บริเวณใกล้ผิวหน้าของแผ่นทองแดงจะถูกติดตั้งด้วยเทอร์โมคอปเปิลจำนวน 7 อันกระจายในตำแหน่งต่างๆเพื่อใช้ในการตรวจสอบการกระจายตัวของ

อุณหภูมิที่ผิวของแผ่นทองแดง ซึ่งผลการวัดการกระจายตัวพบว่า การกระจายตัวอยู่ในช่วง $\pm 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$

เนื่องจากการทดลองคาดหวังที่จะให้เกิดการไหลแบบคงตัว (steady-state) ของลำความร้อนดังนั้นงานความร้อนจะถูกจ่ายกระแสไฟฟ้าเป็นเวลา 2 ชั่วโมงเป็นอย่างน้อยก่อนที่จะเริ่มเก็บข้อมูลของการกระจายตัวของอุณหภูมิและความเร็วของลำความร้อน การเก็บข้อมูลของการกระจายตัวของความเร็วของลำความร้อนทำได้โดยใช้ชุด LDV ซึ่งต้องใช้ตัวอนุภาคในการวัดความเร็วการเคลื่อนที่ ซึ่งจากการทดลองใช้อนุภาคหลายชนิดพบว่า คิวน์ที่ได้มาจากเครื่องผลิตควัน (smoke generator) มีความเหมาะสมในการใช้วัดความเร็วของลำความร้อน คิวน์ที่ผลิตได้จากเครื่องผลิตควันจะถูกนำมาใส่ในกล่องกระจกทางช่องที่เจาะไว้ด้านบน การใส่คิวน์มีผลต่อประสิทธิภาพของการวัดความเร็วดังนั้นการหาความหนาแน่นที่เหมาะสมและช่วงเวลาที่คิวน์คงอยู่ในกล่องกระจกถูกทดสอบ พบว่าหลังจากการใส่คิวน์ในปริมาณที่เหมาะสมในการวัดความเร็วจากนั้นคิวน์จะคงตัวอยู่แต่ลดความหนาแน่นลง ช่วงเวลาประมาณ 45 นาทีความหนาแน่นของคิวน์ยังคงเพียงพอที่จะใช้วัดความเร็วของลำความร้อนซึ่งก็เพียงพอที่จะวัดการกระจายตัวของความเร็วที่ระดับที่ต้องการได้ การทำล่องวัดขนาดของคิวน์ทำโดยใช้ Malvern Particle Analyzer พบว่าคิวน์มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 4-5 ไมโครเมตร

ชุดการทดลองและการจัดวางชุดอุปกรณ์วัดแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1. แสดงชุดทดลองการกระจายตัวของลำความร้อนและชุดอุปกรณ์วัดอุณหภูมิและความเร็ว

การวัดความเร็ว ความเร็วของลำความร้อนถูกวัดโดยใช้ 2 component Laser Doppler Velocimetry (LDV) ที่ประกอบด้วย เลเซอร์ 4 ลำ เป็นเลเซอร์สีแดง 2 ลำและเลเซอร์สีน้ำเงิน 2 ลำ ซึ่งทั้ง 4 ลำของเลเซอร์จะตัดกันที่จุดเดียวในการไหลที่ต้องการวัดความเร็ว ชุด LDV นี้จะสามารถวัดได้โดยใช้การจับสัญญาณ

ด้านหน้าและสะท้อนกลับ จากการทดสอบพบว่าการวัดสัญญาณด้านหน้ามีความเหมาะสมมากกว่าเพราะการรับสัญญาณสะท้อนกลับมีระดับสัญญาณต่ำมาก การวัดการกระจายตัวของความเร็วของลำความร้อนที่ตำแหน่งต่ำสุดคือ 4 มม. เนื่องจากที่ผิวของแผ่นความร้อน แต่เนื่องจากที่ตำแหน่งต่ำนั้นการวัดความเร็วของการไหลของลำความร้อนลำเลเซอร์สีน้ำเงินถูกบังอันเนื่องมาจากตัวพื้นอุปกรณ์ทดลองทำให้การวัดความเร็วในแนวอนจะเริ่มวัดได้ที่มีความสูงเกิน 16 มม. สูงจากพื้นของชุดอุปกรณ์ทดลอง แต่ความเร็วตามแนวตั้งสามารถวัดได้ตั้งแต่ระดับความสูง 4 มม. จากพื้น

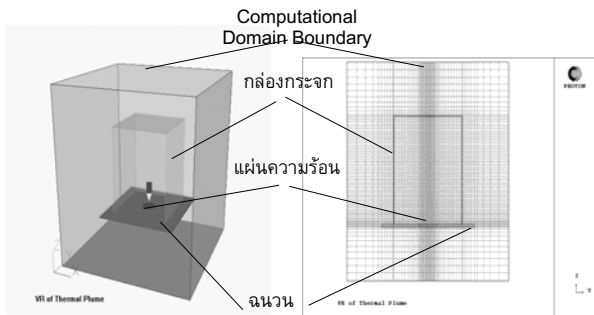
การวัดอุณหภูมิ ทำได้โดยใช้เทอร์โมคอปเปิลจำนวน 32 ตัว และการเก็บข้อมูลจะทำโดยใช้ระบบคอมพิวเตอร์ที่ใช้ LabTech ช่วยในการจัดเก็บข้อมูล ในจำนวนของเทอร์โมคอปเปิลทั้ง 32 ตัวนี้ มี 6 ตัวใช้ในการวัดการกระจายตัวของความร้อนบนแผ่นความร้อนที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดการไหล การวัดอุณหภูมิภายในห้องทดลองใช้เทอร์โมคอปเปิล 1 ตัว ส่วนการวัดการกระจายตัวของความร้อนในฉนวนรอบๆแผ่นความร้อนจะใช้เทอร์โมคอปเปิลจำนวน 5 ตัว ในการวัดการกระจายตัวของอุณหภูมิของลำความร้อนที่ระดับต่างๆจะใช้ชุดของเทอร์โมคอปเปิลจำนวน 15 ตัวซึ่งถูกสอดผ่านท่อสแตนเลสขนาดเล็กเพื่อช่วยด้านความแข็งแรงและตำแหน่งที่แน่นอนโดยปลายที่ใช้วัดห่างจากฐานยึด 20 ซม. และห่างกัน 20 มม. การวัดผลของอุณหภูมิจากการทดลองมีความแม่นยำ $\pm 2^{\circ}\text{C}$ และจากข้อมูลของอุณหภูมิการกระจายตัวของอุณหภูมิในแผ่นความร้อนพบว่า การกระจายตัวอยู่ในช่วง $200 \pm 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ เมื่อทำการตั้งค่าของอุณหภูมิของแผ่นความร้อนที่ 200°C

ในการวัดความเร็วและการวัดอุณหภูมิของลำความร้อนจะไม่ทำพร้อมกันเพื่อป้องกันผลของการรบกวนการไหลของชุดวัดอุณหภูมิต่อการวัดความเร็ว ในขณะที่ทำการวัดความเร็วชุดวัดอุณหภูมิจะถูกดึงขึ้นไปไว้ที่ตำแหน่งสูงสุดซึ่งไกลจากแหล่งกำเนิดมาก และการทดลองสามารถทำซ้ำได้ตั้งแต่วันที่ทำการตั้งค่าของอุณหภูมิของแผ่นความร้อนจะทำการทดลองซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้ง

4. การคำนวณทางพลศาสตร์เชิงตัวเลขของของไหล (CFD)

การคำนวณทางพลศาสตร์เชิงตัวเลขของของไหลจะใช้โปรแกรม PHOENICS (version 3.5) เนื่องจากลักษณะทางกายภาพของชุดอุปกรณ์ถูกทำเป็นลักษณะทางการคำนวณ แต่เนื่องจากต้องการคำนึงผลของการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังของกระจกและฉนวนความร้อนดังนั้นโดเมนการคำนวณจะมีบริเวณด้านนอกของกล่องกระจกและฉนวนความร้อนด้วย ดังนั้นรูปแบบของโดเมนจะเป็นลักษณะ 3 มิติและนอกจากนั้นในการทดลองการไหลของลำความร้อน

เป็นการไหลคงตัวตั้งนั้นโมเดลการคำนวณเชิงตัวเลขจะเป็นสภาวะคงตัวด้วย รูปที่ 2 แสดงลักษณะและโดเมนของการคำนวณเชิงตัวเลข ซึ่งในการคำนวณจะใช้จำนวนเซลล์ในการคำนวณขนาด 73×73×95 เซลล์ดังแสดงในรูปโดยการกระจายตัวของเซลล์จะหนาแน่นในบริเวณในกล่องกระจกและโดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณใกล้แผ่นความร้อน



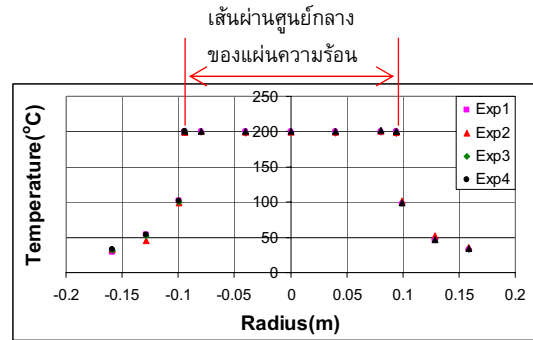
รูปที่ 2. โดเมนการคำนวณเชิงตัวเลขและเซลล์การคำนวณ

ที่บริเวณใกล้กับแผ่นความร้อนอากาศจะมีอุณหภูมิใกล้กับอุณหภูมิของแผ่นความร้อนกล่าวคือใกล้ 200°C ดังนั้นจากการคำนวณค่าของความแตกต่างของความหนาแน่นต่อความหนาแน่นของอากาศที่อุณหภูมิห้อง (the fractional density change, $\Delta\rho/\rho$) มีค่าประมาณ 0.381 เมื่อคิดว่าอุณหภูมิของแผ่นความร้อนเป็น 200°C และอุณหภูมิอากาศในห้องเป็น 20°C และจากการพิจารณาของ Ra จะมีค่าประมาณ 3.63×10^7 จากการพิจารณาข้อจำกัดของ Boussinesq approximation [12] เมื่อ $\Delta\rho/\rho > 0.1$ จะไม่เหมาะสมที่จะใช้ Boussinesq approximation ดังนั้นโมเดล "density difference" ของ PHOENICS จึงถูกนำมาใช้ และนอกจากนี้โมเดลของการไหลปั่นป่วน (turbulence model) แบบ k-ε ที่มีการเพิ่มผลของแรงโน้มถ่วงของโลก (The k-ε turbulence model with gravity correction) ถูกนำมาใช้ในการคำนวณ

5. ผลการทดลอง

ในขั้นนี้การเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณเชิงตัวเลขถูกแสดง แต่ในขั้นแรกผลของการกระจายตัวของความร้อนที่แผ่นความร้อนจากการทดลองถูกแสดงในรูปที่ 3 บริเวณตรงกลางเป็นการกระจายตัวของอุณหภูมิที่แผ่นความร้อนส่วนบริเวณที่มีการลดลงของอุณหภูมิอย่างรวดเร็วเป็นบริเวณของฉนวนรอบแผ่นความร้อน รูปที่ 4 แสดงการเปรียบเทียบผลของการทดลองและการคำนวณเชิงตัวเลขของทั้งความเร็วและอุณหภูมิของลำความร้อนที่ระดับความสูงต่างๆ ผลแสดงให้เห็นว่าค่าจากการคำนวณเชิงตัวเลขมีความสอดคล้องกับผลจากการทดลองโดยผลของความเร็วมีความสอดคล้อง 10% ในส่วนของผลของอุณหภูมิต่างมีความสอดคล้องถึง 5% และนอกจากนั้นจากผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าผลการทดลองนั้นในแต่ละการทดลองมีความเหมือนกันของผลที่ได้กล่าวคือการทดลอง

สามารถทำซ้ำได้ทำอุณหภูมิของอากาศในห้องมีการเปลี่ยนแปลงรูปที่ 5 แสดงผลของการกระจายตัวของความเร็วตามแนวอนทั้งการทดลองและทางคำนวณเชิงตัวเลขซึ่งผลทั้งสองมีความสอดคล้องกัน



รูปที่ 3 การกระจายตัวของอุณหภูมิที่ผิวของแผ่นความร้อน

6. สรุป

จากการศึกษาเกี่ยวกับลำความร้อนโดยวิธีการทดลองและการคำนวณเชิงตัวเลขพบว่าการกระจายตัวของลำความร้อนที่เกิดจากแหล่งความร้อนที่มีลักษณะเป็นพื้นที่วงกลมที่มีการกระจายตัวของความร้อนคงตัวจะมีการกระจายตัวแบบระฆังคว่ำซึ่งสอดคล้องกับผลทางทฤษฎี [10] และผลที่ได้จากการทดลองทั้งของการกระจายตัวของความเร็วและอุณหภูมิมีผลที่ใกล้เคียงอย่างมากกับผลที่ได้มาจากการคำนวณเชิงตัวเลขที่นำเอาโมเดลของการไหลปั่นป่วนแบบ k-ε มาใช้ หรือกล่าวได้ว่าโมเดลของการไหลปั่นป่วนแบบ k-ε มีความเหมาะสมเพียงพอที่จะนำมาใช้คาดการณ์การไหลหรือใช้ในการศึกษาลำความร้อนที่เกิดขึ้นในสถานะต่างๆ หรือใช้ในการออกแบบอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับลำความร้อน

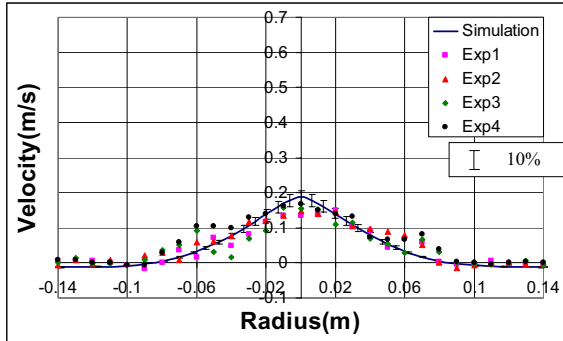
7. กิตติกรรมประกาศ

การศึกษาในครั้งนี้ได้รับความร่วมมือจากมหาวิทยาลัยวลลลองกอง ประเทศออสเตรเลีย ทั้งในด้านสถานที่และชุดเครื่องมือวัด โดยเฉพาะ Associate Prof. Paul Cooper ที่ให้คำแนะนำที่มีคุณค่าที่ใช้ในการศึกษานี้

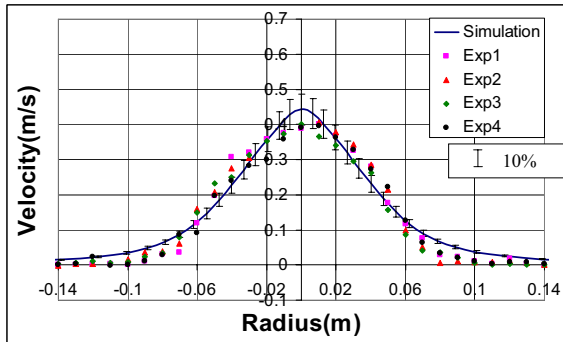
8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Wypych, PW, Cooper, P, Brooks, G, *Generation and Dispersion of Fume from Hot Metal Processes*, ARC Large Research Grant Scheme proposal, Feb 2000.
- [2] Air Contaminants, ASHRAE Handbook - Fundamentals - SI Edition, 1993, p 11.1-11.8
- [3] Industrial Local Exhaust Systems, ASHRAE Handbook - Applications - SI Edition, 1999, p 29.1-29.21
- [4] Goodfellow, H, Tähti, E, Industrial Ventilation Design Guidebook, Academic Press, 2001

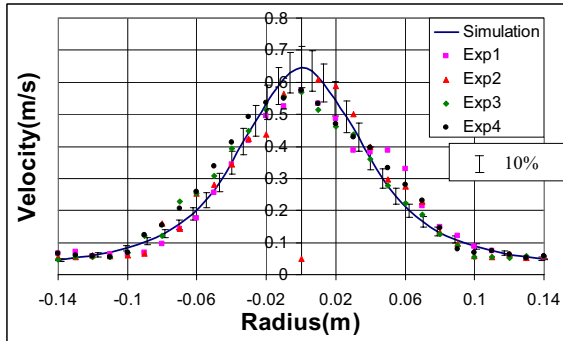
ความเร็วตามแนวตั้ง



20mm

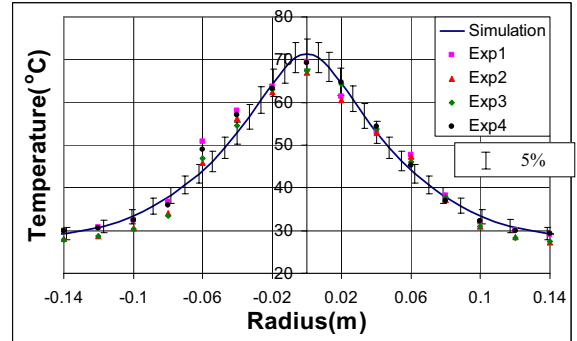


100mm

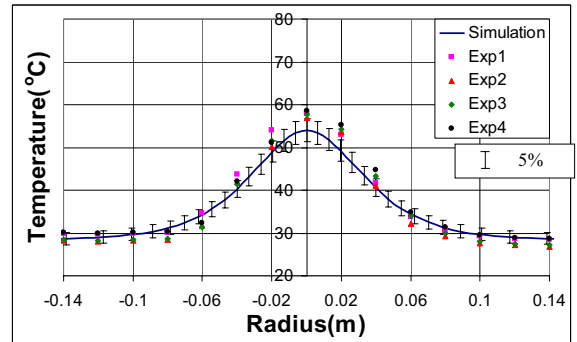


200mm

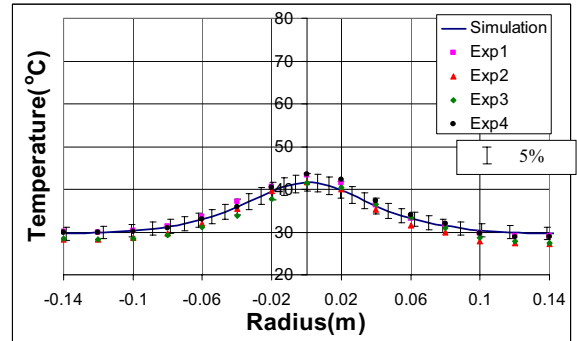
อุณหภูมิ



20mm

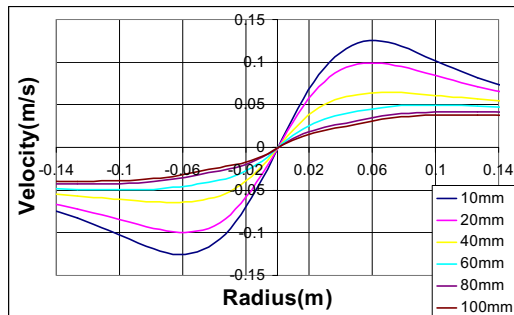


100mm

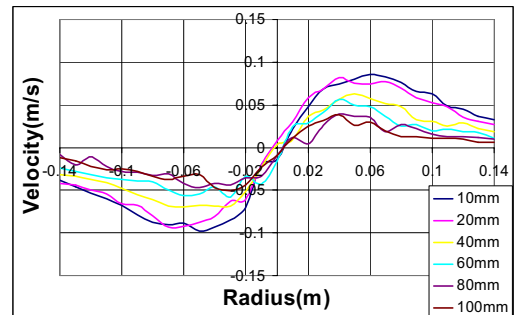


200mm

รูปที่ 4 การเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณเชิงตัวเลขของการกระจายของความเร็วตามแนวตั้งและอุณหภูมิที่ระดับความสูงต่างๆ ($Ra = 3.63 \times 10^7$)



(ก) ผลจากการคำนวณเชิงตัวเลข



(ข) ผลจากการทดลอง

รูปที่ 5 การเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลการคำนวณเชิงตัวเลขของการกระจายของความเร็วตามแนวนอนที่ระดับความสูงต่างๆ ($Ra = 3.63 \times 10^7$)

- [5] ACGIH, Industrial Ventilation – A Manual of Recommended Practice, Metric Version, 23rd Edition, 1998
- [6] Moses, E, Zocchi, G, Libchaber, A, *An experimental study of laminar plumes*, J Fluid Mech, vol 251, 1993, p 581-601
- [7] Pun, KL, Davidson, MJ, *On the behaviour of advected plumes and thermals*, J Hydraulic Research, vol 37, no. 4, 1999, p519-539
- [8] Chiari, A, Guglielmini, G, *Experimental investigation of the velocity field in free convection from a horizontal disc using an LDV measuring technique*, Heat and Technology, Vol 16, n 1, 1998, p 41-49
- [9] Elicer-Cortés, JC, Measurements of the Temperature Field in an Axisymmetric Thermal Pure Plume, Experimental Heat Transfer 11:207, 1998, p 207-219
- [10] Malin, M, CHAM user support, Private Comm, 2003