

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ การพัฒนาจลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ และเทคนิควิถีทัศน์
ในการวัดอุณหภูมิของการถ่ายเทความร้อนแบบทรานเซียนท์ของการ
กระแทกของเจ็ทลงบนพื้นผิวรอยบุ๋ม

(Development of CFD and Thermography Technique of Transient Heat
Transfer of Jet Impingement on a Dimpled Surface)

โดย ผศ.ดร.กุดยา กนกจารุวิจิตร และคณะ

มีนาคม 2551

โครงการการพัฒนาจำลองศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ และเทคนิควิถีทัศน์ในการวัดอุณหภูมิของการถ่ายเทความร้อนแบบทรานเซียนท์ของการกระแทกของเจ็ทลงบนพื้นผิวรอยบุ๋ม

(Development of CFD and Thermography Technique of Transient Heat Transfer of Jet Impingement on a Dimpled Surface)

ทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่

ตามโครงการความร่วมมือระหว่างสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษากับสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย

บทคัดย่อ

เครื่องยนต์กังหันก๊าซได้รับความนิยมนำมาใช้งานจากทั่วโลกในด้านการให้พลังงาน โดยมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง แต่สิ่งหนึ่งที่นักวิจัยมองข้ามไปไม่ได้ก็คือ ปัญหาของความร้อนของใบพัดกังหัน เนื่องจากสารผลิตภัณฑ์ที่ได้จากห้องเผาไหม้จะมีอุณหภูมิสูงถึง 2000°C ทำให้วัสดุที่ใช้ทำใบพัดหลอมละลาย บิดเบี้ยว มีอายุการใช้งานต่ำ ดังนั้นการยืดอายุการใช้งานของมันด้วยการออกแบบระบบการถ่ายเทความร้อนที่ดีสำหรับใบพัดของกังหันจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง เมื่อไม่นานมานี้ได้มีการพัฒนาเครื่องยนต์กังหันก๊าซที่มีขนาดเล็กลงจนกระทั่งให้มีขนาดเล็กกว่าปลายนิ้วมือ เพื่อให้สามารถใช้เป็นแหล่งกำเนิดพลังงานให้กับอุปกรณ์ขนาดเล็ก ดังนั้นการไหลภายในเครื่องยนต์กังหันก๊าซที่มีขนาดเล็กมากนี้จึงมีลักษณะเป็นแบบราบเรียบ

โครงการนี้เป็นการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทอากาศแบบสมมาตรตามแกนให้กับพื้นผิวรอยบุ๋มที่มีลักษณะความร้อนคงที่ โดยอาศัยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จากโปรแกรม COMSOL การแสดงผลการถ่ายเทความร้อนอยู่ในรูปตัวแปรไร้มิติ Nusselt number (Nu) ก่อนที่จะเริ่มทำการทดสอบ ทำการตรวจสอบโปรแกรม COMSOL โดยการเปรียบเทียบกับผลการทดลองของการถ่ายเทความร้อนของแผ่นเรียบและผลจากการคำนวณโดยใช้โปรแกรม FLUENT จากการทบทวนเอกสาร ทั้งนี้ได้พิจารณาผลของความหนาแน่นของกริด ความยาวของหัวฉีด และความหนาของหัวฉีดด้วย สำหรับผลการถ่ายเทความร้อนของการกระแทกของเจ็ทลงบนพื้นผิวรอยบุ๋มนั้นได้พิจารณาผลกระทบของพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ Reynolds number (Re) ในช่วง 100 – 1200 ระยะจากทางออกของหัวฉีดไปยังพื้นผิวตกกระทบ (H/D_j) ในช่วง 1 ถึง 8 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวฉีด ความลึกของรอยบุ๋ม (d/D_d) ในช่วง 0.1 ถึง 0.2 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางของภาพฉายของพื้นผิวรอยบุ๋ม และอัตราส่วนของเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวฉีดและเส้นผ่าศูนย์กลางของภาพฉายของพื้นผิวรอยบุ๋ม (D_j/D_d) ระหว่าง 0.25 ถึง 1 ผลการถ่ายเทความร้อนของรอยบุ๋มที่ได้จะนำมาเปรียบเทียบกับผลของพื้นผิวเรียบ พบว่าเมื่อใช้พื้นผิวรอยบุ๋มกับการกระแทกของเจ็ทนั้น การถ่ายเทความร้อนจะลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นเรียบ เนื่องจากหลังจากเจ็ทตกกระทบมันจะต้องสูญเสียโมเมนตัมบางส่วนไปในการเอาชนะการเคลื่อนที่ออกจากรอยบุ๋มขึ้นไป นอกจากนั้นขอบของรอย

น้ำมันของไหลขึ้นทำให้ของไหลถ่ายเทโมเมนตัมให้แก่อากาศแวดล้อมเพิ่มขึ้น แทนที่จะไปถ่ายเทให้แก่พื้นผิวเรียบที่อยู่ถัดไป

Abstract

Gas turbine engines have gained broad attentions for energy production; hence, the development has continuously carried on throughout the world. However, one concern that researchers in this field cannot look over is the problem of thermal stress that may take place in the turbine blades or vanes. This is due to the fact that the hot gas issuing from the combustion chamber and having high temperature such as 2000°C may cause the material of the vanes melt or distort, thus their lifetime is short. Therefore, in order to prolong the turbine blades and vanes, a good cooling scheme must be designed. In addition, recently there have been attempts to downsize the industrial gas turbine engines to be a finger-tip size for being energy sources for small devices. Thus, the flow inside these small gas turbine engines is laminar.

This research project is to investigate heat transfer of an axi-symmetric air jet impinging perpendicularly on a dimpled surface with constant heat flux by using finite element method from a commercial software called COMSOL. The results are reported in terms of a dimensionless Nusselt number. Prior to testing the dimple impingement, the results obtained from the computation are validated against the results from literature both the experimental ones and computational ones using finite difference from FLUENT software program. Additionally, influences of grid density, nozzle length and nozzle thickness are taken into account. For the dimple impingement, various parameters are considered: Reynolds number ranging from 100 to 1200, jet-to-plate spacing (H/D_j) from 1 to 8, dimple depth (d/D_d) from 0.1 to 0.2 and ratio of jet diameter to dimple projected diameter from 0.25 to 1. Then, the results are compared to those of the flat plate showing that the presence of a dimple causes heat transfer reduction. The flow shows the lifted fluid at the dimple edge, and this allows the fluid to transfer its momentum to the ambient instead of to the adjacent flat portion. Moreover, the post-impinging jet spends some amount of its momentum to leave the dimple.

Keywords : Jet Impingement, Dimple, Finite Element

Executive Summary

โครงการ “การพัฒนาจำลองศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ และเทคนิควิถีทัศน์ในการวัดอุณหภูมิของการถ่ายเทความร้อนแบบทรานเซียนท์ของการกระแทกของเจ็ทลงบนพื้นผิวรอยนูน”

(Development of CFD and Thermography Technique of Transient Heat Transfer of Jet Impingement on a Dimpled Surface) นี้เมื่อแรกเริ่มต้องการให้ประกอบไปด้วย 2 ส่วนอันเป็นการต่อยอดงานวิจัยจากวิทยานิพนธ์ในระดับปริญญาเอกที่ Imperial College London ได้แก่ (1) การใช้โปรแกรม CFD ทาง Finite Difference หรือ Finite Volume มาช่วยในการคำนวณการตกกระทบของกลุ่มเจ็ทลงบนพื้นผิวที่ประกอบไปด้วยกลุ่มของรอยนูน ซึ่งจะต้องเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) และ (2) การพัฒนาเทคนิคการวัดอุณหภูมิจาก Liquid Crystals ชนิด Wide Band ด้วยการใช้ Genetic Algorithms อย่างไรก็ดี เนื่องจากปัญหาของลิขสิทธิ์กับทาง Imperial College จึงได้ตัดในส่วนที่สองทิ้ง เหลือเพียงส่วนที่หนึ่ง แต่เนื่องจากทาง สกว. กำหนดให้การจัดซื้อซอฟต์แวร์สามารถกระทำได้ในวงเงินไม่เกิน 96,000 บาท ต่อมาทางภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ได้ให้ความอนุเคราะห์ซอฟต์แวร์ COMSOL แก่ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ทำให้โครงการนี้ต้องเปลี่ยนทิศทางไปเป็นการใช้ระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งเป็นระเบียบวิธีที่ COMSOL ใช้ในการคำนวณแทน ปัญหาถัดมาก็คือ จิตความสามารถของซอฟต์แวร์และคอมพิวเตอร์ และในที่สุดโครงการนี้จึงเป็นการคำนวณการตกกระทบของเจ็ทแบบราบเรียบแบบสมมาตรตามแกน (Laminar Axi-symmetric Impinging Jet) ลงบนพื้นผิวรอยนูน (1 รอยนูน) โดยพิจารณาผลกระทบของพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น Reynolds number, ระยะระหว่างทางออกของหัวฉีดมายังพื้นผิวรอยนูน ความลึกของรอยนูน และอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวฉีดและเส้นผ่าศูนย์กลางของภาพฉายของพื้นผิวรอยนูน นอกจากนี้ยังได้ทำการเปรียบเทียบผลการถ่ายเทความร้อนของการตกกระทบของเจ็ทลงบนพื้นผิวรอยนูนกับของผิวเรียบ

ก่อนที่จะทำการคำนวณการตกกระทบของเจ็ทลงบนพื้นผิวรอยนูนนั้น ได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของซอฟต์แวร์ (Validation) ด้วยการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณทั้งการถ่ายเทความร้อนและการไหลของการตกกระทบของเจ็ทลงบนพื้นผิวเรียบโดยอาศัยระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของ COMSOL กับผลการทดลองและผลจากการคำนวณของโปรแกรม FLUENT ซึ่งใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์โวลุ่มและเป็นที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลายจากการทบทวนเอกสาร ทั้งนี้ได้ตรวจสอบผลกระทบของความหนาแน่นของกริด การจำกัดการไหล (Confinement) และความยาวของหัวฉีดไว้ด้วย การเปรียบเทียบกับผลการทดลองและผลจาก FLUENT พบว่า สอดคล้องกัน ดังนั้น ซอฟต์แวร์ COMSOL จึงสามารถใช้กับการตกกระทบของเจ็ทได้ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากไม่มีผลการทดลองสำหรับการตกกระทบของเจ็ทเดี่ยวลงบนพื้นผิวรอยนูน เราจึงไม่สามารถ validate ในส่วนนี้ได้

จากข้อมูลที่ได้จากข้อค้น สามารถเขียน Paper ได้ 1 ฉบับในหัวข้อ “Numerical investigation of an axi-symmetric laminar jet impinging on a uniform heat flux dimpled surface using finite element method” โดยได้ส่งต้นฉบับไปยัง International Journal of Thermal Sciences และได้รับการตอบรับให้ตีพิมพ์ได้หลังจากที่จะต้องปรับปรุงการเขียนเสียใหม่ตามข้อเสนอแนะของผู้พิจารณาบทความเสมอมา

เนื้อหางานวิจัย

1. บทนำ

การกระแทกของเจ็ทเป็นเทคนิคการถ่ายเทความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูง ที่ได้รับการยอมรับกันอย่างแพร่หลาย ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาเทคนิคดังกล่าวนี้กันอย่างต่อเนื่อง รวมไปถึงการประยุกต์ใช้พื้นผิวที่ยื่นออกมา หรือครีบกับการกระแทกของเจ็ท ซึ่งเพิ่มการถ่ายเทความร้อนอย่างมาก อย่างไรก็ตามการเพิ่มพื้นที่ผิวดังกล่าวนี้เป็นการเพิ่มน้ำหนักของใบพัดเข้าไปอีก รวมไปถึงการเกิดการสูญเสียความดัน และการเพิ่มค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา ต่อมาในศตวรรษที่ 19 นักวิจัยรัสเซียได้ทดลองใช้พื้นผิวรอยบุ๋มควบคู่กับการการไหลขนานพบว่า การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นผิวเรียบ แต่ความเค้นเชิงความร้อน (Thermal Stress) ลดลง ตั้งแต่นั้นมาการประชุมทางวิชาการประจำปีของสมาคมวิศวกรเครื่องกลของสหรัฐอเมริกา (American Society of Mechanical Engineers) ในส่วนของ Turbomachinery ได้บรรจุให้การถ่ายเทความร้อนจากพื้นผิวรอยบุ๋มเป็น Session หนึ่งของการประชุมประจำปีทุกปี

ในปัจจุบันงานวิจัยรวมถึงการประดิษฐ์ของขนาดจ๋วเข้ามามีบทบาทสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนของแหล่งให้พลังงาน เช่น ในเครื่องคอมพิวเตอร์กระเป๋าหิ้ว ไอพ็อด หรือแม้กระทั่งในการประยุกต์ใช้ในเชิงการแพทย์ เป็นต้น เพื่อให้มนุษย์มีความเป็นอยู่ที่ดีขึ้น อายุยืนยาวขึ้น ดังนั้นจึงได้มีกลุ่มนักวิจัยของ MIT เช่น Prof. Epstein เป็นผู้บุกเบิกการย่อส่วนกังหันก๊าซในระดับอุตสาหกรรมมาให้เลือกขนาดเท่าปลายนิ้วมือ การไหลภายในเครื่องจักรขนาดเล็กนี้จึงเป็นการไหลแบบลามินาร์ อย่างไรก็ตามเทคโนโลยีนี้ยังอยู่ในขั้นการพัฒนาและวิจัย ยังไม่ได้ผลิตขึ้นมาในเชิงพาณิชย์

2. การทบทวนเอกสาร (Literature Review)

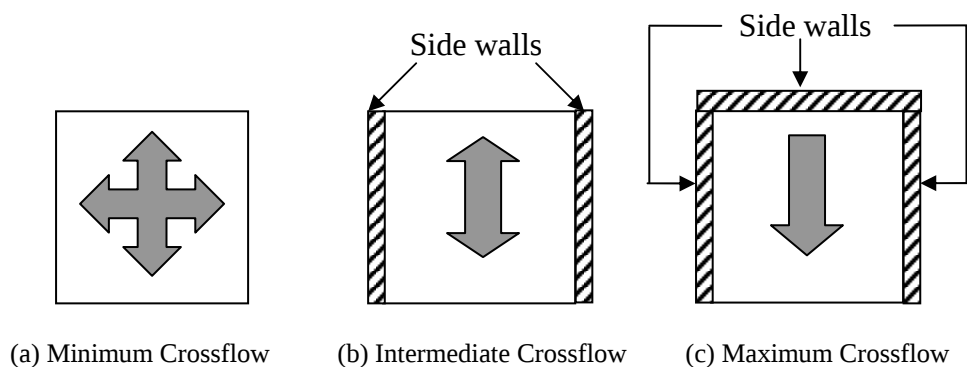
การกระแทกของเจ็ทเป็นเทคนิคการเพิ่มการถ่ายเทความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูง ในกระบวนการให้ความร้อน ลดความร้อนและการอบแห้ง ก่อนที่เจ็ทจะตกกระทบพื้นผิวเป้าหมาย เจ็ทจะแลกเปลี่ยนโมเมนตัมกับอากาศแวดล้อม (Ambient) และหลังจากตกกระทบแล้ว ของไหลจะเปลี่ยนลักษณะเป็นเจ็ทผนัง หรือของไหลที่ใช้แล้ว (Spent fluid) รูปที่ 1 แสดงทิศทางต่างๆ ที่ของไหลที่ใช้แล้วไหลออกจากพื้นผิวดกกระทบ ได้แก่ (1) แบบ Minimum Crossflow ซึ่งใช้ตลอดใน

งานวิจัยนี้ (2) Intermediate Crossflow ซึ่งสร้างขึ้นด้วยการติดผนังด้านข้าง 2 แผ่นเข้าไป และ (3) Maximum Crossflow เป็นการบังคับให้ของไหลที่ใช้แล้วออกในทิศทางเดียว

ที่ผ่านมา นักวิจัยได้พยายามปรับปรุงเทคนิคการกระแทกของเจ็ท ด้วยการใช้ร่วมกับวิธีอื่นๆ เช่น Crossflow พื้นผิวตกระทบที่มีส่วนนูนหรือยื่นออกมา (Protrusions) หรือพื้นผิวที่ยุบลงไป (เช่น รอยบุ๋ม (Dimple) ร่อง (Groove)) เป็นต้น ซึ่งการใช้กับพื้นผิวต่างๆ นี่เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสกับของไหล ในการเพิ่มอัตราการถ่ายเทความร้อนนั้น ชั้นขอบเขต (Boundary Layer) จะถูกทำให้บางลง หรือถูกรบกวนบางส่วน จากนั้นจึงเริ่มต้นชั้นขอบเขตใหม่ เป็นเช่นนี้ซ้ำๆ ไป พื้นผิวนูนหรือยื่นออกมาได้รับการพิสูจน์แล้วว่า ช่วยเพิ่มการถ่ายเทความร้อน อย่างไรก็ตาม ข้อเสียของมันก็คือ ทำให้เกิดการสูญเสียความดัน ซึ่งก่อให้เกิดค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษา นอกเหนือไปจากน้ำหนักของวัสดุที่เพิ่มขึ้น ดังนั้น จึงได้มีการวิจัยด้วยการนำพื้นผิวยุบบุ๋มมาใช้ในการไหลแบบขนาน เนื่องจากมันมีศักยภาพในการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน แต่ใช้วัสดุน้อยลง น้ำหนักน้อย มีการสูญเสียความดันต่ำ และการบำรุงรักษาน้อยกว่า

Bearman และ Harvey [1] ได้ศึกษาอากาศพลศาสตร์ของรอยบุ๋มที่อยู่บนลูกกอล์ฟ ซึ่งใช้ในการลดแรงลาก (Drag) นอกจากนี้พวกเขายังได้พิจารณารูปร่างของรอยบุ๋ม และพบว่ารอยบุ๋มรูปหอกเหลี่ยมให้แรงยก (Lift) มากกว่าแต่แรงลagn้อยกว่ารอยบุ๋มแบบวงกลมธรรมดา เนื่องจากสร้างวอร์เท็กซ์แบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Vortices) ให้แก่ชั้นขอบเขต ในปัจจุบันได้มีงานวิจัยที่ใช้พื้นผิวยุบบุ๋มกับการไหลแบบขนาน เช่น Kesarev และ Kozlov [2] ศึกษาการไหลแบบขนานผ่านรอยบุ๋มขนาดใหญ่ และอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในรูปของแหล่งกำเนิด (Source) และแหล่งรับ (Sink) การถ่ายเทความร้อนเมื่อการไหลผ่านรอยบุ๋มดังกล่าวเพิ่มขึ้น 50% เมื่อเปรียบเทียบกับผิวเรียบ Moon และคณะ [3] พิจารณาการไหลแบบขนานผ่านกลุ่มของรอยบุ๋ม และพบว่าการถ่ายเทความร้อนเป็น 2.1 เท่าของผิวเรียบ ในขณะที่สัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Friction Factor) มีค่าเพียง 1.6-2 เท่า Chyu และคณะ [4] ศึกษาผลของรูปร่างของรอยบุ๋มกับการไหลแบบขนาน พบว่ากลุ่มรอยบุ๋มรูปร่างหยดน้ำให้การถ่ายเทความร้อนและการสูญเสียความดันที่สูงกว่ากลุ่มรอยบุ๋มกลม เพราะมุมแหลมของมัน Bunker และคณะ [5] ทำการทดลองเพื่อหาการถ่ายเทความร้อนและความดันลดสำหรับการไหลแบบขนาน โดยใช้ช่องการไหลที่มีพื้นที่หน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าทั้งแบบตรงและท่อแบบลู่เข้าและบานออก (Converging and diverging) พร้อมกับรอยบุ๋ม 4 แบบ ได้แก่ แบบกลมเหมือนท้าวๆ ไป แบบโคนตัด แบบทรงกระบอกคั่น และแบบผสมระหว่างโคนและทรงกระบอก พวกเขารายงานว่า รอยบุ๋มแบบวงกลมให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้น 50% เมื่อเปรียบเทียบกับผิวเรียบ ในขณะที่การสูญเสียความดันมีค่าน้อยลง 25% เมื่อเปรียบเทียบผลการถ่ายเทความร้อน รอยบุ๋มแบบโคนตัดให้การถ่ายเทความร้อนพอๆ กับแบบวงกลม ในขณะที่แบบทรงกระบอกให้ผลลดลง 10% ถึง 15% และแบบผสมระหว่างโคนตัดและทรงกระบอกคั่นให้ผลการถ่ายเทความร้อนที่ดีสำหรับการไหลที่ความเร็วต่ำ

Kanokjaruvijit และ Martínez-Botas [6] ศึกษาการตกกระทบบของกลุ่มของเจ็ทกลมลงบนพื้นผิวรอยนูนแบบวงกลมและแบบวงกลมสองวงเหลื่อมกัน (Cusped Elliptical shape) ที่มีพื้นผิวตามภาพฉาย (Projected Area) เท่ากัน ในช่วง Re ระหว่าง 5000 ถึง 11500 สำหรับ Crossflow แบบต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 1 พวกเขาสรุปว่า รูปร่างของรอยนูนมีผลเพียงเล็กน้อยต่อการถ่ายเทความร้อน อย่างไรก็ตาม Crossflow Schemes มีผลกระทบอย่างชัดเจนต่อการเพิ่มการถ่ายเทความร้อน Minimum Crossflow ให้การถ่ายเทความร้อนลดลงที่ระยะจากทางออกหัวฉีดถึงพื้นผิวดตกกระทบน้อยๆ เช่น $H/D_j = 2$ ในขณะที่ที่ค่า H/D_j กว้างๆ จะให้การถ่ายเทความร้อนเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับผิวเรียบ นอกจากนี้ เมื่อเกิด Crossflow ปริมาณมากๆ ดังเช่นใน Intermediate และ Maximum Crossflow schemes ทำให้รอยนูนทำงานได้ดีขึ้น การถ่ายเทความร้อนสำหรับ Maximum crossflow scheme มีค่าเพิ่มขึ้น 70% ในงานถัดมาของพวกเขา [7, 8] ได้พิจารณาผลของพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ Reynolds number, H/D_j , ความลึกของรอยนูน อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางของเจ็ทกับเส้นผ่าศูนย์กลางตามภาพฉายของรอยนูนกับ และตำแหน่งของการตกกระทบบ



รูปที่ 1 Crossflow schemes ที่เกิดขึ้นจากการติดตั้งผนังด้านข้าง

3. วัตถุประสงค์

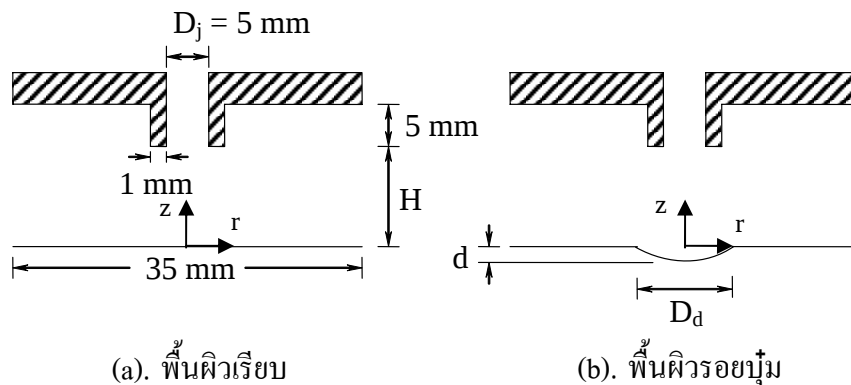
- ตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม COMSOL ด้วยการเปรียบเทียบผลการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทแบบราบเรียบสมมาตรตามแกนตกกระทบบนพื้นผิวเรียบที่ได้จากการคำนวณกับผลการทดลองที่ได้จากการทบทวนเอกสาร ทั้งนี้พิจารณาผลกระทบของความหนาแน่นของกริด ความยาวของหัวฉีด และความหนาของหัวฉีดด้วย
- พิจารณาผลกระทบที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทที่กระทบบนพื้นผิวรอยนูนที่มีลักษณะความร้อนคงที่ ได้แก่ Reynolds number, ระยะห่างระหว่างทางออกของเจ็ทและพื้นผิวดตกกระทบบ ความลึกของรอยนูน และอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่าศูนย์กลางของเจ็ทและเส้นผ่าศูนย์กลางภาพฉายของรอยนูน

- เปรียบเทียบผลการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทตกกระทบลงบนพื้นผิวเรียบกับพื้นผิวเรียบ

4. ขั้นตอนการทดลอง

4.1 การสร้างโดเมนของแบบจำลอง

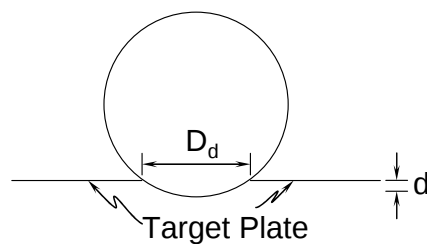
พิจารณารูปที่ 2 แสดงภาพสเก็ตซ์ของโจทย์สำหรับการกระแทกของเจ็ทอากาศที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มม. ลงบนพื้นผิวเรียบ และพื้นผิวรอยบุ๋ม โดยที่ตอนเริ่มแรกนั้นให้แผ่นเป้าหมายมีความยาว 35 มม. อย่างไรก็ตาม อาจมีการขยายความยาวนี้ออกไปอีกเพื่อให้สอดคล้องกับการทดลองจากการทบทวนเอกสาร รวมไปถึงการลู่เข้าของค่าที่กำลังพิจารณา (Convergence) สำหรับระยะห่าง H วัดจากทางออกของหัวฉีดไปยังพื้นผิวเป้าหมาย และเพื่อความเข้าใจในพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับพื้นผิวรอยบุ๋มนั้น รูปที่ 3 ได้แสดงภาพร่างสำหรับการสร้างพื้นผิวรอยบุ๋มจาก Ball mill ซึ่งเป็นการกลึงวัสดุออกไป ซึ่งจะให้เส้นผ่านศูนย์กลางตามภาพฉายของรอยบุ๋ม (Projected diameter) D_d และความลึกของรอยบุ๋มเป็น d



(a). พื้นผิวเรียบ

(b). พื้นผิวรอยบุ๋ม

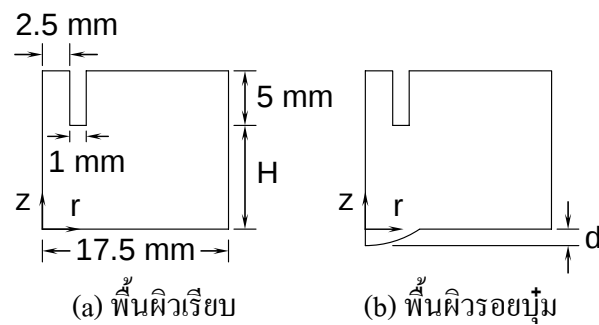
รูปที่ 2 ขนาดและพารามิเตอร์ที่ต้องการทดสอบ (not to scale)



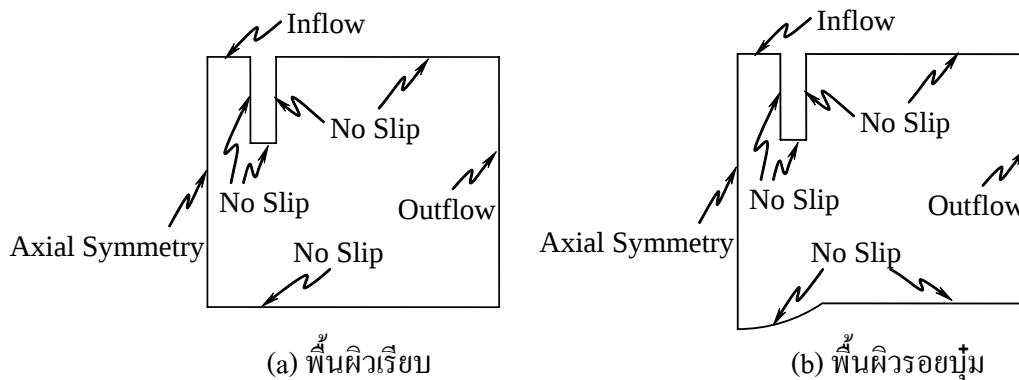
รูปที่ 3 ภาพร่างการสร้างพื้นผิวรอยบุ๋มด้วย Ball mill

เนื่องจากโจทย์เป็นแบบสมมาตรตามแกนในสองมิติ ดังนั้นโดเมนการคำนวณจึงสามารถลดลงเหลือเพียงครึ่งเดียว ดังแสดงในรูปที่ 4 ซึ่งเป็นการช่วยประหยัดหน่วยความจำและเวลาที่ใช้ในการคำนวณ ในการศึกษาใช้ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ที่ใช้ระเบียบวิธีของ Finite Element ที่ชื่อ

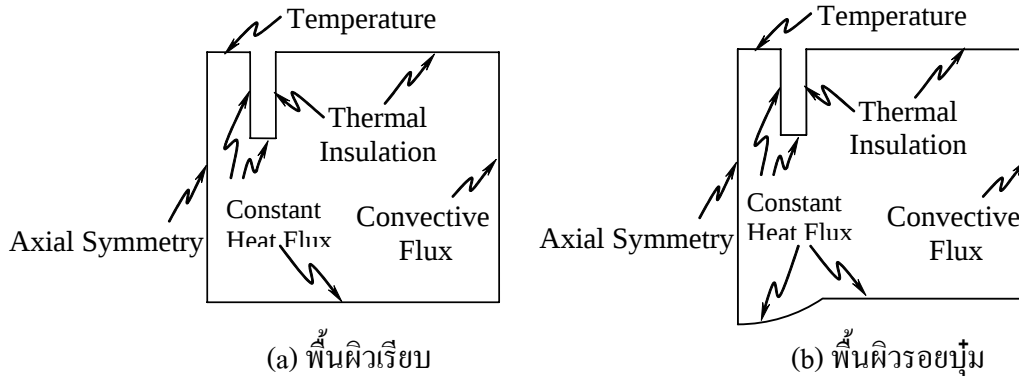
COMSOL ถูกนำมาใช้ โปรแกรมดังกล่าวเหมาะสำหรับ Multiphysics กล่าวคือ มีการพิจารณา มากกว่าหนึ่งปัญหาในโดเมนเดียวกัน ยกตัวอย่างเช่น ในที่นี้ เราจะพิจารณาโจทย์การไหลไป พร้อมๆ กับปัญหาการถ่ายเทความร้อน ดังนั้นจึงต้องกำหนดสภาวะขอบเขต (Boundary Conditions) สำหรับทั้งสองปัญหาพร้อมๆ กัน ดังแสดงในรูปที่ 5 และ 6 สำหรับปัญหาการไหลนั้น เรากำหนดให้พื้นผิวเป็น “No Slip” หรือของไหลไม่ลื่นไถลที่พื้นผิว ที่ทางออกของหัวฉีด กำหนดให้เป็น “inflow” กล่าวคือต้องกำหนดความเร็วของของไหลที่นี้ เมื่อเจ็ทตกกระทบแล้วก็จะ ออกจากโดเมนสู่บรรยากาศ (Atmosphere) ดังนั้นที่ทางออกของโดเมนจึงกำหนดให้เป็น “outflow” เมื่อพิจารณากรณีของการถ่ายเทความร้อนในรูปที่ 5 กำหนดให้เจ็ทอากาศมีอุณหภูมิคงที่ที่ 300 K ถูกปล่อยออกมาจากหัวฉีด และกำหนดให้ผนังแวดล้อมเป็นฉนวน หรือ “thermal insulation” แต่ พื้นผิวเป้าหมายกำหนดให้มีฟลักซ์ความร้อนคงที่เท่ากับ 500 W/m^2 เจ็ทหลังกระทบให้ออกสู่ บรรยากาศ จึงกำหนดให้เป็น “convective flux”



รูปที่ 4 โดเมนสำหรับสมมาตรตามแกนในสองมิติ



รูปที่ 5 การกำหนดสภาวะขอบเขตสำหรับปัญหาการไหล



รูปที่ 6 การกำหนดสภาวะขอบเขตสำหรับปัญหาการถ่ายเทความร้อน

4.2 สมการที่ใช้ในการคำนวณ

การคำนวณในการศึกษานี้ อาศัยกฎการอนุรักษ์ทั้งสาม ได้แก่ การอนุรักษ์มวล การอนุรักษ์โมเมนตัม และการอนุรักษ์พลังงาน ทั้งนี้อยู่ภายใต้สมมติฐานดังนี้ (1) สถานะคงตัว (Steady state) (2) เป็นของไหลนิวทอนเนียน (3) อัดตัวไม่ได้ (4) ไม่นำผลของแรงโน้มถ่วงของโลก (Gravity) มาคิด และ (5) เป็นการไหลแบบสมมาตรตามแกนในสองมิติ อากาศที่ใช้มี $Pr = 0.71$ สมการที่แสดงกฎการอนุรักษ์ที่กล่าวข้างต้นสามารถแสดงได้ดังนี้

สมการการอนุรักษ์มวล (Continuity equation):

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv_r) + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

สมการการอนุรักษ์โมเมนตัมในทิศรัศมี (Momentum equation in radial direction):

$$\rho \left(v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (rv_r)}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} \right] \quad (2)$$

สมการการอนุรักษ์โมเมนตัมในทิศตามแกน (Momentum equation in axial direction):

$$\rho \left(v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right] \quad (3)$$

สมการการอนุรักษ์พลังงาน (Energy equation):

$$\rho c_p \left(v_r \frac{\partial T}{\partial r} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + 2\mu \left[\left(\frac{\partial v_r}{\partial r} \right)^2 + \frac{v_r^2}{r^2} + \left(\frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 \right] + \mu \left[\left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right)^2 \right] \quad (4)$$

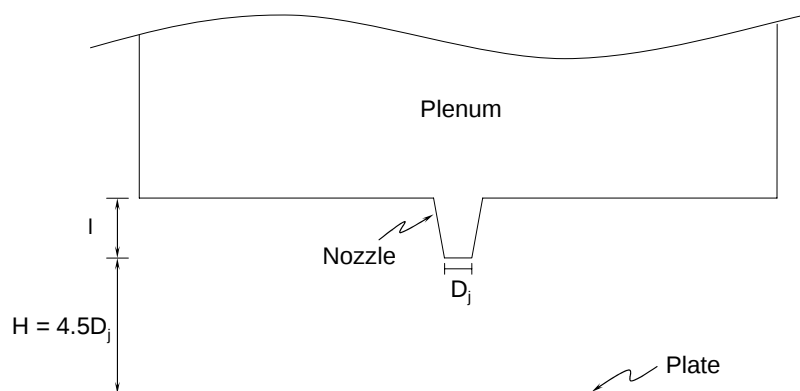
5. การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม (Validation)

ในการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมนั้น กระทำได้โดยการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณของโปรแกรม COMSOL กับผลการทดลองที่ได้จากการทบทวนเอกสาร รวมไปถึงผลจากการใช้ระเบียบวิธี Finite Difference จากโปรแกรมที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายเช่น FLUENT จากเอกสารอ้างอิงด้วย ทั้งนี้จะพิจารณาเฉพาะผลของการกระแทกของเจ็ทลงบนผิวเรียบเท่านั้น ในที่นี้เราจะเลือกใช้โดเมนการคำนวณที่เหมาะสม โดยพิจารณาผลกระทบของการแบ่งโดเมนในการคำนวณ ความหนาแน่นของกริด และลักษณะของหัวฉีด อย่างไรก็ตาม

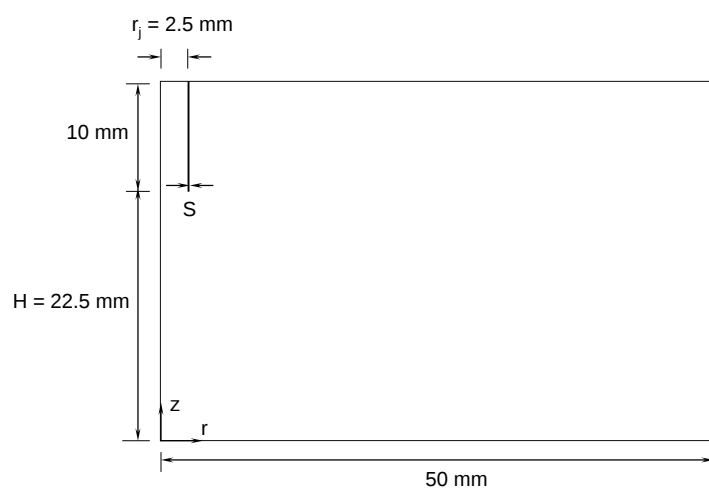
5.1 การเปรียบเทียบกับผลการทดลอง

5.1.1 การสร้างโดเมนให้สอดคล้องกับการทดลอง

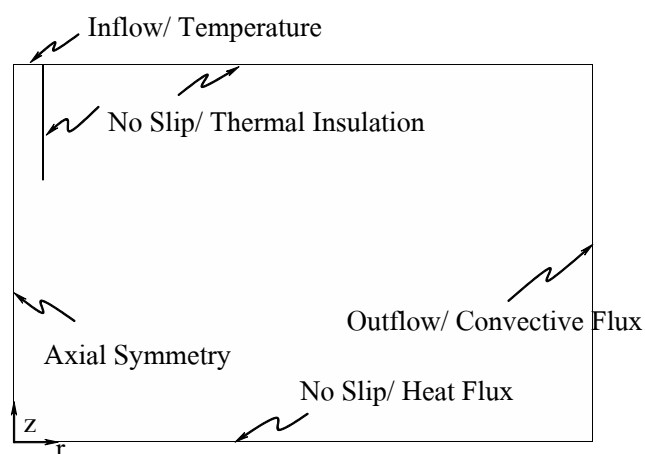
รูปที่ 7 แสดงภาพร่างของการทดลองของ Angioletti และคณะ ซึ่งกำหนดให้ระยะระหว่างทางออกของหัวฉีดและพื้นผิวตกกระทบเป็น $4.5 D_j$ เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวฉีด ($4.5 D_j$) แต่ไม่ได้กำหนดขนาดของส่วนประกอบอื่นมาให้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งรายละเอียดของหัวฉีด ในที่นี้ เรากำหนดให้ $D_j = 5 \text{ mm}$ และความยาวของหัวฉีดเป็น $l = 10 \text{ mm}$ และความหนาของหัวฉีด 0.1 mm รูปที่ 8 แสดงโดเมนการคำนวณซึ่งจำลองแบบออกมาจากรูปที่ 7 เนื่องจากซอฟต์แวร์ COMSOL มีความสามารถในการทำงานแบบ Multiphysics ดังนั้นโปรแกรมจึงคำนวณปัญหาการไหลก่อน ปัญหาการถ่ายเทความร้อน เพราะฉะนั้น เราจึงต้องกำหนดสภาวะขอบเขตสำหรับทั้งสองปัญหาดังแสดงในรูปที่ 9 เริ่มจากกำหนดให้ผนังทุกด้านเป็นสภาวะ No slip สำหรับทางออกจากโดเมน กำหนดให้เป็น “outflow” เนื่องจากเจ็ทหลังตกกระทบจะออกสู่บรรยากาศ 1 atm ตัวเลข Reynolds คำนวณได้จากทางออกของหัวฉีด ดังนั้น เราจึงต้องคำนวณความเร็วที่ทางเข้าหัวฉีดเสียก่อน ในกรณีของปัญหาการถ่ายเทความร้อน พื้นผิวบนและพื้นผิวของหัวฉีดกำหนดให้เป็น “thermal insulation” ในขณะที่อุณหภูมิของเจ็ทที่ออกจากหัวฉีดเป็น 298 K พื้นผิวตกกระทบมีฟลักซ์ความร้อนคงที่ที่ 500 W/m^2 และหลังจากที่เจ็ทตกกระทบแล้ว เจ็ทจะไหลออกจากโดเมนไปสู่บรรยากาศ สมบัติเชิงความร้อนต่างๆ หาที่ 298 K



รูปที่ 7 ภาพร่างสำหรับหัวฉีดและแผ่นตกกระทบของการทดลองของ Angioletti และคณะ



รูปที่ 8 โดเมนการคำนวณที่จำลองจากการทดลองในรูปที่ 6



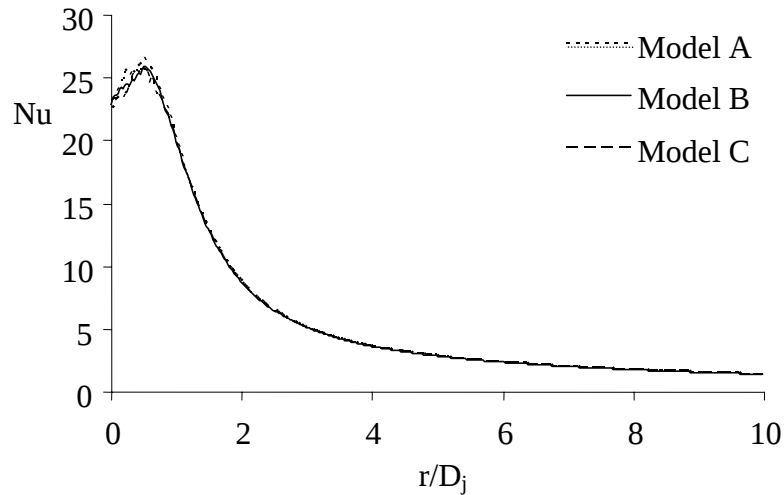
รูปที่ 9 สภาวะขอบเขตสำหรับปัญหาทั้งการไหลและการถ่ายเทความร้อน

5.1.2 การตรวจสอบผลกระทบของความหนาแน่นของกริด

Fagan [12] และ Decha-ampai [13] ได้กล่าวเกี่ยวกับระเบียบวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ไว้ว่า ยิ่งความหนาแน่นของกริดสูง ยิ่งทำให้ความถูกต้องของคำตอบมีมากขึ้น และใช้หน่วยความจำมากขึ้น อย่างไรก็ตามในการศึกษานี้มีข้อจำกัดตรงความสามารถของคอมพิวเตอร์ ซึ่งมี RAM 2 GB โปรแกรม COMSOL สร้างกริดที่กระจายอย่างทั่วถึงในโดเมนที่สนใจ แต่สามารถปรับแต่งค่าของความหนาแน่นของกริดได้ ดังนั้น เราจึงต้องหาความหนาแน่นของกริดที่ดีที่สุด เพื่อประหยัดหน่วยความจำและเวลา แต่จะต้องให้ผลการคำนวณที่มีความถูกต้องพอ ตารางที่ 1 แสดงแบบจำลอง A, B และ C ซึ่งใช้ความหนาแน่นของกริดแตกต่างกัน และผลของการถ่ายเทความร้อนสำหรับ $Re = 1000$, $H/D_j = 4.5$ แสดงในรูปของตัวแปรไร้มิติ Nusselt number (Nu) แสดงในรูปที่ 10 เนื่องจากแบบจำลอง C ใช้ความหนาแน่นของกริดที่สูงที่สุด ดังนั้นแบบจำลอง C จึงให้ผลคำนวณออกมาถูกต้องที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบผลของตัวเลข Nu เฉลี่ยของแบบจำลอง A และ B กับแบบจำลอง C พบว่า แบบจำลอง A มีความแตกต่างจากแบบจำลอง C คิดเป็น 0.4937% และแบบจำลอง B ต่าง 0.2523% เมื่อพิจารณาถึงเวลาที่ใช้ในการประมวลผลนั้น การแก้ปัญหาคำนวณใช้เวลามากกว่าปัญหาการถ่ายเทความร้อน และความหนาแน่นของกริดที่สูงจึงหมายถึงการใช้เวลาไม่น้อยเอง ในที่นี้ เราเลือกแบบจำลอง B เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Angioletti และคณะ [11].

ตารางที่ 1 ผลของความหนาแน่นของกริดที่มีต่อเวลาที่ใช้ในการคำนวณของการตกกระทบของเจ็ทลงบนพื้นผิวเรียบในกรณีของ $Re = 1000$ และ $H/D_j = 4.5$

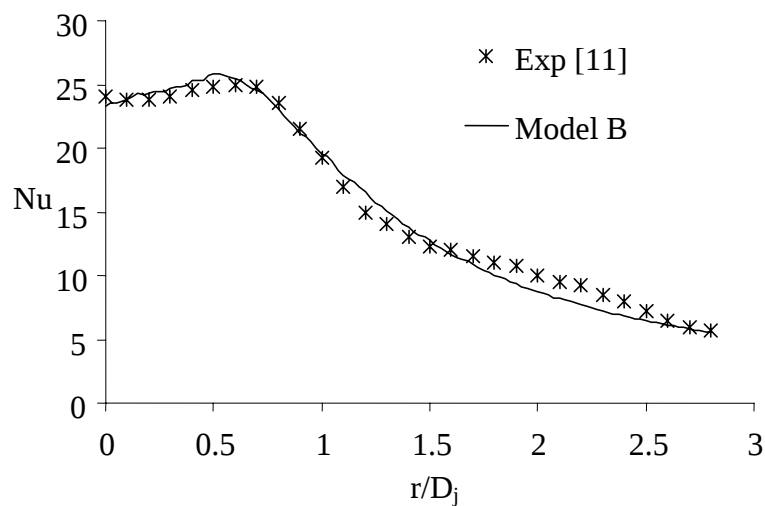
Model	ความหนาแน่นของกริด (grids/mm ²)	เวลาที่ใช้ในการคำนวณ (นาที่ : วินาที)		
		ปัญหาการไหล	ปัญหาการถ่ายเทความร้อน	รวมเวลา
A	17.32	9 : 30	0 : 8	9 : 38
B	21.32	12 : 54	0 : 11	13 : 05
C	23.14	14 : 22	0 : 12	14 : 34



รูปที่ 10 การเปรียบเทียบผลการถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่ที่ได้จากแบบจำลองที่มีความหนาแน่นของกริดต่างๆ กัน $Re = 1000$, $H/D_j = 4.5$

5.1.3 การเปรียบเทียบผลการถ่ายเทความร้อน

รูปที่ 11 แสดงการเปรียบเทียบผลของการถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่ที่ได้จากการคำนวณโดเมนของแบบจำลอง (21.32 grids/mm^2) กับผลการทดลองของ Angioletti และคณะ [11] ที่ $Re = 1000$ และ $H/D_j = 4.5$ ซึ่งแสดงให้เห็นความสอดคล้องกัน สำหรับค่า Nu เฉลี่ยนั้นต่างกัน 1.0443% ความแตกต่างนี้อาจจะมาจากการขาดข้อมูลของหัวฉีดจากการทดลอง



รูปที่ 11 การเปรียบเทียบผลการถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่ของแบบจำลอง B (ดูตารางที่ 2) กับผลจากการทดลองของ Angioletti และคณะ [11] ที่ $Re = 1000$ และ $H/D_j = 4.5$

5.2 การเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณโดยใช้วิธี *Finite Difference*

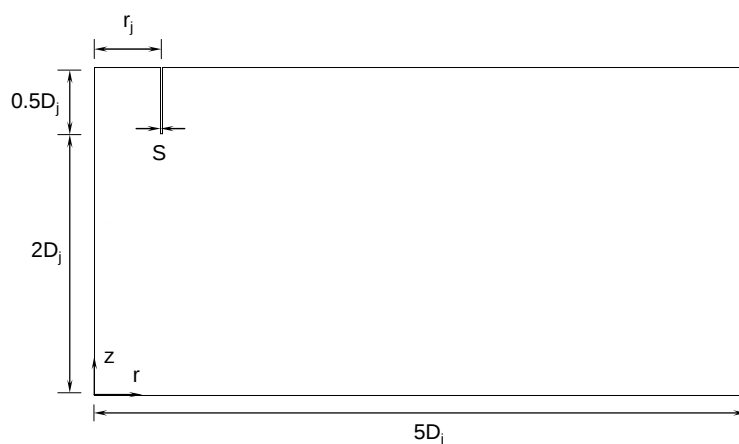
ระเบียบวิธี Finite Difference ได้รับการยอมรับโดยทั่วไป ดังนั้นเราจึงเลือกที่จะเปรียบเทียบกับผลการคำนวณจากระเบียบวิธีนี้ งานของ Chattopadhyay [14] ได้ใช้ SIMPLE algorithm กับการศึกษาของเจ็ทสมมาตรตามแกนในสองมิติเช่นเดียวกัน โดยที่เขาได้นิยามตัวเลข Reynolds ดังนี้

$$\text{Re} = \frac{\rho U_j D_j}{\mu} \quad (5)$$

เมื่อ U_j คือความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทที่ทางออก ในทำนองเดียวกันกับการตรวจสอบที่ผ่านมา เราจะเลือกแบบจำลองที่เหมาะสมโดยพิจารณาความหนาแน่นของกริด และเวลาที่ใช้ในการคำนวณ นอกจากนี้ ในหัวข้อนี้เรานำการเพิ่มโดเมนเข้ามาใช้เพื่อให้การคำนวณลู่เข้าค่าหนึ่ง (converge)

5.2.1 การจำลองโดเมนการคำนวณ

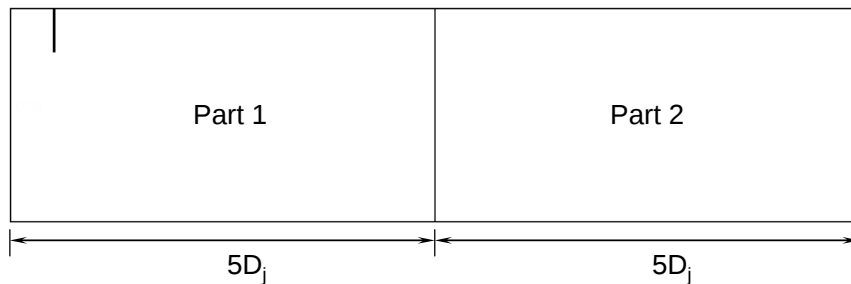
รูปที่ 12 แสดงโดเมนการคำนวณของ Chattopadhyay [14] เขากำหนดขนาดต่างๆ ให้อยู่ในรูปของจำนวนเท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวฉีดหรือเจ็ท (D_j) โดยมีความยาวของหัวฉีดเป็น $0.5 D_j$ ระยะระหว่างทางออกกับแผ่นตกกระทบเป็น $10 D_j$ นอกจากนี้ยังกำหนดให้ผนังของหัวฉีดเป็นเพียงเส้นบางๆ สมบัติเชิงความร้อนของอากาศหาที่อุณหภูมิ 303 K แต่ในการศึกษานี้ เรากำหนดให้เส้นผ่าศูนย์กลางของหัวฉีดเป็น 5 mm และผนังของหัวฉีดหนา 0.1 mm สภาวะขอบเขตสำหรับปัญหาการไหลและการถ่ายเทความร้อนกำหนดให้เหมือนกับในรูปที่ 8 และ 9



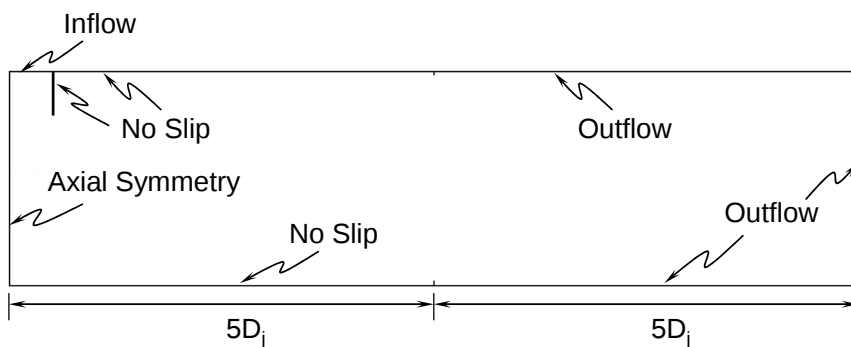
รูปที่ 12 การกำหนดขนาดของโดเมนการคำนวณของ Chattopadhyay [14]

5.2.2 ผลของความหนาแน่นของกริดและการเพิ่มโดเมน

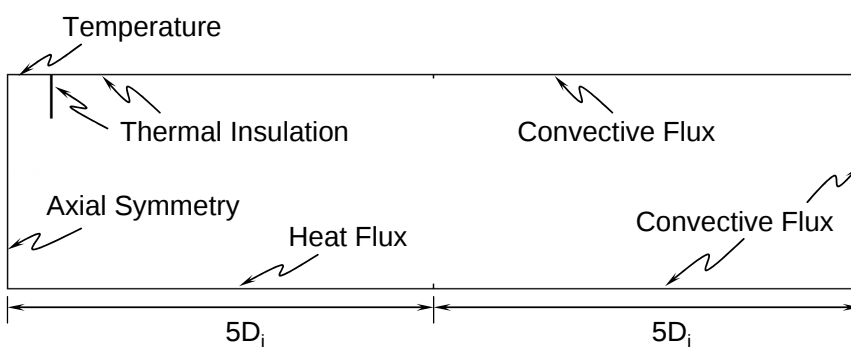
ในการสร้างโดเมนให้เหมือนกับรูปที่ 12 ทำให้ซอฟต์แวร์ของเราให้คำตอบที่ไม่ลู่เข้า (Divergence) ซึ่งอาจจะมาจากสาเหตุของ End Effect ดังนั้นเราจึงเพิ่มอีกโดเมนที่มีความยาว $5D_j$ เข้าไป ดังแสดงในรูปที่ 13 และสถานะขอบเขตสำหรับทั้งสองปัญหาแสดงในรูปที่ 14 และ 15 การเพิ่มโดเมนเข้ามานี้ ไม่ได้เป็นการขยายพื้นที่วัดผลกระทบแต่อย่างใด แต่เป็นการเพิ่มโดเมนให้ซอฟต์แวร์สามารถทำงานได้ ด้วยการกำหนดให้โดเมนใหม่นี้เปิดสู่บรรยากาศ



รูปที่ 13 การต่อโดเมนการคำนวณ (Part 2)



รูปที่ 14 สถานะขอบเขตสำหรับปัญหาการไหลของทั้งสองโดเมน



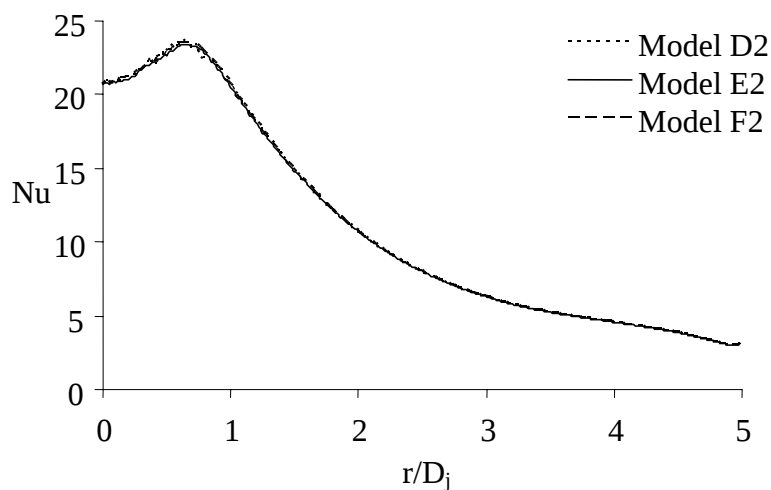
รูปที่ 15 สถานะขอบเขตสำหรับปัญหาการถ่ายเทความร้อนของทั้งสองโดเมน

ขั้นต่อไปเป็นการตรวจสอบผลกระทบของความหนาแน่นของกริด ทั้งนี้เพื่อลดเวลาในการคำนวณและหน่วยความจำ ทั้งสองโดเมนในแบบจำลอง D มีความหนาแน่นของกริดเท่ากันเป็น 35.12 grids/mm^2 ดังแสดงในตารางที่ 2 ความหนาแน่นของกริดของแบบจำลอง E ให้มีค่าเท่ากันใน

ทั้งสองโดเมนคือ 48.12 grids/mm^2 อย่างไรก็ตาม เนื่องจากเราให้ความสำคัญกับโดเมนการคำนวณแรกมากกว่า ในแบบจำลอง F เราจึงกำหนดให้ความหนาแน่นของกริดของโดเมนแรกมีค่าสูงเท่ากับ 48.12 grids/mm^2 แต่ในโดเมนที่เพิ่มเข้ามามีความหนาแน่นของกริดต่ำเท่ากับ 5.90 grids/mm^2 ผลการถ่ายเทความร้อนที่ได้มาจากทั้งสามแบบจำลองแสดงในรูปที่ 16 ซึ่งทั้งสามแสดงผลที่ใกล้เคียงกัน เมื่อเปรียบเทียบทั้งสามแบบจำลองนั้น แบบจำลอง E ถือว่าให้ความถูกต้องสูงที่สุดเนื่องจากมีความหนาแน่นของกริดสูงที่สุด ([12], [13]) เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของ Nu ของแบบจำลอง D และ F กับ E พบว่า ให้ผลต่าง 0.3342% และ 0.1861% ตามลำดับ ดังนั้นเราจึงเลือกแบบจำลอง F เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณของ Chattopadhyay [14].

ตารางที่ 2 ความหนาแน่นของกริดของทั้งสองโดเมนในรูปที่ 14

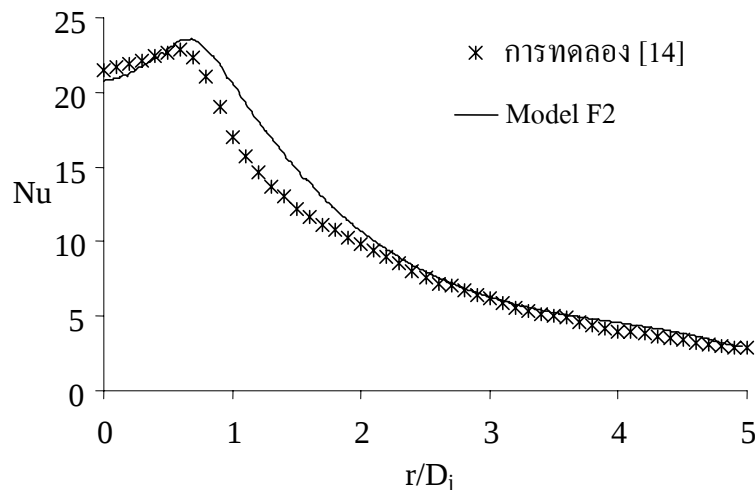
Model	ความหนาแน่นของกริด (grids/mm^2)	
	โดเมน 1	โดเมน 2
D2	35.32	35.32
E2	48.12	48.12
F2	48.12	5.90



รูปที่ 16 การเปรียบเทียบผลการถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่ของแบบจำลองที่ความหนาแน่นของกริดต่างๆ ตามตารางที่ 4 ที่ $Re=1000$, $H/D_j = 2$

5.2.3 การเปรียบเทียบผลการถ่ายเทความร้อน

รูปที่ 17 แสดงการเปรียบเทียบตัวเลข Nu เฉพาะที่ $Re = 1000$ และ $H/D_j = 2$ ที่ได้จากแบบจำลอง F กับผลการคำนวณโดยใช้ FDM ของ Chattopadhyay [14] พบว่า ผลสอดคล้องกันบริเวณตกกระทบ ($0 < r/D_j < 0.8$) และในช่วงเจ็ทผนังที่เริ่มตั้งแต่ $r/D_j > 3$ ผลต่างในช่วง $0.8 < r/D_j < 3$ อาจจะมาจากการที่เกี่ยวกับการกำหนดค่าของความยาวของหัวฉีดและเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวฉีด ตารางที่ 3 สรุปผลต่างของค่าเฉลี่ยของ Nu สำหรับ $Re = 500$ และ 1000 ที่ $H/D_j = 2$ สำหรับที่ $Re = 500$ ผลต่างมีค่าเป็น 3.6394% ในขณะที่สำหรับ $Re = 1000$ ผลต่างอยู่ที่ 6.8539%



รูปที่ 17 การเปรียบเทียบผลการถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่กับผลที่ได้จากวิธี Finite Difference ของ Chattopadhyay [14] ที่ค่า $Re = 1000$ และ $H/D_j = 2$

ตารางที่ 3 ตัวเลข Nusselt เฉลี่ยจาก FEM เปรียบเทียบกับ FDM [14]

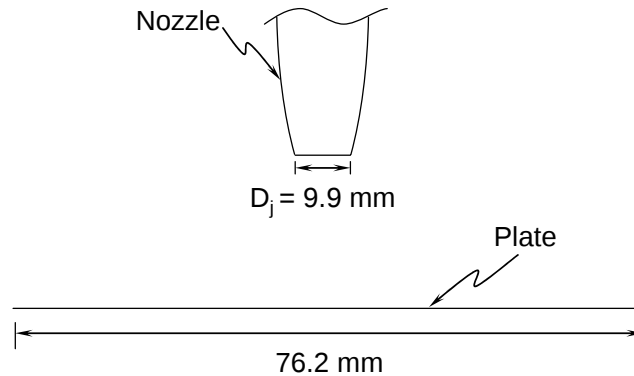
Re	Nu _{ave}		% Difference
	Finite Element (Model F2)	Finite Difference [...]	
500	6.6384	6.88	3.6394
1000	10.9076	10.16	6.8539

5.3 การพิจารณาการจำกัดการไหลของหัวฉีด (Nozzle Confinement)

ผลของลักษณะของหัวฉีดที่จำกัดการไหลจะพิจารณาผ่านการหาความหนาที่เหมาะสมของผนังของหัวฉีด เริ่มต้นด้วยการเปรียบเทียบผลจากการคำนวณกับผลการทดลองของ Bergthorson และคณะ [15] ผู้ซึ่งใช้การตกกระทบของเจ็ทแบบไม่จำกัดการไหล (Unconfined Jet Impingement) และภาพร่างของการทดลองแสดงดังรูปที่ 18 ผลที่ได้แสดงออกมาในรูปของความเร็วยูนิฟิเคชันที่แกนสมมาตรที่ $Re = 400, 700$ และ 1400 และ $H/D_j = 1$ ทั้งนี้พวกเขาได้นิยามตัวเลข Re ไว้ดังนี้

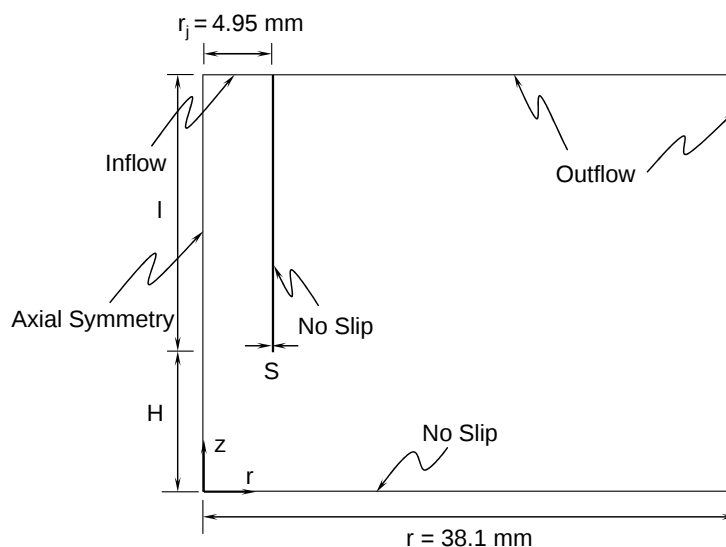
$$Re = \frac{\rho U_c D_j}{\mu} \quad (6)$$

เมื่อ U_c แสดงความเร็วของเจ็ทที่ทางออก วัดที่เส้นสมมาตร



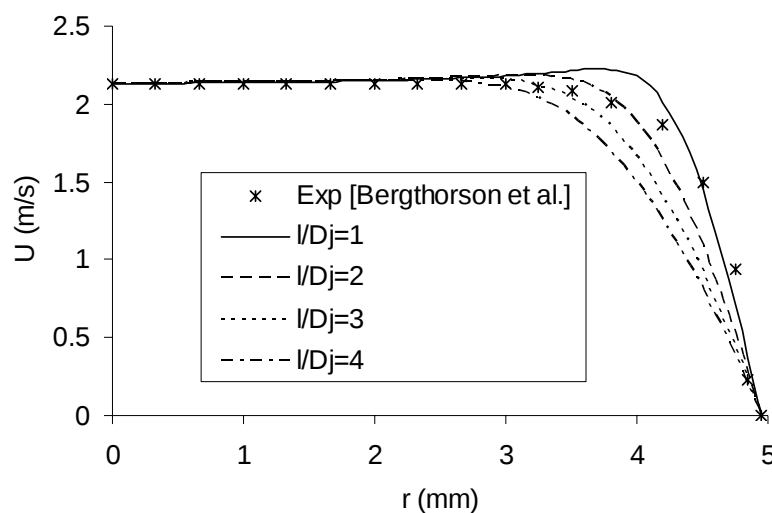
รูปที่ 18 ภาพร่างการทดลองของ Berthorson และคณะ [15]

รูปที่ 19 แสดงการจำลองโดเมนการคำนวณและสภาวะขอบเขตสำหรับรูปที่ 18 เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของหัวฉีดที่กำหนดไว้มีค่าเป็น 9.9 mm และเส้นผ่าศูนย์กลางกลางของแผ่นตกกระทบ รูปวงกลมเป็น 72.6 mm สมบัติเชิงความร้อนหาที่ 293 K แต่ไม่ได้กำหนดความยาวและความหนาของผนังหัวฉีดมาให้ ซึ่งเราจะต้องหาต่อไป เนื่องจากนี่คือกรณีของเจ็ทตกกระทบที่ไม่จำกัดการไหล (Unconfined) แต่ทว่าในการที่จะให้โปรแกรมประมวลผลออกมาได้นั้นเราต้องกำหนดขอบเขตของโดเมน ซึ่งในที่นี้เราให้ผนังด้านบนเป็น “outflow” แทนที่จะเป็น “no slip” รวมไปถึงผนังบนจะต้องมีความสูงกว่าทางออกของหัวฉีดมากพอเพื่อให้แน่ใจว่าเป็นเจ็ทไม่จำกัดการไหล เนื่องจากการขาดข้อมูลเกี่ยวกับหัวฉีด ในที่นี้เรากำหนดให้หัวฉีดมีรูปร่างเป็นทรงกระบอก



รูปที่ 19 การจำลองโดเมนการคำนวณจากรูปที่ 18

ขั้นตอนถัดมาเป็นการหาความยาวที่เหมาะสมของหัวฉีด แต่ก่อนอื่นเราจะต้องหาความหนาแน่นของกริดที่เหมาะสมเสียก่อนดังที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้น ในที่นี้เราเลือกความหนาแน่นที่ 16.98 grids/mm^2 ความยาวของหัวฉีดเป็น 1, 2, 3 และ 4 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีด และ $Re = 1400$ เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Bergthorson และคณะ [15] ดังแสดงในรูปที่ 20 ทุกค่าของ L/D_j สอดคล้องกันกับผลการทดลองจนกระทั่งถึง $r \approx 2.7$ และหลังจากตำแหน่งนี้ หัวฉีดที่มี $L/D_j = 2$ ให้ค่าที่ดีที่สุด โดยมีผลต่างจากผลการทดลองเป็น 6.994% ดังแสดงสรุปในตารางที่ 4 ดังนั้น เราจึงเลือกความยาวของหัวฉีดที่ $L/D_j = 2$ เป็นตัวแทน

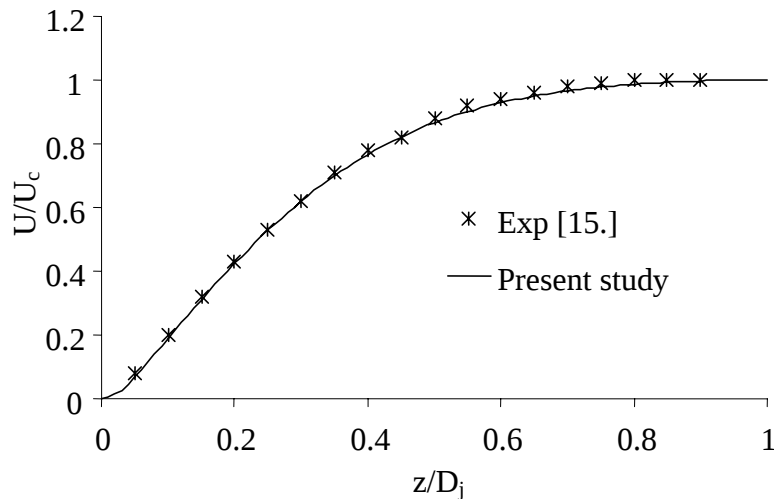


รูปที่ 20 การเปรียบเทียบความเร็วที่แกนสมมาตรของเจ็ทที่ทางออก สำหรับค่า L/D_j ต่างๆ กับค่าที่ได้จากการทดลองของ Bergthorson และคณะ [15] สำหรับ $Re = 1400$.

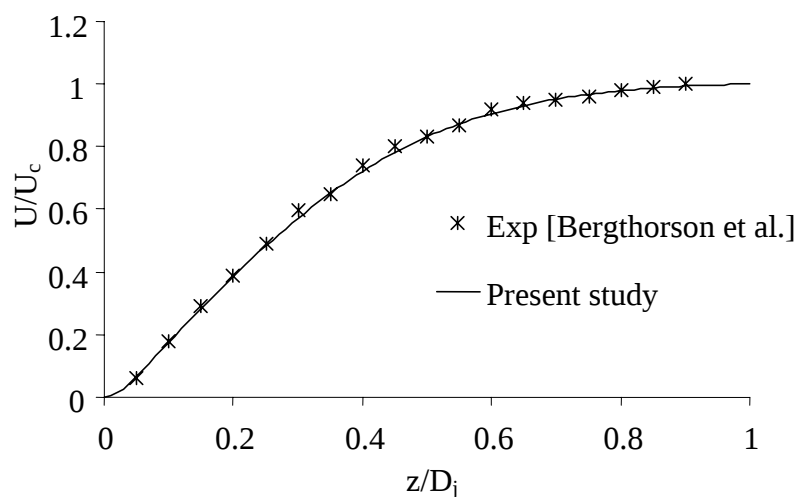
ตารางที่ 4 ความแตกต่างของความเร็วเฉลี่ยของเจ็ทที่ทางออกจากการคำนวณกับผลของ Bergthorson และคณะ [15] ที่ความยาวต่างๆ ของหัวฉีดที่ $Re = 1400$

L/D_j	% Difference
1	7.3598
2	6.9994
3	8.1778
4	11.0038

การเปรียบเทียบค่าความเร็วไร้หน่วยที่เส้นสมมาตรที่ $Re = 400$ จากการศึกษานี้กับข้อมูลจากการทดลองของ Bergthorson และคณะ [15] แสดงในรูปที่ 21 และที่ $Re = 700$ ในรูปที่ 22 ทั้งสองรูปแสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องกัน ผลต่างของค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 2.1389% และ 1.8485% สำหรับ $Re = 400$ และ 700 ตามลำดับ



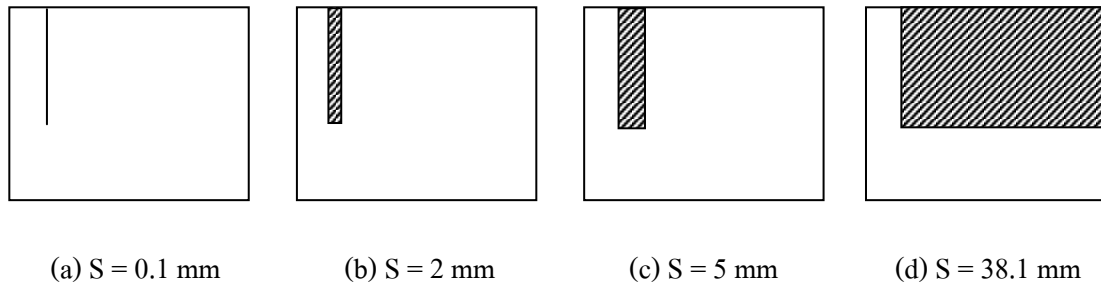
รูปที่ 21 การเปรียบเทียบความเร็วไร้หน่วยที่แกนสมมาตรกับผลการทดลองของ Bergthorson และคณะ [15] ที่ $Re = 400$



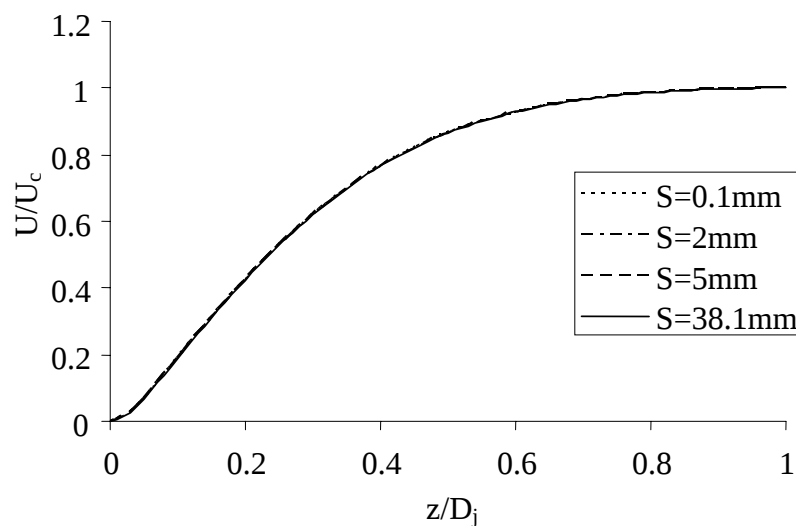
รูปที่ 22 การเปรียบเทียบความเร็วไร้หน่วยที่แกนสมมาตรกับผลการทดลองของ Bergthorson และคณะ [15] ที่ $Re = 700$

ในขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นการหาความหนาที่เหมาะสมของผนังหัวฉีด ซึ่ง Bergthorson และคณะ [15] ไม่ได้กำหนดไว้ รูปที่ 23 แสดงหัวฉีดที่มีความหนาดังแต่ 0.1 ถึง 38.1 mm รูปที่ 23(a) แสดงความหนา 0.1 mm ซึ่งหมายถึงกรณีของการไม่จำกัดการไหล (Unconfined) และรูปที่ 23(d)

เป็นหัวฉีดที่มีความหนา 38.1 mm ซึ่งให้ลักษณะการไหลเป็นแบบจำกัด (Confined) ความเร็วไร้หน่วยที่เส้นสมมาตรของกรณี $l/D_j = 2$ และ $Re = 400$ แสดงในรูปที่ 24 สังเกตได้ว่า ไม่มีความแตกต่างกันมากนัก ตารางที่ 5 แสดงผลต่างของความเร็วเฉลี่ยตามแกนเปรียบเทียบกับกรณีของ $S = 0.1$ mm ดังนั้นในที่นี้เราเลือกกรณีของ $S = 0.1$ mm ในการเปรียบเทียบกับกรณีทดลอง



รูปที่ 23 ผนังของหัวฉีดที่มีความหนาต่างๆ



รูปที่ 24 ความเร็วที่เส้นศูนย์กลางของทางออกหัวฉีดที่มีความหนาต่างๆ ของหัวฉีดที่ $l/D_j = 2$ และ $Re = 400$.

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบผลของความเร็วที่ทางออกของหัวฉีดวัดที่เส้นสมมาตรสำหรับหัวฉีดที่มีความหนา 0.1 mm

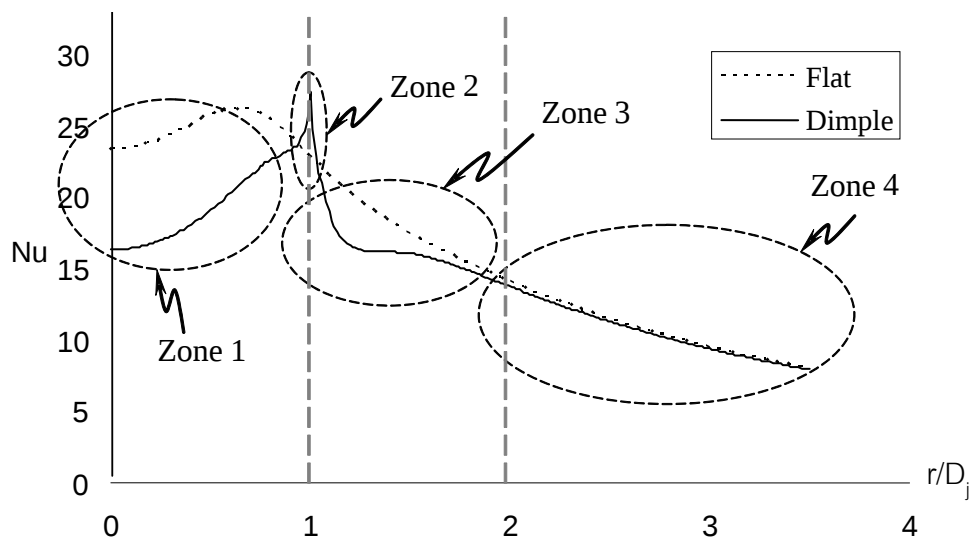
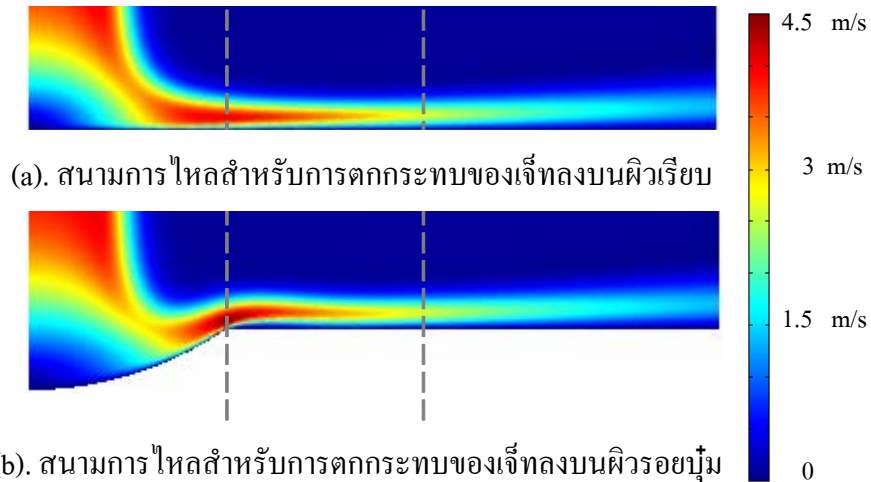
ความหนาของผนังหัวฉีด S (mm)	% ความแตกต่างจากค่าของ $S = 0.1$ mm
2	0.1686
5	0.2237
38.1	0.0915

6. ผลการทดลองและการอภิปรายผล

เนื่องจากข้อมูลจากการทดลองของการกระแทกของเจ็ทแบบราบเรียบลงบนพื้นผิวรอยนูนไม่มี ดังนั้น จึงแสดงผลการคำนวณการตกกระทบลงบนรอยนูนโดยไม่มีผลเปรียบเทียบกับ การทดลอง โดยพิจารณาพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ตัวเลข Reynolds (Re) ระยะจากทางออกของหัวฉีดมายังแผ่นเป้าหมาย (H/D_j) ความลึกของรอยนูน (d/D_d) และอัตราส่วนของเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวฉีดและเส้นผ่าศูนย์กลางตามภาพฉายของรอยนูน (D_j/D_d)

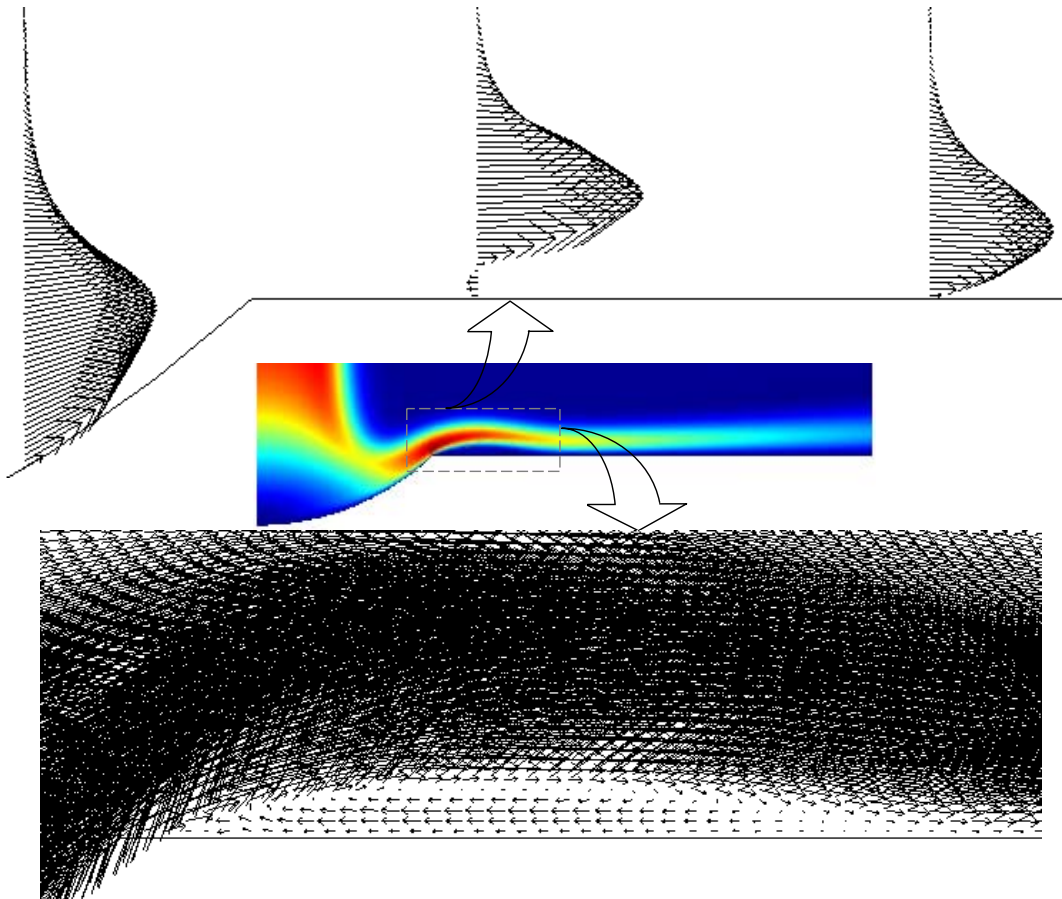
6.1 การเปรียบเทียบผลการถ่ายเทความร้อนกับผลของการตกกระทบลงบนพื้นผิวเรียบ

รูปที่ 25 แสดงการเปรียบเทียบค่าการถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่ของเจ็ทที่ตกกระทบลงบนพื้นผิวรอยนูน ในกรณี $d/D_d = 0.15$ และ $D_j/D_d = 0.5$ กับแผ่นเรียบที่ $Re = 1200$, $H/D_j = 2$ รูปที่ 25(a) และ (b) แสดงสนามการไหลของการตกกระทบบนพื้นผิวเรียบและพื้นผิวรอยนูนตามลำดับ ซึ่งช่วยอธิบายค่าการถ่ายเทความร้อนในรูปที่ 25(c) ดังนี้ บริเวณที่ 1 แสดงการไหลบริเวณตกกระทบบนแผ่นเรียบให้การถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่าการตกกระทบลงบนรอยนูน เนื่องจากรอยนูนเป็นการขุดวัสดุออกไป ดังนั้นเจ็ทจึงต้องเคลื่อนที่ลงมาในระยะทางที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นเรียบ และเจ็ทจึงถ่ายเทโมเมนตัมให้แก่ผิวรอยนูนน้อยกว่า นอกจากนี้จากสนามการไหลแสดงให้เห็นว่า หลังจากตกกระทบบนแล้ว ของไหลจะหนีออกจากรอยนูนไปยังบริเวณที่เรียบที่อยู่ถัดไป ซึ่งเป็นการทำให้เจ็ทสูญเสียโมเมนตัมแทนที่จะให้แก่พื้นผิวอย่างเดียวย รูปที่ 25(b) แสดงบริเวณที่มีความเร็วสูงเกิดขึ้นบริเวณขอบของรอยนูน บริเวณนี้เจ็ทจะถูกยกขึ้นโดยขอบของรอยนูนดังแสดงในบริเวณที่ 3 ทำให้เจ็ทแลกเปลี่ยนโมเมนตัมกับอากาศแวดล้อมมากขึ้นนอกเหนือไปจากกับพื้นผิว ทำให้การถ่ายเทความร้อนลดลงอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นเรียบ ดังแสดงในรูปที่ 25(c) นอกจากนั้น โปรไฟล์ความเร็วในบริเวณที่ 3 ในรูปที่ 26 ยังปรากฏการไหลย้อนกลับ (Back Flow) ใกล้เคียงกับพื้นผิว ทำให้เกิดการแยกตัวของชั้นขอบเขต ในบริเวณที่ 4 ผลของการถ่ายเทความร้อนมีค่าใกล้เคียงกัน รวมไปถึงสนามการไหลก็มีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน ค่าเฉลี่ยของตัวเลข Nusselt สำหรับแผ่นเรียบเป็น 16.6586 ในขณะที่สำหรับผิวรอยนูนมีค่าเท่ากับ 15.4257



(c). การเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่ของการตกกระทบลงบนพื้นผิวรอยนูนกับผิวเรียบ (วงกลมแสดงบริเวณที่สนใจ).

รูปที่ 25 การเปรียบเทียบการตกกระทบลงบนพื้นผิวรอยนูนกับลงบนแผ่นเรียบที่ $Re = 1200$, $H/D_j = 2$ และพื้นผิวรอยนูนที่ $d/D_d = 0.15$ และ $D_j/D_d = 0.5$.

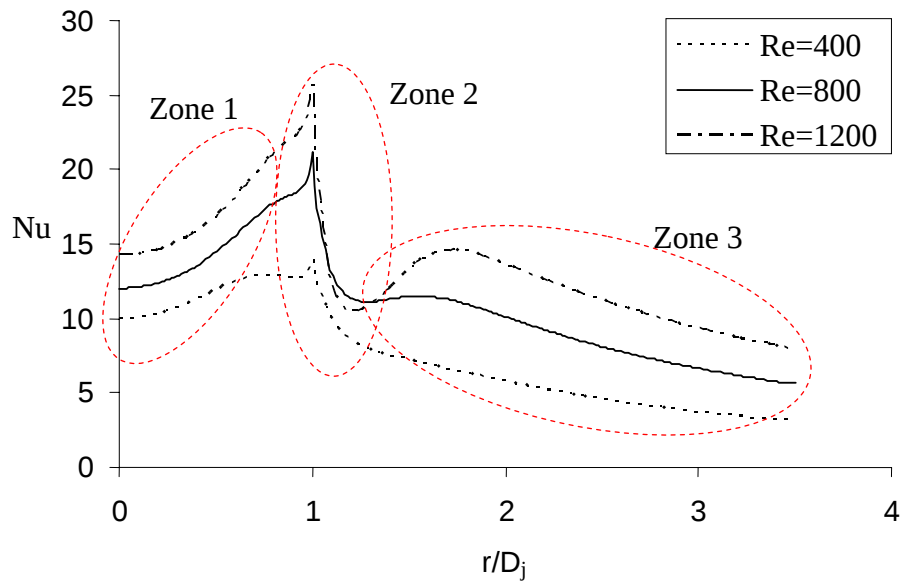


รูปที่ 26 โปรไฟล์ความเร็วในบริเวณของส่วนที่เป็นพื้นเรียบที่ติดกับรอยนูน

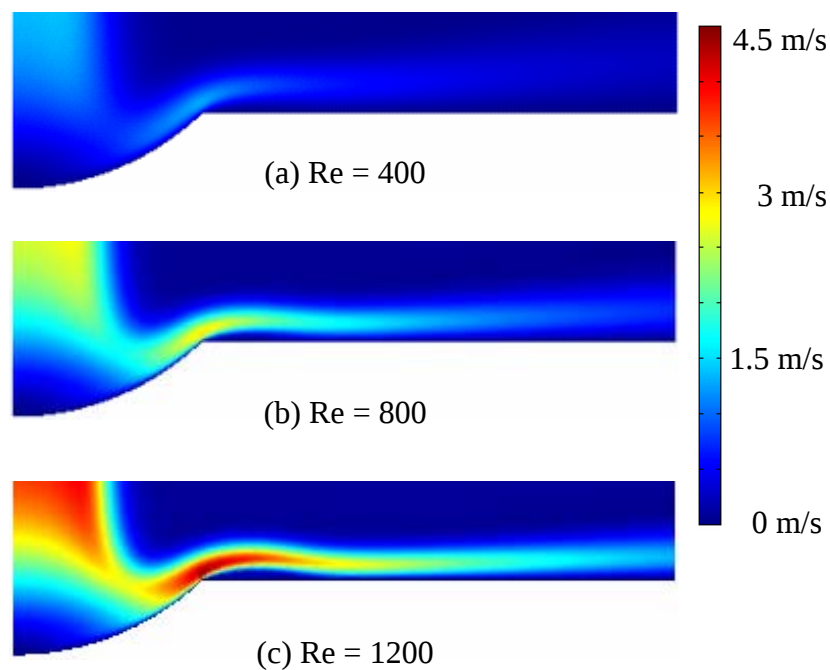
6.2 ผลของ Reynolds number

การเพิ่มตัวเลข Reynolds เป็นการเพิ่มระดับโมเมนตัมของเจ็ต ดังนั้นมันจึงมีผลกระทบอย่างเห็นได้ชัดต่อการถ่ายเทความร้อนของการเจ็ตที่ตกกระทบลงบนพื้นผิวรอยนูน รูปที่ 27 แสดงการถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่สำคัญสำหรับค่าต่างๆ ของ Re ที่ $H/D_j = 2$, $d/D_d = 0.2$ และ $D_j/D_d = 0.5$ ที่ค่า $Re = 1200$ ให้การถ่ายเทความร้อนที่สูงที่สุดในทุกบริเวณ ยกเว้น downstream ของรอยนูนที่เกิดเจ็ตผนัง (Wall Jet) ทั้งนี้เจ็ตที่ $Re = 1200$ นั้นมีโมเมนตัมสูงที่สุด ดังนั้นจึงแลกเปลี่ยนโมเมนตัมกับแผ่นเป้าหมายได้มากที่สุดที่สุดในบริเวณที่ 1 หรือบริเวณตกกระทบนั่นเองดังแสดงในรูปที่ 28 เจ็ตหลังตกกระทบพยายามหนีออกจากรอยนูนไปยังบริเวณที่ 2 ซึ่งครอบคลุมขอบของรอยนูนด้วย ในบริเวณนี้เจ็ตผนังจะถูกยกขึ้นเนื่องมาจากความโค้งของรอยนูน ทำให้กราฟของการถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่กระโดดขึ้นสู่จุดยอดสำหรับทุกกรณี นอกจากนั้น เจ็ตที่ถูกยกขึ้นนี้ยังถ่ายเทโมเมนตัมให้แก่อากาศแวดล้อมนอกเหนือไปจากพื้นผิวเป้าหมาย ด้วยเหตุนี้เองจึงทำให้การถ่ายเทความร้อนลดลงอย่างฉับพลัน รูปที่ 29 แสดงโปรไฟล์ความเร็วบนผิวเรียบที่อยู่ติดกับรอยนูน พบการไหลย้อนกลับ (Back Flow) ในกรณีของ $Re = 800$ และ 1200 จากนั้น เมื่อของไหลไหลมาสู่บริเวณที่ 3

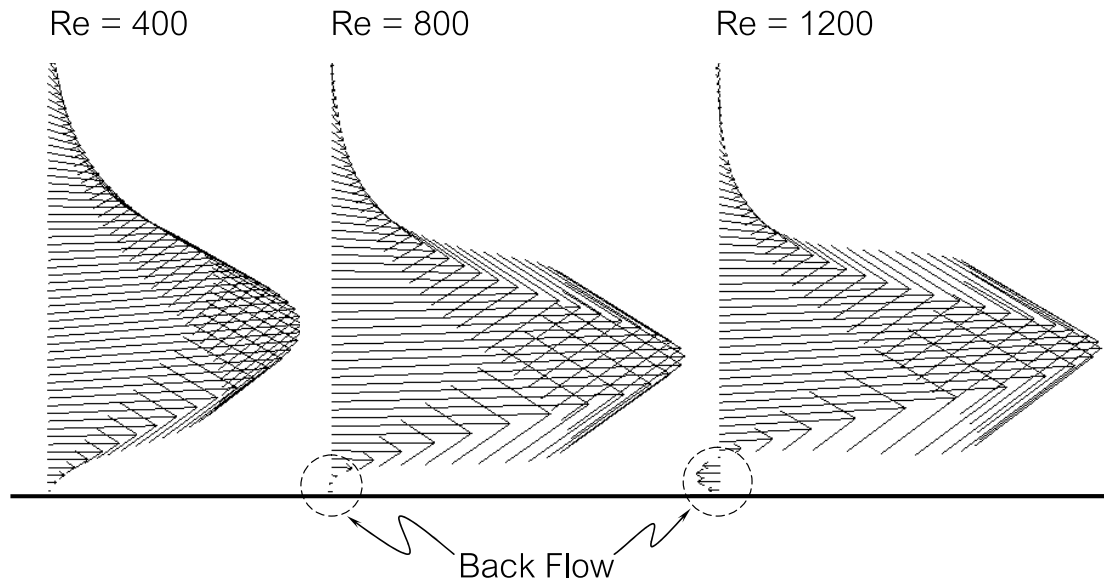
ผลการถ่ายเทความร้อนสำหรับ $Re = 1200$ มีค่ามากที่สุด ตามมาด้วย $Re = 800$ และ 400 ตามลำดับ ในบริเวณดังกล่าวนี้ เจ็ทพ่นได้แตกเปลี่ยนโมเมนตัมที่เหลือนับกับบริเวณผิวเรียบ



รูปที่ 27 การเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่ที่ค่า Reynolds number ต่างๆ สำหรับกรณี $H/D_j = 2$, $d/D_d = 0.2$ and $D_j/D_d = 0.5$.



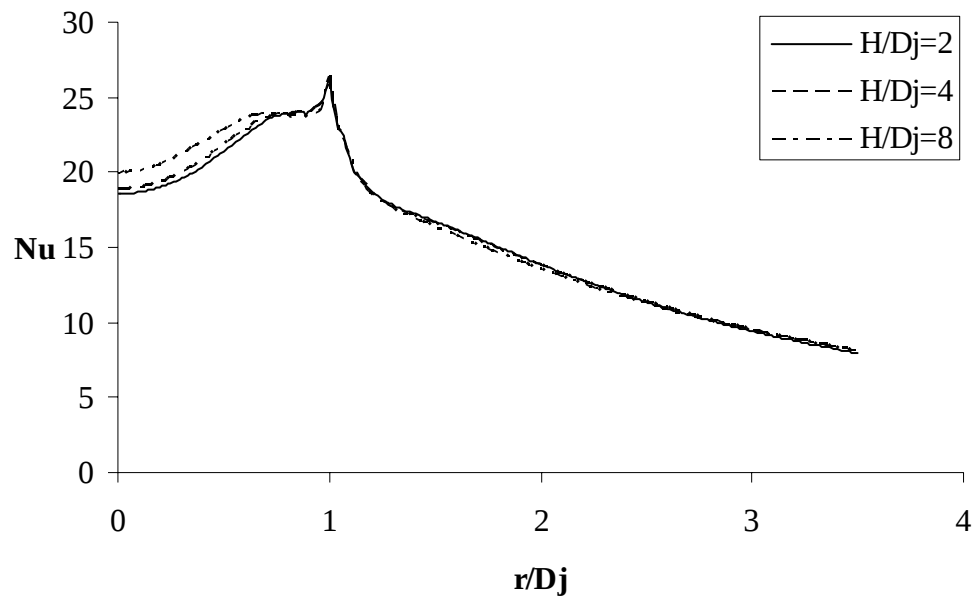
รูปที่ 28 สนามการไหลของการตกกระทบลงบนรอยปุ่มที่ค่า Reynolds number ต่างๆ สำหรับ $H/D_j = 2$, $d/D_d = 0.2$ และ $D_j/D_d = 0.5$



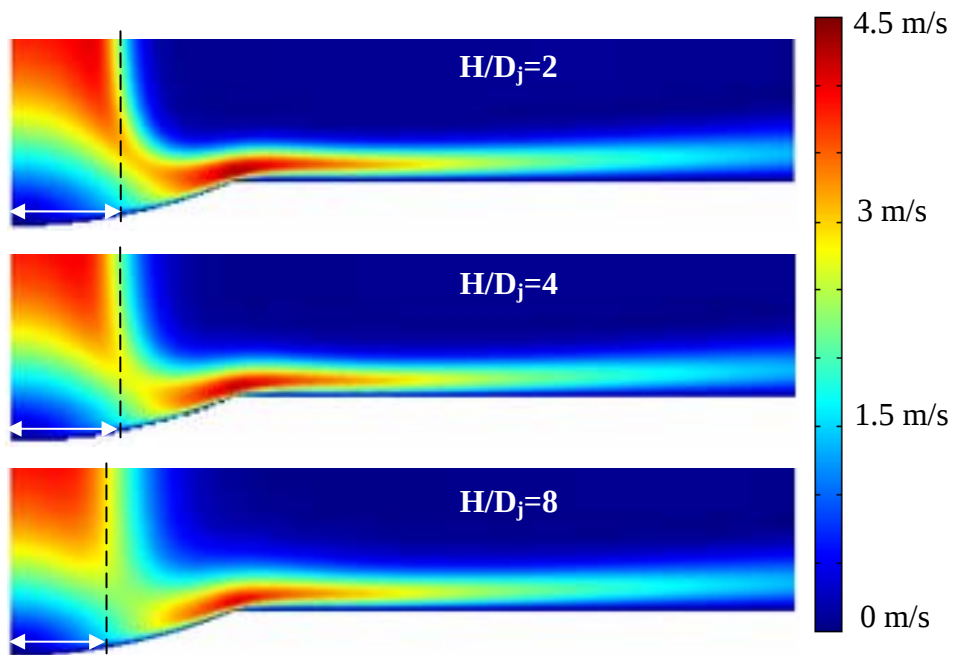
รูปที่ 29 โปรไฟล์ความเร็วสำหรับค่า Reynolds number ต่างๆ

6.3 ผลของระยะระหว่างทางออกของหัวฉีดและพื้นผิวตกกระทบ

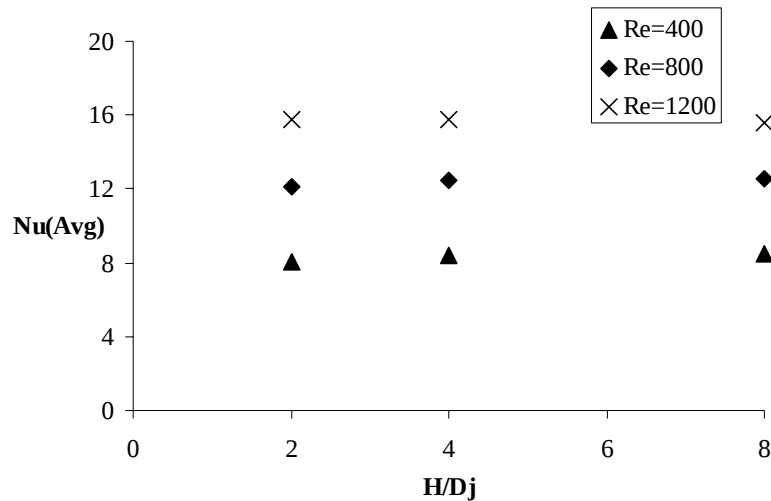
รูปที่ 30 แสดงการกระจายของการถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่สำหรับการตกกระทบของเจ็ทลงบนพื้นผิวรอยบุ๋มที่ $Re = 1200$, $d/D_d = 0.1$ และ $D_j/D_d = 0.5$ ที่ค่า H/D_j ต่างๆ กราฟทั้งหมดเกือบทับกันเป็นเส้นเดียวกัน ยกเว้นบริเวณตกกระทบ โดยที่ $H/D_j = 8$ ให้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่า $H/D_j = 2$ และ 4 เล็กน้อย เมื่อสังเกตสนามการไหลในรูปที่ 31 พบว่า ความกว้างของบริเวณตกกระทบที่แสดงด้วยสีน้ำเงินหรือบริเวณความเร็วต่ำสำหรับกรณีของ $H/D_j = 8$ นั้นมีค่าน้อยกว่าอีกสองกรณี นอกจากนี้ ความกว้างของเจ็ทที่ตกกระทบลงมาในกรณีนี้ยังมีค่ามากกว่าเล็กน้อย เนื่องจากการบานออกของเจ็ทนั่นเอง เนื่องจากเจ็ทนี้เป็นแบบลามินาร์ ระหว่างทางที่เจ็ทตกลงมานั้น เจ็ทถ่ายเทโมเมนตัมเพียงเล็กน้อยให้แก่อากาศแวดล้อม ในบริเวณของเจ็ทผนัง การกระจาย Nu เฉพาะที่แสดงให้เห็นถึงความใกล้เคียงกันของทั้งสามกรณี และเมื่อหาค่าเฉลี่ยของตัวเลข Nu จะได้ค่าที่ใกล้เคียงกันดังแสดงในรูปที่ 32



รูปที่ 30 ตัวเลข Nusselt เฉพาะที่ที่ค่า H/D_j ต่างๆ สำหรับที่ $Re = 1200$



รูปที่ 31 สนามการไหลที่ค่าต่างๆ ของ H/D_j ที่ $Re = 1200$

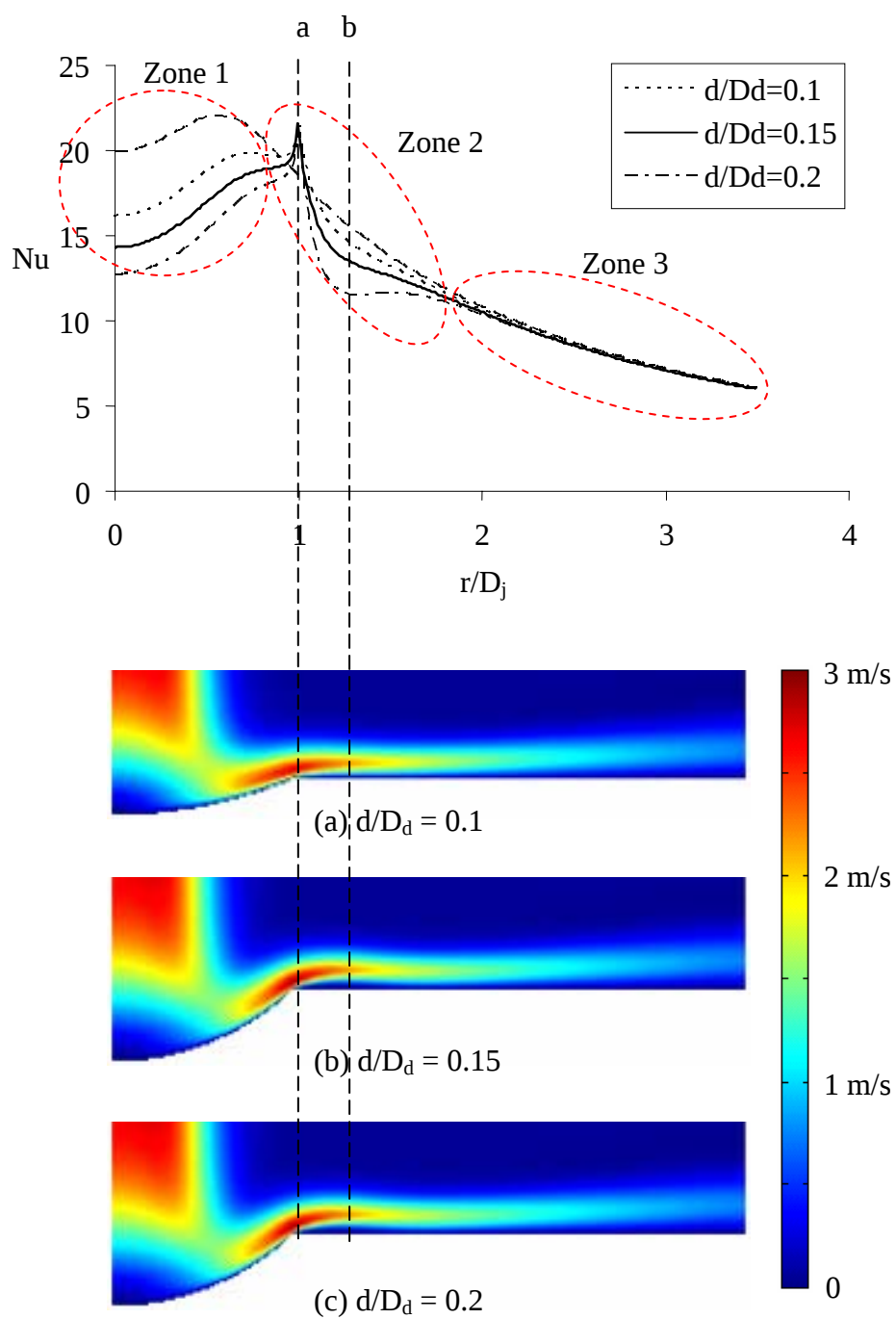


รูปที่ 32 ผลเฉลี่ยของตัวเลข Nusselt ที่ค่า H/D_j และตัวเลข Re ต่างๆ

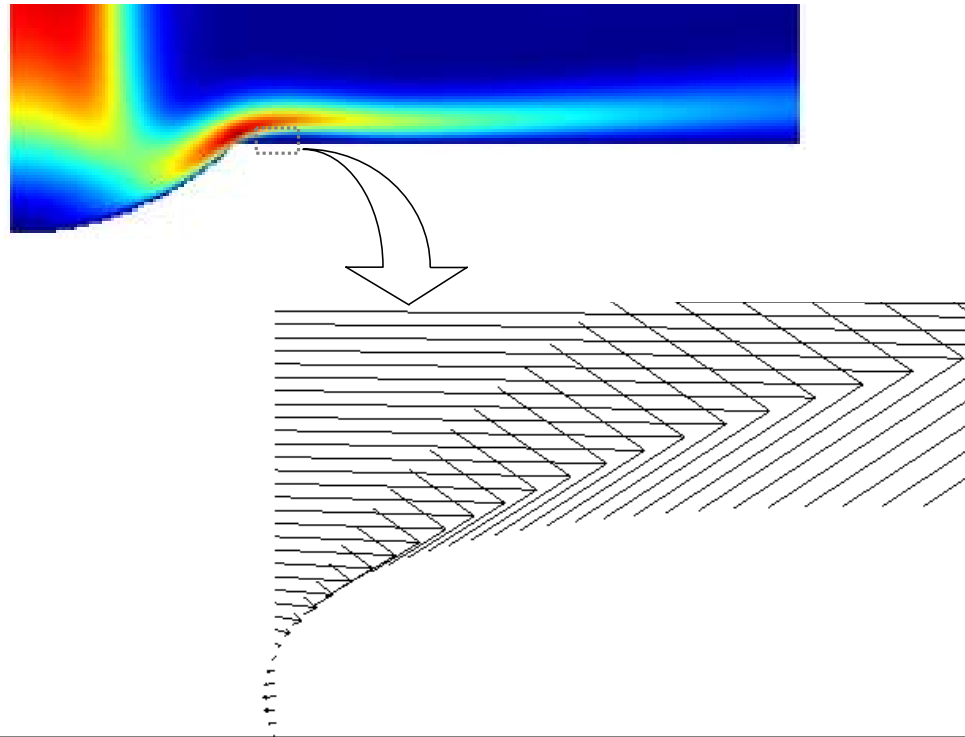
6.4 ผลของความลึกของรอยบ่ม

ความลึกของรอยบ่มส่งผลกระทบต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทที่ตกกระทบบนอย่างเห็นได้ชัด รูปที่ 33 ได้แสดงกราฟของตัวเลข Nu เฉพาะที่สำหรับค่าต่างๆ ของ d/D_d สำหรับ $Re = 1200$, $H/D_j = 4$, $D_j/D_d = 0.5$ ความแตกต่างที่เห็นได้อย่างชัดเจนปรากฏอยู่ในบริเวณตกกระทบ (Zone 1) และบริเวณขอบรอยบ่ม (Zone 2) หลังจากนั้นกราฟก็ทับกับกราฟของแผ่นเรียบ พิจารณาบริเวณตกกระทบ (Zone 1) รอยบ่มที่ลึกที่สุด $d/D_d = 0.2$ ให้การถ่ายเทความร้อนที่ต่ำที่สุด เนื่องจากว่า มันมีพื้นที่สัมผัสมากที่สุดทำให้ได้ฟลักซ์โมเมนตัมน้อยที่สุด ในขณะที่รอยบ่มที่ตื้นขึ้น เช่น $d/D_d = 0.1, 0.15$ ให้การถ่ายเทความร้อนที่สูงกว่า รอยบ่มที่ลึกยังหมายถึงการมีความโค้งสูงเป็นเหตุให้ของไหลไหลออกจากรอยบ่มนั้นได้ยากขึ้นด้วย ทั้งนี้ เราสามารถสังเกตได้จากสนามการไหลในแต่ละกรณี ที่ขอบของรอยบ่ม ตัวเลข Nu เฉพาะที่กระโดดสำหรับทุกค่าของความลึก จากนั้นมันจะลดลงอย่างรวดเร็ว

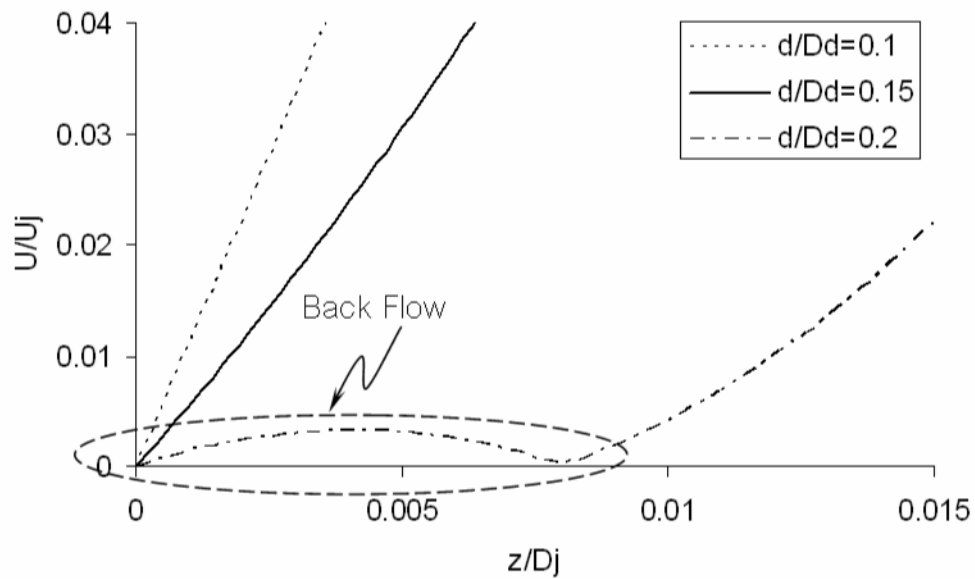
เนื่องจาก $d/D_d = 0.2$ มีความโค้งมากที่สุด เจ็ทผนังจึงถูกยกขึ้นสูงกว่าอีกสองค่าของ d/D_d และพบการไหลย้อนกลับ (Back flow) ดังแสดงในรูปที่ 34 และ 35 ดังนั้นมันจึงให้ค่าการถ่ายเทความร้อนที่ต่ำที่สุดในบริเวณที่ 2 สำหรับบริเวณถัดมานั้น กราฟก็ทับกัน สนามการไหลแสดงให้เห็นว่า ความเร็วในแต่ละค่าความลึกมีค่าใกล้เคียงกัน อาจเป็นเพราะเจ็ทได้สูญเสียโมเมนตัมปริมาณมากขณะตกกระทบและไหลออกจากรอยบ่ม ดังนั้น มันจึงมีโมเมนตัมน้อยลงเมื่อมาถึงบริเวณนี้ ค่าเฉลี่ยของตัวเลข Nu สำหรับแผ่นเรียบเท่ากับ 16.6918 สำหรับแผ่นรอยบ่มที่มี $d/D_d = 0.1, 0.15$ และ 0.2 มีค่าเป็น 15.7449, 14.9703 และ 14.2257 ตามลำดับ



รูปที่ 33 การเปรียบเทียบการถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่และสนามการไหลของการตกกระทบของเจ็ทลงบนพื้นผิวรอยนูนที่มีความลึกต่างๆ และลงบนผิวเรียบที่ $Re = 1200$, $H/D_j = 4$, $D_j/D_d = 0.5$



รูปที่ 34 การไหลย้อนกลับ (Back flow) ที่บริเวณที่ 2 สำหรับรอยปุ่มที่มีความลึก $d/D_d = 0.2$



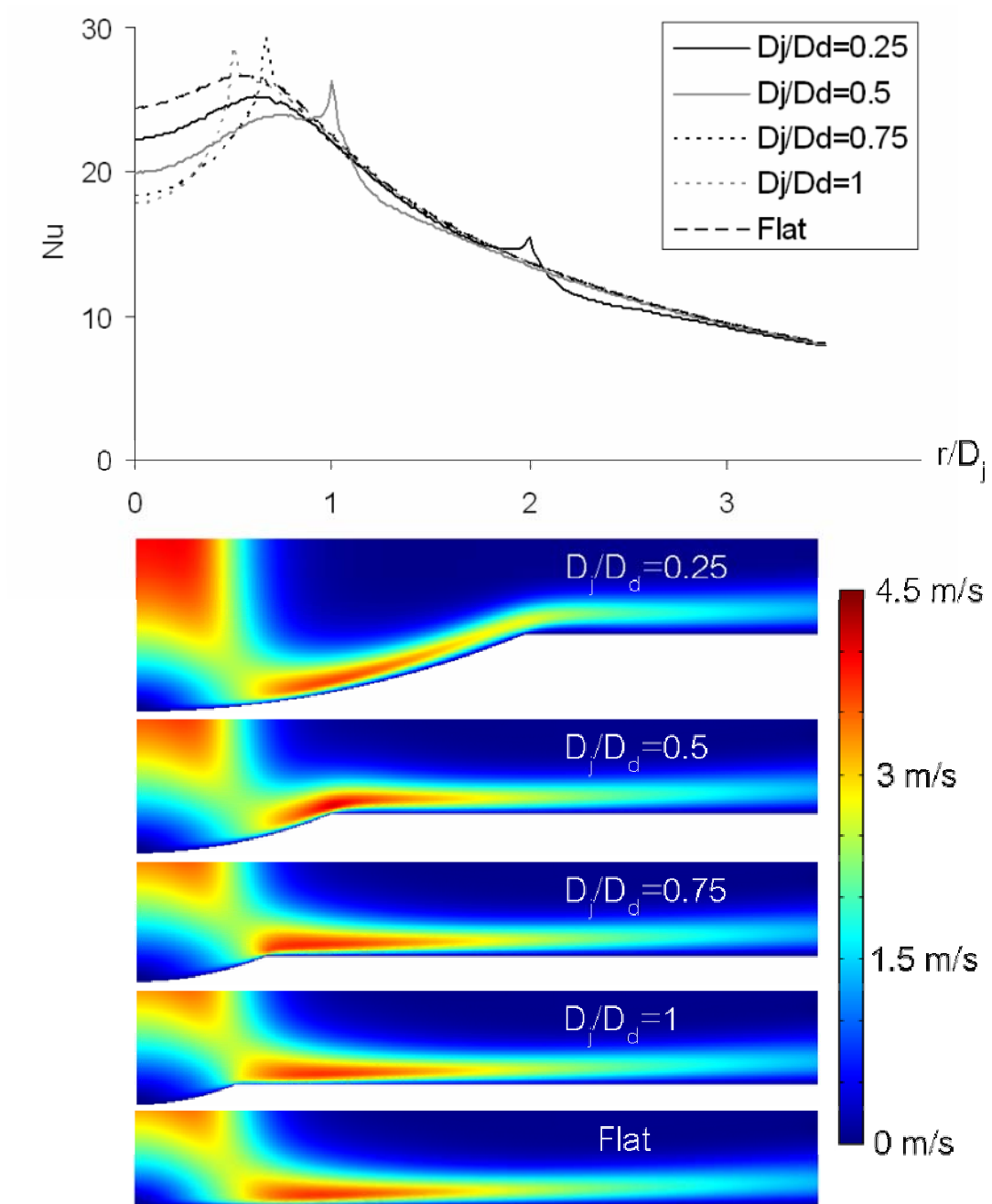
รูปที่ 35 โปรไฟล์ความเร็วไร้หน่วยที่หน้าตัด b ($x/D_j = 1.2$) สำหรับ $Re = 1200$ $H/D_j = 4$ และ $D_j/D_d = 0.5$

6.5 ผลของอัตราส่วนของเส้นผ่าศูนย์กลางหัวฉีดและเส้นผ่าศูนย์กลางตามภาพฉายของ รอยนูน

ในการศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนของเส้นผ่าศูนย์กลางของหัวฉีดต่อเส้นผ่าศูนย์กลางตามภาพฉายของรอยนูน (D_j/D_d) นั้น ในการศึกษาครั้งนี้เรากำหนดให้เส้นผ่าศูนย์กลางของหัวฉีดคงที่เป็น 5 mm แต่จะเปลี่ยนค่าของ D_d เพื่อให้ได้ค่า D_j/D_d เป็น 0.25, 0.5, 0.75 และ 1 D_j/D_d มีผลกระทบต่อการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทตกกระทบ โดยเฉพาะในบริเวณตกกระทบ รูปที่ 36 แสดงการกระจายของตัวเลข Nusselt เฉพาะที่และสนามการไหลสำหรับค่าต่างๆ ของ D_j/D_d ที่ $Re = 1200$, $H/D_j = 8$ และ $d/D_d = 0.1$ พร้อมกับเปรียบเทียบกับผลของแผ่นเรียบ สำหรับทั้ง 4 กรณีของค่า D_j/D_d นั้น เราสามารถแบ่งลักษณะของผลที่ได้ออกเป็น 2 กลุ่มๆ แรกคือ การตกกระทบของเจ็ทเกิดขึ้นภายในรอยนูน ซึ่งให้ผลการถ่ายเทความร้อนคล้ายกับแผ่นเรียบ ยกเว้นบริเวณขอบรอยนูน โดยที่กลุ่มแรกนี้ได้แก่ $D_j/D_d = 0.25$ และ 0.5 กลุ่มที่ 2 คือบริเวณตกกระทบครอบคลุมรอยนูน ได้แก่ $D_j/D_d = 0.75$ และ 1

พิจารณากรณีที่ 1 (ตกกระทบภายในรอยนูน) แม้ว่ารูปร่างของกราฟการถ่ายเทความร้อนเฉพาะที่จะคล้ายคลึงกับแผ่นเรียบ แต่ขนาดของการถ่ายเทความร้อนมีค่าน้อยกว่า ทั้งนี้เนื่องจากรอยนูน $D_j/D_d = 0.25$ และ 0.5 มีพื้นที่สัมผัสของไหลมากกว่าแผ่นเรียบ ดังนั้นฟลักซ์โมเมนตัมของเจ็ทที่ตกกระทบจึงมีค่าน้อยกว่า นอกจากนี้ ความแตกต่างที่เห็นได้ชัดพบที่ตำแหน่งของขอบรอยนูน โดยที่ค่าของ Nu กระโดด เนื่องจากขอบรอยนูนสำหรับค่า $D_j/D_d = 0.5$ ปรากฏขึ้นก่อน $D_j/D_d = 0.25$ การยกตัวของของไหลจึงเกิดขึ้นก่อนในบริเวณความเร็วสูง ก่อให้เกิดการสูญเสียโมเมนตัมสูง ดังแสดงในสนามการไหล สำหรับกรณีของ $D_j/D_d = 0.25$ นั้น ขอบรอยนูนเกิดขึ้นในบริเวณของบริเวณที่มีความเร็วลดลงแล้ว (หรืออีกนัยหนึ่ง บริเวณค่าโมเมนตัมต่ำ) ดังแสดงในบริเวณสีเหลืองในสนามการไหล ดังนั้นจึงสูญเสียโมเมนตัมน้อยกว่ากรณีของ $D_j/D_d = 0.5$

กลุ่มที่ 2 แสดงกรณีของบริเวณตกกระทบครอบคลุมรอยนูนทั้งหมด ซึ่งเกิดขึ้นในกรณีของ $D_j/D_d = 0.75$ และ 1 ดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น การปรากฏของขอบรอยนูนทำให้การถ่ายเทความร้อนลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นเรียบ เนื่องมาจากความโค้งของรอยนูน โดยที่บริเวณที่การถ่ายเทความร้อนลดลงอย่างเห็นได้ชัดปรากฏในบริเวณตกกระทบ จากนั้นหลังจากกราฟการถ่ายเทความร้อนกระโดดที่ขอบรอยนูนแล้ว กราฟส่วนที่เหลือก็เกือบเป็นเส้นเดียวกับของแผ่นเรียบ



รูปที่ 36 การกระจายของตัวเลข Nusselt เฉพาะที่และสนามการไหลที่ค่า D_j/D_d ต่างๆ สำหรับ $Re = 1200$, $H/D_j = 8$ และ $d/D_d = 0.1$.

5. สรุปผลการทดลอง

ในการศึกษานี้เป็นการใช้ซอฟต์แวร์เชิงพาณิชย์ที่มีชื่อว่า COMSOL ซึ่งใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการแก้ปัญหาการถ่ายเทความร้อนและการไหลของเจ็ทแบบราบเรียบสมมาตรตามแกน (Axi-symmetric laminar jet) ตกกระทบบนพื้นผิวรอยนูนและพื้นผิวเรียบ ทั้งนี้งานวิจัยได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ (1) การทดสอบความถูกต้องของโปรแกรม ด้วยการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณของโปรแกรมกับผลการทดลองจากการทบทวนเอกสาร (Validation) และ (2) การศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ต่างๆ ของการตกกระทบบนพื้นผิวรอยนูน

สำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมนั้น เราเปรียบเทียบเฉพาะผลของการตกกระทบบนพื้นผิวเรียบเท่านั้น โดยพิจารณาผลกระทบของความหนาแน่นของกริด และผลของการจำกัดการไหลของหัวฉีดด้วย พบว่า ความหนาแน่นของกริดมิได้ส่งผลกระทบต่อปัญหาการถ่ายเทความร้อนและการไหล อย่างไรก็ตาม เราเลือกค่าความหนาแน่นของกริดที่ช่วยย่นระยะเวลาในการคำนวณและช่วยประหยัดหน่วยความจำ การตรวจสอบการจำกัดการไหลของหัวฉีดนั้นทดสอบด้วยการเปลี่ยนความหนาของหัวฉีดให้มีค่าตั้งแต่บางจนเกือบเป็นเส้นไปจนถึงหนามาก ซึ่งเป็นการลอกเลียนระบบของการตกกระทบบนพื้นผิวที่มีการจำกัดการไหล (Flow Confinement) และพบว่า การจำกัดการไหลไม่มีผลต่อระบบนัก จากการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณกับผลการทดลองจากการทบทวนเอกสารพบว่า ให้ผลที่ใกล้เคียงกัน

สำหรับการตกกระทบบนพื้นผิวรอยนูนนั้น เราได้พิจารณาผลกระทบของพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ตัวเลข Re , ระยะจากทางออกของหัวฉีดมายังพื้นผิวเป้าหมาย (H/D_j) ความลึกของรอยนูน (d/D_j) และอัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางของเจ็ทต่อเส้นผ่านศูนย์กลางตามภาพฉายของรอยนูน (D_j/D_d) สามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. ตัวเลข Re มีผลกระทบอย่างมากต่อการถ่ายเทความร้อนของการตกกระทบบนพื้นผิวรอยนูน เนื่องจากการเพิ่ม Re เป็นการเพิ่มขนาดของโมเมนตัม
2. ระยะจากทางออกของหัวฉีดมายังพื้นผิวเป้าหมาย ไม่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนนัก เนื่องจากเจ็ทแบบราบเรียบที่กำลังจะตกลงมาแลกเปลี่ยนโมเมนตัมปริมาณไม่มากนักกับอากาศแวดล้อมก่อนที่จะตกกระทบบนพื้นผิวเป้าหมาย
3. รอยนูนที่ลึกลดการถ่ายเทความร้อน เนื่องจากรอยนูนดังกล่าวมีความโค้งมาก เช่นเดียวกันกับพื้นที่ผิวสัมผัสที่มาก ทำให้ได้ฟลักซ์โมเมนตัมที่น้อยลง
4. เมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางของเจ็ทต่อเส้นผ่านศูนย์กลางตามภาพฉายของรอยนูนที่มีต่อการถ่ายเทความร้อนแล้วพบว่า เราสามารถแบ่งลักษณะของผลกระทบออกเป็น 2 แบบได้แก่ (1) เจ็ทตกกระทบบนภายในรอยนูน และ (2) เจ็ทตกกระทบบนขอบรอยนูนทั้งหมด แบบแรกให้การกระจายของตัวเลข Nusselt ที่มีรูปร่างคล้ายกันกับของแผ่นเรียบ ยกเว้นบริเวณรอยนูน ซึ่งแสดงการลดลงเล็กน้อยของปริมาณ

การถ่ายเทความร้อน และสำหรับในแบบที่สอง การลดลงอย่างมากของปริมาณการถ่ายเทความร้อนแสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนในบริเวณรอยนูน

สุดท้าย เมื่อเปรียบเทียบผลของการถ่ายเทความร้อนของการกระแทกของเจ็ทลงบนพื้นผิวรอยนูนกับพื้นผิวเรียบพบว่า ปริมาณการถ่ายเทความร้อนลดลงที่บริเวณของรอยนูนและขอบรอยนูน สนามการไหลแสดงให้เห็นว่า ขอบรอยนูนจะยกเจ็ทผนังขึ้น และพบการไหลย้อนกลับหรือการแยกตัวของการไหลในบางกรณีของการตกกระทบบนรอยนูน นอกจากนี้ เนื่องจากรอยนูนมีความโค้งทำให้มีพื้นที่สัมผัสมากกว่าแผ่นเรียบ มันจึงได้รับฟลักซ์โมเมนตัมจากเจ็ทที่ตกลงมาน้อยกว่า

6. บรรณานุกรม

- [1] Kanokjaruvijit, K., Martinez-Botas, R.F., An experimental investigation of the heat transfer due to multiple jets impinging normally on a dimpled surface, J.Mech. Eng. Sc. – Part C, 218 (2004) 1337-1347.
- [2] Kanokjaruvijit, K., Heat transfer investigation of jet impingement coupled with dimples, Ph.D. thesis, Imperial College of Science, Medicine and Technology, University of London, United Kingdom, 2004.
- [3] Bearman, P.W., Harvey, J.K., Golf ball aerodynamics, Aeronaut. Quart. May 1976 112-122.
- [4] Kozlov, A.P., Kesarev, V.S., Convection heat transfer in turbulized flow past a hemispherical cavity. Heat Tran Res. 25(1993) 156-160.
- [5] Moon, H.K., O'Connell, T., Glezer, B., Channel height effect on heat transfer and friction in a dimpled passage, J. Eng. Gas Turb. Power, 122(2000) 307-313.
- [6] Chyu, M.K., Yu, Y., Ding, H., Downs, J.P., Soechting, F.O., Concavity enhanced heat transfer in an internal cooling passage, ASME Turbo Expo'97, Orlando, Florida, USA, 1997, ASME Paper 97-GT-437.
- [7] Bunker, R.S., Gotovskii, M., Belen'kiy, M., Fokin, B., Heat transfer and pressure loss for flows inside converging and diverging channels with surface concavity shape effect, in: Proceedings of the 4th International Conference Compact Heat Exchangers and Enhancement Technology, Crete Island, Greece, 2005.
- [8] Kanokjaruvijit, K., Martinez-Botas, R.F., Jet impingement on a dimpled surface with different crossflow schemes, Int. J. Heat Mass Tran. 48(2004) 161-170.
- [9] Kanokjaruvijit, K., Martinez-Botas, R.F., Parametric effects of heat transfer of impingement on dimpled surface, J. Turbomach. 127(2005) 287-296.

- [10] Kanokjaruvijit, K., Martinez-Botas, R.F., Heat Transfer and pressure investigation of dimple impingement, in: Strazicar, A., Haught, D., Hall, K. (Eds.), Proceedings of GT2005 ASME Turbo Expo'05: Power for Land, Sea and Air, Reno-Tahoe, Nevada, USA, 2005, GT2005-68823.
- [11] Angioletti, M.E., Nino, E., Ruocco, G., CFD turbulent modelling of jet impingement and its validation by particle image velocimetry and mass transfer measurements, Int. J. Ther. Sc. 44 (2005) 349-356.
- [12] Fagan, M.J., Finite element analysis: theory and practice, Prentice Hall, New Jersey, 1992.
- [13] Decha-ampai, P., Finite element method for fluid dynamics (Thai language), Chulabook, Bangkok, Thailand, 2002.
- [14] Chattopadhyay, H., 2004, Numerical investigations of heat transfer from impinging annular jet, Int J Heat and Mass Transfer, Vol.47, pp.3197-3201.
- [15] Bergthorson, J.M., Goodwin, D.G., Dimotakis, P.E., Experiments and modeling of impinging jets and premixed stagnation flame, in: Behnia, M., McBain, G.D., Srinivas, K., Armfield, S.W., Auld, D., Lin, W. (Eds.), Proceedings of 15th Australasian Fluid Mechanics Conference. 2004: the University of Sydney, Sydney, Australia.

Output ที่ได้จากโครงการ

1. การตอบรับการตีพิมพ์ในหัวข้อ “Numerical investigation of an axi-symmetric laminar jet impinging on a uniform heat flux dimpled surface using finite element method” จาก International Journal of Thermal Sciences ภายหลังจากที่แก้ไขต้นฉบับตามข้อกำหนดของผู้พิจารณาบทความ ตามเอกสารที่แนบมาในภาคผนวก
2. เนื่องจากผู้พิจารณาบทความใน Output ที่ 1 ได้เสนอแนะให้ศึกษาการตกกระทบของเจ็ทแบบปั่นป่วน (Turbulent Impinging Jet) ลงบนพื้นผิวรอยนูน โดยใช้โปรแกรม COMSOL เพิ่มเติมต่อจาก Paper ในข้อที่ 1 (ดูข้อเสนอแนะของ Review#3 ในภาคผนวก) ดังนั้น หลังจากปิดโครงการนี้และแก้ไข Paper ในข้อที่ 1 แล้ว ดิฉันใคร่จะศึกษาเพิ่มเติมดังกล่าว และต้อง upgrade หน่วยความจำของคอมพิวเตอร์ที่ใช้อยู่