

การออกแบบหัวฉีดน้ำความดันสูงโดยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ High Speed Water Jet Design by Computational Fluid Dynamics

มงคล แก้วบำรุง^{1*}, ภาณุมาศ อรุณเดชาวัฒน์² และ จิตติวัฒน์ สืบสูงศักดิ์²

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยปทุมธานี อ.เมือง จ.ปทุมธานี 12000

² ภาควิชาวิศวกรรมการบินและอวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน กรุงเทพฯ 10900

*ติดต่อ: E-mail : mongkol.kaewbumrung@gmail.com, โทรศัพท์ 0-2975-6999, โทรสาร 0-2979-6728

บทคัดย่อ

จุดประสงค์ของการศึกษาคือการทำความเข้าใจถึงความสัมพันธ์ของแรงเฉือนที่พื้น (WSS : Wall Shear Stress) และพฤติกรรมการไหลของหัวฉีดน้ำความดันสูงเมื่อมีการปรับเปลี่ยนขนาด ความสูง และมุมเอียง ของท่อฉีด โดยพิจารณาการไหลแบบคงตัวสองมิติไม่อัดตัวที่มีความปั่นป่วนของของไหลแบบหลายสถานะ (Multiphase Turbulence Flow) ด้วยแบบจำลอง $SST k - \omega$ ที่มีการผนวกพจน์ของการคิดแรงเฉือนเข้าไปในสมการความปั่นป่วนให้มีความถูกต้องมากขึ้น ในการศึกษาจะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป ANSYS FLUENT R16.0 ซึ่งใช้วิธีปริมาตรจำกัด (FVM : Finite Volume Method) ในการแก้สมการของการไหล

จากผลการศึกษาพบว่า ความสูงและมุมเอียง มีผลกับการเพิ่มขึ้นของแรงเฉือนที่เกิดขึ้นบนพื้นเมื่อน้ำเข้าปะทะอย่างชัดเจน นอกจากนี้มุมเอียงและขนาดของท่อ มีความสัมพันธ์กับพื้นที่ของแรงเฉือนที่เกิดขึ้นบนพื้น อีกทั้งการศึกษาในอนาคตจะใช้แบบจำลองความปั่นป่วนที่มีความซับซ้อนมากขึ้นเพื่อพิจารณาถึงโครงสร้างของพลศาสตร์การไหลและกลศาสตร์การเกิดแรงเฉือนที่พื้น รวมทั้งคิดผลกระทบจากการอัดตัวได้ของอากาศเนื่องจากน้ำที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง อนึ่งผลจากการศึกษานี้และในอนาคต ถือได้ว่าเป็นการสร้างฐานข้อมูลที่สำคัญในการออกแบบและพัฒนาเครื่องจักรกลหรืออุปกรณ์ที่ต้องใช้ประโยชน์จากแรงเฉือนที่พื้นโดยใช้หลักการเรื่องการเปลี่ยนแปลงพลังงานจากน้ำความดันสูง ดังนั้นการศึกษานี้จึงเป็นกิจกรรมที่มีความสำคัญในวงจรชีวิตของการพัฒนาผลิตภัณฑ์

คำหลัก: แรงเฉือนที่พื้น , ความปั่นป่วนของของไหลแบบหลายสถานะ, วิธีปริมาตรจำกัด

Abstract

The aim of this study is to investigate relationships between a Wall Shear Stress (WSS) and a flow field of high speed water jet, while the nozzle dimension, inlet pressure, its height from surface and inclined angle are the observed variables. The fluid is considered as two-dimensional multiphase turbulence incompressible flow at a steady state condition. The $SST k - \omega$ model embedded with the concerned of wall shear stress is applied in order to enhance the accuracy of the turbulence model. The commercial software ANSYS FLUENT R16.0 is a major tool applied in this study.

The computational results precisely suggest that the height of nozzle and the nozzle angle from surface are effect to wall shear stress while the nozzle angle and size have the relation with the wall shear stress area on the wall. In the future, the air surround the high speed water jet will be assigned to behave as compressible and the more comprehensive turbulence model will be applied, both of which are the conjuncture of the next study. The results of this study and the near future will complete the database which is useful for developing

CST-16

equipment or machines required WSS. As a result, this study is the crucial activity in a product development life cycle.

Keywords: Wall Shear Stress, Multiphase Turbulence Flow, Finite Volume Method

1. บทนำ

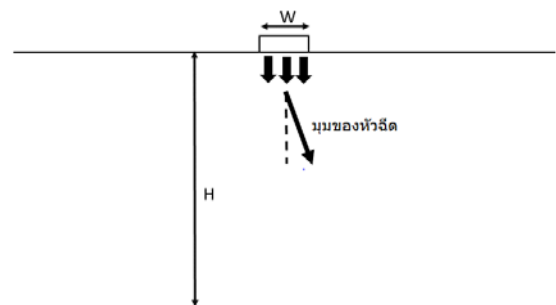
การใช้น้ำแรงดันสูงมาประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมในปัจจุบันมีการใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งอุตสาหกรรมการตัด การขึ้นรูปหรือแม้แต่การทำความสะอาดชิ้นงานขนาดเล็กไปจนถึงขนาดใหญ่ ซึ่งทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความแรงของน้ำที่จะนำไปใช้ให้เหมาะสมกับงาน [1] อย่างไรก็ตาม การศึกษาที่ผ่านมาพบว่า ประสิทธิภาพของการนำประโยชน์จากแรงดันน้ำไปใช้งานนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ขนาดของท่อฉีด ความดัน ความเร็วสำหรับการเคลื่อนที่ของหัวฉีด เป็นต้น เพื่อเพิ่มความเข้าใจของพฤติกรรมกระไหลที่เกิดขึ้น

จากการศึกษาพฤติกรรมของการไหลในน้ำแรงดันสูงด้วยพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดลองพบว่าการศึกษาการไหลของน้ำแรงดันสูงจะไม่สามารถพิจารณาเป็นการไหลของสารชนิดเดียวได้หากการเคลื่อนที่ของน้ำแรงดันสูงฉีดออกมาสัมผัสกับอากาศ ซึ่งการศึกษาของการไหลดังกล่าวต้องพิจารณาการไหลที่ประกอบไปด้วยปฏิสัมพันธ์กันระหว่างของไหลสองชนิดคือน้ำแรงดันสูงและอากาศ [3,7] และเพื่อเพิ่มความถูกต้องและแม่นยำการศึกษาสมการความปั่นป่วนที่เหมาะสมสำหรับทำนายคุณสมบัติของการถ่ายเทความร้อนและแรงที่เกิดขึ้นที่ผิวโดยเทียบผลที่ได้จากพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเปรียบเทียบกับผลการทดลองพบว่าสมการความปั่นป่วนแบบ $SST k-\omega$ ให้ผลที่สอดคล้องกับการทดลองมากที่สุด [2,9,10] ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของงานวิจัยฉบับอื่นๆ [6,11] นอกจากนี้จากการศึกษาเพิ่มเติม เพื่อหาข้อมูลและคุณสมบัติของระบบสำหรับการออกแบบกระบวนการทำความสะอาดโดยพิจารณาค่า Wall Shear Stress พบว่าบริเวณที่เกิดการหมุนวนของกระแสของไหลมีผลให้ค่า Wall Shear Stress ลดลงเนื่องจากเป็นบริเวณความดันต่ำแต่จะมีค่าเพิ่มขึ้นเพิ่มเมื่ออัตราการไหล [5] และนอกจากนี้ความเร็วของของไหลที่มีความเร็วสูงจะทำให้การถ่ายเทมวลแบบปฏิกิริยาทางเคมีจะดีขึ้นภายในบริเวณที่มีค่า Wall Shear Stress สูง [4]

สำหรับในการศึกษาครั้งนี้จะมุ่งศึกษาถึงผลกระทบจากการปรับเปลี่ยนขนาด ความสูง และมุมเอียง ของท่อฉีดน้ำแรงดันสูง ซึ่งตัวแปรดังกล่าวเป็นตัวแปรที่สำคัญในการพิจารณาเลือกเครื่องฉีดและในบางครั้งเป็นการกำหนดหรือความต้องการของผู้ใช้ที่ต้องการเครื่องฉีดน้ำแรงดันสูง ซึ่งค่าประสิทธิภาพของการฉีดในที่นี้พิจารณาจากค่า Wall Shear Stress เพื่อนำไปประกอบการพิจารณาและเลือกอุปกรณ์มาใช้งานได้อย่างถูกต้องเหมาะสม

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในการศึกษาครั้งนี้จะพิจารณาเป็นแบบสองมิติในระบบแกน x-y ที่ความดันบรรยากาศปกติมีของไหลในระบบสองชนิดคือน้ำและอากาศ โดยรูปที่ 1 แสดงตัวแปรที่สนใจในการศึกษาครั้งนี้



รูปที่ 1 แผนภาพการฉีดน้ำแรงดันสูง

โดยความสูงระหว่างท่อน้ำแรงดันสูงกับพื้น (H) มีค่า 5.0 – 40.0 เซนติเมตร, ขนาดของท่อน้ำแรงดันสูง (W) ที่สนใจมีค่าอยู่ระหว่าง 0.5 – 2.5 เซนติเมตร, มุมของท่อน้ำแรงดันสูง มีค่าอยู่ระหว่าง 0 – 35 องศาและความดันเครื่องฉีดที่เลือกมาศึกษาสามารถทำได้ที่ $1 \times 10^7 \text{ Pa}$ ตามลำดับซึ่งค่าตัวแปรต่างๆเหล่านี้เป็นค่าที่ผู้ผลิตสามารถสร้างขึ้นมาได้จริงอีกทั้งยังเป็นข้อกำหนดสำหรับการออกแบบหัวฉีดน้ำแรงดันสูงและในการจำลองดังกล่าวสมมุติให้การไหลเป็นแบบไม่ขึ้นอยู่กับ, ของไหลทั้งน้ำและอากาศไม่สามารถอัดตัวได้ และ ไม่คิดผลเนื่องจากความร้อน

CST-16

3. ระเบียบวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

ในการศึกษานี้เป็นการศึกษาแบบสารหลายชนิด (Multiphase) ประกอบไปด้วยน้ำและอากาศ ซึ่งสมการควบคุมต่างๆที่ใช้อยู่ภายใต้ทฤษฎี Mixture Model ของโปรแกรมสำเร็จรูป ANSYS FLUENT R16.0 ซึ่งใช้วิธีปริมาตรจำกัด โดยแบ่งสถานะของของไหลออกเป็นสองชนิดคือของเหลว (น้ำ) และก๊าซ (อากาศ) โดยจำนวนกริดที่เลือกใช้เป็นแบบสี่เหลี่ยมที่มีการกระจายตัวไม่เท่ากัน ทั้งนี้การกระจายตัวของกริดที่ใช้จะเน้นทำกริดขนาดเล็กที่บริเวณที่มีความเร็วสูงเพื่อให้สามารถคำนวณความถูกต้องของความเร็วและความดันได้ดียิ่งขึ้นดังรูปที่ 2 ซึ่งหลังจากทดสอบการเปลี่ยนแปลงของคำตอบกับจำนวนกริด (Mesh Independent) พบว่า ที่จำนวนกริด 77,792 กริด ให้คำตอบที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามขนาดและจำนวนของกริด สำหรับการแก้สมการพีชคณิตได้ใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่เหมาะสมดังนี้

Pressure-Velocity Coupling : Coupled

Special Discretization

Gradient : Green-Gauss Cell Based

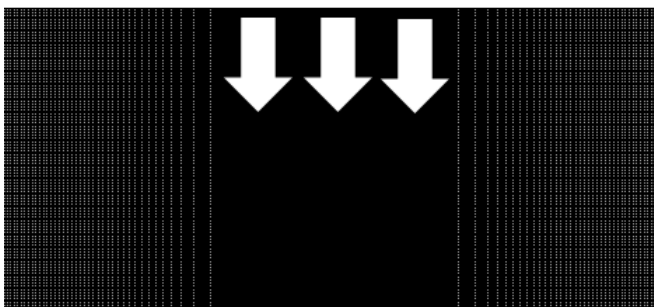
Pressure : PRESTO!

Momentum : First Order Upwind

Volume Fraction : First Order Upwind

Turbulent-k : First Order Upwind

Turbulent- ω : Second Order Upwind



รูปที่ 2 กริดที่ใช้สำหรับการคำนวณ

3.1 สมการความต่อเนื่อง [8]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m) = 0 \quad (1)$$

โดย

$$\vec{v}_m = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_k}{\rho_m}$$

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k$$

เมื่อ $\vec{v}_m$ คือ ความเร็วของมวลเฉลี่ย

ρ_m คือ ความหนาแน่นผสม

α_k คือ อัตราส่วนของสารแต่ละชนิด

3.2 สมการโมเมนตัม [8]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \vec{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \vec{v}_m) = -\nabla p + \nabla \cdot (A) + \nabla \cdot (B) \quad (2)$$

เมื่อ $A = \mu_m (\nabla \vec{v}_m + \nabla \vec{v}_m^T)$

$$B = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_{dr,k} \vec{v}_{dr,k}$$

โดย μ_m คือ ความหนืดผสม

$\vec{v}_{dr,k}$ คือ ความเร็วของการไถลระหว่างสสาร

สามารถหาได้จาก $\vec{v}_k - \vec{v}_m$

3.3 สมการความปั่นป่วน [8]

ด้วยความสามารถของ Mixture Model จำทำการแก้สมการโดยรวมของความปั่นป่วน ซึ่งในที่นี้ใช้สมการความปั่นป่วนแบบ $SST k - \omega$ หลังจากนั้นก็นำไปคำนวณหาค่าเฉลี่ยของตัวแปรต่างๆอีกครั้งด้วยสมการ Volume Fraction

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_p \rho_p) + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{v}_p) = -\nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{v}_{dr,p}) + \sum_{q=1}^n (\dot{m}_{qp} - \dot{m}_{pq}) \quad (3)$$

3.4 สมการของ Wall Shear Stress

ค่า Wall Shear Stress เป็นค่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้นที่ผิวมีลักษณะคล้ายคลึงกับแรงเสียดทานมีหน่วยเป็น Pa [4] สามารถเขียนสมการได้เป็น

$$\tau_w = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_{y=0} \quad (4)$$

เมื่อ μ คือ ความหนืดจลน์

u คือ ความเร็วของของไหลที่ขนานไปกับพื้น

y คือ ระยะความสูงจากพื้น

CST-16

4. ผลการจำลอง

สำหรับการศึกษานี้จะมุ่งเน้นพิจารณาค่าของ Wall Shear Stress ที่เกิดขึ้นภายใต้การเปลี่ยนแปลงตัวแปร ความสูงระหว่างท่อน้ำแรงดันสูงกับพื้น, ขนาดของท่อน้ำแรงดันสูง และ มุมของท่อน้ำแรงดันสูง ได้ผลการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณดังนี้

4.1 ผลของการเปลี่ยนแปลงความสูงระหว่างท่อน้ำแรงดันสูงกับพื้น

สำหรับการเปลี่ยนแปลงความสูงระหว่างท่อน้ำแรงดันสูงกับพื้นโดยเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 5.0 – 40.0 เซนติเมตร , ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อน้ำแรงดันสูงมีค่าคงที่ คือ 1.0 เซนติเมตร และค่าความดันน้ำที่ปากท่อมมีค่าคงที่เท่ากับ $1 \times 10^7 \text{ Pa}$ ผลจากการศึกษาแสดงดังรูป 3 พบว่า การเปลี่ยนแปลงความสูงระหว่างท่อน้ำแรงดันสูงกับพื้นนั้นมีความสัมพันธ์ที่ลดลงของค่า Wall Shear Stress ทั้งนี้เนื่องมาจากความดันที่ออกมาจากปลายท่อน้ำแรงดันสูงยังคงมีโมเมนตัมเพียงพอที่จะเคลื่อนที่ไปยังพื้นโดยไม่เกิดการสูญเสียโมเมนตัมมากนักส่งผลต่อความเร็วที่เข้าปะทะพื้น ดังนั้นผลที่ได้ดังกล่าวสามารถนำไปพิจารณาถึงช่วงของความสูงของหัวฉีดที่เหมาะสมกับการออกแบบบรรจิดน้ำแรงดันสูงเพื่อให้รถมีขนาดกะทัดรัดและง่ายต่อการใช้งานภายใต้การทำความสะอาดที่มีประสิทธิภาพสูงตามหลักวิศวกรรม

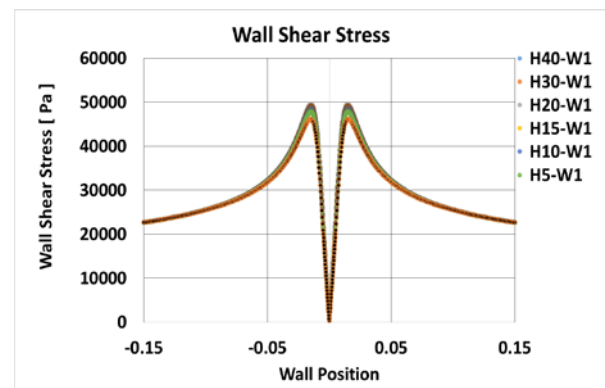
4.2 ผลของการเปลี่ยนแปลงขนาดของท่อน้ำแรงดันสูง

สำหรับการเปลี่ยนแปลงขนาดของท่อน้ำแรงดันสูงโดยเปลี่ยนแปลงค่าอยู่ระหว่าง 0.5 – 2.5 เซนติเมตร, ความสูงของปากท่อน้ำแรงดันสูงที่ต้องการออกแบบอยู่ห่างจากพื้น 15 เซนติเมตร และความดันของน้ำที่ปากท่อมมีค่าคงที่เท่ากับ $1 \times 10^7 \text{ Pa}$ จากรูปที่ 4 พบว่า เมื่อขนาดของท่อน้ำแรงดันสูงมีขนาดเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าของ Wall Shear Stress มีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดทั้งนี้เนื่องจากเมื่อมีการเพิ่มขนาดท่อแต่ยังคงใช้ความดันเท่าเดิมที่ในท่อส่งผลให้พลังงานหรือโมเมนตัมของน้ำมีค่าลดลงเมื่อออกจากปากท่อมก่อนที่จะวิ่งไปชนกับพื้น แต่ในทางกลับกันขนาดของพื้นที่ที่ให้ค่าสูงสุดของ Wall Shear Stress ในแต่ละขนาดของท่อน้ำแรงดันสูงนั้นมีขนาดกว้างขึ้นตามขนาดของท่อน้ำแรงดันสูง ซึ่งจากผล

ดังกล่าวสามารถนำไปคำนวณหาพื้นที่ทั้งหมดของการทำความสะอาดได้ในการออกแบบบรรจิดน้ำแรงดันสูง

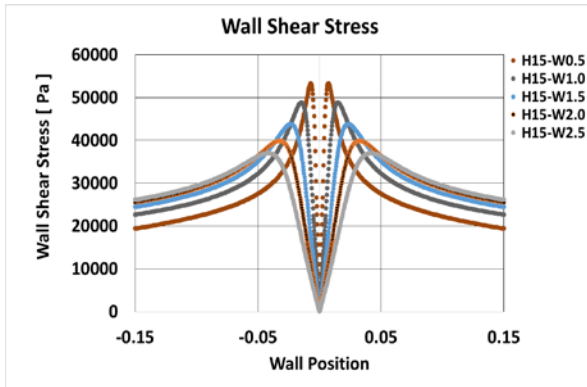
4.3 ผลของการเปลี่ยนแปลงมุมของท่อน้ำแรงดันสูง

สำหรับการเปลี่ยนแปลงมุมของท่อน้ำแรงดันสูงโดยค่าของมุมดังกล่าวเปลี่ยนแปลงอยู่ระหว่าง 0.0 – 35.0 องศา , ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อน้ำแรงดันสูงมีค่าคงที่ คือ 1.0 เซนติเมตร, ปากท่อยู่อสูงจากพื้น 15.0 เซนติเมตร และค่าความดันน้ำที่ปากท่อมมีค่าคงที่เท่ากับ $1 \times 10^7 \text{ Pa}$ ผลจากการศึกษาแสดงดังรูปที่ 5 พบว่าการเปลี่ยนแปลงมุมการฉีดของท่อน้ำแรงดันสูงมีผลการต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า Wall Shear Stress ในลักษณะที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัด โดยค่า Wall Shear Stress จะมีค่าสูงสุดเมื่อมุมฉีดเท่ากับศูนย์องศา แต่อย่างไรก็ตามที่มุมฉีด 5 องศา ค่าของ Wall Shear Stress มีแนวโน้มที่จะมีค่าสูงกว่ามุมศูนย์องศา ซึ่งเป็นผลมาจากเวกเตอร์ความเร็วที่จากเดิมฉีดแบบตรงๆจะมีเพียงเวกเตอร์ความเร็วของน้ำในแกน y เท่านั้น แต่เมื่อมีการฉีดน้ำในมุมเฉียงๆ เวกเตอร์ความเร็วของน้ำจะแยกเป็นสองแนวแกนคือ แกน x และ แกน y ส่งผลให้ความเร็วที่เข้าปะทะกับพื้นมีค่าลดลง ซึ่งพฤติกรรมดังกล่าวยังคงต้องการศึกษาถึงคุณสมบัติการไหลในเชิงลึกและค่ามุมวิกฤตที่จะทำให้ค่า Wall Shear Stress มีค่าสูงกว่ามุมฉีดแบบตั้งฉาก อย่างไรก็ตาม จากข้อมูลดังกล่าวผู้ออกแบบบรรจิดน้ำแรงดันสูงสามารถนำข้อมูลดังกล่าวไปประกอบการพิจารณาถึงการวางแนวท่อฉีดและประเมินค่าของประสิทธิภาพการฉีดหากรถมีการเคลื่อนที่บนพื้นผิวขรุขระ เป็นต้น

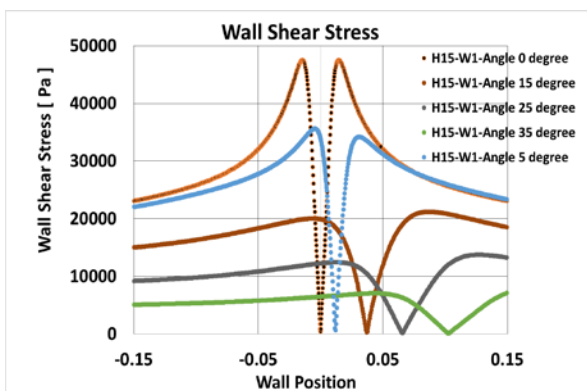


รูปที่ 3 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Wall Shear Stress และความสูงระหว่างท่อน้ำแรงดันสูงกับพื้น

CST-16



รูปที่ 4 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Wall Shear Stress และขนาดท่อน้ำแรงดันสูง



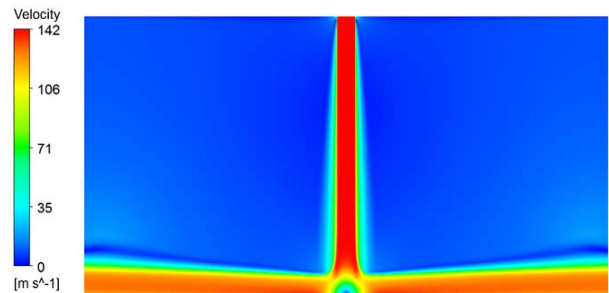
รูปที่ 5 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Wall Shear Stress และมุมของท่อน้ำแรงดันสูง

4.4 ลักษณะการไหลที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงตัวแปรที่สนใจ

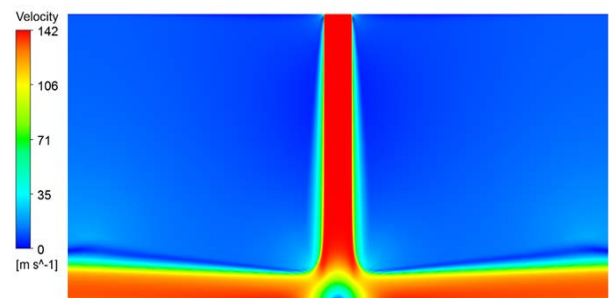
จากรูปที่ 6 แสดงความเร็วของน้ำที่ฉีดออกมาจากซึ่งพบว่าความเร็วของน้ำสูงสุดอยู่ที่ 142 เมตรต่อวินาที โดยขณะที่น้ำฉีดออกมาในอากาศนั้นจะเกิดการกระจายตัวกว้างขึ้นเล็กน้อยก่อนจะพุ่งเข้าปะทะกับพื้นและแยกการไหลออกเป็นสองด้านซึ่งการพุ่งมาชนพื้นด้วยความเร็วสูงดังกล่าวจะเกิดจุดอับของการไหล (Stagnation point) ซึ่ง ณ จุดนี้จะมีค่าความดันสูงแต่ความเร็วเป็นศูนย์ ส่งผลให้ที่บริเวณดังกล่าวมีค่า Wall Shear Stress เป็นศูนย์และบริเวณที่ของของจุดอับของการไหลจะเป็นบริเวณที่เกิดค่า Wall Shear Stress สูงสุด

นอกจากนี้หากเพิ่มขนาดของท่อน้ำแรงดันสูงตามรูปที่ 7 พฤติกรรมการไหลก็มีความคล้ายคลึงกันเพียงแต่ขนาดของจุดอับของการไหลมีความกว้างเพิ่มขึ้นตามขนาดของท่อ แต่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมุมของการฉีดน้ำพบว่าขนาดของลำน้ำแรงดันสูงมีการขยายขนาดกว้างขึ้น

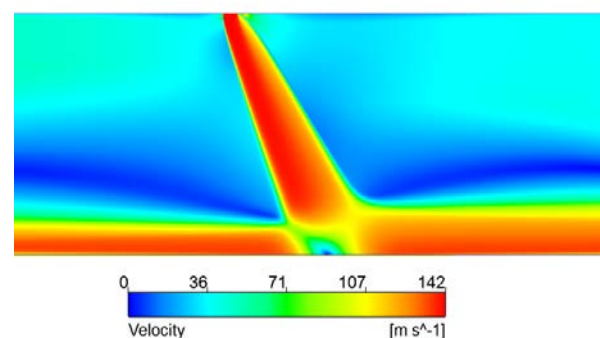
เมื่อเคลื่อนที่ห่างออกไปจากปากท่อและเข้าปะทะพื้นในแนวเฉียง ซึ่งส่งผลให้ความเร็วไม่สมมาตรกันระหว่างด้านซ้ายและขวาของจุดศูนย์กลางท่อ ส่งผลให้ค่า Wall Shear Stress ทั้งสองฝั่งไม่เท่ากัน ซึ่งสอดคล้องกับรูปที่ 8



รูปที่ 6 ความเร็วของลำน้ำ ที่ H = 15.0 เซนติเมตร , W = 0.5 เซนติเมตร



รูปที่ 7 ความเร็วของลำน้ำ ที่ H = 15.0 เซนติเมตร , W = 1.5 เซนติเมตร



รูปที่ 8 ความเร็วของลำน้ำ ที่ H = 15.0 เซนติเมตร , W = 0.5 เซนติเมตร , มุมของท่อน้ำแรงดันสูง 25 องศา

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้ทำวิจัยขอขอบพระคุณ บริษัท พันธ์ อินโนเวชัน จำกัด ที่ให้คำปรึกษาในการออกแบบและเอื้อเฟื้อข้อมูลในการทำวิจัย

CST-16

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Annoni M., Arleo F., and Malmassari C., 2014. CFD aided design and experimental validation of an innovative Air Assisted Pure Water Jet cutting system, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.214, pp.1647-1657.
- [2] Dutta, R., Dewan, D., and Balaji Srinivasan, 2013. Comparison of variations integration to wall (ITW) RANS models for predicting turbulent slot jet impingement heat transfer, *International Journal of Heat and Mass Trasfer*, Vol. 65, pp.750-764.
- [3] Guha D., Barron M.R., and Ram Balachandar, 2015. Numerical simulation of high-speed turbulent water jets in air, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 48, pp.119-124.
- [4] Kristiawan, M., Meslem, A., Nastase I., and Vaclav Sobolik, 2012. Wall shear rate and mass transfer in impinging jets: Comparison of circular convergent and cross-shaped orifice nozzles, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, pp.282-293.
- [5] Lelievre, C., Legentilhomme, P., Gaucher, C., Legrand, J., Faille, Ch., and Thierry Benezech, 2002. Cleaning in place : Effect mof local wall shear stress variation on bacterial removal from stainless steel equibment, *Chemical Engineering Science*, Vol. 57, pp. 1287-1297.
- [6] Meslem, A., Bode F., Croitoru C., and Ilinca Nastase, 2014. Comparison of turbulence models in simulating jet flow from a cross-shaped orifice, *European Journal of Mechanics B/Fluids*, Vol. 44, pp.100-120.
- [7] Pandey K. M., and Virendra Kumar, 2010. CFD Analysis of Twin Jet Flow At March 1.74 with Fluent Software, *International Journal of Environmental Science and Development*, Vol. 1.
- [8] Versteeg, H.K. and Malslasekera, W.(1665)" Introduction to Computational Fluid Dynamics : The Finite Volume Method" John Wiley and Sons Inc., New York, U.S.A.
- [9] Yaknesh S., and Rajamurugu N., 2013. Analysis on High Speed Jet Flow Characteristics Using CFD (Gambit-Fluent), *International Journal of Mechanical Engineering and Research*, Vol.6, pp.677-682.
- [10] Young R.M., Hargather M.J., and Settles G.S., 2013. Shear stress and particle removal measurments of a round turbulent air jet impinging normally upon a planar wall, Vol.62, pp.15-25.
- [11] Zhiwei L., Wenxin H., and Yang Zhonghua, Interaction between Wall Jet and Offset Jet with Different Velocity and Offset Ratio, *International Conference on Modern Hydraulic Engineering*, Vol.28, pp.49-54.