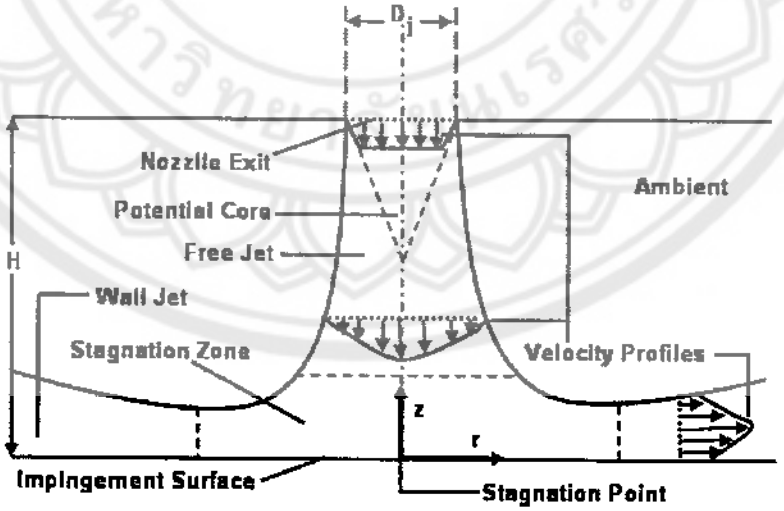
บทที่ 2
ทฤษฎีและวิธีการทดลอง

2.1 ความหมายและการไหลของเจ็ทไปตกกระทบลงบนแผ่นเป้าหมาย

จากรูปที่ 2.1 ที่ตำแหน่งทางออกของเจ็ท (Nozzle Exit) จะเกิดแกนกลางการไหลแบบศักย์ (Potential Core) ซึ่งบริเวณนี้จะมีความเร็วสม่ำเสมอ (Uniform Flow) เนื่องจากบริเวณแกนกลางการไหลแบบศักย์ไม่ได้รับอิทธิพลจากอากาศรอบข้าง (Ambient Air) ส่วนบริเวณรอบๆแกนกลางการไหลแบบศักย์ เรียกว่า เจ็ทอิสระ (Free Jet) ซึ่งจะได้รับอิทธิพลจากกอากาศรอบข้าง โดยจะเกิดการถ่ายเทโมเมนตัมกับอากาศรอบข้าง ส่งผลให้ความเร็วบริเวณนี้มีค่าไม่สม่ำเสมอ (Non-uniform Flow) ซึ่งเมื่อพิจารณาบริเวณที่ถัดจากแกนกลางการไหลแบบศักย์ลงมาที่ระนาบ z จะเกิดความเร็วสูงสุดที่ตำแหน่งแกนสมมาตร (r=0) และความเร็วสูงสุดนี้จะมีค่าลดลงเมื่อระยะจากตำแหน่งทางออกของหัวฉีดมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาจากบริเวณที่ถัดจากเจ็ทอิสระลงมาจะเข้าสู่บริเวณตกกระทบ (Stagnation Point Zone) โดยบริเวณตกกระทบนี้พื้นผิวเป้าหมายจะมีอิทธิพลต่อลักษณะการไหล คือ จะลดความเร็วในทิศทางตั้งฉาก (z) และเพิ่มความเร็วในแนวรัศมี (r) และในบริเวณตกกระทบจะมีตำแหน่งที่เจ็ทตกกระทบกับพื้นผิวเป้าหมายที่ตำแหน่ง (z=0 , r=0) ซึ่งจุดนี้ เรียกว่า จุดตกกระทบ (Stagnation Point) หลังจากเจ็ทไหลออกจากบริเวณตกกระทบ เจ็ทจะถูกเรียกว่า เจ็ทผนัง (Wall Jet) โดยเจ็ทผนังจะไหลขนานไปกับพื้นผิวเป้าหมาย ซึ่งความเร็วของเจ็ทผนังจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะ r เพิ่มขึ้น จนมีค่าความเร็วสูงสุดที่ระยะ r ค่าหนึ่ง หลังจากนั้นความเร็วของเจ็ทผนังก็จะลดลงเมื่อระยะ r เพิ่มขึ้น จนกระทั่งความเร็วเป็นศูนย์



รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะทั่วไปของการไหลของเจ็ทที่ตกกระทบลงบนแผ่นเป้าหมาย

2.2 วิธีดำเนินการทดลอง

ในหัวข้อนี้เป็นการสร้างโดเมนการคำนวณรวมถึงการกำหนดสภาวะขอบเขตของโจทย์การกระแทกของเจ็ทและกำหนดคุณสมบัติต่างๆของอากาศที่ใช้ในการศึกษาเชิงคำนวณ โดยใช้โปรแกรม COMSOL ทั้งนี้สามารถแบ่งออกเป็นสองส่วนใหญ่ๆด้วยกันได้แก่ การศึกษาการไหลของเจ็ทของอากาศ และการศึกษาการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทของอากาศ

2.2.1 การศึกษาการไหลของเจ็ทของอากาศ

ในการศึกษาส่วนนี้จะศึกษาถึงลักษณะกายภาพของอากาศที่ไหลออกจากหัวฉีดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.01 เมตร กระทบลงบนแผ่นเป้าหมายที่มีความยาว 0.03 เมตร โดยที่ค่าระยะระหว่างทางออกจากหัวฉีดถึงแผ่นเป้าหมาย (H/D_j) = 2-6 ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Re) = 400-1500 สมการที่ใช้ในการคำนวณตัวเลขเรย์โนลด์

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho v D_j}{\mu}$$

โดยที่ Re = ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number)

ρ = ความหนาแน่นของอากาศ ; (kg/ m^3) ที่อุณหภูมิ 300 K

μ = ค่าความหนืด ที่อุณหภูมิ 300 K ; (N·s/m^2) ที่อุณหภูมิ 300 K

D_j = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวฉีด ; (m)

v = ความเร็วของอากาศ ; (m/s)

ก) สมการที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการไหล

กำหนดให้คุณสมบัติต่างๆของอากาศมีค่าคงที่ ได้แก่ ความหนาแน่นและความหนืด เป็นต้น นอกจากนี้ยังกำหนดให้การไหลอยู่ที่สภาวะคงตัว (Steady state) และเป็นแบบสมมาตรตามแกนสองมิติ (2D Axial-symmetry) ดังนั้น เราจึงได้โดเมนของการคำนวณเพียงครึ่งเดียวและสมการที่เกี่ยวข้องมีดังต่อไปนี้

สมการต่อเนื่อง(Continuity Equation)

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(rv_r)+\frac{\partial}{\partial z}(v_z)=0 \qquad \text{.....2.1}$$

สมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes Equation)

แกน r

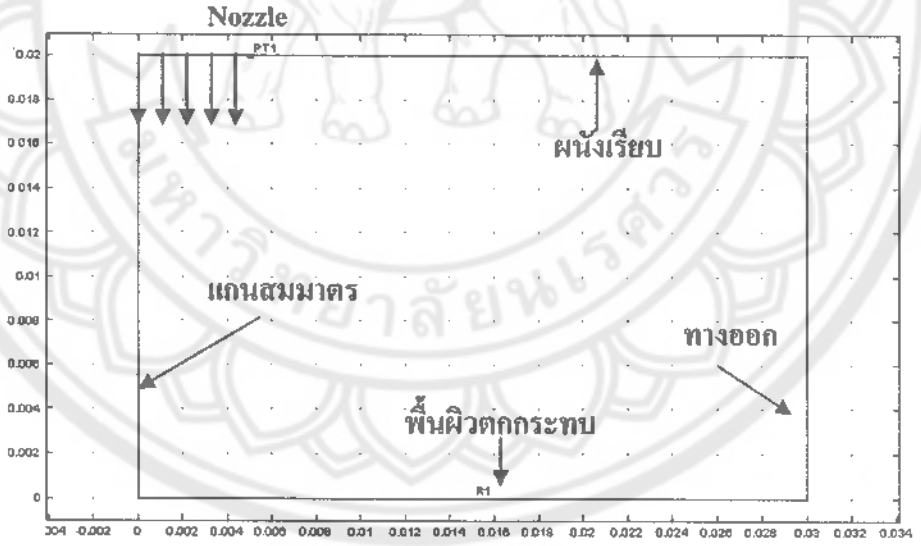
$$\rho\left(v_r\frac{\partial v_r}{\partial r}+v_z\frac{\partial v_r}{\partial z}\right)=-\frac{\partial p}{\partial r}+\mu\left\{\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[rv_r\right]\right)+\frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2}\right\} \quad \text{.....2.2}$$

แกน z

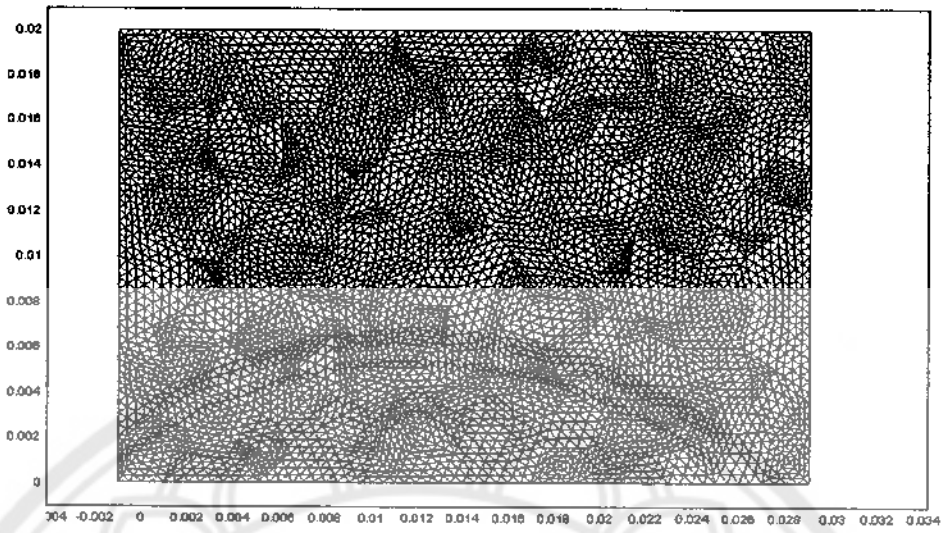
$$\rho\left(v_r\frac{\partial v_z}{\partial r}+v_z\frac{\partial v_z}{\partial z}\right)=-\frac{\partial p}{\partial z}+\mu\left\{\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial v_z}{\partial r}\right)+\frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2}\right\} \quad \text{.....2.3}$$

ข) การสร้างโดเมนการคำนวณ

รูปที่ 2.2 แสดงโดเมนการคำนวณสำหรับโจทย์การกระแทกของเจ็ทแบบสมมาตรตามแกนสองมิติ เริ่มจากแกนสมมาตร หัวฉีด (Nozzle) มีรัศมี 5 mm. ซึ่งในที่นี้กำหนดให้อากาศไหลผ่านหัวฉีดเป็นแบบ Uniform flow ผนังเรียบถัดจากหัวฉีดกำหนดให้ไม่ลื่นไถล (No slip) พื้นผิวด้านล่างเป็นพื้นผิวตกกระทบที่ไม่ลื่นไถล (No slip) เช่นกัน และสุดท้ายที่ทางออก กำหนดให้เจ็ทหลังตกกระทบไหลออกสู่สภาวะแวดล้อมที่ความดันบรรยากาศ หลังจากที่กำหนโดเมนการคำนวณแล้ว ทำการสร้างกริด (Grid) แบบสามเหลี่ยมไร้ระเบียบกระจายทั่วโดเมน ดังรูปที่ 2.3 ซึ่งมีความหนาแน่นของกริดเท่ากับ 10,016 Grid /m^2



รูปที่ 2.2 โดเมนการคำนวณสำหรับการไหลของเจ็ทที่ตกกระทบลงบนแผ่นเรียบ



รูปที่ 2.3 ลักษณะของการแบ่งกริด (Grid) แบบสามเหลี่ยมไร้ระเบียบกระจายทั่วโดเมน

ค) พารามิเตอร์และตัวแปรที่เกี่ยวข้อง

พารามิเตอร์และตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการไหลดังที่กล่าวมาข้างต้น คำนวณที่อุณหภูมิของเจ็ทคงที่เป็น T = 300 K แสดงได้ดังต่อไปนี้

ความหนาแน่นของอากาศ (ρ_{air}) = 1.1614 kg/m^3

ความหนืดของอากาศ (μ_{air}) = 184.6×10^{-7} N.s/m^2

ความเร็วของอากาศ $v = v_0$ = -0.63578 m/s (Re = 400) ,-1.58946 m/s (Re = 1000) และ -2.38419 m/s (Re = 1500)

ความสูงตามแนวแกน z H = 0.02 m , 0.04 m และ 0.06 m

2.2.2 การศึกษาการถ่ายเทความร้อนของอากาศ

ในหัวข้อนี้จะศึกษาถึงการถ่ายเทความร้อน (Heat transfer) ของอากาศที่ไหลออกจากหัวฉีดมาตกกระทบกับแผ่นเรียบที่มีค่าฟลักซ์ความร้อนคงที่ q'' จากนั้นใช้สมการพลังงานคำนวณอุณหภูมิที่พื้นผิว T_2 เพื่อให้เราสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (h) ได้ดังความสัมพันธ์

$$q'' = h(T_2 - T_1) \qquad \text{.....2.4}$$

โดยทั่วไปนิยมแสดงการถ่ายเทความร้อนในรูปของตัวแปรไร้มิติ Nussult number , Nu

$$Nu = \frac{hD_j}{k} \qquad \text{.....2.5}$$

โดยที่ q'' = ค่าฟลักซ์ความร้อน (Heat flux) ; W/m^2

h = สัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Convection coefficient) ; $W/m^2 \cdot K$

T_1 = อุณหภูมิที่อากาศทางออกเจ็ท; K

T_2 = อุณหภูมิที่อากาศผิวแผ่นเป้าหมาย; K

Nu = ค่าตัวเลขนัสเซิลท์ (Nusselt number)

k = ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ; $W/m \cdot K$

ก) สมการเกี่ยวข้องกับปัญหาการถ่ายเทความร้อน

ในการหาอุณหภูมิ T_2 ของพื้นผิวตกกระทบดังกล่าวข้างต้นนั้น ในระเบียบวิธีทางตัวเลขนี้เรากำหนดให้พื้นผิวตกกระทบมีฟลักซ์ความร้อนคงที่ เท่ากับ 1500 W/m^2 และใช้สมการพลังงาน

$$\frac{1}{\alpha}\left(v\frac{\partial T_2}{\partial r} + u\frac{\partial T_2}{\partial z}\right) = \frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial T_2}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} \qquad \text{.....2.6}$$

ข) การสร้างโดเมนการคำนวณ

รูปที่ 2.4 แสดงการกำหนดสภาวะขอบเขตของโจทย์โดยมีรายละเอียดดังนี้

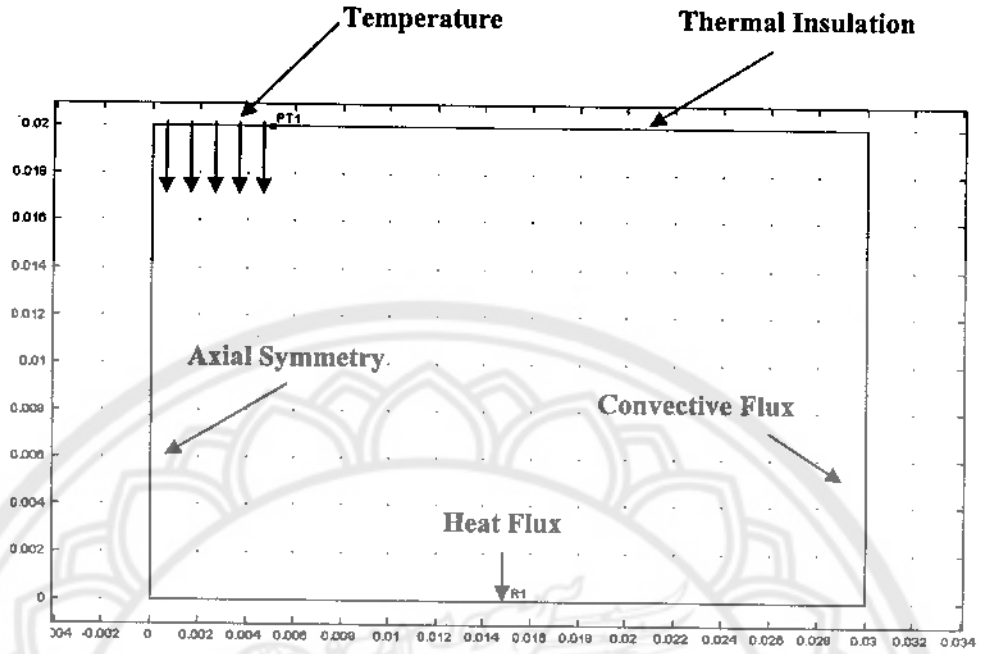
Axial Symmetry คือ เป็นแกนสมมาตรของโดเมนทำให้การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนเหลือเพียงครึ่งเดียว

Heat Flux คือ การกำหนดฟลักซ์ความร้อนให้กับพื้นผิวเป้าหมายมีค่าเท่ากับ 1500 W/m^2

Temperature คือ ตำแหน่งทางเข้าที่กำหนดให้มีอุณหภูมิคงที่เท่ากับอุณหภูมิของเจ็ท ซึ่งเท่ากับอุณหภูมิอากาศเท่ากับ 300 K

Thermal insulation คือ กำหนดให้ผนังเรียบที่อยู่ถัดจากหัวฉีดเป็นตำแหน่งที่ไม่มีการถ่ายเทความร้อน

Convection flux คือ ที่ทางออกของเจ็ทหลังตกกระทบกำหนดให้ฟลักซ์ความร้อนที่เกิดจากการพาความร้อนอย่างเดียว โดยไม่มีการนำความร้อนสู่บรรยากาศ



รูปที่ 2.4 โดเมนการคำนวณสำหรับการถ่ายเทความร้อนของเจ็ทที่ตกกระทบลงบนแผ่นเรียบ

ค) พารามิเตอร์และตัวแปรที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากก่อนที่จะประมวลผลสำหรับโจทย์การถ่ายเทความร้อน โปรแกรมจะต้องประมวลผลของโจทย์การไหลเสียก่อน ดังนั้น พารามิเตอร์และตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทความร้อนจึงเหมือนกับพารามิเตอร์และตัวแปรของโจทย์การไหลแต่จะเพิ่มเติมดังต่อไปนี้

ค่าการนำความร้อน (k) = 26.3×10^{-3} W/m·K

ค่าความร้อนจำเพาะ (C_p) = 1007 kJ/kg·K