บทที่ 3
การจำลองทางคอมพิวเตอร์

ในการทำการทดลองออกแบบใบพัดของเครื่องสูบน้ำพลังน้ำในครั้งนี้ ได้นำโปรแกรมทางคอมพิวเตอร์มาช่วยในการออกแบบและหาค่าที่ได้จริงในทางทฤษฎี ซึ่งโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองในครั้งนี้คือโปรแกรม Flo Wizard ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในโปรแกรม Computational Fluid Dynamics (CFD) ที่วิเคราะห์ลักษณะและคุณสมบัติการไหลของของไหลในรูปแบบและสภาวะที่แตกต่างกันออกไป

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีต่างที่เกี่ยวข้องในโปรแกรมและทฤษฎีที่ใช้จริงในการจำลองครั้งนี้ซึ่งคือ ทฤษฎี แบบจำลอง Realizable k-ε (The realizable k-ε model) ซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดต่อไป นอกจากนี้ภายในบทนี้ยังจะกล่าวถึงขั้นตอนการใช้โปรแกรมในการจำลองครั้งนี้ด้วย

3.1 แบบจำลองที่เกี่ยวข้อง

การไหลแบบปั่นป่วน แบบลักษณะการไหลแบบขึ้นๆลงๆหรือการเปลี่ยนแปลงของสนามความเร็วอยู่ตลอดเวลา การไหลแบบมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลานี้จะส่งผ่าน ปริมาณ เช่น โมเมนตัม, พลังงาน และสิ่งที่เป็นความเข้มข้นได้ดี

นับตั้งแต่การไหลแบบมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลานี้ สามารถที่จะแยกและแบ่งออกเป็นส่วนย่อยๆได้แล้ว และสามารถทำการคำนวณทางคอมพิวเตอร์ในการจำลองได้ผลที่ไม่ดีสำหรับการทดลองในทางวิศวกรรมศาสตร์ ในการแทนที่, การแทนที่อย่างรวดเร็ว (ค่าจริง) ในสมการ สามารถแทนค่าของ เวลาโดยเฉลี่ย, ผลรวมโดยเฉลี่ย หรือไม่เช่นนั้น การควบคุมจะกำจัดจุดแยกย่อยนั้นออกไป ผลที่ได้จากการปรับปรุงสมการซึ่ง การคำนวณทางคอมพิวเตอร์จะเป็นไปได้ง่ายขึ้นในการแก้สมการ

อย่างไรก็ตามสมการการที่ได้ปรับปรุงแล้วนั้นก็ยังมีตัวแปรที่ไม่ทราบค่าเพิ่มขึ้นมาและการไหลแบบปั่นป่วนนี้จำเป็นที่หาค่าของตัวแปรในค่าเชิงปริมาณ

ตัวอย่างของแบบจำลองของการไหลแบบปั่นป่วน

1. Spalart-Allmaras model
2. k -ε models
    a. Standard k -ε model
    b. Renormalization-group (RNG) k -ε model
    c. Realizable k -ε model
3. k -ω models
    a. Standard k -ω model
    b. Shear-stress transport (SST) k -ω model
4. v^2-f model
5. Reynolds stress model (RSM)
6. Detached eddy simulation (DES) model
7. Large Eddy simulation (LES) model

แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงในส่วนของแบบจำลองที่เกี่ยวข้องและทฤษฎีที่ใช้เท่านั้น คือ แบบจำลอง k -ε (k -ε models) ซึ่งประกอบด้วย แบบจำลองมาตรฐาน (Standard k -ε model), แบบจำลอง RNG k -ε (Renormalization - group (RNG) k -ε model) และแบบจำลอง Realizable k -ε (Realizable k -ε model) โดยเฉพาะในแบบจำลอง Realizable k -ε ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ใช้ในการจำลองครั้งนี้ ส่วนทฤษฎีที่เกี่ยวข้องจะกล่าวในลำดับต่อไป

3.1.1 The Standard k -ε Model

แบบจำลองมาตรฐาน k -ε เป็นครึ่งหนึ่งของแบบจำลองที่ได้จากการทดลองซึ่งเป็นพื้นฐานของสมการการส่งผ่านที่ใช้สำหรับ พลังงานจลน์ของการไหลแบบปั่นป่วน (k) และอัตราการกระจายตัว (ε) แบบจำลองของสมการการส่งผ่านสำหรับ k ซึ่งได้มาจากการแก้สมการ, ขณะที่แบบจำลองของสมการการส่งผ่านสำหรับ ε ได้มาจากการใช้เหตุผลทางฟิสิกส์และมีความคล้ายคลึงกันกับการหาผลจริงทางคณิตศาสตร์

ในการหาค่าของ แบบจำลอง k -ε ได้มาจากการสมมุติให้เป็นการไหลปั่นป่วนแบบสมบูรณ์ และผลกระทบจากโมเลกุลของความหนืดมีเพียงเล็กน้อยเท่านั้น. แบบจำลองมาตรฐาน k -ε จึงเหมาะสำหรับการไหลแบบสมบูรณ์เท่านั้น

ก. สมการการส่งผ่านของแบบจำลองมาตรฐาน k-ε

พลังงานจลน์ของการไหลแบบปั่นป่วน, (k) และอัตราการกระจายตัว (ε) หาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+G_k+G_b-\rho\varepsilon-Y_M+S_k \tag{3.1}$$

และ

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}\right]+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k+C_{2\varepsilon}G_b)-C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k}+S_\varepsilon \tag{3.2}$$

จากสมการดังกล่าว

ค่า G_k คือค่าที่แสดงในรูปแบบของพลังงานของการไหลแบบปั่นป่วนเนื่องจากความเร็วในแนวลาด ซึ่งได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 3.2.3

ค่า G_b คือค่าที่แสดงในรูปแบบของพลังงานของการไหลแบบปั่นป่วนเนื่องจากแรงลอยตัว, ซึ่งหาได้จากหัวข้อ 3.2.4

ค่า Y_M คือค่าที่ได้จากการขยายตัวแบบแปรผัน ในการไหลแบบปั่นป่วนที่กดอัดได้ เพื่อหาค่าของอัตราการขยายตัวโดยรวม, ซึ่งหาได้จากหัวข้อ 3.2.5

ค่า $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$และ $C_{3\varepsilon}$ เป็นค่าคงที่

ค่า σ_k และ σ_ε คือค่า Prandtl numbers สำหรับ k-ε ตามลับดับ

ค่า S_k และ S_ε เป็นค่าที่ผู้ใช้กำหนดขึ้นมาเอง

ข. การจำลองความหนืดของหารไหลแบบปั่นป่วน

ความหนืดของการไหลแบบปั่นป่วน (หรือ Eddy) (μ_t) ที่หาได้จากการคำนวณโดยการผสมผสานของ k-ε หาได้ดังต่อไปนี้

$$\mu_t=\rho C_\mu\frac{k^2}{\varepsilon} \tag{3.3}$$

ในที่นี้ค่า C_μ เป็นค่าคงที่

ค. ค่าคงที่ในแบบจำลอง

ซึ่งค่า $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, C_{μ} และ σ_k, σ_ε มีค่าตั้งต่อไปนี้

$C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$, $C_{\mu} = 0.09$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$

ค่าพื้นฐานเหล่านี้ได้ถูกกำหนดจากการทดลองกับอากาศและน้ำ สำหรับแรงเฉือนของการไหลแบบปั่นป่วนรวมถึงแรงเฉือนของการไหลที่เป็นเนื้อเดียวกันและการเสื่อมลงของงานไหลแบบปั่นป่วนที่มีความดันคงที่ เพื่อที่จะให้ได้ความแม่นยำมากขึ้นสำหรับขอบเขตที่กว้างและไม่มีแรงเฉือนในการไหล

ถึงแม้ว่าค่าพื้นฐานของค่าคงที่ของแบบจำลองเป็นมาตรฐานหนึ่งเดียวและเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขว้าง, คุณสามารถเปลี่ยนมันได้ (ถ้าต้องการ) ในแบบจำลองความหนืด

3.1.2 แบบจำลอง RNG k -ε

แบบจำลอง RNG k -ε ในการไหลแบบปั่นป่วน หาได้จากสมการการแทนที่อย่างรวดเร็วของ Navier-Stokes, โดยใช้เทคนิคทางคณิตศาสตร์ที่ถูกเรียกว่า “renormalization group” ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์หาค่าในแบบจำลองที่ใช้ค่าคงที่จะแตกต่างจากผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองมาตรฐานรวมทั้งข้อตกลงเพิ่มเติมและฟังชั่นของสมการการส่งผ่านของ k -ε

ก. การแปลงสมการสำหรับแบบจำลอง RNG k -ε

แบบจำลอง RNG k -ε จะมีความคล้ายคลึงกับ แบบจำลองมาตรฐาน k -ε

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\alpha_k \mu_{eff}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+G_k+G_b-\rho\varepsilon-Y_M+S_k$$

(3.4)

และ

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\alpha_\varepsilon\mu_{eff}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}\right]+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}\left(G_k+C_{2\varepsilon}G_b\right)-C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k}-R_\varepsilon+S_\varepsilon$$

(3.5)

จากสมการดังกล่าว

ค่า G_k คือค่าที่แสดงในรูปแบบของพลังงานของการไหลแบบปั่นป่วนเนื่องจากความเร็วในแนวลาด ซึ่งได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 3.2.3

ค่า G_b คือค่าที่แสดงในรูปแบบของพลังงานของการไหลแบบปั่นป่วนเนื่องจากแรงลอยตัว, ซึ่งหาได้จากหัวข้อ 3.2.4

ค่า Y_M คือค่าที่ได้จากการขยายตัวแบบแปรผัน ในการไหลแบบปั่นป่วนที่กดอัดได้ เพื่อหาค่าของอัตราการขยายตัวโดยรวม, ซึ่งหาได้จากหัวข้อ 3.2.5

ค่า $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$และ C_μ เป็นค่าคงที่

ค่า σ_k และ σ_ε คือค่า Prandtl numbers สำหรับ k-ε ตามลับดับ

ค่า S_k และ S_ε เป็นค่าที่ผู้ใช้กำหนดขึ้นมาเอง

ข. การจำลองประสิทธิภาพของความหนืด

ขั้นตอนการกำจัดออกของสเกลในผลของทฤษฎี RNG ในระบบสมการอนุพันธ์สำหรับหาค่าความหนืดของการไหลแบบปั่นป่วน

$$d\left(\frac{\rho^2 k}{\sqrt{\varepsilon\mu}}\right)=1.72\frac{\hat{\upsilon}}{\sqrt{\hat{\upsilon}^3-1+C_\upsilon}}d\hat{\upsilon} \tag{3.6}$$

เมื่อ

$$\hat{\upsilon}=\mu_{eff}/\mu$$

$$C_\upsilon\approx 100$$

จากสมการข้างบนถ้าทำการอินทิเกตเพื่อรับการอธิบายอย่างถูกต้องว่าประสิทธิภาพของการส่งผ่านของการไหลแบบปั่นป่วนขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของ Reynolds number (or eddy scale) การยอมให้แบบจำลองที่มี ค่าReynolds number ที่ต่ำ และมีการไหลใกล้ผนังทำงานได้ดี

ในข้อจำกัดที่มีค่า Reynolds number ที่สูง จะได้สมการว่า

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \qquad (3.7)$$

โดยค่า C_μ = 0.0845 ได้มาจากการใช้ทฤษฎี RNG เป็นค่าที่น่าสนใจเพราะว่าค่านี้มีค่าใกล้เคียงกับ 0.09 ซึ่งใช้ในแบบจำลองมาตรฐาน k-ε

ในโปรแกรม Flo Wizard โดยพื้นฐานประสิทธิภาพของความหนืดหาได้จากสมการ the high-Reynolds-number (3.7) อย่างไรก็ตามข้อกำหนดนี้ยังยอมให้คุณใช้สมการอนุพันธ์ในสมการ (3.6) เมื่อคุณต้องการใช้ประสิทธิภาพของ Reynolds-number ที่ต่ำ

ค. การแก้ไข การหมุนวนใน RNG

การไหลแบบปั่นป่วนโดยทั่วไปแล้วผลกระทบหลักๆมาจากการหมุนและการหมุนวนในการหมุนหลักๆ แบบจำลอง RNG ในโปรแกรม Flo Wizard นี้ใช้สำหรับหาประสิทธิภาพจากการหมุนหรือการหมุนวนโดยการแก้ไขความหนืดในการไหลแบบปั่นป่วนได้อย่างเหมาะสม การแก้ไขดังกล่าว

ใช้ฟังก์ชันดังต่อไปนี้

$$\mu_t = \mu_{t0} f\left(\alpha_{S,} \Omega, \frac{k}{\varepsilon}\right) \qquad (3.8)$$

เมื่อ $\mu_{t\theta}$

ค่า $\mu_{t\theta}$ เป็นค่าความหนืดของการไหลแบบปั่นป่วนที่หาได้จากการแก้ไขการหมุนโดยสมการ 11.4-6 หรือ (3.7)

ค่า Ω เป็นค่าคุณลักษณะของการหมุนวนที่ใช้ในโปรแกรม Flo Wizard

ค่า α_s เป็นค่าคงที่ของการหมุนวนซึ่งสมมติจากค่าที่แตกต่างโดยยึดหลักการการหมุนวนที่มีอิทธิพลต่อการไหลหรือการหมุนวนมีอิทธิพลน้อยมากต่อการไหล การปรับแก้การหมุนวนจำเป็นต้องกระทำในแนวแกน, การไหลวน, และการไหลในสามมิติ, เมื่อใช้แบบจำลอง RNG

สำหรับการหมุนวนที่เบาบาง (เป็นพื้นฐานภายใน โปรแกรม Flo Wizard) ค่า α_s ถูกกำหนดไว้ที่ 0.05 และไม่สามารถแก้ไขได้

สำหรับการไหลที่มีการหมุนวนที่มีมาก อย่างไรก็ตามค่า α_s ที่สูงก็สามารถใช้ได้

ง. การคำนวณหาค่าส่วนกลับของผลกระทบของ Prandtl Numbers

ส่วนกลับของผลกระทบของ Prandtl Numbers คือ α_k, α_ε คือค่าที่คำนวณจากสูตรที่ได้วิเคราะห์ไว้แล้วโดยทฤษฎี RNG

$$\left|\frac{\alpha - 1.3929}{\alpha_0 - 1.3929}\right|^{0.6321}\left|\frac{\alpha + 2.3929}{\alpha_0 + 2.3929}\right|^{0.3679} = \frac{\mu_{mol}}{\mu_{eff}} \tag{3.9}$$

เมื่อ α_0 = 1.0 ในค่าเรย์โนนัมเบอร์ที่สูง (μ_{mol}/μ_{eff}), $\alpha_k = \alpha_\varepsilon \approx 1.393$

จ. ค่า Re ในสมการของ ε

ข้อแตกต่างหลักๆระหว่างแบบจำลอง RNG และแบบจำลองมาตรฐาน k-ε ที่ใช้ในข้อตกลงเพิ่มเติมในสมการ ε มีอยู่ว่า

$$R_\varepsilon = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta\eta^3}\frac{\varepsilon^2}{k} \tag{3.10}$$

เมื่อ $\eta \equiv S_{K/\varepsilon}$, $\eta_0 = 4.38$, $\beta = 0.012$

ผลกระทบนี้ที่มีต่อ ε ในสมการ ε สามารถเห็นได้ชัดเจนจากการนำสมการที่ (3.5) มาเรียงใหม่ ใช้สมการที่ (3.10) ในเทอมที่ 3 และ 4 ไปแทนค่าในด้านขวาของสมการที่ (3.5) สามารถนำมารวมกัน และผลของสมการ ε ที่เขียนใหม่ได้ว่า

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}\left(G_k + C_{3\varepsilon}G_b\right) - C_{2\varepsilon}{}^* \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \tag{3.11}$$

เมื่อค่า $C^*_{2\varepsilon}$ ได้มาจาก

$$C_{2\varepsilon}^{\ *} \equiv C_{2\varepsilon} + \frac{C_\mu \eta^3 (1-\eta/\eta_0)}{(1+\beta\eta^3)} \tag{3.12}$$

ในที่นี้ เมื่อ $\eta < \eta_0$, ค่า R จะมีค่าเป็นบวกและค่า $C^*_{2\varepsilon}$ มีค่ามากกว่าค่า $C_{2\varepsilon}$ ในทางลอกการิทึมแล้วสำหรับตัวอย่างมันสามารถที่จะแสดงว่าค่า $\eta \approx 3.0$ โดยให้ $C^*_{2\varepsilon} \approx 2.0$ โดยค่าที่ได้ใกล้เคียงกับค่า $C_{2\varepsilon}$ ในแบบจำลองมาตรฐาน (1.92) ผลก็คือ จากการไหลที่มีค่าจากน้อยไปหาค่าที่มาก แบบจำลอง RNG จะให้ค่าที่กว้างกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลองมาตรฐาน k-ε

ในที่นี้เมื่อ อัตราส่วนของความเครียดที่มีขนาดกว้าง ($\eta > \eta_0$), อย่างไรก็ตามค่าR ที่ได้จะมีค่าเป็นลบ และทำให้ค่า $C^*_{2\varepsilon}$ น้อยกว่าค่า $C_{2\varepsilon}$

ในการเปรียบเทียบโดยแบบจำลองมาตรฐาน k-ε การทำลายอย่างน้อยนิดของ ε การขยายตัวของ k-ε, การลดลงของ k-ε และในที่สุดมาจากผลกระทบของความหนืด

ผลคือในการไหลที่รวดเร็วสนามความหนืดในการไหลแบบปั่นป่วนของแบบจำลอง RNG จะมีค่ามากกว่า แบบจำลองมาตรฐาน k-ε

ด้วยเหตุนี้แบบจำลอง RNG ขานรับกับผลกระทบจากความตรึงเครียดอย่างรวดเร็วและเส้นโค้งของแนวการไหลมากกว่า แบบจำลองมาตรฐาน k-ε ซึ่งจะอธิบายถึงข้อดีของแบบจำลอง RNG

ฉ. ค่าคงที่ในแบบจำลอง

ค่าคงที่ในแบบจำลอง คือค่า $C_{1\varepsilon}$ และ $C_{2\varepsilon}$ ในสมการ (3.5) โดยมีค่าที่ได้จากการวิเคราะห์จากทฤษฎีของ และค่าที่ใช้ในโปรแกรม Flo Wizard คือ

$$C_{1\varepsilon} = 1.42,\ C_{2\varepsilon} = 1.68$$

3.1.3 The Realizable k-ε Model

แบบจำลอง Realizable k-ε เป็นแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมาจากแบบจำลองมาตรฐาน k-ε และมีข้อแตกต่างที่สำคัญอยู่ 2 ข้อ คือ

- แบบจำลอง Realizable k-ε ประกอบด้วยสูตรใหม่ของความหนืดในการไหลแบบปั่นป่วน

- สมการใหม่ของสมการการส่งผ่านสำหรับอัตราการขยายตัว ε โดยหามาจากสมการของการแกว่งแบบเป็นวงกลม

ในความหมายของ "Realizable" คือแบบจำลองที่ใช้หลักในทางคณิตศาสตร์ ของ Reynolds stresses โดยอยู่บนหลักการของการไหลแบบปั่นป่วนในทางฟิสิกส์ ไม่ว่าจะเป็นแบบจำลองมาตรฐาน k-ε หรือ แบบจำลอง RNG ก็เป็นแบบ realizable เช่นกัน

ประโยชน์ที่ได้ทันทีของ แบบจำลอง Realizable k-ε คือ มันจะทำการทำนายอัตราการแพร่กระจายได้อย่างแม่นยำทั้งในแนวราบและแบบพุ่งเป็นลำ และยังเหมาะที่จะใช้สำหรับการไหลแบบหมุนวน, แนวแบ่งขอบเขตภายใต้ความดันที่สูงแบบค่อยๆเพิ่ม, แบบแยกส่วน, และแบบกลับไปกลับมา

ทั้งแบบจำลองแบบ Realizable k-ε และแบบจำลอง RNG k-ε มีการปรับปรุงหลักการให้ดียิ่งกว่า จะเป็นแบบจำลองมาตรฐาน k-ε ซึ่งที่สภาพของการไหลรวมทั้งเส้นความแข็งของไอในแนวโค้ง, แนววงกลมและแนวการหมุน นับตั้งแต่แบบจำลองนี้มีการพัฒนามา ก็ไม่สามารถจะยกตัวอย่างขึ้นมาอธิบายได้อย่างชัดเจนว่าแบบจำลองแบบ realizable k-ε มีการกระทำที่ไม่เหมือนกับ แบบจำลอง RNG อย่างไรก็ตามการศึกษาค่าเริ่มต้นจะทำให้เราเห็นว่าแบบจำลองแบบ realizable k-ε มีการกระทำที่ได้ผลดีต่างจากแบบจำลองแบบ k-ε ในวิธีอื่นๆสำหรับการไหลแบบแยกส่วนและการไหลเชิงซ้อน

หนึ่งในข้อกำหนดของแบบจำลองแบบ Realizable k-ε คือมันจะทำให้การไหลแบบปั่นป่วนอยู่ในสภาวะที่ไม่เป็นไปตามลักษณะทางกายภาพเมื่อมีการคำนวณหลักๆคือการหมุนและพื้นที่ของการไหลนี้คือความจริงของแบบจำลองแบบ realizable k-ε ที่ส่งผลกระทบต่อความหมายของการหมุนในนิยามของความหนืดของการไหลแบบปั่นป่วน ผลกระทบจากการหมุนนี้ได้ถูกทดสอบจากการหมุนที่อ้างอิงจากระบบและได้แสดงการกระทำไว้ในแบบมาตรฐาน k-ε

ช. แบบจำลองแบบ Realizable k-ε

นอกจากแบบจำลองมาตรฐานและแบบ RNG บนพื้นฐานของแบจำลอง k-ε ที่ได้อธิบายไว้ใน โปรแกรม Fluent นี้ยังมีแบบจำลองที่ถูกเรียกว่า แบบจำลองแบบ Realizable k-ε ในความหมายของคำว่า "Realizable" ซึ่งหมายถึงแบบจำลองที่ใช้หลักในทางคณิตศาสตร์เพื่อหาค่าความเค้นผิวปกติและอยู่บนหลักการไหลแบบปั่นป่วนในหลักฟิสิกส์. เพื่อให้เข้าใจได้ง่ายแบบจำลองนี้ได้คิดแบบผสมผสานระหว่างความสัมพันธ์ของ Boussinesq (สมการ 3.35) และ

eddy (สมการ 3.3) เพื่อที่จะใช้สำหรับ normal Reynolds stress ในของเหลวที่กดอัดไม่ได้

$$\bar{u}^2 = \frac{2}{3}k - 2\upsilon_t \frac{\partial U}{\partial x} \tag{3.13}$$

จากสมการ 11.4-3 สำหับค่า $\upsilon_t = \mu_t / \rho$, ผลที่ได้คือความเค้นปกติ ($\bar{u}^2$) ซึ่งมีค่าเป็นบวกหากมีค่าเป็นลบแสดงให้เห็นว่านั้นมันเป็น "non-realizable" เมื่อความเครียดมีค่ามากเกินไป

$$\frac{k}{\varepsilon}\frac{\partial U}{\partial x} > \frac{1}{3C} \approx 3.7 \tag{3.14}$$

ในความคล้าย, ยังสามารถแสดงให้เห็นตามหลักความไม่เท่ากันของ Schwarz สำหรับค่าความเค้นเฉือน ($\bar{u}_\alpha \bar{u}^2{}_\beta \le \bar{u}^2{}_\alpha \bar{u}^2{}_\beta$; ไม่รวมกันเกินα และ β) แต่เราจะไม่คิดเมื่อ ค่าอัตราส่วนของความเครียดมีค่ามาก ทางที่ทำให้มั่นใจที่สุดที่เราจะแน่ใจได้ว่า มันสามารถที่จะเป็นจริง (ข้อกำหนดของ ความเค้นปกติและหลักความไม่แน่นอนของ Schwarz) เป็นตัวทำให้เกิด ค่า C_μ ที่แปรเปลี่ยนไปตามการทิศทางของไหล (การทำให้เปลี่ยนทิศ) และการไหลแบบปั่นป่วน (k ,ε)ความคิดที่เกี่ยวกับการแปรเปลี่ยนของค่า C_μ ได้ถูกถามจากนักออกแบบหลายท่านรวมถึง Reynolds และได้ทำให้เป็นแบบแผนโดยการทำการทดลอง. สำหรับตัวอย่าง, ค่า C_μ ที่ถูกหาได้นั้นมีค่าเท่ากับ 0.09 ในค่าชั้นภายในของสมดุลของชั้นขอบเขต, และมีค่าเท่ากับ 0.05ในการไหลแนวเฉือนที่เป็นไหลในทิศทางเดียวกัน

ในข้อด้อยอื่นๆของแบบจำลองมาตรฐาน k -ε หรือแบบจำลองอื่นๆในทำนองของ k -ε ที่ได้ถูกออกแบบสมการสำหรับอัตราการขยายตัว(ε) เรารู้ดีว่าการไหลที่พุ่งเป็นลำ ได้ถูกพิจารณาให้เป็นหลักในการออกแบบสมการการกระจายตัว

แบบจำลอง Realizable k -ε ที่ถูกคาดหมายว่าจะบรรจุลงในข้อบกพร่องของแบบจำลอง k -ε ตามเงื่อนไขดังนี้

- สูตรใหม่ที่ต้องการหาความหนืดของ Eddy จากการแปรเปลี่ยนของค่าC_μ โดยที่ค่าเริ่มต้นจากค่าของ Reynolds

- สมการของแบบจำลองใหม่ที่ใช้สำหรับการกระจายตัว (ε) นี้ มีพื้นฐานจากสมการการเคลื่อนที่ของการแกว่งขึ้นลงในแบบวงกลมจัตุรัส

ซ. การเปลี่ยนสมการสำหรับแบบจำลอง Realizable k -ε

แบบจำลองที่ได้ถูกทำการเปลี่ยนแปลงสมการสำหรับ k และ ε ในแบบจำลอง realizable k -ε เป็นดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+G_k+G_b-\rho\varepsilon-Y_M+S_k \tag{3.15}$$

และ

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_j)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}\right]+\rho C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}C_{3\varepsilon}G_b+S_\varepsilon \tag{3.16}$$

เมื่อ

$$C_1=\max\left[0.43,\frac{\eta}{\eta+5}\right],\eta=S\frac{k}{\varepsilon},S=\sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \tag{3.17}$$

จากสมการดังกล่าว

ค่า G_k คือค่าที่แสดงในรูปแบบของพลังงานของการไหลแบบปั่นป่วนเนื่องจากความเร็วในแนวลาด ซึ่งได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 3.2.3

ค่า G_b คือค่าที่แสดงในรูปแบบของพลังงานของการไหลแบบปั่นป่วนเนื่องจากแรงลอยตัว, ซึ่งหาได้จากหัวข้อ 3.2.4

ค่า Y_M คือค่าที่ได้จากการขยายตัวแบบแปรผัน ในการไหลแบบปั่นป่วนที่กดอัดได้ เพื่อหาค่าของอัตราการขยายตัวโดยรวม, ซึ่งหาได้จากหัวข้อ 3.2.5

ค่า $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$และ $C_{3\varepsilon}$ เป็นค่าคงที่

ค่า σ_k และ σ_ε คือค่า Prandtl numbers สำหรับ k -ε ตามลับดับ

ค่า S_k และ S_ε เป็นค่าที่ผู้ใช้กำหนดขึ้นมาเอง

ฌ. ข้อแนะนำ

สมการของ k (สมการ 3.15) เป็นค่าเดียวกันกับในแบบจำลองมาตรฐาน k -ε (สมการ 11.4-1) และแบบจำลอง RNG (สมการ3.4), เว้นแต่ในแบบจำลองที่เป็นค่าคงที่ อย่างไรก็ตามรูปแบบของสมการ ε เป็นข้อแตกต่างเพียงเล็กน้อยเท่านั้นระหว่างแบบจำลองมาตรฐาน k -ε และแบบจำลอง RNG (สมการ3.2 และ 3.5) สิ่งหนึ่งที่ควรจดจำคือผลที่ได้ในสมการ ε (เทอมที่สองในฝั่งขวามือของสมการ 3.16) ไม่นำผลของค่า k ที่ได้มาคิด มันไม่ได้ประกอบด้วยค่าที่มีค่าเท่ากับค่าของแบบจำลอง k -ε อื่นๆ มันน่าเชื่อถือได้ว่าสิ่งที่กล่าวมานี้ดีกว่าเดิมในแง่ของการถ่ายเทพลังงาน ลักษณะอื่นๆที่ควรทราบจะอยู่ในเทอมที่ต้องการทำลาย (สิ่งที่ถัดไปจากเทอมสุดท้าย ในฝั่งด้านขวามือของสมการ3.16) ไม่ต้องแปลกใจเพราะตัวหารจะไม่มีการสูญหาย, ถ้าหาก k หายไปหรือมีค่าเข้าใกล้ศูนย์มากๆ ลักษณะนี้จึงเป็นข้อเปรียบเทียบของแบบจำลอง k -ε ทุกๆแบบ ถ้าต้องแปลกใจว่าค่า k จึงเป็นตัวหาร

แบบจำลองนี้มีถูกทำให้มีเหตุผลที่กว้างสำหรับค่าขอบเขตของการไหลที่กว้างรวมไปถึงการไหลแบบเฉือนที่มีการหมุนไปในทางเดียวกัน, การไหลอิสระรวมถึงเครื่องไอพ่นและการผสมของชั้น, ช่องและขอบเขตการไหล, และการแยกของการไหล สำรับทุกๆกรณี, การกระทำจากแบบจำลองสามารถทำให้เป็นรูปเป็นร่างที่ดีขึ้นกว่าแบบจำลองมาตรฐาน k -ε โดยเฉพาะอย่างยิ่งสิ่งที่ควรจดจำก็คือความจริงของ แบบจำลอง realizable k -ε ตั้งใจที่จะให้พุ่งเป็นลำ, ได้คาดเดาว่าอัตราการกระจายตัวสำหรับการพุ่งของลำน้ำในแนวแกนจะดีกว่าการพุ่งในแนวระนาบ

ญ. การออกแบบความหนืดของการไหลแบบปั่นป่วน

ในแบบจำลองอื่นๆของ แบบจำลอง k -ε ความหนืดหาได้จาก

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{3.18}$$

ข้อแตกต่างระหว่าง แบบจำลอง Realizable k -ε และ แบบจำลองมาตรฐาน และ RNG k -ε คือค่า C_μ เป็นค่าคงที่ที่อยู่ได้ไม่นาน หาจาก

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{kU^*}{\varepsilon}} \tag{3.19}$$

เมื่อ

$$U^* \equiv \sqrt{S_{ij}S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij}\tilde{\Omega}_{ij}} \tag{3.20}$$

และ

$$\tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2\varepsilon ij\omega_k \tag{3.21}$$

$$\tilde{\Omega}_{ij} = \overline{\Omega}_{ij} - \varepsilon ijk\omega_k \tag{3.22}$$

เมื่อ $\tilde{\Omega}_{ij}$ เป็นค่าของอัตราการหมุนที่ถูกแสดงในการหมุนอ้างอิงโดยความเร็วเชิงมุม(ω_k) แบบค่าคงที่คือค่า A_0 และ A_S

โดยมีค่า

$$A_0 = 4.04,\ A_S = \sqrt{6}\cos\phi \tag{3.23}$$

เมื่อ

$$\phi = \frac{1}{3}\cos^{-1}\left(\sqrt{6}W\right), W = \frac{S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{S^3}, \tilde{S} = \sqrt{S_{ij}S_{ij}}, S_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right) \tag{3.24}$$

เราจะเห็นว่าค่า C_μ เป็นฟังก์ชันของความเครียดและอัตราการหมุน, ความเร็วเชิงมุมของการหมุนทั้งระบบ, และสนามการไหลแบบปั่นป่วน (k และ ε) ค่า C_μ ในสมการ (3.17) สามารถครอบคลุมค่ามาตรฐาน เป็น 0.09 สำหรับ ค่าชั้นภายในของสมดุลของชั้นขอบเขต

ฎ. ค่าคงที่ในแบบจำลอง

ค่าคงที่ในแบบจำลองคือค่า C_2, σ_kและ σ_ε มีค่าดังนี้

$C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_2 = 1.9$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.2$

3.2 ทฤษฎีและข้อกำหนดที่เกี่ยวข้องใน แบบจำลอง k-ε

ในการไหลแบบปั่นป่วนจำเป็นที่จะต้องรู้ค่าของตัวแปรที่ใช้ในสมการต่างของแบบจำลองต่างๆ และยังมีข้อกำหนดในการใช้โปรแกรม Flo Wizard เพื่อให้ได้ค่าที่ต้องการ

3.2.1 การหาค่าตัวแปรของการไหลแบบปั่นป่วน

เมื่อมีการไหลเข้าสู่ขอบเขตทางเข้า, ทางออก, Far-Field ขอบเขต, โปรแกรม Flo Wizard ต้องการระบุรายละเอียดขนาดของการเคลื่อนที่ของของไหลแบบปั่นป่วน ทั้งหมดในส่วนนี้ได้อธิบายขนาดที่ต้องการสำหรับแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนจำเพาะยังมีข้อกำหนดและแนวทางที่เหมาะสมของการหาค่าการไหลเข้าขอบเขต

รายละเอียดของการใช้รูปแบบของค่าของการไหลแบบปั่นป่วน

การขยายตัวเต็มที่ของการไหลแบบปั่นป่วนที่ของไหลทางเข้าขอบเขตเป็นตัวอย่างที่มีส่วนสำคัญซึ่งเราจะต้องทำการเปลี่ยนแปลงขนาดของการไหลแบบปั่นป่วนในอุดมคติโดยสร้าง รูปแบบของขอบเขตจากการทดลองหรือที่ได้ตั้งขึ้นไว้. ถ้าเรามีการวิเคราะห์ลักษณะของข้อมูลโดยข้อมูลค่อนข้างจะเป็นกระจาย, คุณสามารถวิเคราะห์ลักษณะของแต่ละจุดและทำการสร้างแฟ้มข้อมูลขอบเขตหรือสร้างรูปแบบและข้อกำหนดข้อมูลที่ทางเข้าขอบเขต

เราสามารถประดิษฐ์รูปแบบของข้อมูลตามคุณลักษณะข้างล่างนี้

- แบบจำลอง Spalart-Allmaras : เลือกความหนืดของการไหลแบบปั่นป่วนหรืออัตราความ หนืดของการไหลปั่นป่วนในรายละเอียดวิธีการในรายชื่อของการไหลแบบปั่นป่วนที่เกิดการ

drop-down และเลือกข้อมูลที่เหมาะสมโดยโปรแกรม Flo Wizard นี้จะคำนวณค่าขอบเขตที่เหมาะสมสำหรับการเปลี่ยนแปลง ค่าความหนืดของการไหลแบบปั่นป่วน ($\tilde{\upsilon}$)โดยรวม μ_t/μ ด้วย ค่าที่เหมาะสมของความหนาแน่นและความหนืดของโมเลกุล

- แบบจำลอง k-ε : เลือก k และ ε ในรายชื่อของการไหลแบบปั่นป่วนที่เกิดการ drop-down ต่อไปจนถึงเลือกชื่อข้อมูลที่เหมาะสมในรายชื่อ drop-down ต่อไปเป็นพลังงานจลน์ของการไหลแบบปั่นป่วนและอัตราการขยายตัวของการไหลแบบปั่นป่วน

- แบบจำลอง k - ω: เลือกค่า k และ ω ในรายชื่อของการไหลแบบปั่นป่วนที่เกิดการ drop-down ต่อไปจนถึงเลือกชื่อข้อมูลที่เหมาะสมในรายชื่อ drop-down ต่อไปเป็นพลังงานจลน์ของการไหลแบบปั่นป่วนและอัตราการขยายตัวของการไหลแบบปั่นป่วน

- แบบจำลอง Reynolds stress : เลือกค่า k และ ε ในรายชื่อของการไหลแบบปั่นป่วนที่เกิดการ drop-down ต่อไปจนถึงเลือกชื่อข้อมูลที่เหมาะสมในรายชื่อ drop-down ต่อไปเป็นพลังงานจลน์ของการไหลแบบปั่นป่วนและอัตราการขยายตัวของการไหลแบบปั่นป่วน เลือก Reynolds stress ส่วนประกอบในรายละเอียดวิธีการของ Reynolds stressที่เกิดการ drop-down และเลือกชื่อข้อมูลที่เหมาะสมในรายชื่อ drop-down ต่อไปจนถึงส่วนประกอบของแต่ละจุด

ฎ. รูปแบบรายละเอียดของปริมาณของการไหลแบบปั่นป่วน

ในบางตำแหน่ง, ค่าของขนาดของการไหลแบบปั่นป่วนที่เกิดขึ้นที่ทางเข้าขอบเขตมีความเหมาะสมและสม่ำเสมอ ตัวอย่างเช่น ของไหลที่กำลังไหลเข้าไปในท่อลม, ขอบเขต Far-Field, หรือแม้แต่การขยายตัวเต็มที่ของการไหลของท่อกลมโดยที่ไม่รู้ค่าของขนาดของการไหลแบบปั่นป่วน

ในการไหลแบบปั่นป่วนมาก, ระดับของการปั่นป่วนที่สูงทำให้เกิด Shear Layer ภายในที่ไหลเข้าไปในขอบเขต, ทำให้ไม่สามารถรู้ความสัมพันธ์ของผลที่คำนวณได้ แต่กระนั้น, คำแนะนำอาจทำให้เราแน่ใจในส่วนของค่าขอบเขตแต่ด้วยในความเป็นจริงลักษณะที่ไม่เป็นทางกายภาพและสิ่งแปลกปลอมจะทำให้เกิดปัญหาในการสู่เข้าของข้อมูลในการคำนวณ, ทั้งหมดนี้คือรายละเอียดจริงของการไหลภายนอกลักษณะที่ไม่เป็นทางกายภาพ มีความเป็นไปได้สูง ค่าประสิทธิภาพของความหนืดใน Free –Steam สามารถทำให้เกิดชั้นของswampในชั้นขอบเขตได้

ฐ. ความรุนแรงของการไหลแบบปั่นป่วน

การเพิ่มขึ้นของการไหลแบบปั่นป่วน(I) กำหนดให้เป็นอัตราส่วนของ root-mean-square ของความเร็วแปรปรวน (U') และความเร็วของการไหลเฉลี่ย (U_{avg})

ถ้าความหนาแน่นของการไหลแบบปั่นป่วนที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่า 1% ให้พิจารณาเป็นค่าที่น้อยมากและหากความหนาแน่นของของไหลแบบปั่นป่วนมีค่ามากกว่า 10 % ให้พิจารณาว่าเป็นค่าที่สูง ในทางอุดมคติ, เราจะสามารถประมาณค่าของความหนาแน่นของการไหลแบบปั่นป่วนที่ทางขาเข้าขอบเขตจากภายนอก, ข้อมูลการวัด, อย่างเช่น ถ้าคุณกำลังทดลองจำลองอุโมงค์ลม, พฤติกรรมของความหนาแน่นของการไหลแบบปั่นป่วนของ Free-steam ของอุโมงค์จะเป็นประโยชน์ในการทดลอง, ในปัจจุบันค่าความปั่นป่วนของอุโมงค์ลมลดต่ำลงมาก, ค่าความหนาแน่นของการไหลแบบปั่นป่วนของ Free-steam อาจจะต่ำกว่า 0.05 %

สำหรับการไหลภายนอก, ความหนาแน่นของการไหลแบบปั่นป่วนที่ทางขาเข้าคือ ขึ้นอยู่กับผลรวมของ up – steam ที่เกิดขึ้นตามหลักความเป็นจริงของการไหล ถ้าการไหลของ up – steam อยู่ภายใต้การขยายตัวและไม่ถูกรบกวน, ก็สามารถให้เป็นค่าความหนาแน่นของการไหลแบบปั่นป่วนต่ำได้ ถ้าการไหลเกิดการขยายตัวเต็มที่, ความหนาแน่นของการไหลแบบปั่นป่วนอาจจะสูงขึ้น 2-3 % ความหนาแน่นของการไหลแบบปั่นป่วนที่ขยายตัวเต็มที่ที่จุดศูนย์กลางของท่อสามารถประมาณได้จากความสัมพันธ์ที่ตั้งขึ้นไว้สำหรับการไหลในท่อ

$$I \equiv \frac{u'}{u_{avg}} = 0.16\left(\mathrm{Re}_{DH}\right)^{-1/8} \tag{3.25}$$

โดยที่ค่า Reynolds number เท่ากับ 50,000, สำหรับตัวอย่าง, ความหนาแน่นของการไหลแบบปั่นป่วนเป็น 4% จึงจะสามารถใช้สูตรข้างต้นนั้นได้

ฑ. ค่าความยาวและค่าเส้นผ่าศูนย์กลางชลศาสตร์ของการไหลแบบปั่นป่วน

ค่าความยาวของการไหลแบบปั่นป่วน (l) คือขนาดทางกายภาพที่เกี่ยวข้องกับขนาดการบรรจุพลังงานการไหลแบบปั่นป่วนที่มีการขยายตัวเต็มที่ของการไหลในท่อ, ขนาดทางกายภาพของท่อคือ

$$l = 0.07L \tag{3.26}$$

โดยที่ L เป็นขนาดของท่อ ค่าปรับแก้โดยพื้นฐานเท่ากับ 0.07 โดยเป็นค่าสูงสุดของความยาวผสมในขณะที่การไหลแบบปั่นป่วนมีการขยายตัวเต็มที่ในท่อ, โดย L คือ เส้นผ่าน

, ในส่วนของพื้นที่หน้าตัดที่ไม่ใช่วงกลม, เราสามารถใช้ค่า L เป็นค่าเส้นผ่าศูนย์กลางชลศาสตร์ได้

ถ้าความยาวมีลักษณะที่ผิดปกติทำให้เกิดอุปสรรคในการไหลแบบปั่นป่วน เช่น แผ่นเพลต ที่มีการเจาะรู, ลักษณะความยาวที่ค่อนข้างจะเป็นอุปสรรคในการไหลแบบปั่นป่วนซึ่งมันอาจจะสังเกตได้จากความสัมพันธ์ ของสมการ (3.26) ซึ่งเกี่ยวกับขนาดทางกายภาพ (L) ไปจนถึงขนาดความยาวของการไหลแบบปั่นป่วน (l) จึงไม่จำเป็นที่จะใช้ได้ในทุกตำแหน่ง อย่างไรก็ตามมันคือการประมาณค่าของแต่ละตำแหน่ง

- สำหรับการไหลภายในที่มีการขยายตัวเต็มที่, ที่เลือกความรุนแรงและรายละเอียดวิธีการเลือกเส้นผ่าศูนย์กลางชลศาสตร์

- สำหรับการไหล Down-steam ของใบพัดที่กำลังหมุน, แผ่นเจาะรูอื่นๆ ควรเลือกความรุนแรงและรายละเอียดวิธีการเลือกเส้นผ่าศูนย์กลางชลศาสตร์และระบุลักษณะความยาวของการไหลแบบเปิดสำหรับ L ใน ตัวเลือกของเส้นผ่าศูนย์กลางชลศาสตร์

- สำหรับขอบเขตการไหลของผนังซึ่งการไหลเข้าสู่ชั้นขอบเขตการไหลแบบปั่นป่วน, ควรเลือกความรุนแรง และใช้ค่าความหนาของชั้นขอบเขต (δ_{99}) เพื่อที่จะคำนวณหาขนาดของความยาวของการไหลแบบปั่นป่วน (l) จากค่าทางเข้าสำหรับ l ในขนาดของสนามความยาวการไหลแบบปั่นป่วน

ฒ. อัตราส่วนความหนืดของการไหลแบบปั่นป่วน

อัตราส่วนความหนืดของการไหลแบบปั่นป่วน (μ_t/μ) คือสัดส่วนโดยตรงของค่าความปั่นป่วนของ Reynolds number ($\mathrm{Re}_t = k^2/\varepsilon\upsilon$) Re_t เป็นค่าที่สูง (100-1,000) ใน high-Reynolds-number, boundary layers, shear layers, และการขยายตัวเต็มที่ของการไหลในท่ออย่างไรก็ตาม, ขอบเขตของไออิสระที่ไหลภายนอก, μ_t/μ เป็นค่าที่แม่นยำต่ำมาก ตัวอย่าง, คือตัวแปรหลักของการไหลแบบปั่นป่วนคือ $1 < \mu_t/\mu < 10$ ขนาดจำเพาะในเทอมของอัตราส่วนความหนืดของการไหลแบบปั่นป่วน, เราจะสามารถเลือกอัตราส่วนความหนืดของการไหลแบบปั่นป่วน (สำหรับ Spalart-Allmaras model) หรือ ความรุมแรงและอัตราส่วนความหนืด (สำหรับแบบจำลอง k-ε, แบบจำลอง k-ω หรือ RSM)

ณ. ความสัมพันธ์สำหรับการหาค่าปริมาณการไหลแบบปั่นป่วน

เมื่อได้ค่าของการเปลี่ยนแปลงขนาดการไหลแบบปั่นป่วนจากขนาดความเหมาะสมดังเช่น μ_t/μ , I หรือ L เราจำเป็นต้องอาศัยกฎความสัมพันธ์ที่มีอยู่ให้เป็นประโยชน์, โดยส่วนใหญ่ในโปรแกรม Fluent จะแสดงให้เห็นตามที่จะเสนอต่อไป

การคาดคะเนการแก้ไขความหนืดของการไหลแบบปั่นป่วนจากความรุนแรงของการไหลแบบปั่นป่วนและสเกลความยาว

เมื่อได้แก้ไขค่าความหนืดของการไหลแบบปั่นป่วน ($\tilde{\upsilon}$) สำหรับแบบจำลองของ Spalart-Allmaras จากความรุนแรงของการไหลแบบปั่นป่วน (I) และสเกลความยาว (l) เราสามารถใช้สมการข้างล่างนี้คือ

$$\tilde{\upsilon} = \sqrt{\frac{3}{2}} u_{avg} I l \tag{3.27}$$

โดยสูตรนี้ถูกใช้ในโปรแกรม Fluent ถ้าคุณเลือกความรุนแรง, รายละเอียดวิธีการเลือกเส้นผ่าศูนย์กลางชลศาสตร์แบบจำลองของ Spalart-Allmaras เป็นค่าที่ได้จากสมการ (3.26)

ด. การคาดคะเนพลังงานจลน์ของการไหลแบบปั่นป่วนจากความรุนแรงของการไหลแบบปั่นป่วน

ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลของการไหลแบบปั่นป่วน (k) และความรุนแรงของการไหลแบบปั่นป่วน (I) คือ

$$k = \frac{3}{2}\left(u_{avg} I\right)^2 \tag{3.28}$$

โดยที่ U_{avg} คือความเร็วการไหลเฉลี่ย

ความสัมพันธ์นี้ถูกใช้ในโปรแกรม Flo Wizard เมื่อไรก็ตามที่ ความรุนแรงและเส้นผ่าศูนย์กลางชลศาสตร์, ความรุนแรงและสเกลของความยาว หรือ ความรุนแรงและอัตราส่วนของความหนืดเป็นการใช้แทนเฉพาะค่าที่ใช้ในแบบจำลอง k - ω

น. การคาดคะเนอัตราการขยายตัวจากสเกลความยาว

ถ้าเรารู้สเกลของความยาว(l) เราจะสามารถหาค่า ε จากความสัมพันธ์

$$\varepsilon = C_{\mu}^{\ 3/4} \frac{k^{3/2}}{l} \tag{3.29}$$

โดย C_{μ} เป็นค่าจำเพาะคงที่ในแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน (ประมาณ 0.09) การหาค่า l พิจารณาจากทฤษฎีก่อนหน้านี้

ความสัมพันธ์ถูกใช้ในโปรแกรม Flo Wizard เมื่อไหร่ก็ตามที่ค่าความรุนแรงและสัดส่วนความหนืดถูกใช้แทนค่าจำเพาะในแบบจำลอง k และε

บ. การคาดคะเนอัตราการขยายตัวสำหรับการถดถอยของการไหลแบบปั่นป่วน

ถ้าเรากำลังสร้างแบบจำลองอุโมงค์ลมซึ่งมีภูเขาในการทดสอบ ส่วนของ Down-steams ของกริด หรือ wire mesh screens, คุณสามารถเลือกค่าของ ε จาก

$$\varepsilon \approx \frac{\Delta k U_{\infty}}{L_{\infty}} \tag{3.30}$$

โดยที่ Δk คือการประมาณการถดถอยของค่า k โดยของไหลที่มีการไหลข้ามขอบเขต(กล่าวคือประมาณ 10 % ของค่า k ที่ขาเข้า) U_{∞} คือค่าความเร็วของไออิสระ, และ L_{∞} คือความยาวของการไหลของ Steamwise จากสมการ7.2-7 เป็นการประมาณเชิงเส้นตามกฎของกำลังงาน ในทางปฏิบัติค่าReynolds numbers จะมีค่าสูงและเป็นการไหลแบบปั่นป่วนและ isentropic มันมีพื้นฐานเป็น

$$U \partial k / \partial_x = -\varepsilon \tag{3.31}$$

สมการแม่นตรงสำหรับ k สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน ถ้าเราใช้วิธีนี้ในการประมาณค่า ε เราต้องตรวจสอบผลที่ได้ของ สัดส่วนความหนืด μ_t/μ ค่าของมันควรไม่มาก, ใช้สมการ (3.30)

แม้ว่าวิธีการนี้จะไม่ถูกใช้ในโปรแกรม Flo Wizard เราสามารถใช้มันจากค่าคงที่ของ ไออิสระค่าของ εนั้นเราสามารถใช้ได้โดยตรงโดยเลือก k และε ในวิธีการเลือกรายละเอียดของการไหลแบบปั่นป่วนแบบ drop-down เราสามารถหาค่า k และ l ของแต่ละตำแหน่งได้จากสมการ (3.28)

ป. การคาดคะเนอัตราการขยายแบบจำเพาะจากสเกลความยาว

ถ้าเรารู้สเกลความยาวของการไหลแบบปั่นป่วน (l) เราจะหาค่า ω จากความสัมพันธ์

$$\omega = \frac{k^{1/2}}{C^{1/4}{}_{\mu} l} \tag{3.32}$$

โดยที่ C_μ คือ ค่าคงที่จำเพาะในแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน (ประมาณ 0.09) การหาค่า l พิจารณาจากทฤษฎีที่กล่าวมาแล้ว

ผ. การคาดคะเนอัตราการขยายแบบจำเพาะจากสัดส่วนความหนืดของการไหลแบบปั่นป่วน

ค่าของ ω สามารถหาได้จากสัดส่วนความหนืดของการไหลแบบปั่นป่วน μ_t/μ และ k ใช้ความสัมพันธ์ตามสมการข้างล่างนี้

$$\omega = \rho \frac{k}{\mu}\left(\frac{\mu_t}{\mu}\right)^{-1} \tag{3.33}$$

ฝ. การคาดคะเนส่วนประกอบของ Reynolds Stress จากพลังงานจลน์ของการไหลแบบปั่นป่วน

เมื่อมีการใช้ RSM ถ้าเราไม่เจาะจงใช้ค่าของ Reynolds-Stress ที่แน่นอน ที่ทางเข้าการใช้ ส่วนประกอบของ Reynolds-Stress คือทางเลือกหนึ่งในวิธีการเลือกรายละเอียดของ Reynolds-Stress แบบ drop-down, และการประมาณค่าเหล่านี้หาจากค่าจำเพาะของ โดยสมมติให้เป็นการไหลแบบปั่นป่วนแบบ isotropic

$$\overline{u_i' u_j'} = 0$$

และ

$$\overline{u'_\alpha}\,\overline{u'_\alpha} = \frac{2}{3}k \tag{3.34}$$

ในโปรแกรม Flo Wizard จะใช้วิธีนี้ถ้าเราเลือกความรุนแรงของการไหลแบบปั่นป่วนใน วิธีการเลือกรายละเอียดของ Reynolds-Stress แบบ drop-down

3.2.2 Boussinesq Approach vs. Reynolds Stress Transport Models

การจำลองว่าค่าเฉลี่ยที่เข้าใกล้การไหลแบบปั่นป่วนที่ต้องการนั้นแสดงในสมการ Reynolds stress (3.34) เป็นการจำลองตามความเหมาะสม การใช้สมมติฐาน Bousinesq ซึ่งเกี่ยวข้องกับ Reynolds stress ไปจนถึงการเปลี่ยนแปลงของความเร็วเฉลี่ย

$$-\rho\bar{u}'_i\bar{u}'_j = \mu_t\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) - \frac{2}{3}\left(\rho k + \mu_t\frac{\partial u_i}{\partial x_i}\right)\delta_{ij} \tag{3.35}$$

โดยสมมติฐาน Bousinesq ถูกใช้ในแบบจำลอง Sparat – Allmaras, แบบจำลอง k-ε และ k-ω การคำนวณความหนืดเนื่องจากการไหลแบบปั่นป่วน มีส่วนร่วมในการคำนวณความเสียหาย , μ_t ในกรณีของแบบจำลองของ Sparat – Allmaras, การแก้ไขมีเพียงวิธีเดียวคือ เพิ่มสมการการเคลื่อนที่(แสดงให้เห็นความหนืดเนื่องจากการหลแบบปั่นป่วน)ในกรณีของแบบจำลอง k-ε และ k-ω จะทำการแก้ไขโดยเพิ่มสมการการเคลื่อนที่ที่เป็น 2 สมการ สำหรับพลังงานจลน์เนื่องจากการไหลแบบปั่นป่วน(k) อัตราการกระจายเนื่องจากการไหลแบบปั่นป่วนของแต่ละส่วน, k-ε หรืออัตราการกระจายตัวจำเพาะ(ω) และการคำนวณหาฟังก์ชันของ k-ε ข้อเสียของสมมติฐานของ Bousinesq คือการแนะนำให้สมมติค่า μ_t เป็น Isentropic Scalar, ซึ่งเป็นไปไม่ได้ในความเป็นจริง.

ทางเลือกที่จะแทนค่าให้ได้ค่าจริงได้, เป็นการแก้ไขสมการการเคลื่อนที่ของแต่ละเทอมในสมการ Reynolds stress tensor โดยแสดงให้เห็นใน RSM การเพิ่มขนาดการหาสมการที่ต้องการทั้งหมดนี้ ค่าเฉลี่ยแล้วหากเพิ่มสมการการเคลื่อนที่ 5 สมการเมื่อต้องการการไหลแบบ 2 มิติ และอาจจะเพิ่มสมการการเคลื่อนที่เป็น 7 สมการ เพื่อแก้ปัญหาในการไหลใน 3 มิติ

ในกรณีอื่นๆ, พื้นฐานของแบบจำลองบนสมมติฐานของ Bousinesq ในทางปฏิบัติจะมีผลดีพอสมควร, และไม่จำเป็นต้องเพิ่มการคำนวณความสูญเสียตามแบบจำลอง Reynold stress อย่างไรก็ดี RSM มีความชัดเจนในการบ่งบอกตำแหน่งใน anisotropy ของการไหลแบบปั่นป่วนซึ่งมีผลต่อการไหลเฉลี่ย รวมทั้งมีการไหลหมุนวนสูงขึ้นและการไหลแบบ stress-driven secondary

3.2.3 การทำแบบจำลองแบบปั่นป่วนในแบบจำลอง k-ε

ในส่วนของ G_k ที่กำลังจะกล่าวถึงเป็นผลของพลังงานจลจากการปั่นป่วน เป็นการจำลองเช่นเดียวกันกับแบบจำลองมาตรฐาน, แบบจำลอง RNG และแบบจำลอง realizable k-ε จากสมการแม่นตรง ในส่วนนี้อาจจะกำหนดการเปลี่ยนแปลงของค่า k เป็น

$$G_k = -\rho \overline{u_i' u_j'} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \tag{3.36}$$

การหาค่า G_k โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงวิธีการด้วยสมมติฐานของ Boussinesq

$$G_k = \mu_t S^2 \tag{3.37}$$

โดยที่ S เป็นค่า modulus of the mean rate-of-stain tensor กำหนดให้

$$S \equiv \sqrt{2S_{ij}} Sij \tag{3.38}$$

เมื่อใช้ค่า High- Reynolds k-ε , μ_{eff} คือการใช้ในตำแหน่งของ μ_t ในสมการ

3.2.4 ผลกระทบของแรงลอยตัวต่อการไหลปั่นป่วนในแบบจำลอง k-ε

เมื่อสภาพของแรงโน้มถ่วงและอุณหภูมิลดลงพร้อมกันในแบบจำลอง k-ε เป็นการอธิบายถึงการเกิดค่า k และแรงลอยตัวในสมการ (3.1)(3.4) และ (3.15) และผลของ ε ในสมการ (3.2) (3.5)และ (3.16) สอดคล้องกับผลของสมการของ k

การเกิดความปั่นป่วนลอยตัวถูกกำหนดโดย

$$G_b = \beta \frac{\mu_t}{\Pr_t} \frac{\partial T}{\partial X_i} \tag{3.39}$$

โดยที่ $\Pr_t$ คือค่าพลังงานของ Prandtl number ของการไหลปั่นป่วน และค่า g_i คือส่วนประกอบของเวคเตอร์ (i) ในทิศทางของการดึงดูดสำหรับ แบบจำลอง มาตรฐาน และ แบบ realizable k-ε_t ค่าของ Pr เป็น 0.85 ในกรณีของแบบจำลอง RNG k-ε จะเท่ากับ β โดยที่ α หาได้จากสมการ (3.9) แต่ด้วย $\alpha_0 = 1/\Pr = k/\mu c_p$ โดยกำหนดให้ เป็นสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อน

$$\beta = -\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_P \tag{3.40}$$

สำหรับก๊าซอุดมคติ สมการ(3.3) ลดลงมาเป็น

$$G_b = -g_i \frac{\mu_t}{\rho \Pr_t} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \tag{3.41}$$

มันยังพบเห็นจากการเปลี่ยนแปลงจากสมการ k (3.1) (3.4) (3.15) พลังงานจลน์เนื่องจากการไหลแบบปั่นป่วนนั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ($G_b > 0$) การก่อตัวเป็นชั้นๆทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง สำหรับการก่อตัวเป็นชั้นๆไม่มีการเปลี่ยนแปลง แรงลอยตัวมีแนวโน้มจะลดลงการไหลแบบปั่นป่วน ($G_b < 0$) ในโปรแกรม Flo Wizard ผลกระทบของแรงลอยตัวทำให้เกิดค่า k เสมอ เมื่อสนามแรงโน้มถ่วงและอุณหภูมิเกิดการเปลี่ยนแปลงไม่เป็น ศูนย์ทั้งคู่

ขณะเดียวกันเพื่อให้เกิดความเข้าใจ ความสัมพันธ์ของผลกระทบของแรงลอยตัวที่ทำให้เกิดค่า k โดยที่ผลกระทบของ ε มีน้อยมากจนเห็นได้ชัด ในโปรแกรม Flo Wizard ผลกระทบของแรงลอยตัวเนื่องจาก ε จึงไม่มีผล โดยปรับค่า G_b ในสมการสำหรับ ε (3.2, 3.16) ให้เป็นศูนย์

อย่างไรก็ดี เราสามารถรวมผลกระทบของแรงลอยตัวเนื่องจาก ε ไว้ใน Viscous Model panel ในกรณีนี้ค่าของ G_b แสดงโดยสมการ (3.25) คือใช้ในการเปลี่ยนแปลงสมการ ε (3.2, หรือ 3.16) ในระดับนี้ ε คือผลกระทบโดยแรงลอยตัวแทนด้วยค่าคงที่ $C_{3\varepsilon}$ ในโปรแกรม Flo Wizard ค่า $C_{3\varepsilon}$ ไม่ใช่ค่า $C_{3\varepsilon}$ จำเพาะแต่เป็นการแทนค่าลงไปในความสัมพันธ์ ดังนี้

$$C_{3\varepsilon} = \tanh\left|\frac{\upsilon}{u}\right| \tag{3.42}$$

โดยที่ υ คือ ส่วนประกอบของเวคเตอร์ การดึงดูดของความเร็วในการไหลในแนวขนานและ

u คือ ส่วนประกอบของเวคเตอร์ การดึงดูดของความเร็วในการไหลในแนวตั้งฉาก

$C_{3\varepsilon}$ จะกลับมาเป็น 1 สำหรับ Buoyant Sheer ที่มีการไหลในทิศทางเดียวกันกับทิศทางของแรงโน้มถ่วง

$C_{3\varepsilon}$ จะกลับมาเป็น 0 สำหรับ Buoyant Sheer ที่มีการไหลตั้งฉากกับเวคเตอร์ของแรงดึงดูด

3.2.5 ผลกระทบของการไหลแบบปั่นป่วนของของเหลวกดอัดได้ในแบบจำลอง k -ε

สำหรับการไหลที่มีค่า Mach-number ที่สูง ผลกระทบที่เกิดจากการไหลแบบปั่นป่วนของของไหลกดอัดได้ ดังนั้นจึงกล่าวถึง "การกระจายของการขยายตัว" ซึ่งปกติแล้วมักจะไม่ให้ความสนใจมากนักในการจำลองการไหลของของไหลแบบกดอัดไม่ได้ หากไม่สนใจการกระจายของการขยายตัว เราจะไม่สามารถทำนายได้เลย สังเกตการทดลองของอัตราการกระจายตัวขณะที่ Mach-number มีค่าเพิ่มมากขึ้น

สำหรับของไหลผสมแบบกดอัดได้ และ Free Shear Layer อื่นๆ. ผลกระทบทั้งหมดนี้อธิบายได้ในแบบจำลอง k -ε ในโปรแกรม Flo Wizard ในส่วนของการกระจายของการขยายตัว, Y_M คือการรวมไว้ในสมการ k ซึ่งในเทอมของแบบจำลองนี้ได้ถูกเสนอโดย Sakar

$$Y_M = 2\rho\varepsilon M_t^{\,2} \tag{3.43}$$

โดยที่ M_t คือ Mach-number ของการไหลแบบปั่นป่วน กำหนดเป็น

$$M_t = \sqrt{\frac{k}{a^2}} \tag{3.44}$$

โดยที่ a $(\equiv \sqrt{\gamma RT})$ คือค่าความเร็วของเสียง

ผลกระทบของของเหลวกดอัดได้มีการเปลี่ยนแปลงเสมอเมื่อใช้การกดอัดตามกฎก๊าซอุดมคติ

3.2.6 การใช้ขอบเขตสภาพของการไหล

โปรแกรม Flo Wizard ได้มีข้อกำหนด 10 แบบ ของชนิดของขอบเขตไว้สำหรับรายละเอียดของการไหลเข้า-ออก คือ ความเร็วของขาเข้า, ความดันขาออก, การไหลของมวลของขา

เข้า, ความดันขาออก, ความดันจากจุดอื่น, การไหลออก, รูอากาศ, พัดลมดูด, รูระบายอากาศออก, พัดลมระบาย

การเลือกสภาวะขอบเขตทางเข้าและออกในโปรแกรม Flo Wizard มีรายละเอียด ดังนี้

1. สภาวะของความเร็วที่ขาเข้าสู่ขอบเขต กำหนดให้ความเร็วและคุณสมบัติของการไหลเข้าสู่ขอบเขตเป็นค่าสเกลลาร์

2. สภาวะของความดันที่ขาเข้าสู่ขอบเขต กำหนดให้ความดันรวมและค่าความดันอื่นๆที่ไหลเข้าไปในขอบเขตเป็นขนาดสเกลลาร์

3. สภาวะของมวลที่ไหลเข้าสู่ขอบเขตไปจนถึงอัตราการไหลของมวลที่ทางเข้ากำหนดให้เป็นของไหลแบบกดอัดได้จึงไม่จำเป็นที่จะต้องใช้ของเหลวแบบกดอัดไม่ได้ที่ทางเข้า เพราะว่าเมื่อความหนาแน่นคงที่, มวลการไหลของสภาวะของความเร็วที่ขาเข้าสู่ขอบเขตจะไม่เปลี่ยนแปลง

4. สภาวะของความดันที่ขาออกจากขอบเขต กำหนดให้เป็นความดันสถิตที่ของไหลทางออก บ่อยครั้งที่ต้องใช้สภาวะของความดันที่ขาออกขอบเขตแทนสภาวะของการไหลออกทำให้เกิดอัตราการไหลเข้าหากันเมื่อเกิดการไหลย้อนกลับซึ่งเกิดขึ้นในระหว่างการทำซ้ำ

5. สภาวะขอบเขตของสนามความดันเป็นการจำลองแบบไออิสระ กดอัดได้ที่การไหลไม่สิ้นสุด ค่า Mach number ของอิสระและสภาวะสถิตจำเพาะ ขอบเขตที่กล่าวมานี้ถูกนำเอามาใช้สำหรับของเหลวกดอัดได้เท่านั้น

6. สภาวะของการไหลออกขอบเขตเป็นการใช้แบบจำลองการไหลออกโดยที่รู้รายละเอียดของความเร็วในการไหลและความดัน แต่ไม่รู้ลำดับวิธีของปัญหาของการไหล, ทั้งหมดนี้จึงเป็นสิ่งที่เหมาะสมโดยที่สภาวะของการไหลทางออกเป็นระบบปิดและเกิดการขยายตัวเต็มที่, โดยสมมติให้สภาวะของการไหลออกจากขอบเขตเป็นศูนย์โดยทั่วไปการไหลจะลดลงยกเว้นความดัน สิ่งเหล่านี้เป็นสิ่งที่ไม่เหมาะสมสำหรับการคำนวณการไหลแบบกดอัดได้

7. สภาวะขอบเขตของทางเข้ารูอากาศเป็นแบบจำลองที่ต้องใช้ สัมประสิทธิ์ การสูญเสียที่ทางเข้ารูอากาศ, ทิศทางการไหลผลรวมของความดัน – อุณหภูมิของอากาศที่ล้อมรอบ (ทางเข้า)

8. สภาวะขอบเขตของพัดลมดูดเป็นแบบจำลองพัดลมดูดภายนอกด้วยค่าความดันปั่นป่วนจำเพาะ, ทิศทางการไหล, ผลรวมของความดัน-อุณหภูมิของอากาศที่ล้อมรอบ

9. สภาวะขอบเขตของทางออกรูอากาศเป็นแบบจำลองที่ต้องใช้สัมประสิทธิ์การสูญเสียทางรูอากาศและผลรวมความดันสถิตและอุณหภูมิ