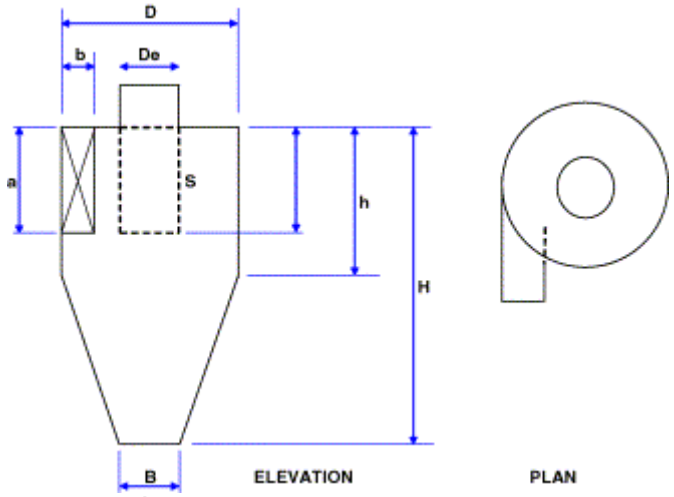
บทที่ 3
ทฤษฎีไซโคลนและการวิเคราะห์ CFD

ในบทนี้ประกอบด้วย 2 เนื้อหาหลัก ๆ นั่นก็คือแบบจำลองไซโคลน ซึ่งเป็นการอธิบายถึงแบบจำลองไซโคลนที่นำมาใช้ว่าประกอบด้วยอะไรบ้างโดยขนาดต่างๆที่ใช้ได้อ้างอิงถึงการออกแบบของ Stairmand high Efficiency และ Bohnet ตลอดจนทฤษฎีค่าความดันตกคร่อมเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบผลจากการจำลองและค่าจากการทดลอง[9] และอีกเนื้อหาหนึ่งก็คือการวิเคราะห์ CFD เป็นการอธิบายขั้นตอนการใช้ตลอดจนกระบวนการคิดวิเคราะห์ของ CFD

3.1 แบบจำลองไซโคลน

รูปร่างของไซโคลนมีมากมายหลายชนิด แต่ชนิดของไซโคลนที่จะนำมาเสนอนั้นเป็นไซโคลนชนิด Tangential cyclone configuration ที่ถูกใช้อยู่ในโรงงานอุตสาหกรรม ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 Tangential cyclone configuration

ในการออกแบบไซโคลนโดยปกติไซโคลนจะประกอบด้วย 4 ส่วนหลักคือ ทางเข้าห้องแยก ห้องเก็บฝุ่นและทางออก ทางเข้าเป็นส่วนที่ทำให้เกิดแนวเส้นสัมผัสกับห้องแยก เพื่อให้เกิดการหมุนวนภายในห้องแยก ทำให้เกิดการแยกของอนุภาคที่เป็นของแข็งออกจากอากาศที่นำเข้ามาภายในไซโคลน

ในการศึกษานี้จะเกี่ยวข้องกับกรณีมาตรฐานของการไหลแบบย้อยกลับของไซโคลนซึ่งมีทางเข้าเป็นแบบแนวเส้นสัมผัส และขนาดของไซโคลนในการจำลองลักษณะการไหลวนแบบปั่นป่วนนั้นได้แสดงดัง ตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 Cyclone geometry used in this simulation

Geometry	a/D	b/D	D_e/D	S/D	h/D	H/D	B/D	D
Stairmand High efficiency	0.5	0.2	0.5	0.5	1.5	4	0.375	0.305
Bohnet	0.533	0.133	0.333	0.733	0.695	2.58	0.333	0.15

ซึ่งรูปร่างของไซโคลนที่ออกแบบในตารางที่ 3.1 นี้เป็นไปตามการออกแบบของ Stairmand High Efficiency และ Bohnet [4]

3.2 ทฤษฎีค่าความความดันตกคร่อม

ค่าของความดันตกคร่อมภายในไซโคลน เป็นตัวแปรที่สำคัญตัวแปรหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงเมื่อนำมาพิจารณาถึงสมรรถนะของของไซโคลน ซึ่งค่าของพลังงานที่ต้องใช้ในการดำเนินการของไซโคลนนั้นก็เป็นอีกตัวแปรที่ต้องพิจารณาเช่นเดียวกับค่าความตกคร่อมภายในไซโคลน เมื่อมีการนำเหตุผลทางเศรษฐศาสตร์มาเกี่ยวข้องกับค่าพลังงานที่ใช้ในการดำเนินงานของไซโคลนเพื่อให้ไซโคลนทำงานตามสภาวะที่ต้องการ

ค่าของความดันตกคร่อมภายในไซโคลน ประกอบด้วยการสูญเสียที่ทางเข้า ทางออก และภายในตัวไซโคลน ส่วนที่ทำให้เกิดค่าของความดันตกคร่อมภายในไซโคลนประมาณ 80 % เกิดที่ภายในตัวไซโคลน เนื่องมาจาก Energy Dissipation โดย Viscous Stress ของการหมุนวนแบบปั่นป่วนและอีก 20 % ของค่าของความดันตกคร่อมที่เหลือนั้นเกิดการสาเหตุของการสัมผัสกันของการไหลของของไหลที่ทางออก, การขยายตัวที่ทางเข้าและความเสียดทานของของไหลที่พื้นผิวผนังของไซโคลน

ในการศึกษานี้ ได้มีการนำทฤษฎีทางการทดลอง ซึ่งมีอยู่ 4 ทฤษฎี มาใช้ในการค่าของความดันตกคร่อมภายในไซโคลนได้แก่ ทฤษฎีของ Shepherd และLapple, Casal และ Martinez, Dirgo, และ Coker [4] ซึ่งใน 4 ทฤษฎีนี้ค่าของความดันตกคร่อมภายในไซโคลนได้มีการสมมุติขึ้นให้มีค่าเท่ากับ Static Pressure Drop หรือ เป็นฟังก์ชันกับขนาดของไซโคลนและสัมประสิทธิ์ของความดันตกคร่อม (Pressure Drop Coefficient) ในกรณีทั่วๆไปค่าของความดันตกคร่อม

ภายในไซโคลนนั้นมีความสัมพันธ์กับเฮดความเร็ว (Velocity Head) และสามารถที่จะเขียนให้อยู่ในรูปแบบดังนี้

$$\Delta P = \alpha \frac{\rho_g v_i^2}{2} \tag{3.1}$$

ทฤษฎีของ Shepherd และ Lapple ค่าของ α ได้สมมุติเป็นค่าของStatic Pressure Drop ซึ่งกำหนดให้อยู่ในรูปแบบ

$$\alpha = 16 \frac{ab}{D_e^2} \tag{3.2}$$

ทฤษฎีของ Casal และ Martinez ค่าของ α ได้มาการการวิเคราะห์ผลทางสถิติของการทดลอง ซึ่งกำหนดให้อยู่ในรูปแบบ

$$\alpha = 11.3\left(\frac{ab}{D_e^2}\right)^2 + 3.33 \tag{3.3}$$

ทฤษฎีของ Dirgo ค่าของ α ถูกกำหนดโดยให้เป็นฟังก์ชันกับขนาดของไซโคลนซึ่งกำหนดให้อยู่ในรูปแบบ

$$\alpha = 20\left(\frac{ab}{D_e^2}\right)\left[\frac{S/D}{(H/D)(h/D)(B/D)}\right]^{1/3} \tag{3.4}$$

ทฤษฎีของ Coker กำหนดให้อยู่ในรูปแบบ

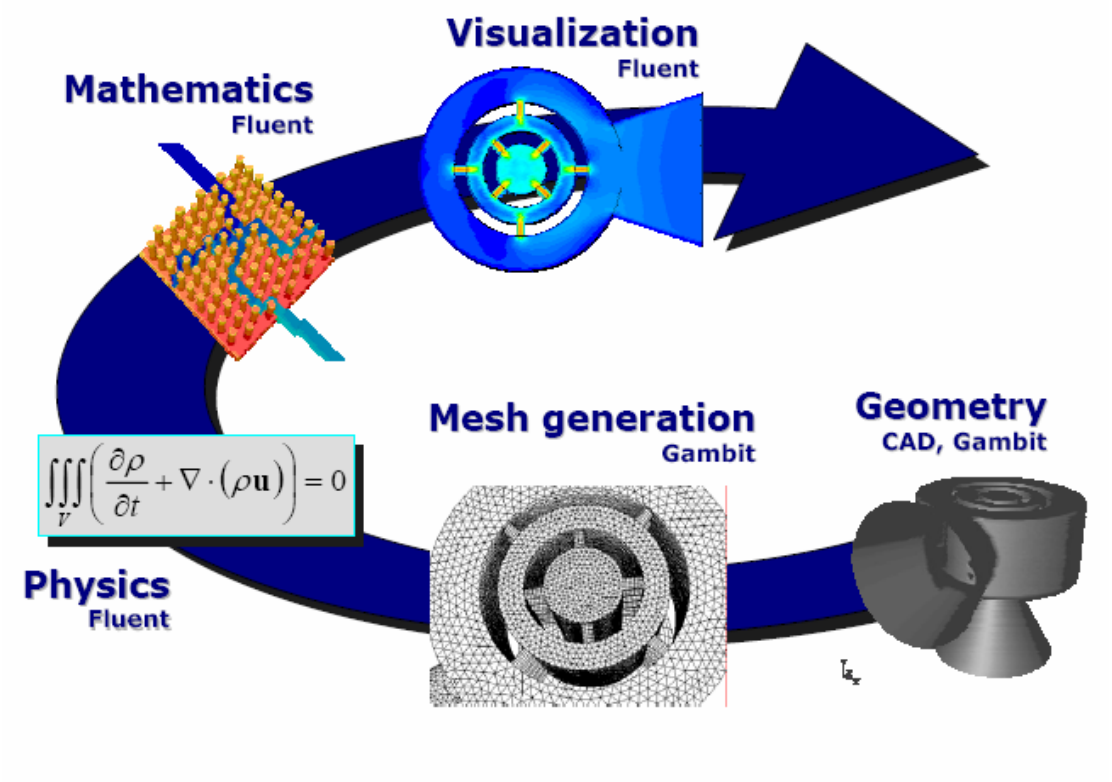
$$\alpha = 9.47 \frac{ab}{D_e^2} \tag{3.5}$$

3.3 ขั้นตอนพื้นฐานสำหรับการสร้างและ MESH รูปทรงโดยใช้โปรแกรม GAMBIT

โดยขั้นตอนมีดังนี้

1. Start GAMBIT
2. ใช้ Operation tool pad
3. สร้าง Brick และ Cylinder
4. ทำการรวม ทั้ง 2 รูปร่างเข้าด้วยกัน
5. ตรวจสอบและเพิ่มเติมรูปทรง
6. Mesh a volume
7. ตรวจสอบคุณภาพของ Mesh
8. Save และออกจาก GAMBIT

3.4 การเคราะห์ CFD



รูปที่ 3.2 แสดงความสัมพันธ์ของการวิเคราะห์ CFD และ CAD

โดยเริ่มจากการสร้าง Model ขึ้นมาจาก Cad (ในที่นี้ใช้ Gambit) ต่อจากนั้นจะเป็นการสร้าง Mesh โดยใช้ Gambit เป็นตัว Generation ซึ่งขั้นตอนนี้มีความสำคัญมากหาก Mesh ที่สร้างขึ้นมีความไม่สมบูรณ์ก็จะทำให้ผลที่ได้จาก CFD ไม่ถูกต้อง ต่อจากนั้นเป็นการตั้งค่าคุณสมบัติต่างๆและเป็นการกำหนดค่าขอบเขตต่างๆของ Model ว่ามีลักษณะเป็นเช่นไร ต้องใช้อะไรเป็นตัวกำหนด มีลักษณะการไหลแบบไหน ซึ่งเมื่อมีการกำหนดค่าต่างๆแล้ว ต่อไปก็เป็นการคำนวณผลและแสดงผล ผลที่ ได้นี้สามารถแสดงออกในรูปแบบของ Graphics และยังสามารถตรวจสอบได้ว่าผลที่ได้นั้นถูกต้องหรือไม่

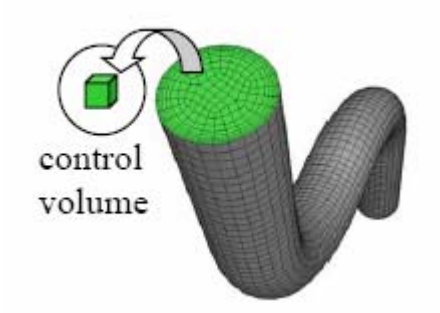
3.4.1 ความหมายของ CFD

Computation Fluid Dynamics (CFD) เป็นศาสตร์ของการทำนายการไหลของของไหล การถ่ายเทมวลและพลังงาน การเกิดปฏิกิริยาเคมี โดยการแก้ปัญหาเชิงตัวเลขของระบบสมการทางคณิตศาสตร์ เช่น กฎการอนุรักษ์มวล พลังงาน โมเมนตัม และอื่นๆ

- ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ของ CFD จะเกี่ยวข้องกับสิ่งต่างๆ ต่อไปนี้
  - แนวความคิดที่จะใช้ในการศึกษาของการออกแบบสิ่งใหม่ๆ
  - การพัฒนาผลิตภัณฑ์
  - การวิเคราะห์ปัญหา
  - การออกแบบใหม่
- สิ่งที่ได้จากการวิเคราะห์ของ CFD
  - ช่วยลดความต้องการผลจากการทดลองและจำนวนทฤษฎีที่ใช้

3.4.2 CFD และวิธีการ Finite Volume

- ปริมาตรควบคุมหรือ Cells



รูปที่ 3.3 ปริมาตรควบคุมหรือ Cells

- รูปแบบทั่วไปของ Conservation Equation
  - สำหรับ มวล โมเมนตัม พลังงาน และอื่นๆ

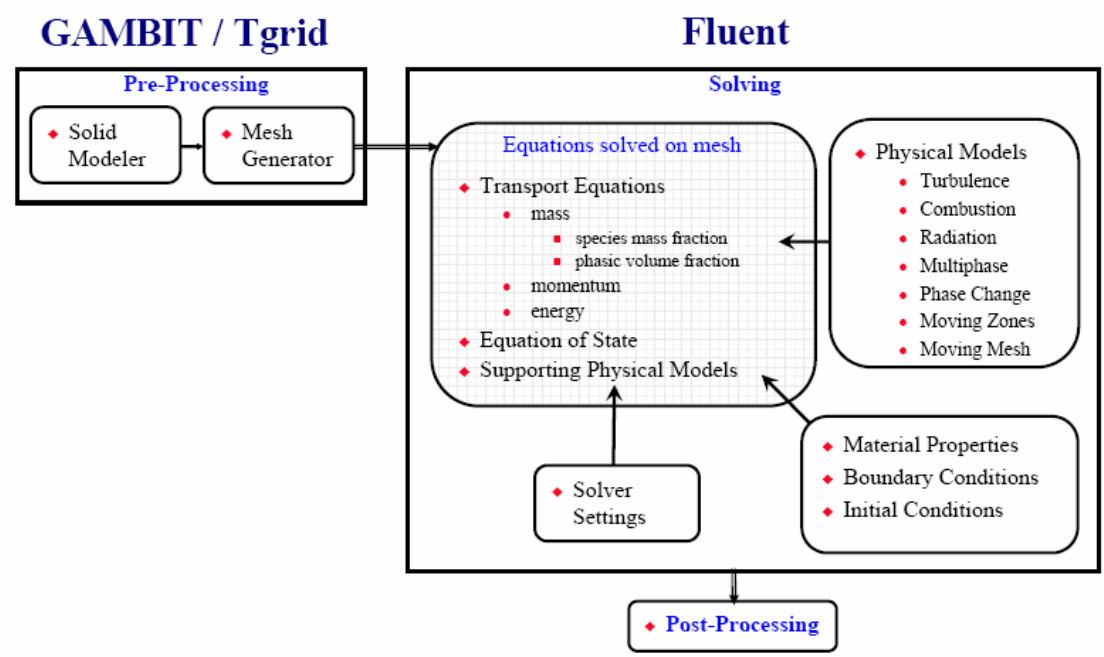
$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t}\int_V \rho\varphi dV}_{\text{unsteady}} + \underbrace{\oint_A \rho\varphi V.dA}_{\text{convection}} = \underbrace{\oint_A \Gamma\nabla\varphi.dA}_{\text{diffusion}} + \underbrace{\int_V S_\varphi dV}_{\text{generation}}$$

Egn.	φ
Continuity	1
x-mom.	u
y-mom.	v
energy	h

รูปที่ 3.4 รูปแบบทั่วไปของ Conservation Equation

- จาก Partial Differential Equations => ระบบ Algebraic Equation
- แก้ปัญหาโดยวิธีการเชิงตัวเลข

3.4.3 สิ่งที่ใช้ในการวิเคราะห์ทาง CFD



รูปที่ 3.5 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ของ CFD

สามารถแบ่งเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ทาง CFD ได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆคือกลุ่มของ GAMBIT เป็นส่วนของ Pre-Processing และกลุ่มของ FLUENT เป็นส่วนของ Solving และ Post-Processing ในกลุ่มของ GAMBIT เป็นกลุ่มเครื่องมือที่ใช้ในการออกแบบ Model และเป็น Mesh Generator เพื่อส่งไปให้ FLUENT อีกทีหนึ่ง ในกลุ่มของ FLUENT เป็นกลุ่มเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาและการแสดงผลที่ได้จากการวิเคราะห์ทาง CFD

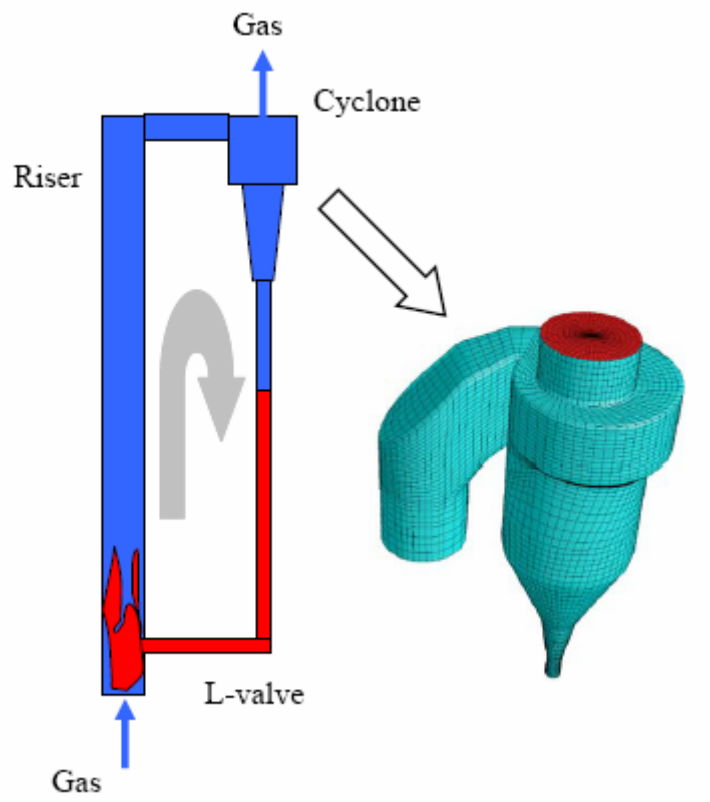
3.4.4 ขั้นตอนพื้นฐานของการวิเคราะห์ CFD

- การกำหนดปัญหาและ Pre-Processing
  1. กำหนดเป้าหมายของการออกแบบ
  2. ระบุว่าอะไรคือ Domain ของ Model
  3. ออกแบบและสร้าง Grid
- ทำการแก้ปัญหา
  4. ตั้งค่าการคำนวณเชิงตัวเลขของ Model
  5. คำนวณหาผลเฉลย

- Post-Processing

6. ตรวจสอบผลที่ได้จากการคำนวณ
7. พิจารณาแก้ไขปรับปรุงที่ Model

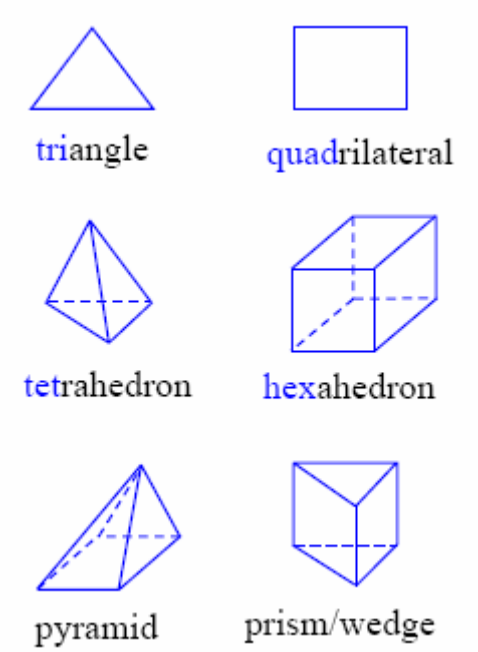
1. เป้าหมายของการออกแบบ
    - อะไรเป็นสิ่งที่ต้องการและจะมีวิธีการทำอย่างไร
        - มีอะไรบ้างที่ต้องกำหนดให้กับ Model
            - คุณสมบัติอะไรที่ต้องใส่รวมให้กับการวิเคราะห์ทาง CFD
            - สมมุติฐานอะไรที่สามารถใช้ได้เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณา
            - สมมุติฐานอะไรที่สามารถตั้งขึ้นได้
    - ต้องการความแม่นยำมากน้อยแค่ไหน
    - ต้องการความเร็วแค่ไหนในการคำนวณเพื่อให้ได้มาซึ่งคำตอบ
2. ระบุว่าอะไรคือ Domain ของ Model



รูปที่ 3.6 Cyclone Separator

- เลือกส่วนที่เป็น Domain ของปัญหา
- การคำนวณส่วนที่เป็น Domain
  - ขอบเขตของข้อมูล
  - ขอบเขตที่ต้องกำหนดเป็นชนิดไหนสามารถกำหนดได้หรือไม่
  - สามารถที่จะขยายขอบเขตของ Domain ไปเป็นจุดได้ไหมเมื่อรู้ว่ามีข้อมูลอยู่แล้ว
- สามารถที่จะประมาณค่าได้ว่า Domain เป็น 2D และมีการสมมาตรหรือไม่

3. ออกแบบและสร้าง Grid



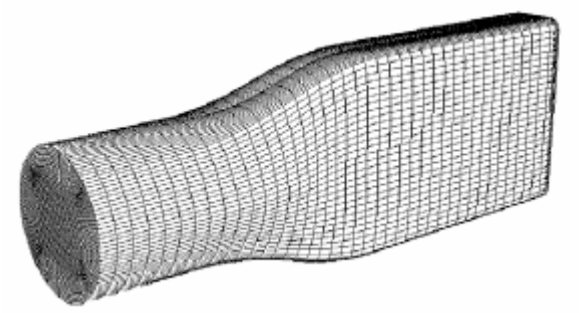
รูปที่ 3.7 รูปร่างของ Grid แบบต่างๆ

Quad/Hex Grid, Tri/Tet Grid หรือ Hybrid Grid

- ความหนาแน่นของ Grid
  - เลือกรูปร่าง Grid ที่ต้องการ
  - รูปร่างที่เลือกมีขนาดใหญ่ไปหรือไม่
  - สามารถปรับแก้ได้ไหม
- สิ่งที่ต้องการในการคำนวณ
  - มีความต้องการจำนวน Cells มากน้อยแค่ไหน

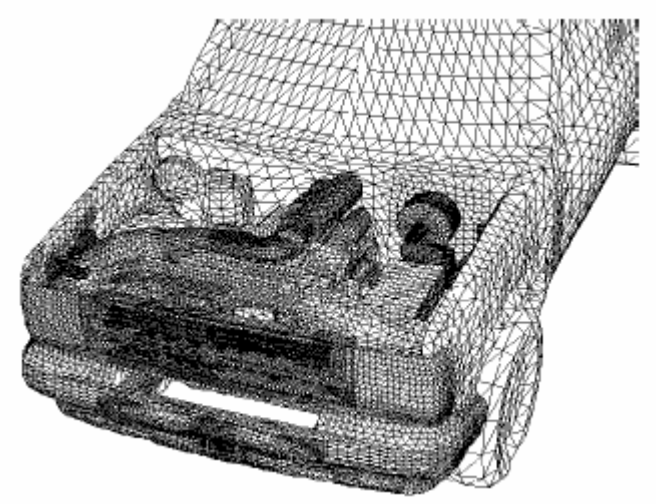
- ต้องใช้จำนวน Model เท่าไหร่ที่เกี่ยวข้องในการคำนวณ

- Tri/Tet กับ Quad/Hex Meshes
  - สำหรับรูปร่างที่เป็นแบบง่ายๆ Quad/Hex Meshes สามารถที่จะให้ผลการคำนวณที่แม่นยำกว่าแบบ Tri/tet Mesh



รูปที่ 3.8 Mesh แบบ Quad/Hex

  - สำหรับรูปร่างทีมีความซับซ้อนนั้น Quad/Hex Meshes ได้แสดงถึงผลทางการคำนวณเชิงตัวเลขว่าไม่มีประโยชน์ที่จะ Mesh แบบนี้ และสามารถที่จะใช้จำนวน Cells ที่ลดลงได้โดยการใช้ Mesh แบบ Tri/Tet



รูปที่ 3.9 Mesh แบบ Tri/Tet

4. ตั้งค่าการคำนวณเชิงตัวเลขของ Model
    - สำหรับปัญหาที่กำหนดมาให้นั้น จำเป็นต้องมีสิ่งต่อไปนี้
        - เลือก Model ทางฟิสิกส์
        - กำหนดคุณสมบัติของ Material
        - กำหนดสภาวะของการดำเนินการ
        - กำหนดสภาวะของขอบเขต
        - กำหนดค่าเริ่มต้นของผลเฉลย
        - ตั้งค่า Solver ที่ใช้ควบคุมการคำนวณ
        - ตั้งค่าตรวจจับการลู่เข้าของคำตอบ
5. คำนวณหาผลเฉลย
    - สมการต่างๆที่ใช้ในการคำนวณจะถูกคำนวณโดยการกระทำซ้ำ
    - การลู่เข้าจะเกิดขึ้นเมื่อ
        - การเปลี่ยนแปลงค่าของตัวแปรจากการกระทำซ้ำหนึ่งไปอีกการกระทำซ้ำถัดไปเปลี่ยนแปลงน้อยมาก
            - ค่า Residuals จะเป็นตัวบอกแนวโน้มนี้ทาง Monitor
        - ค่าคุณสมบัติโดยรวมของ Conservation มีค่าที่ยอมรับได้
    - ค่าความแม่นยำของการลู่เข้าของผลเฉลยขึ้นอยู่กับสิ่งต่อไปนี้
        - ความแม่นยำของ Model ทางฟิสิกส์
        - ความหนาแน่นของ Grid
        - การตั้งค่าของปัญหา

6. ตรวจสอบผลที่ได้จากการคำนวณ
    - ตรวจสอบผลที่ได้และความเที่ยงตรงของข้อมูล
        - เครื่องมือที่ใช้ในการแสดงผลแบบ Graphics
            - ลักษณะการไหล
            - การแยกตัว
            - Shocks, shear layers, และอื่นๆ
        - เครื่องมือที่ใช้ในการแสดงผลแบบรายงานเชิงตัวเลข
            - แรง
            - สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

- คุณภาพของพื้นผิวและปริมาตรโดยรวม
- การสมดุลของ Flux

7. พิจารณาแก้ไขปรับปรุงที่ Model
    - คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของ Model ประมาณได้ว่าเป็นแบบไหน
        - เป็นการไหลแบบปั่นป่วนหรือไม่
        - เป็นการไหลที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาหรือไม่
        - มีผลกระทบเนื่องมาจากการกดอัดได้หรือไม่
        - มีผลกระทบเนื่องมาจาก 3D หรือไม่
    - สภาวะของขอบเขตถูกต้องหรือไม่
        - มีการคำนวณของ Domain ใหญ่พอหรือไม่
        - สภาวะของขอบเขตเหมาะสมหรือไม่
        - ค่าของขอบเขตมีเหตุมีผลหรือไม่
    - Grid เพียงพอหรือไม่
        - Grid สามารถที่จะปรับแก้เพื่อให้ผลที่ได้จากการคำนวณดีขึ้นได้หรือไม่
        - ผลเฉลยมีการเปลี่ยนแปลงหรือไม่เมื่อมีการปรับแก้ หรือผลเฉลยขึ้นอยู่กับ Grid
        - ความหนาแน่นของขอบเขตจำเป็นต้องมีการปรับปรุงให้ดีขึ้นหรือไม่