

การเปรียบเทียบแบบจำลองเชิงตัวเลขกับอากาศพลศาสตร์ของอาเหม็ดบอดี
ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มและแลตทิซ-โบลต์ซมันน์

**Benchmarking numerical simulations on the aerodynamics of the Ahmed Body
with Finite Volume and Lattice Boltzmann Methods**

ชาติชาย ชุมจันทร์¹, ชัยยศ ดำรงกิจ โกศล¹

Chartchay Chumchan and Chaiyot Damrongkijkosol

¹ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องต้นกำลัง

วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

chartchayc@gmail.com¹ chaiyot.d@cit.kmutnb.ac.th¹

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบความแม่นยำและเวลาในการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในคอมพิวเตอร์รุ่นต่ำ ระหว่างแบบจำลองระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มและระเบียบวิธีแลตทิซ-โบลต์ซมันน์ โดยใช้อาเหม็ดบอดีเป็นต้นแบบในการศึกษา โดยจะนำค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน (C_D) ที่ได้จากการจำลองเชิงตัวเลขของทั้งสองระเบียบวิธีมาเทียบค่าที่ได้จากการทดลอง (Experimental Data) ของอาเหม็ดบอดีและเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการจำลองการไหลของทั้งสองระเบียบวิธีบนคอมพิวเตอร์ Intel(R) Core(TM) i5-6200U CPU@ 2.30 GHz และแรม 8 GB

ผลการวิจัยพบว่า ในด้านความแม่นยำระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มจากโปรแกรมทางการค้า SolidWorks Flow Simulation ได้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ (C_D) เท่ากับ 0.322 ขณะที่ระเบียบวิธีแลตทิซ-โบลต์ซมันน์ จากโปรแกรมทางการค้า XFlow ได้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ (C_D) เท่ากับ 0.339 เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองของอาเหม็ดบอดีซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศเท่ากับ 0.283 พบว่าระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มมีความแม่นยำสูงกว่าโดยมีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 13.78% ขณะที่ระเบียบวิธีแลตทิซ-โบลต์ซมันน์มีความคลาดเคลื่อน 19.79% ขณะที่ในด้านเวลาที่ใช้ในการจำลองพบว่าระเบียบวิธีแลตทิซ-โบลต์ซมันน์ใช้เวลาในการจำลอง 47 นาที 14 วินาที ซึ่งน้อยกว่าการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มที่ใช้เวลา 1 ชั่วโมง 22 นาที 35 วินาที โดยการสร้างแบบจำลองการไหลด้วยโปรแกรมทางการค้า XFlow ทำได้รวดเร็วกว่าเนื่องจากไม่มีกระบวนการสร้างเมช ทำให้ไม่มีข้อจำกัดด้านความซับซ้อนของรูปทรงเรขาคณิตในงานอุตสาหกรรมยานยนต์จริง

คำสำคัญ: ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม, ระเบียบวิธีแลตทิซ-โบลต์ซมันน์, อาเหม็ดบอดี, อากาศพลศาสตร์

Abstract

This research objective was to compare the accuracy and computational time of the CFD between Finite Volume and Lattice Boltzmann methods using the Ahmed model in the budget laptop. The drag coefficients obtained from the simulation of the Finite Volume and Lattice Boltzmann methods were compared with Ahmed experimental data. Moreover, the computational time running of both methods were also compared. The specification of laptop used for this simulation was Intel(R) Core(TM) i5-6200U CPU@ 2.30 GHz with 8GB of ram.

The research results shown as follow: for the accuracy of the simulation, the drag coefficient (C_D) from the Finite Volume method using the Commercial CFD program named SolidWorks Flow Simulation was around 0.322 while the drag coefficient (C_D) of the Lattice Boltzmann method using the Commercial CFD program named XFlow was around 0.339. Comparing those two simulation results with the Ahmed experimental data ($C_D=0.283$) found that the Finite Volume method had better accuracy because it had an error 13.78% while the Lattice Boltzmann method had an error 19.79%. For the computational time, the Lattice Boltzmann method used only 47 minute and 14 second which lesser than the Finite Volume method that used 1 hour 22 minute and 35 second. The flow modeling with the XFlow was faster because there was no meshing process therefore the complexity of the real geometry in automotive industry was not a restriction.

Keyword: Finite Volume Method, Lattice Boltzmann Method, Ahmed body, Aerodynamics

1. บทนำ

อากาศพลศาสตร์สำหรับยานยนต์ (Vehicle Aerodynamics) นับเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการออกแบบยานยนต์ในปัจจุบัน โดยปัจจัยหลักที่ส่งผลต่ออากาศพลศาสตร์ของรถยนต์คือรูปร่างของรถยนต์ที่เปลี่ยนแปลงไปจะส่งผลต่ออากาศพลศาสตร์ภายนอกของรถรอบตัวถึงรถยนต์ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะส่งผลให้รถยนต์มีค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศที่เปลี่ยนแปลง รวมถึงทำให้แรงต้านอากาศที่เกิดขึ้นเปลี่ยนแปลงไป [1] อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์ปัญหาอากาศพลศาสตร์เป็นเรื่องที่ซับซ้อน และหากต้องใช้เวลามากในการทดลองเพื่อหาผลลัพธ์ที่ถูกต้อง ดังนั้นในปัจจุบันวิธีการวิเคราะห์ปัญหาพลศาสตร์ของของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) ซึ่งเป็น การใช้คอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยวิเคราะห์ปัญหาทางด้านพลศาสตร์ของไหล (Fluid Dynamics) โดยมีพื้นฐานในการพิจารณาของไหลที่มีความต่อเนื่องให้อยู่ในรูปของลักษณะเป็นช่วง คอมพิวเตอร์จึงมีบทบาทสำคัญในการวิเคราะห์ด้านอากาศพลศาสตร์สำหรับยานยนต์ โดยการนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์เข้ามาจะช่วยผู้วิเคราะห์สามารถวิเคราะห์ปัญหาได้ง่ายกว่าการทดลองจริง ช่วยลดค่าใช้จ่าย และลดเวลาการปฏิบัติงาน [2] ซึ่งโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ช่วยในการวิเคราะห์ปัญหาทาง

พลศาสตร์ของไหลก็ใช้ระเบียบวิธีที่ต่างกันโดยโปรแกรมทางการค้า Flow Simulation ของโปรแกรม SolidWorks (SW) ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม (Finite Volume Method, FVM) ในการวิเคราะห์ ขณะที่โปรแกรมทางการค้า Xflow นำระเบียบวิธีแลตทิซ-โบลต์ซมันน์ (Lattice Boltzmann Method, LBM) ไปใช้ในการวิเคราะห์ปัญหา ซึ่งการใช้ระเบียบวิธีที่ต่างกันอาจให้ผลลัพธ์ที่ต่างกัน รวมถึงเวลาในการวิเคราะห์ผลที่อาจจะแตกต่างกัน เนื่องจากแต่ละวิธีก็จะใช้อัลกอริทึมเชิงตัวเลข (Numerical Algorithm) การกำหนดค่าของปัญหา แผนวิธีการแบ่งโดเมนย่อยๆ (Discretization Scheme) รวมถึงแต่ก็วิธีที่เหมาะสมกับปัญหาแต่ละประเภทที่แตกต่างกัน[3]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบความแม่นยำและเวลาในการคำนวณระหว่างสองระเบียบวิธีในโปรแกรมสำเร็จรูปทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณในคอมพิวเตอร์ระหว่างแบบจำลองระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มและระเบียบวิธีแลตทิซ-โบลต์ซมันน์ โดยใช้อาเหม็ดบอดี้ซึ่งเป็นโมเดลจำลองที่มีผลการทดลอง (Experiment) สามารถนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการจำลองการไหลทั้งสองระเบียบวิธีและสร้างแบบจำลองบนคอมพิวเตอร์แล็ปท็อปต้นทุนต่ำ Intel(R) Core(TM) i5-6200U CPU@ 2.30 GHz และแรม 8 GB

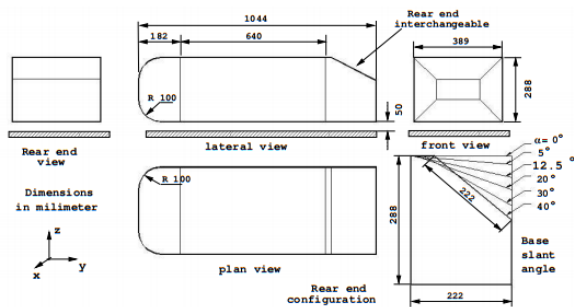
2. วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างสองระเบียบวิธีในโปรแกรมสำเร็จรูปทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณระหว่างแบบจำลองระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มและระเบียบวิธีแลตทิซ-โบลต์ซมันน์จำลองการไหลบนอาห์เหม็ดบอดีและแบ่งให้มีจำนวนโดเมนย่อยๆ ของ Fluid Cell 3 มิติ ให้ใกล้เคียงกัน เพื่อตรวจสอบความแม่นยำที่ยังยอมรับได้เมื่อเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงจากผลการทดลองโดยความคลาดเคลื่อนต้องไม่เกิน 15 เปอร์เซ็นต์[4]และใช้เวลาในการคำนวณที่สั้นที่สุด

3. วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

3.1 อาห์เหม็ดบอดี (Ahmed Body)

อาห์เหม็ดบอดีนั้นถูกคิดค้นครั้งแรกโดย S.R. Ahmed ในปี ค.ศ.1984 ได้ถูกนำมาใช้ เป็น โมเดลมาตรฐานในโปรแกรมจำลองหลักอากาศพลศาสตร์ เพื่อเปรียบเทียบความแม่นยำของการจำลอง โดยเป็นรูปทรงเลขาคณิตต่างๆ มีความยาว 1.044 เมตร สูง 0.288 เมตร และกว้าง 0.389 เมตร มีความสูงจากพื้น 0.5 เมตร และรูปทรงด้านหลังจะกำหนดองศาการเอียงตามที่ต้องการ [5,6] ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 : อาห์เหม็ดบอดี [5,6]

3.2 แบบจำลองการไหลเชิงตัวเลข

การสร้างแบบจำลองโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขสำหรับพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics, CFD) นั้น ในปัจจุบันสามารถแบ่งการเคลื่อนที่ของของไหลได้เป็น 2 แบบ [7] คือการมองของไหลที่มีความต่อเนื่องกันและไม่ต่อเนื่องกันหรือคำอธิบายที่เรียกว่า Eulerian Description และ Lagrangian Description โดยคำอธิบาย Eulerian Description ได้กำหนดบริเวณที่สนใจ เรียกว่าปริมาตรควบคุม

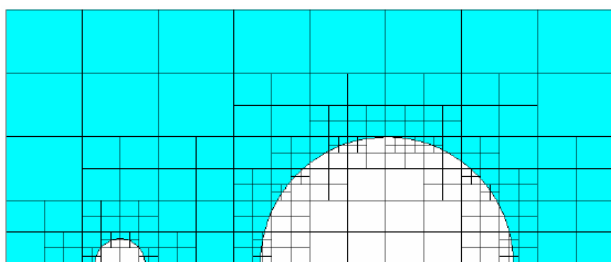
ซึ่งใช้สัญลักษณ์ CV โดยปริมาตรควบคุมนี้จะมีขอบเขต (Boundary) ซึ่งมีการไหลข้ามของมวล โมเมนตัม และพลังงาน รายละเอียดของการไหลจะไม่ถูกพิจารณาเพราะจะใช้ค่าเฉลี่ยของคุณสมบัติต่าง ๆ เป็นมุมมองซึ่งกำหนดตำแหน่งตายตัว (Fixed) ในสนามความเร็วและให้เวลาผ่านไป นั้น ได้มองที่จุดใดจุดหนึ่งตลอดเวลา ความเร็ว ณ จุดนั้นสามารถเขียนแทนด้วย $\vec{V} = \vec{V}(x, y, z, t)$ สำหรับพฤติกรรมกรไหลสามารถอธิบายด้วยสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่เรียกว่าสมการนาเวียร์-สโตกส์ แล้วทำกระบวนการดิสครีไทเซชัน (Discretization) สร้างสมการพีชคณิตจากสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยนั้นด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขต่างๆ ที่นิยมในปัจจุบันคือระเบียบวิธีแบบปริมาตรควบคุม (Finite Volume Method) แล้วทำการหาค่าผลเฉลยเชิงตัวเลขนั้นออกมา มุมมองนี้เหมาะสำหรับการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของของไหลและสำหรับคำอธิบายมุมมองการไหลแบบ Lagrangian Description ใช้คำอธิบายการไหลของของไหลรวมทั้งการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Particle) ที่มีการชนกัน (Collision) ของอนุภาคของของไหลตามหลักการของกฎอนุรักษ์มวลและกฎอนุรักษ์โมเมนตัมและจะติดตามอนุภาค ซึ่งเคลื่อนที่ไปสู่ตำแหน่งต่างๆ ในเวลาต่างๆ โดยไม่ยึดติดกับตำแหน่งโดยสามารถเขียนความเร็วให้อยู่ในรูป $V(x,y,z,t)$ มุมมองนี้เหมาะสำหรับการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของของแข็งหรืออนุภาค

ในส่วนของการจำลองเชิงตัวเลขสำหรับการไหลแบบปั่นป่วนนั้นสามารถแบ่งได้ เป็น 2 ประเภท ประเภทแรกจะทำการแก้สมการนาเวียร์-สโตกส์ เพื่อหาค่าความเร็วที่เวลาใด ๆ การจำลองเชิงตัวเลขแบบนี้ได้แก่การจำลองเชิงตัวเลขโดยตรง (Direct Numerical Simulation, DNS) ซึ่งเป็นการแก้สมการนาเวียร์-สโตกส์ โดยไม่ใช้แบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence Models) และ Large-Eddy Simulation (LES) ซึ่งเป็นการแก้สมการนาเวียร์-สโตกส์ โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน ช่วยในบางส่วนของโดเมน ส่วนอีกประเภทนั้นจะทำการแก้สมการที่เรียกว่า Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) เพื่อทำการหาค่าความเร็วเฉลี่ยซึ่งในการแก้สมการ RANS นั้นจะมีการใช้แบบจำลองความปั่นป่วน เช่น แบบจำลองความปั่นป่วน $k-\epsilon$, $k-\omega$, SST เป็นต้น สำหรับงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการศึกษา

อากาศยานศาสตร์รอบๆอาหะมีดบอดี โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปเชิงพาณิชย์

3.2.1 ระเบียบวิธีของโปรแกรมทางการค้า Flow Simulation

โปรแกรมทางการค้า Flow Simulation เป็นโปรแกรมวิเคราะห์การไหลสำเร็จรูปเชิงพาณิชย์ที่อยู่ในโปรแกรมช่วยออกแบบรูปทรงทางเรขาคณิต (CAD) SolidWorks ใช้คอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของของไหลต่างๆ โดยจะทำการสร้างเมชแบบโครงสร้างที่มีความอิสระจากรูปทรงทางเรขาคณิตที่ออกแบบไว้และเซลล์จะมีการตัดกันที่ขอบเขตระหว่างของแข็งและของไหลเรียกเทคนิคนี้ว่า “Structured Cartesian Immersed-Body Mesh” ดังรูปที่ 2 ซึ่งโปรแกรมจะทำการสร้างโดเมนของไหลเพื่อคำนวณโดยอัตโนมัติจาก CAD รูปทรงทางเรขาคณิตของชิ้นงานทำให้สะดวกและรวดเร็ว ซึ่งมีความแตกต่างจากโปรแกรมสำเร็จรูปเชิงพาณิชย์อื่นๆ ที่ต้องสร้างเฉพาะรูปทรงทางเรขาคณิต ของโดเมนของของไหลและกระบวนการดิสครีไทเซชัน (Discretization) ได้ใช้ระเบียบวิธีที่ใช้หลักการแบ่งโดเมนออกเป็นปริมาตรควบคุมย่อยเรียกว่าระเบียบวิธีปริมาตรสี่เหลี่ยม (Finite Volume, FV) และอาศัยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในการแก้สมการสมการนาเวียร์-สโตกส์ ร่วมกับใช้สมการในการหาผลเฉลยสมการค่าเฉลี่ยเรโนลด์ส์นาเวียร์-สโตกส์ (Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations, RANS) สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนจะอธิบายด้วยแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน $k-\epsilon$ ชนิด Standard [8]

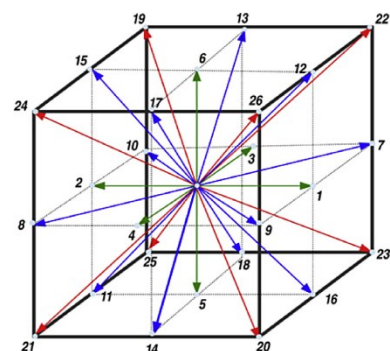


ภาพที่ 2 : เมชแบบ Structured Cartesian Immersed-Body (IB)

3.2.2 กระบวนการในโปรแกรมทางการค้า XFlow

โปรแกรมทางการค้า XFlow เป็นซอฟต์แวร์สำเร็จรูปของบริษัท Next Limit โดยใช้ระเบียบวิธีแลตทิซ-โบลต์ซมันน์ (Latic Boltzmann Method, LBM) สำหรับพิจารณาการ

เคลื่อนที่ของอนุภาคในโดเมนการไหล โดยไม่จำเป็นต้องทำการเมช ทำให้การวิเคราะห์การไหลสามารถทำได้อย่างรวดเร็วและง่าย ในกระบวนการดิสครีไทเซชันได้พิจารณาการเคลื่อนที่ของอนุภาคเนื่องจากมีความเป็นไปได้ที่จะมีการส่งผ่านโมเมนตัมจากจุดกริดไปยังอีกจุดกริดในโดเมนของไหล ใน LBM โดเมนของของไหลจะถูกแบ่งโดยจุดกริดไปอยู่ในโครงตาข่ายทรงลูกบาศก์ ดังรูปที่ 3 แต่ละจุดดังกล่าวเป็นจุดที่การไหลเวียนของอนุภาคความเร็วเริ่มต้นแล้วปฏิสัมพันธ์เกิดขึ้นกับสตรีมมิ่ง (Streaming) จากจุดกริดข้างเคียง ขนาดของความเร็วของอนุภาคจากจุดกริดพุ่งออกจากลูกบาศก์ตาข่ายไปกริดข้างเคียงในหลายๆ ทิศทางนี่คือการแบ่ง Boltzmann Distribution จากนั้นก็ไม่มีปฏิสัมพันธ์กับกริดข้างเคียงอื่นๆ ซึ่งคำนวณได้จากกฎการควบคุมการชนกันที่เรียกว่าดำเนินการปะทะกัน (Collision Operator) การชนกันของอนุภาคทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดและทิศทางของความเร็ว ความหนาแน่นเป็นเพียงผลรวมของฟังก์ชันการกระจาย (Distribution Function) ความน่าจะเป็นแบบไม่ต่อเนื่องของอนุภาค (The Zeroeth moment of the PDF) ภายภาพส่วนใหญ่ที่นำไปสู่พฤติกรรมของของไหลมีอยู่ในตัวดำเนินการปะทะกันปฏิสัมพันธ์ระหว่างอนุภาคนี้เป็นหนึ่งระดับซึ่ง LBM เป็นธรรมชาติในการกำหนดสถานะปั่นป่วนของการเคลื่อนที่ของของเหลว [7] เห็นได้ชัดว่าการผูกกับทฤษฎีจลศาสตร์และ Boltzmann Distribution นั้นถูกต้อง



ภาพที่ 3 : โครงตาข่ายทรงลูกบาศก์ ของแบบจำลองความเร็ว D3Q27 [9]

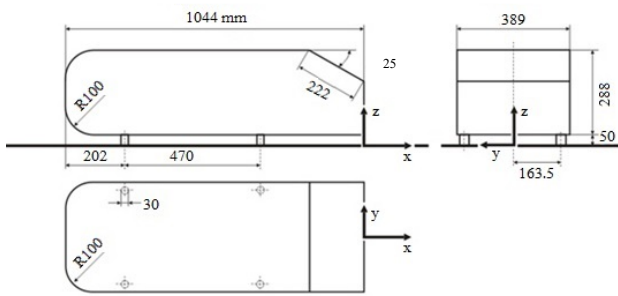
ในโปรแกรมทางการค้าโดยเฉพาะโปรแกรมทางการค้า XFlow มี 27 เส้นทางในการเคลื่อนที่ (Streaming) แบบ 3D

และเรียกว่า D3Q27 (D3 = 3 ทิศทางเชิงพื้นที่ Q27 = 27 ทิศทางความเร็วแยก) สำหรับแบบจำลองปั่นป่วนสามารถเลือกได้หลายแบบ เช่น การจำลองเชิงตัวเลขโดยตรง , แบบจำลอง LES แบบ Smagorinsky , Wall-Adapting Local-Eddy (WALE) และ Spalart-Allmaras [6,10,11]

4. วิธีการดำเนินการวิจัย

4.1 การสร้างโมเดลจำลองอาหะมีดบอดี

ผู้วิจัยได้ทำการสร้างโมเดลจำลองอาหะมีดบอดี โดยได้ทำการเลือกใช้อุปกรณ์เชิงคำนวณด้านหลังที่ 25 องศา ดังแสดงในภาพที่ 2 ซึ่งผลจากการกำหนดค่าองศาเชิงคำนวณด้านหลังที่ 25 องศา ทำให้อาหะมีดบอดี ดังกล่าวมีค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ (C_D) เท่ากับ 0.283 [6] ดังแสดงในภาพที่ 4



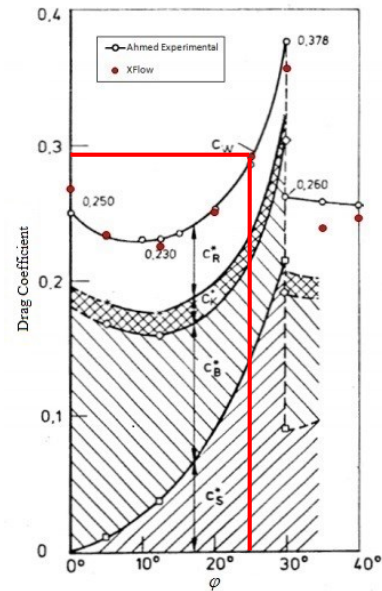
ภาพที่ 4 : อาหะมีดบอดีที่มีมุมเชิงคำนวณด้านหลัง 25 องศา

ตามหลักอากาศพลศาสตร์ เมื่อมีลมไหลผ่านรถยนต์หรือวัตถุจะเกิดแรงขึ้นที่วัตถุนั้นคือ แรงต้านอากาศ (Drag Force, F_D) จากนั้นจะนำค่าทั้งสองไปคำนวณ หาค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ (Drag Coefficient, C_D) เพื่อวิเคราะห์แรงต้านอากาศ ที่นำมาจำลอง โดยมีสูตรในการคำนวณดังนี้

$$C_D = \frac{2F_D}{\rho Av^2} \quad (1)$$

เมื่อ C_D คือ สัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ F_D คือ แรงต้านอากาศ (Drag Force, N) ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ

(kg/m^3) A คือพื้นที่หน้าตัดของรถ (m^2) และ v คือความเร็วของอากาศ (m/s)

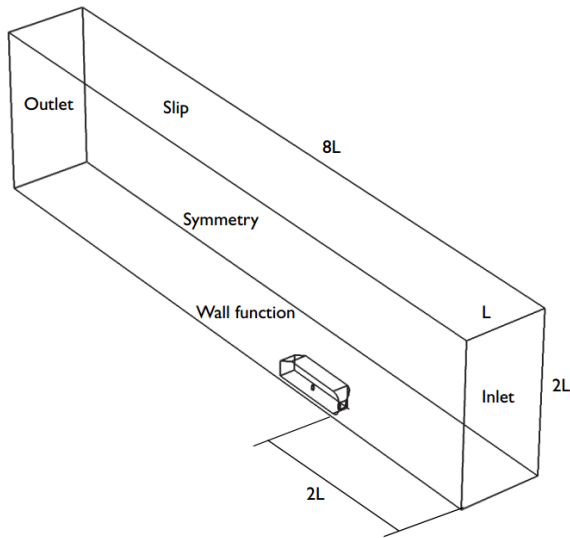


ภาพที่ 5 : ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ ของอาหะมีดบอดี ที่มุมมองการเชิงคำนวณด้านหลังที่ต่างกัน [5]

จากภาพที่ 5 พบว่าเมื่อทำการปรับมุมเชิงคำนวณด้านหลังของแรงต้านอากาศ ไปที่ 25 องศา ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศที่ได้จากการทดลองของ Ahmed [5] เท่ากับ 0.283

4.2 การจำลองไหลไหลโดยใช้โปรแกรมทางการค้า

สำหรับงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้เลือกใช้โปรแกรมทางการค้า 2 โปรแกรม โดยโปรแกรมทางการค้า Flow Simulation ที่ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มในการวิเคราะห์การไหลนั้นจะต้องมีกระบวนการเมชเหมือนกับซอร์ฟแวร์ทั่วไปและ โปรแกรมทางการค้า Xflow ที่ใช้ระเบียบวิธีแลตทิซ-โบลต์ซมันน์ไม่ต้องการกระบวนการเมชเนื่องจาก มีกริดที่เป็นโครงตาข่ายทรงลูกบาศก์รูปทรงเดียวหรือเรียกว่าโครงผลึกโบลต์ซมันน์ เพียงแต่ต้องกำหนดขนาดของ Resolve Scale รวมถึง Wake Resolution ให้เหมาะสมเท่านั้น เพื่อวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านของอากาศของอาหะมีดบอดี รวมถึงศึกษาเวลาที่ใช้ในการจำลองของแต่ละโปรแกรม เพื่อนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกัน



ภาพที่ 6 : การกำหนดโดเมนเพื่อใช้ในการจำลองการไหลผ่านอาหะมีคบอดี [8,12]

ตารางที่ 1 เงื่อนไขของปัญหาการไหล

บริเวณ	เงื่อนไขขอบเขต
Inlet	Velocity inlet, $V = 60 \text{ m/s}$
Outlet	Pressure Outlet, Reference Pressure $P=0$
Top	Stationary Wall, Slip
Bottom	Moving Wall, $V=60 \text{ m/s}$
Side	Symmetry
Wall	No slip

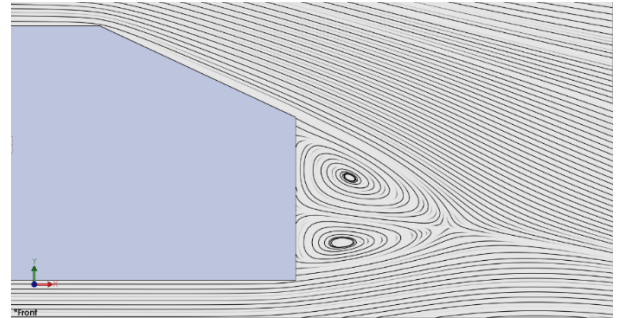
โดยในการวิเคราะห์นั้นผู้วิจัยได้กำหนดขอบเขตที่จะใช้ในการจำลองดังภาพที่ 6 [8,12] และมีรายละเอียดเพื่อใช้กับการจำลองของทั้งสองโปรแกรม โดยทำการจำลองโดยใช้ของไหลเป็นอากาศที่ความเร็ว 60 m/s มีความหนาแน่นของอากาศเท่ากับ 1 kg/m^3 ที่อุณหภูมิ $352 \text{ }^\circ\text{K}$ และความหนืดไดนามิก (Dynamic Viscosity) เท่ากับ 0.000146014 Pa.s [5]

5. ผลการวิจัย

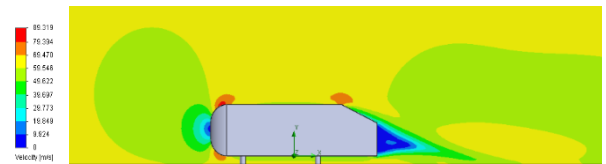
5.1 ผลการจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม

จากการจำลองการไหลด้วยวิธีไฟไนต์วอลุ่มพบว่าเกิดกระแสลมปั่นป่วน (Unsteady Wake) ที่ด้านหลังของอาหะมีคบอดี ซึ่งประกอบไปด้วยกระแสลมวน (Vortex) สอง

ตำแหน่ง โดยด้านบนจะเกิดกระแสลมวนที่มีขนาดใหญ่กว่าด้านล่างดังภาพที่ 7 ขณะที่ค่าความเร็วเฉลี่ยของการไหลที่ระนาบ (Plane) ครึ่งหนึ่งของอาหะมีคบอดี ดังถูกแสดงในภาพที่ 8



ภาพที่ 7 : การหมุนวนของอากาศด้านหลังของอาหะมีคบอดีด้วยโปรแกรมทางการค้า Flow Simulation



ภาพที่ 8 : รูปร่างความเร็วของอากาศรอบอาหะมีคบอดี ด้วยโปรแกรมทางการค้า Flow Simulation

ในส่วนของการคำนวณประสิทธิภาพแรงต้านอากาศพบว่าเมื่อมีการปรับเพิ่มความละเอียดของการจำลอง รวมถึงรูปแบบการตั้งค่า จะทำให้ได้จำนวนเมชที่แตกต่างกัน และได้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2 และ 3 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 จำนวนเมชกับระดับการตั้งค่าระดับความละเอียดของโปรแกรมทางการค้า Flow Simulation

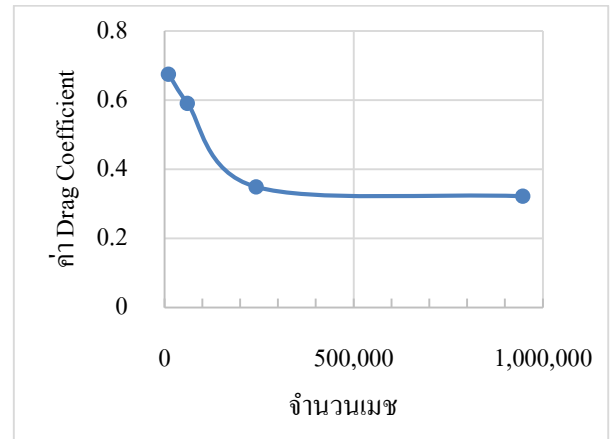
ความละเอียดในการจำลอง	จำนวนเมช	
	Uniform Mesh	Advanced Channel Refinement
1	9,902	10,942
3	61,160	60,592
5	238,736	241,990
7	922,926	947,078

จากตารางที่ 2 แสดงให้เห็นจำนวนเมชของการตั้งค่าแบบ Advanced Channel Refinement จะมีจำนวนเมชที่มากกว่าการตั้งค่าแบบ Uniform Mesh และเมื่อมีการปรับค่าความละเอียดในการจำลองเพิ่มขึ้น จำนวนเมชก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

ตารางที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ (C_D) จากการจำลองด้วยโปรแกรมทางการค้า Flow Simulation

ความละเอียดในการจำลอง	ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ (C_D)	
	Uniform Mesh	(Advanced Channel Refinement)
1	0.732	0.675
3	0.511	0.591
5	0.559	0.349
7	0.389	0.322

จากตารางที่ 3 แสดงให้เห็นค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ (C_D) ที่แตกต่างกันเมื่อใช้ความละเอียดในการจำลองและรูปแบบการกำหนดจำนวน Mesh ที่ต่างกัน โดยค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ (C_D) ของแบบ Advanced Channel Refinement มีค่าต่ำกว่าตั้งค่าแบบ Uniform Mesh ในทุกค่าความละเอียด นอกจากนี้การตั้งค่าแบบ Advanced Channel Refinement จะได้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ (C_D) ที่ใกล้เคียงกับค่ามาตรฐานมากกว่า โดยเมื่อพิจารณาแนวโน้มค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ (C_D) ต่อจำนวนเมช ที่ใช้ในการจำลองจะพบว่าเมื่อจำนวนเมช มีมากขึ้นค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ (C_D) จะลดลงดังแสดงในภาพที่ 7



ภาพที่ 7 : ผลของความอิสระเมชต่อค่า C_D ของอาหะมีคบดีด้วยโปรแกรมทางการค้า Flow Simulation

ด้านเวลาในการจำลอง พบว่าเวลาในการจำลองเมื่อมีการเพิ่มความละเอียดในการจำลองมากขึ้นจะใช้เวลาในการจำลองนานขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4

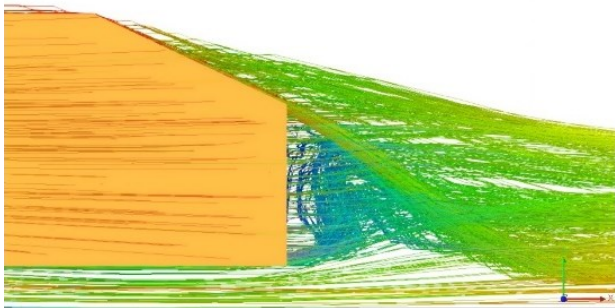
ตารางที่ 4 เวลาที่ใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรมทางการค้า SolidWorks Flow Simulation

ระดับความละเอียดในการจำลอง	เวลาที่ใช้ในการจำลอง (ชั่วโมง:นาที:วินาที)	
	Uniform Mesh	(Advanced Channel Refinement)
1	0:00:15	0:00:18
3	0:02:13	0:02:11
5	0:013:6	0:15:8
7	1:16:54	1:18:23

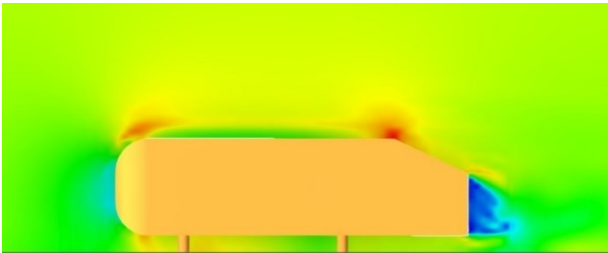
5.2 ผลการจำลองด้วยระเบียบวิธีแลตติซ-โบลต์มัน

จากการจำลองการไหลด้วยวิธีแลตติซ-โบลต์มันพบว่ามี การเกิดกระแสลมปั่นป่วน (Unsteady Wake) ที่ด้านหลังของ ซึ่งประกอบ ไปด้วยกระแสลมวน (Vortex) สองตำแหน่ง ด้านหลังของอาหะมีคบดี เหมือนกับระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม โดยด้านบนจะเกิดกระแสลมวนที่มีขนาดใหญ่กว่าด้านล่างดัง ภาพที่ 8 รวมถึงความเร็วเฉลี่ยของการไหลที่เกิดขึ้นการไหลที่

ระนาบ (Plane) ครึ่งหนึ่งของอาเหม็ดบอดี ก็มีความใกล้เคียงกับระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มดังแสดงในภาพที่ 9



ภาพที่ 8 : การหมุนวนของอากาศด้านหลังของอาเหม็ดบอดีที่ได้จากโปรแกรมทางการค้า Xflow



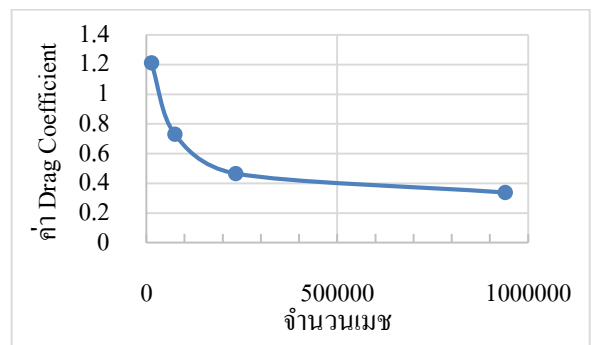
ภาพที่ 9 : รูปร่างความเร็วของอากาศรอบอาเหม็ดบอดีด้วยโปรแกรมทางการค้า Xflow

ในส่วนของค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศและเวลาที่ใช้ในการจำลอง พบว่าเมื่อมีการปรับเพิ่มความละเอียดของการจำลอง จะทำให้ได้จำนวนเมช ที่แตกต่างกัน และได้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศที่ต่างกันอย่างเห็นได้ชัดในตารางที่ 5

เมื่อเพิ่มระดับความละเอียดของเมชในการจำลองทำให้เวลาจะเพิ่มขึ้น และค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ (C_D) จะลดลง ดังแสดงในภาพที่ 10 ในส่วนของเวลาที่ใช้ในการจำลองจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อมีการปรับระดับความละเอียดในการจำลองเพิ่มขึ้น โดยค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองของ Ahmed มากที่สุดจะอยู่ที่ระดับความละเอียดในการจำลองระดับที่ 4

ตารางที่ 5 ผลกระทบของความอิสระจำนวนกริดต่อค่า C_D และเวลาที่ใช้ในการจำลองด้วยโปรแกรมทางการค้า Xflow

ความละเอียดในการจำลอง	จำนวนกริด	ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ (C_D)	เวลาที่ใช้ในการคำนวณ (ชั่วโมง:นาที:วินาที)
1	13,094	1.214	0:00:22
2	74,543	0.732	0:02:02
3	234,070	0.467	0:13:47
4	939,702	0.339	0:47:14



ภาพที่ 7 : ผลของความอิสระกริดต่อค่า C_D ของอาเหม็ดบอดีด้วยโปรแกรมทางการค้า Xflow

5.3 การเปรียบเทียบผลของระเบียบวิธี FVM และ LBM

จากตารางที่ 6 ผลการวิจัยพบว่าในด้านความแม่นยำโปรแกรมทางการค้า SolidWorks Flow Simulation ที่ใช้จำนวนเมชมากที่สุดได้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ (C_D) เท่ากับ 0.322 โดยมีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 13.78% ซึ่งไม่เกิน 15% ตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ ส่วนผลจากโปรแกรมทางการค้า XFlow ที่ใช้จำนวนกริดมากที่สุดได้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ (C_D) เท่ากับ 0.339 โดยมีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 19.79% ซึ่งสูงกว่าวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ในด้านเวลาที่ใช้ในการจำลองพบว่าแบบจำลองการไหลของโปรแกรมทางการค้า XFlow ใช้เวลาในการจำลอง 47 นาที 14 วินาที ซึ่งน้อยกว่าแบบจำลองจำลองจากโปรแกรมทางการค้า SolidWorks Flow Simulation ที่ใช้เวลา 1 ชั่วโมง 22 นาที 35 วินาที

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบผลการจำลองของระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม และวิธีแลตติซ-โบลต์ซมันน์กับผลการทดลองของอาเหม็ด

ระเบียบวิธี	สัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ (C_D)	ความคลาดเคลื่อน	เวลาที่ใช้ในการคำนวณ (ชั่วโมง:นาที:วินาที)
ผลการทดลองของ Ahmed	0.283	-	-
FVM	0.322	13.78 %	1:22:35
LBM	339.0	19.79 %	0:47:14

6. สรุปและอภิปรายผล

ผลเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างสองระเบียบวิธีในโปรแกรมสำเร็จรูปทางพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณระหว่างแบบจำลองระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มและระเบียบวิธีแลตทิซ-โบลต์ซมันน์จำลองการไหลบนอาหะมีดบอดี้และแบ่งให้มีจำนวนเมชหรือกริด 3 มิติ ให้ใกล้เคียงกัน การตรวจสอบความแม่นยำนั้นยอมให้คลาดเคลื่อนไม่เกิน 15 เปอร์เซ็นต์ [4] จากค่าอ้างอิงที่มากจากผลการทดลองโดยค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศเท่ากับ 0.283 และเวลาในการคำนวณต้องสั้นที่สุดบนคอมพิวเตอร์ Intel(R) Core(TM) i5-6200U CPU@ 2.30 GHz และแรม 8 GB พบว่าในการสร้างแบบจำลองเพื่อคำนวณการไหลนั้น โปรแกรมทางการค้า Xflow ทำได้รวดเร็วกว่าเนื่องจากไม่มีกระบวนการสร้างกริดทำให้ไม่มีข้อจำกัดความซับซ้อนของรูปทรงเรขาคณิต ในด้านความแม่นยำ พบว่าเมื่อนำผลการจำลองของทั้งสองระเบียบวิธีที่มีค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองของอาหะมีด มากที่สุดมาเปรียบเทียบกัน พบว่าระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่มได้ค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศใกล้เคียงกับผลการทดลองของอาหะมีดมากกว่า โดยมีค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ (C_D) เท่ากับ 0.322 โดยมีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 13.78% ขณะที่ระเบียบวิธีแลตทิซ-โบลต์ซมันน์มีค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านอากาศ (C_D) เท่ากับ 0.339 โดยมีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 19.79% ซึ่งสูงกว่าค่าที่กำหนดไว้ ขณะที่เวลาที่ใช้ในการจำลองพบว่าระเบียบวิธีแลตทิซ-โบลต์ซมันน์ ใช้เวลาในการจำลองที่น้อยกว่าระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม สำหรับในการสร้างแบบจำลองเพื่อคำนวณการไหลนั้น โปรแกรมทางการค้า

XFlow ทำได้รวดเร็วกว่าเนื่องจากไม่มีกระบวนการสร้างกริดทำให้ไม่มีข้อจำกัดความซับซ้อนของรูปทรงเรขาคณิตในโลกอุตสาหกรรมจริง

7. ข้อเสนอแนะจากการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้กำหนดความแม่นยำที่ยอมรับได้ไว้ที่ 15 เปอร์เซ็นต์ [4] เนื่องจากมีข้อจำกัดด้านต้นทุนการคำนวณ ดังนั้นงานวิจัยครั้งต่อไปควรดำเนินการสร้างแบบจำลองให้ได้ผลความแม่นยำสูงกว่านี้ด้วยเทคนิคและระเบียบวิธีอื่นๆ ด้วยคอมพิวเตอร์ประสิทธิภาพสูงต่อไป

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Richard Stone and Jeffery K ball. "Automotive Engineering Fundamental" SAE, 2004
- [2] M. Selmi, M. J. Al-Khawaja, and A. Marafia, "Validation of CFD simulation for flat plate solar energy collector," Renewable Energy, vol. 33, no. 3, pp. 383–387, 2008.
- [3] M. Goodarzi et al. "Comparison of the Finite Volume and Lattice Boltzmann Methods for Solving Natural Convection Heat Transfer Problems inside Cavities and Enclosures" Abstract and Applied Analysis Volume 2014 (2014)
- [4] รักขานาถ ตระกูลมินัก สมุล แซ่เฮง พิธิษฐ์สังฆการ และ บุญลือ สวัสดิ์มงคล. "การออกแบบรถโดยสารระหว่างเมือง (มาตรฐาน 1) ด้วยเทคนิคการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล" การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 29, 2558
- [5] David M. Holman, Ruddy M. Brionnaud, and Zaki Abiza. "Solution to industry benchmark problems with the lattice-Boltzmann code XFlow" Next Limit Technologies, Angel Caverio 2, 28043, Madrid (Spain), 2012
- [6] Ahmed, S., Ramm, G., and Faltin., "Some Salient Features of the Time-Average Ground Vehicle Wake, "SAE



Technical Paper 840300, 1984.

- [7] Yunus Cengel and John Cimbala. Fluid Mechanics Fundamentals and Applications. McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering, 3rd Edition.
- [8] Sobachkin, A. and Dumnov, G., “Numerical Basis of CAD-Embedded CFD”, NAFEMS World Congress, 2013.
- [9] Satjaritanun, P., Khunatorn, Y., Vorayos, N., Shimpalee, S. and Bringley, E., “Numerical analysis of the mixing characteristic for napier grass in the continuous stirring tank reactor for biogas production” Biomass and Bioenergy 86 (2016) 53-64
- [10] Donovan J Cogan. “The Aerodynamic Design and Development of an Urban Concept Vehicle Through CFD Analysis” Master’s Thesis, Cape Peninsula University of Technology, Africa, 2016.
- [11] Next Limit Technologies. “XFlow 2013 Computational Fluid Dynamics User Guide”, 2013
- [12] Brian Costa. “Studying the Airflow Over a Car Using an Ahmed Body” Retrieved from 10 April 2017, from <https://www.comsol.com/blogs/studying-the-airflow-over-a-car-using-an-ahmed-body/>