

การไหลของน้ำผ่านปลากัดแข่งขัน Water Flow Past the Siamese Fighting Fish

ธีรศักดิ์ ศรีมิตรรุ่งโรจน์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ 1518 ถนนพิบูลสงคราม เขตบางซื่อ
กรุงเทพฯ 10800

โทร 0-2913 2500 ต่อ 8308 หรือ 8303 โทรสาร 0-2913-2618 อีเมล roofbeta@yahoo.co.th

Theerasak Srimitrungrroj

Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok,
1518 Pibulsongkram Rd, Bangsue, Bangkok 10800

Tel: 0-2913-2500 ext 8308 or 8303, Fax: 0-2913-2618, E-mail: roofbeta@yahoo.co.th

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้ใช้แบบจำลองการไหลแบบราบเรียบชนิดหนืดในแกนอ้างอิง 2 มิติร่วมกับระเบียบวิธีปริมาตรสืบเนื่องโดยเลือกใช้โปรแกรม Fluent มาช่วยในการจำลองสนามการไหลของน้ำรอบรูปร่างปลากัด 2 สายพันธุ์ด้วยกัน ได้แก่ ปลากัดหม้อไทย และปลากัดป่าใต้ จุดประสงค์เพื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบถึงแนวโน้มของแรงต้านทานการเคลื่อนที่ ที่เกิดขึ้นของปลากัดในแต่ละสายพันธุ์ เพื่อเข้าถึงบทสรุปที่ว่ารูปร่างที่เหมาะสมของปลากัดแข่งขัน ควรที่จะมีรูปร่างเป็นอย่างไร ทั้งนี้ได้ทำการเปรียบเทียบความสามารถในการทำนายผลของระเบียบวิธีผลต่างเชิงตัวเลขทั้งหมด 4 ระเบียบวิธีด้วยกัน คือ ระเบียบวิธีผลต่างเหนือลมอันดับที่หนึ่ง ระเบียบวิธีผลต่างยกกำลัง ระเบียบวิธีผลต่างเหนือลมอันดับที่สอง และสุดท้ายระเบียบวิธีผลต่างควิก ที่ระยะความยาวเหยียดปลากัด 5.5 เซนติเมตร ซึ่งได้ตรวจสอบกลไกของการลดลงของแรงต้านทานการเคลื่อนที่ และแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะการไหลของปลากัดแต่ละรูปทรง นอกจากนี้ยังได้ตรวจสอบเพิ่มเติมถึงอิทธิพลของรูปทรงลำตัวปลากัดป่าได้ร่วมกับครีบหาง 3 รูปทรงด้วยกัน คือ รูปทรง A รูปทรง B และ รูปทรง C ทั้งนี้เพื่อวิเคราะห์ถึงผลกระทบต่อแรงต้านทานการเคลื่อนที่หากมีการเปลี่ยนแปลงรูปทรงเรขาคณิตของครีบหางดังกล่าวนี้

จากการวิเคราะห์ผลการคำนวณสนามการไหลของน้ำที่ไหลผ่านปลากัดในหลายรูปแบบที่นำมาวิเคราะห์ ได้บทสรุปว่า รูปทรงลำตัวของปลากัดที่มีแรงต้านทานการเคลื่อนที่ต่ำที่สุด ได้แก่ รูปทรงลำตัวปลากัดป่าใต้ ส่วนรูปทรงครีบหางที่มีค่าแรงต้านทานการเคลื่อนที่ต่ำที่สุด ได้แก่ ครีบหางรูปทรง A ดังนั้นรูปทรงลำตัวแบบปลากัดป่าใต้ และครีบหางรูปทรง A จึงมีความเหมาะสมที่สุด สำหรับจะนำมาใช้เพื่อเพาะพันธุ์ปลากัดสำหรับกัดแข่งขัน

Abstract

This paper used 2D laminar viscous flow model with finite volume method by fluent software to simulate the water flow around two types of betta splendens. The first is siamese fighting fish and the second is wild type. The objective of the study was to investigate drag reduction mechanism and to predict the trend of how shape body change can affect the flow field feature. Flow numerical differencing, first order upwind, power law, second order upwind and QUICK differencing scheme were used to solve the nonlinear convective term. The computational from this schemes were investigated total length of betta splendens at 5.5 cm. The effect of position change on drag reduction mechanism investigated two types of betta splendens.

In addition, this thesis also investigates the influence of shape body of wild type and coupling caudal fin pattern. The drag reduction mechanism and the effect of shape change were investigated at three caudal fin, type A , type B and C.

The computational analysis and compare result, good scale and optimized shape body of fighting fish is wild type and caudal fin is type A. That is should be selected for breeding.

Keywords: CFD (Computational fluid dynamics), fish locomotion
Siamese fighting fish, betta splendens.

1. บทนำและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันปลากัดแข่งขัน เป็นเกมกีฬาที่ทั่วโลกที่นิยมกันอย่าง

Liu และคณะ ศึกษาการไหลในการขับเคลื่อนของลูกกบ ในแบบจำลองสองมิติโดยใช้ CFD (Computational Fluid Dynamics) เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ปัญหา ได้ศึกษาถึงกลไกในการสร้างแรงขับเคลื่อนของลูกกบในระหว่างว่ายน้ำ และ ประสิทธิภาพที่ใช้ในการขับเคลื่อน

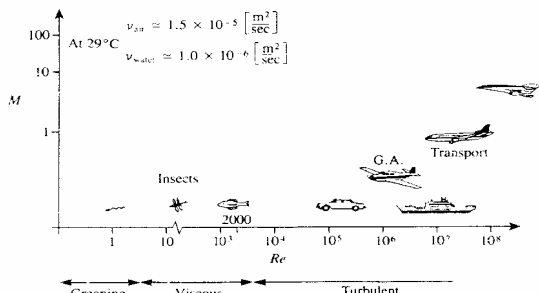
Unpaired Fin) เป็นครีบที่อยู่แนวกลางลำตัว ตามสันท้อง ไม่เป็นคู่
ได้แก่ ครีบหลัง (Dorsal Fin) ครีบกัน (Anal Fin) และ ครีบหาง
(Caudal Fin and Tail Fin)

3.2 ครีบก้น (Paired Fin) เป็นส่วนที่เทียบได้กับแขนขาของสัตว์ชั้นสูง มีไม่เกิน 2 คู่ ได้แก่ ครีบอก (Pectoral Fin) ครีบท้อง (Ventral Fin)

4. การประยุกต์พลศาสตร์ของไหลกับแบบจำลองปลากัด

กระบวนการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของไหลนั้นจะทำการจำลองแบบ (Simulation) โดยใช้สมการนาวิเยร์-สโตกส์แบบเต็มรูป (Full Navier - Stokes Equations) โดยตั้งอยู่บนสมมุติฐานที่ว่าของไหลมีพฤติกรรมการไหลแบบราบเรียบชนิดหนืด (Laminar Viscous Flow) และเป็นของไหลชนิดอัดตัวไม่ได้ (Incompressible Fluids) ของไหลที่สนใจเป็นของไหลนิวโทเนียนและ คุณสมบัติต่างๆคงที่ไม่แปรเปลี่ยนตามเวลาซึ่งรูปแบบของสมการนาวิเยร์-สโตกส์แบบเต็มรูป คือ

$$\rho \frac{\partial u_j}{\partial t} + \rho u_k \frac{\partial u_j}{\partial x_k} = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \mu \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_i^2} + \rho \cdot f_j \quad (1)$$



รูปที่ 3 แสดงการแบ่งลักษณะพฤติกรรมของไหลที่ไหลผ่านวัตถุต่างๆที่มีความสัมพันธ์กับตัวเลขเรย์โนลด์ [2]

จากรูปที่ 3 แสดงขอบเขตพฤติกรรมของไหลที่ไหลผ่านปลาขนาดเล็กจะมีพฤติกรรมเป็นการไหลแบบราบเรียบชนิดหนืด ซึ่งในการที่จะแบ่งถึงพฤติกรรมของไหลจะต้องอาศัยตัวแปรไรมันดี (Reynolds Number, Re) เข้ามาเป็นตัวชี้วัดว่ารูปแบบของปัญหาที่สนใจนั้นจะมีพฤติกรรมการไหลเป็นแบบใด

$$Re = \frac{U \cdot L}{\nu} \quad (2)$$

เมื่อ U คือ ความเร็วเฉลี่ยของการไหล L คือ ความยาวของวัตถุ นั้น และ ν ความหนืดจลนศาสตร์ (Kinematics Viscosity)

5. การกำหนดปัญหาและสนามการคำนวณ

ในงานวิจัยนี้เลือกพิจารณาของไหล คือ น้ำที่อุณหภูมิ 20 °C มีค่าความหนาแน่น $\rho = 998.2 \text{ kg/m}^3$ และค่าความหนืดจลนศาสตร์ $\nu = 1.0048 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ส่วนความยาวเหยียดของปลากัดเท่ากับ 5.5 cm ซึ่งในการพิจารณาปัญหาจะแบ่งออกเป็น 2 กรณีหลักดังนี้



(ก) ปลากัดหม้อไทยรูปทรงปลาช่อน



(ข) ปลากัดหม้อไทยรูปทรงปลากาย



(ค) ปลากัดป่าอีสาน



(ง) ปลากัดป่าใต้

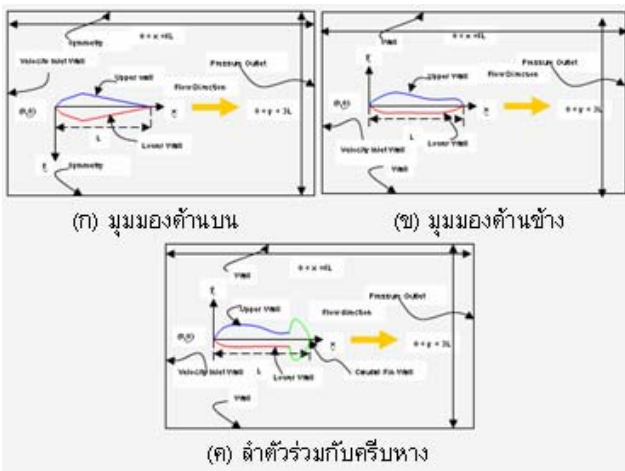
รูปที่ 4 แสดงรูปทรงลำตัวและครีบต่างๆจากมุมมองด้านข้างของปลากัดที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง

1. แบบจำลองรูปทรงปลากัดมุมมองด้านบน (Top View) แบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบ ด้วยกัน คือ แบบจำลองปลากัดไทย แบบจำลองปลากัดป่า และแบบจำลองรูปทรงปีกเครื่องบิน NACA63018
2. แบบจำลองรูปทรงปลากัดมุมมองด้านข้าง (Side View) แบ่งออกได้เป็น 4 รูปแบบ ด้วยกัน คือแบบจำลองปลากัดไทยรูปทรงปลาช่อน แบบจำลองปลากัดไทยรูปทรงปลากาย แบบจำลองปลากัดป่าใต้ และแบบจำลองรูปทรงปีกเครื่องบิน NACA4424

6. การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต

งานวิจัยนี้นั้นได้ทำการกำหนดเงื่อนไขขอบ ดังต่อไปนี้

1. น้ำไหลเข้าโดเมนกำหนดให้ความเร็วคงที่และคงตัว
2. พิจารณาให้น้ำไหลผ่านลำตัวปลากัดที่อยู่กับที่
3. น้ำไหลออกจากโดเมนที่พิจารณา กำหนดให้ความดันในสนามความเร็วมีค่าเท่ากับความดันบรรยากาศ และไม่ถูกรบกวนด้วยลำตัวปลากัด
4. ความเร็วสัมผัสของน้ำที่ผิวปลากัดมีค่าเป็นศูนย์ เนื่องมาจากอิทธิพลของความหนืด
5. ที่ขอบเขตด้านบนและล่างของแบบจำลอง กำหนดให้เป็นระนาบสมมาตร เฉพาะในกรณีของแบบจำลองมุมมองด้านบนปลากัดเท่านั้น
6. ที่ขอบเขตด้านบนและล่างของแบบจำลอง กำหนดให้เป็นผนังซึ่งปราศจากแรงเสียดทาน (เฉพาะในกรณีของแบบจำลองมุมมองด้านข้างปลากัดเท่านั้น)
7. กำหนดให้ปลากัดมีความลึกเข้าไปในแกน z ไม่จำกัด (เฉพาะในกรณีของแบบจำลองมุมมองด้านข้างปลากัด)



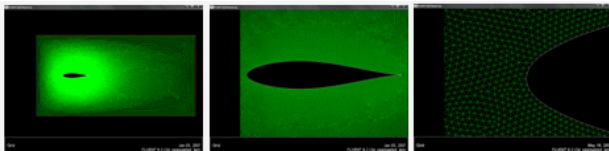
รูปที่ 5 แสดงการกำหนดสนามการไหลของแบบจำลองปลากัดมุมมองด้านบนและด้านข้าง และการกำหนดเงื่อนไขขอบเขต

7. การตรวจสอบผลการคำนวณ

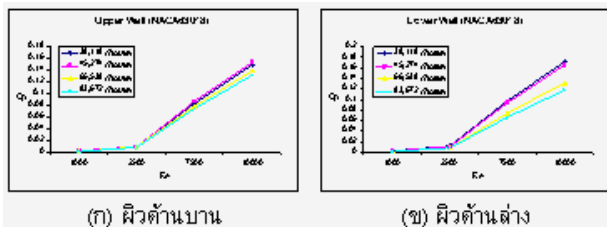
7.1 ผลกระทบที่เกิดจากจำนวนของกริดเซล

การศึกษาถึงผลกระทบของจำนวนกริดเซล (Grid Dependent) โดยจะแบ่งจำนวนกริดออกเป็น 3 ระดับด้วยกัน คือ

1. กริดเซลแบบหยาบ (Coarse Grid) มีจำนวน 38,118 กริดเซล และ 45,274 กริดเซล
2. กริดเซลแบบปานกลาง (Medium Grid) มีจำนวนกริด 66,538 กริดเซล
3. กริดเซลแบบละเอียด (Fine Grid) มีจำนวน 83,118 กริดเซล



รูปที่ 6 แสดงรูปแบบกริดสามเหลี่ยมที่ใช้ในการคำนวณกับโมเดลปีกเครื่องบิน NACA63018 เพื่อตรวจสอบผลกระทบของจำนวนกริด



รูปที่ 7 แสดงผลกระทบของจำนวนกริดเซลที่มีต่อการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานจากความดัน

จากรูปที่ 7 เป็นกราฟการกระจายตัวของสัมประสิทธิ์ความดันที่ระดับความเร็วต่ำ คือที่ค่า $1000 < Re < 2500$ แนวโน้มของผลเฉลยในทุกๆระดับของจำนวนกริดเซลมีความแตกต่างกันอย่างมาก

ที่ระดับความเร็วปานกลาง คือที่ค่า $2500 < Re < 7500$ แนวโน้มของผลเฉลยในทุกๆระดับของจำนวนกริดเซลมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก หรืออาจกล่าวได้ว่าผลเฉลยมีค่าของความแม่นยำและแน่นอนมากในการทำนายพฤติกรรมของไหลได้เป็นอย่างดีที่ระดับความเร็วที่แน่นอน

ที่ระดับความเร็วสูง คือที่ค่า $7500 < Re < 10000$ แนวโน้มของผลเฉลยเริ่มมีความแตกต่างของผลเฉลยค่อนข้างสูง เช่นเดียวกับที่ระดับความเร็วต่ำ

7.2 ผลกระทบจากการเลือกระเบียบวิธีวิธีการคำนวณ

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการทดสอบถึงความแม่นยำและแน่นอนของแต่ละระเบียบวิธี ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการเปรียบเทียบถึงผลลัพธ์ที่ได้จากการประมาณค่าของผลเฉลย 4 ระเบียบวิธีดังต่อไปนี้

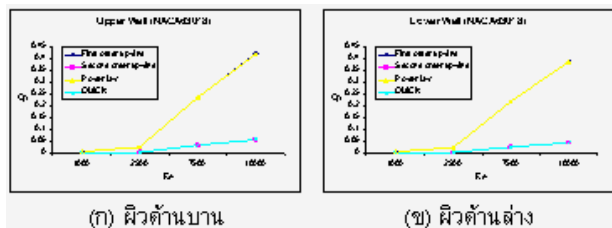
1. ระเบียบวิธีผลต่างเหนือลมอันดับที่หนึ่ง (First Order Upwind Differencing Scheme)
2. ระเบียบวิธีผลต่างเหนือลมอันดับที่สอง (Second Order Upwind Differencing Scheme)
3. ระเบียบวิธีผลต่างยกกำลัง (Power Law Differencing Scheme)
4. ระเบียบวิธีผลต่างควิก (QUICK Differencing Scheme)

ตารางที่ 1 การเลือกแบบแผนและระเบียบวิธีการคำนวณ (กรณีที่ 1)

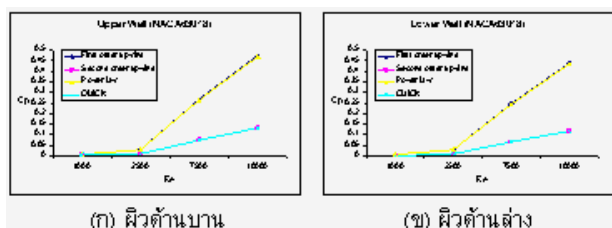
Case	Pressure & Velocity Coupling	Discretization (Pressure)	Discretization (Momentum)
1	Simple	Standard	First Order Upwind
2	Simple	Standard	Second Order Upwind
3	Simple	Standard	Power Law
4	Simple	Standard	QUICK

ตารางที่ 2 การเลือกแบบแผนและระเบียบวิธีการคำนวณ (กรณีที่ 2)

Case	Pressure & Velocity Coupling	Discretization (Pressure)	Discretization (Momentum)
1	Simple	Second Order	First Order Upwind
2	Simple	Second Order	Second Order Upwind
3	Simple	Second Order	Power Law
4	Simple	Second Order	QUICK



รูปที่ 8 แสดงผลกระทบของระเบียบวิธีการคำนวณ (กรณีที่ 1)



รูปที่ 9 แสดงผลกระทบของระเบียบวิธีการคำนวณ (กรณีที่ 2)

จากรูปที่ 8 และภาพที่ 9 เป็นการเปรียบเทียบผลเฉลยแบบประมาณค่าของสัมประสิทธิ์ความดันที่ผิวด้านบนและด้านล่าง ซึ่งกำหนดรายละเอียดของระเบียบวิธีการคำนวณดังมีรายละเอียดในตารางที่ 1 และตารางที่ 2

กลุ่มแรก ได้แก่ ระเบียบวิธีผลต่างเหนือลมอันดับที่หนึ่งและระเบียบวิธีผลต่างยกกำลังจะให้ค่าที่มีความใกล้เคียงกันอย่างมากในทุกช่วงของค่าตัวเลขเรย์โนลด์

กลุ่มหลัง ได้แก่ ระเบียบวิธีผลต่างเหนือลมอันดับที่สองและระเบียบวิธีผลต่างควิกจะให้ค่าเท่ากันทุกช่วงตัวเลขเรย์โนลด์

อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้เลือกใช้ระเบียบวิธีผลต่างเหนือลมความถูกต้องอันดับที่ 2 อันมีสาเหตุมาจากหากเปรียบเทียบกันในเรื่องของเวลาที่ใช้ในการประมวลผลกับระเบียบวิธี QUICK แล้วนั้น ระเบียบวิธีผลต่างเหนือลมอันดับที่สองจะใช้เวลาในการคำนวณน้อยกว่าในขณะที่ผลลัพธ์ที่ได้มีค่าเท่ากัน

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบความแตกต่างจากการคำนวณ (กรณีที่ 1)

ค่าความแตกต่างของระเบียบวิธี	Re = 1000		Re = 2500		Re = 7500		Re = 10000	
	Upper Wall	Lower Wall	Upper Wall	Lower Wall	Upper Wall	Lower Wall	Upper Wall	Lower Wall
กลุ่มที่ 1 : First Order Upwind & Power Law	1.23%	1.04%	0.24%	0.17%	0.23%	0.08%	0.44%	0.30%
กลุ่มที่ 2 : Second Order Upwind & QUICK	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
First Order Upwind & (QUICK / Second Order Upwind)	84.5%	87.0%	85.7%	87.9%	86.2%	88.4%	86.3%	88.5%
Power Law & (QUICK / Second Order Upwind)	84.3%	86.9%	85.7%	87.9%	86.2%	88.4%	86.3%	88.4%

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบความแตกต่างจากการคำนวณ (กรณีที่ 2)

ค่าความแตกต่างของระเบียบวิธี	Re = 1000		Re = 2500		Re = 7500		Re = 10000	
	Upper Wall	Lower Wall	Upper Wall	Lower Wall	Upper Wall	Lower Wall	Upper Wall	Lower Wall
กลุ่มที่ 1 : First Order Upwind & Power Law	0.75%	0.60%	0.00%	0.04%	0.54%	0.39%	0.76%	0.65%
กลุ่มที่ 2 : Second Order Upwind & QUICK	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
First Order Upwind & (QUICK / Second Order Upwind)	70.1%	71.8%	71.4%	72.3%	72.0%	72.8%	72.1%	72.9%
Power Law & (QUICK / Second Order Upwind)	69.6%	71.6%	71.4%	72.4%	71.8%	72.7%	71.9%	72.7%

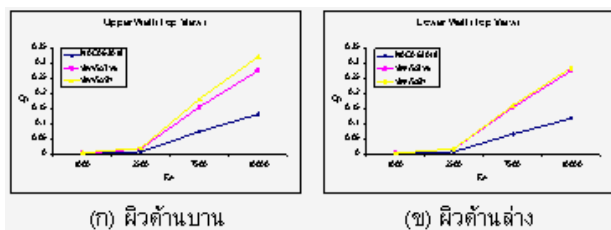
8. การวิเคราะห์อิทธิพลรูปทรงลำตัวปลากัด

8.1 แบบจำลองรูปทรงปลากัดมุมมองด้านบน

แบบจำลองมุมมองด้านบนนี้ ประกอบไปด้วยแบบจำลองปลากัดไทย แบบจำลองปลากัดปา และแบบจำลองรูปทรงปีกเครื่องบิน NACA63018



รูปที่ 10 แสดงแบบจำลองมุมมองด้านบนรูปทรงลำตัวปลากัด



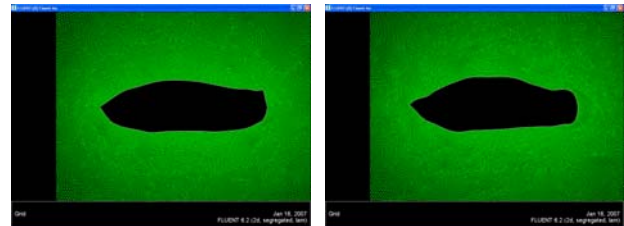
(ก) ผิวด้านบน (ข) ผิวด้านล่าง

รูปที่ 11 กราฟเปรียบเทียบความแตกต่างของสัมประสิทธิ์ความดัน

สำหรับที่มุมมองด้านบน ค่าสัมประสิทธิ์ความดันทานความดันของรูปทรงปลากัดไทยจะต่ำกว่ารูปทรงปลาช่อนทุกช่วงของเรย์โนลด์ นัมเบอร์ แต่ค่าไม่แตกต่างกันมากนัก เนื่องมาจากมุมมองนี้มีรูปทรงเคียงกัน

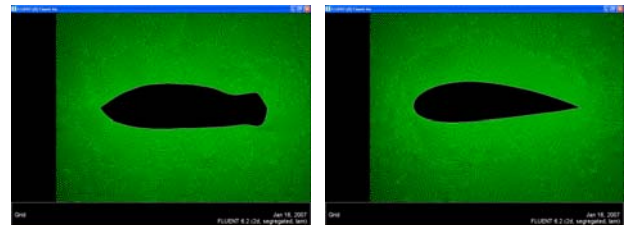
8.2 แบบจำลองรูปทรงปลากัดมุมมองด้านข้าง

แบบจำลองมุมมองด้านข้าง ประกอบไปด้วยแบบจำลองปลากัดไทย 2 รูปแบบ ได้แก่ รูปทรงปลาช่อน รูปทรงปลาทราย แบบจำลองรูปทรงปลากัดปาได้ 1 รูปแบบ



ปลากัดหัวรูปทรงปลาช่อน

ปลากัดหัวรูปทรงปลาทราย



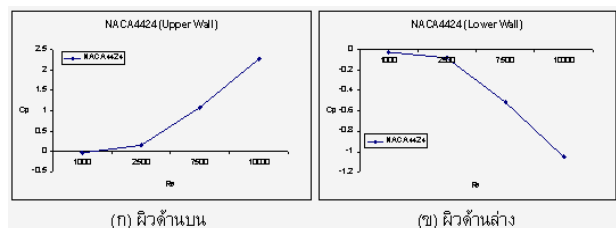
ปลากัดปาใต้

NACA4424

รูปที่ 10 แสดงแบบจำลองรูปทรงลำตัวมุมมองด้านข้างปลากัด

8.3 การตรวจสอบสนามการไหลของแบบจำลองปลากัดมุมมองด้านข้าง

ขั้นตอนนี้จะเป็นการตรวจสอบแบบจำลองสนามการไหลด้านข้างของปลากัด โดยเลือกใช้แบบจำลองรูปทรงปีกเครื่องบิน NACA4424 มาทดสอบและช่วยยืนยันผลของแบบจำลองมุมมองด้านข้างปลากัด



(ก) ผิวด้านบน

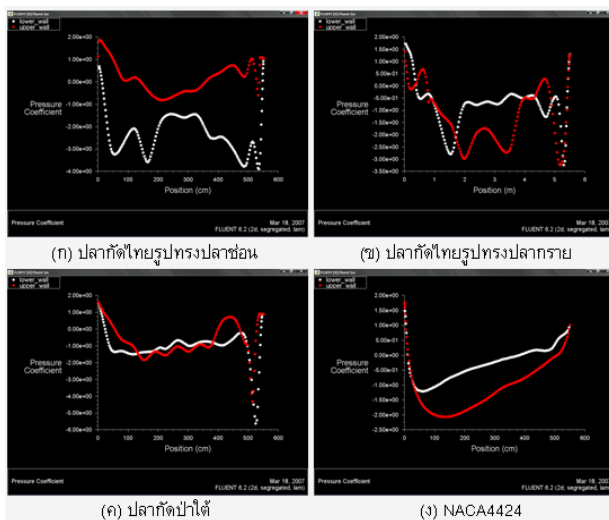
(ข) ผิวด้านล่าง

รูปที่ 12 กราฟแสดงการกระจายตัวของสัมประสิทธิ์ความดันที่ผิวบน – ล่าง (NACA4424)

จากรูปที่ 12 คือ กราฟการกระจายตัวของสัมประสิทธิ์ความดันที่ผิวด้านบนและผิวด้านล่าง ที่ระดับตัวเลขเรย์โนลด์ต่างกันจะพบได้ว่าที่ระดับความเร็วสูง คือ ที่ $7500 < Re < 10000$ ค่าของ $C_p > 1$ ซึ่งไม่เป็นจริง เนื่องมาจาก $C_p < 1$ เสมอ สาเหตุที่ค่าของ $C_p > 1$ นั้นเป็น

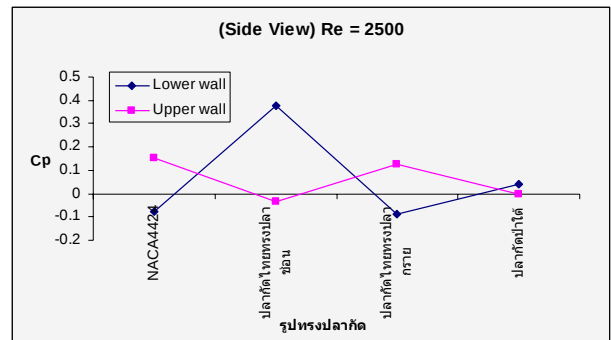
ผลมาจากการคำนวณผู้วิจัยเลือกใช้แบบจำลองสนามการไหลแบบราบเรียบชนิดหนืด ซึ่งมีค่าของตัวเลขโนลต์ไม่ควรมากเกิน 5000 (พิจารณาจากรูปที่ 1) ซึ่งในช่วง $Re > 7500$ นั้น เป็นช่วงของการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) ดังนั้นจึงส่งผลต่อการคำนวณค่าเชิงปริมาณและประเด็นที่สำคัญอีกประการจากการทดสอบนี้ คือ ระยะกริดต่ำสุดที่เลือกใช้บริเวณชั้นขีดผิวปลากัด 0.035 cm นั้นสามารถสะท้อนให้เห็นถึงการคำนวณของพฤติกรรมกริดการไหลได้อย่างถูกต้อง นั้นย่อมบ่งชี้ได้ว่าระยะกริดเซลล์ต่ำสุดที่เลือกใช้หรือการเลือกกระดุมกริดแบบละเอียดเพียงพอต่อการประมาณค่าและทำนายพฤติกรรมกริดการไหลที่เกิดขึ้นจริงได้นั่นเอง

8.4 อิทธิพลของรูปทรงลำตัวปลากัดที่ส่งผลต่อแรงต้านทานการเคลื่อนที่



รูปที่ 13 กราฟเปรียบเทียบการกระจายตัวสัมประสิทธิ์ความดัน (Side View) ที่ผิวด้านบนและด้านล่างของลำตัวปลากัดรูปทรงต่างๆ

จากรูปที่ 13 แสดงลักษณะการกระจายตัวของสัมประสิทธิ์ความดันที่พื้นผิวด้านบนและด้านล่างของรูปทรงลำตัวปลากัดแบบต่างๆ (เส้นสีแดงแทนผิวด้านบนปลากัด ส่วนเส้นสีขาวแทนผิวด้านล่าง) สำหรับปลากัดรูปทรงปลากายจะให้ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานความดันต่ำกว่ารูปทรงปลาช่อน สืบเนื่องมาจากความเร็วของน้ำที่ไหลผ่านพื้นผิวด้านล่างของรูปทรงปลากายสูงกว่า (หากพิจารณาจากสมการเบอร์นูลลี) แต่ในกลไกการลดลงของความดันจริงๆ แล้วนั้น จะพบว่าสมการเบอร์นูลลีจะสามารถบอกถึงการเปลี่ยนแปลงของพลังงานที่ไม่มีการสูญเสียเพียงแต่ถ่ายโอนและเปลี่ยนแปลงรูปพลังงานไปเท่านั้น ส่วนที่รูปทรงปลากัดป้าได้จะเห็นได้อย่างชัดเจนที่ผิวด้านบนและด้านล่างมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากรูปทรงค่อนข้างจะสมมาตรกัน ดังนั้นทิศทางและขนาดของเวกเตอร์ความเร็วที่ไหลผ่านจึงไหลผ่านไปได้อย่างราบเรียบมากกว่ารูปทรงปลากายและรูปทรงปลาช่อน จึงส่งผลให้ลดค่าความต้านทานได้ดีกว่านั่นเอง



รูปที่ 14 กราฟเปรียบเทียบการกระจายตัวสัมประสิทธิ์ความดัน $Re=2500$ (Side View)

จากรูปที่ 14 บทสรุปจะเปรียบเทียบให้เห็นถึงลักษณะการกระจายตัวของสัมประสิทธิ์ความดัน ที่กระทำกับผิวด้านบนและด้านล่าง ($Re=2500$) ซึ่งกระทำกับรูปทรงปลากัดที่มุ่มมองด้านข้าง จะเห็นได้ว่ารูปทรงที่มีแรงต้านทานรวมต่ำสุด ได้แก่ รูปทรงปลากัดป้าได้

9. การทดสอบรูปทรงครีบทางแบบต่างๆ ร่วมกับรูปทรงลำตัวปลากัดป้าได้

ในส่วนนี้ผู้วิจัยจึงได้ทำการจำลองแบบในการคำนวณสนามการไหลเพิ่มเติม 3 รูปแบบดังนี้

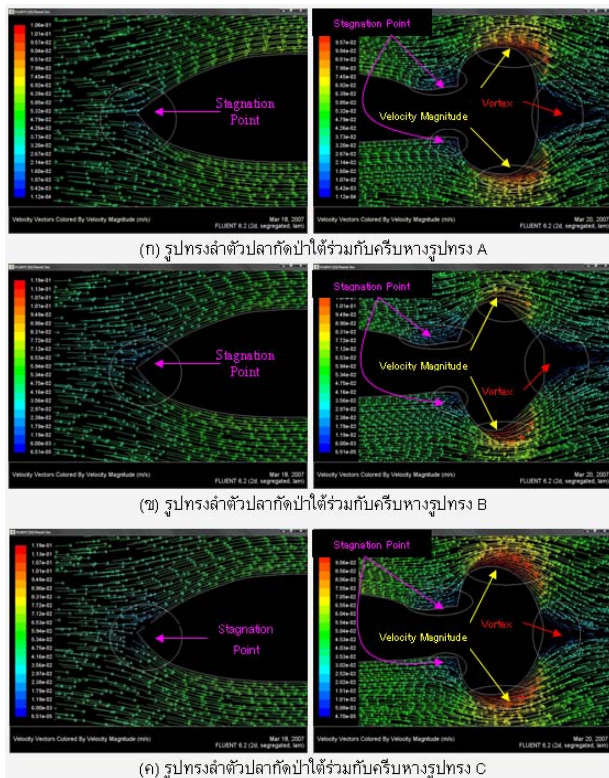
1. แบบจำลองรูปทรงลำตัวปลากัดป้าได้ร่วมกับครีบทางรูปทรง A
2. แบบจำลองรูปทรงลำตัวปลากัดป้าได้ร่วมกับครีบทางรูปทรง B
3. แบบจำลองรูปทรงลำตัวปลากัดป้าได้ร่วมกับครีบทางรูปทรง C



รูปที่ 15 แสดงรูปทรงครีบทางปลากัดแบบต่างๆ



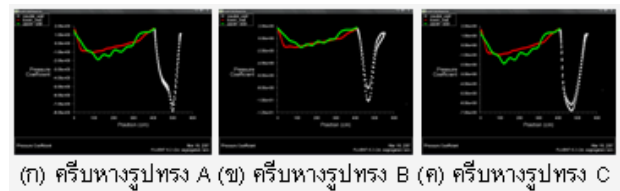
รูปที่ 16 แสดงแบบจำลองรูปทรงลำตัวปลากัดป้าได้ร่วมกับครีบทางรูปทรง A , B และ C



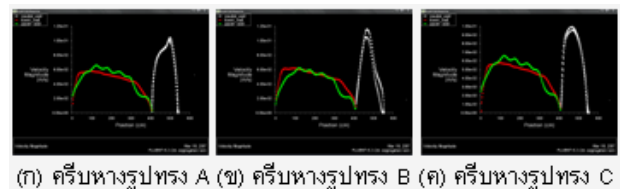
รูปที่ 17 แสดงขนาดและลักษณะเวกเตอร์ความเร็วที่ไหลผ่านลำตัวปลากัดปลาได้ร่วมกับรูปทรงครีบทรง A , B และ C

จากรูปที่ 17 แสดงลักษณะการไหลของน้ำของขนาดความเร็วที่จุดชนปะทะ ตำแหน่งด้านหน้ากับด้านท้ายปลากัดปลาได้และขนาดของความเร็วที่กระทำกับรูปทรงครีบทรงแบบ A ,B และ C ซึ่งสามารถแบ่งจุดที่ทำการพิจารณาได้ 3 ส่วนด้วยกัน คือ

1. จุดชนปะทะ ได้แก่ ที่ด้านหน้าปลากัดหนึ่งจุด และที่ด้านท้ายสองจุด
 2. ขนาดและลักษณะของความเร็วที่ไหลผ่านส่วนยอดด้านบนและด้านล่างครีบทรง
 3. วอเทค (Vortex) กระแสหมุนวนที่ด้านหลังสุดของครีบทรง
- ตำแหน่งที่ 1. ที่จุดชนปะทะที่ด้านหน้าและด้านท้ายปลากัด จะเห็นว่า ไม่ว่าจะมีการเปลี่ยนรูปทรงครีบทรงเป็นแบบใดก็ตาม จุดชนปะทะยังคงอยู่ที่ตำแหน่งเดียวกัน
- ตำแหน่งที่ 2. ขนาดและลักษณะของความเร็วที่ไหลผ่านส่วนปลายด้านบนและด้านล่างครีบทรง ที่รูปทรงครีบทรงแบบ A จะให้คุณลักษณะการไหลที่ราบเรียบกว่าแบบอื่น ทั้งนี้เนื่องจาก ความชัน (Slope) ของรูปทรงด้านหน้าและด้านท้ายครีบทรงไม่แตกต่างกันอย่างทันทีทันใด (เปรียบเทียบกับครีบทรงรูปทรง B และC) สอดคล้องกับกระแสการไหล หรือไม่ขวางทางการไหลเหมือนแบบรูปทรงอื่น
- ตำแหน่งที่ 3. วอเทค ขนาดของกระแสหมุนวนทางด้านท้ายมีขนาดไม่แตกต่างกัน แต่ทั้งนี้ขนาดของกระแสหมุนวนที่เกิดขึ้นไม่ได้เป็นตัวบ่งชี้ถึงภาพรวมของความต้านทานที่เกิดขึ้นทั้งหมด จึงต้องพิจารณาในส่วนอื่นด้วย ดังที่ได้อธิบายไว้แล้วทั้งสามส่วนนั่นเอง

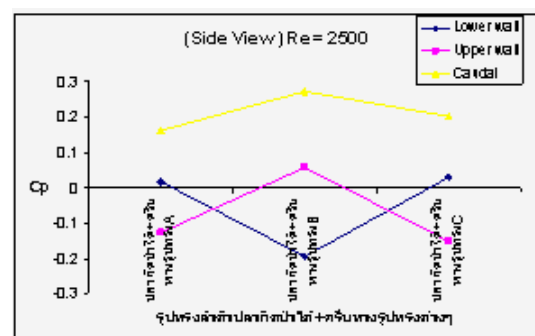


รูปที่ 18 กราฟแสดงการกระจายตัวของสัมประสิทธิ์ความดัน (รูปทรงลำตัวปลากัดปลาได้+ครีบทรงรูปทรง A, B และ C)



รูปที่ 19 กราฟแสดงการกระจายตัวของขนาดความเร็ว (รูปทรงลำตัวปลากัดปลาได้+ครีบทรงรูปทรง A, B และ C)

จากรูปที่ 18 และ 19 แสดงกราฟการกระจายตัวของสัมประสิทธิ์ความดันและขนาดของความเร็วที่กระทำกับลำตัวปลากัดปลาได้และครีบทรงแบบ A ,B และ C (เส้นสีแดงคือผิวด้านล่าง เส้นสีเขียวคือผิวด้านบน และเส้นสีขาวพื้นผิวครีบทรง) จะเห็นได้ว่าลักษณะการกระจายตัวของความเร็วและสัมประสิทธิ์ความดันของลำตัวรูปทรงครีบทรง A และ C มีแนวโน้มเดียวกัน แต่หากพิจารณาที่รูปทรงลำตัวร่วมกับครีบทรงแบบ B จะเห็นได้ว่าที่ผิวบนและผิวล่างที่ด้านหน้าของปลากัดจะมีความแตกต่างสูงกว่าแบบ A และ C นั้นย่อมหมายถึงว่าการไหลที่เกิดขึ้นมีการไหลราบลื่นน้อยกว่าแบบอื่น จึงส่งผลให้ค่าความต้านทานที่ส่วนของลำตัวเมื่อพิจารณาพร้อมกับครีบทรงแบบ B มีค่าความต้านทานการเคลื่อนที่สูงกว่าแบบอื่น ในทางกลับกันหากสนใจเฉพาะเพียงแครูปทรงครีบทรงเพียงอย่างเดียว ครีบทรงแบบ B กับมีค่าความต้านทานต่ำกว่าแบบ C ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับรูปทรงเรขาคณิตของครีบทรงนั้น ดังนั้นการพิจารณาในส่วนนี้ สามารถสรุปได้ว่า รูปทรงลำตัวที่เหมาะสมที่สุด คือ ปลากัดปลาได้ และรูปทรงครีบทรงที่เหมาะสมที่สุด คือ ครีบทรงรูปทรง A



รูปที่ 20 กราฟเปรียบเทียบการกระจายตัวสัมประสิทธิ์ความดันของรูปทรงลำตัวปลากัดปลาได้ร่วมกับครีบทรง รูปทรง A , B และ C

10. บทสรุปและข้อเสนอแนะ

10.1 บทสรุปสำคัญที่ได้จากการวิจัย

จากผลการวิจัยที่ได้ในแต่ละบทสามารถที่จะสรุปออกเป็นประเด็นที่สำคัญได้ 4 หัวข้อด้วยกันดังนี้

10.1.1 ประเด็นทางด้านระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลข

จะเห็นได้ว่าผลการคำนวณหาค่าของสัมประสิทธิ์ความดันด้วยระเบียบวิธีผลต่างเหนือลมอันดับที่สอง และระเบียบวิธีผลต่างควิกจะได้ผลลัพธ์จากการคำนวณเท่ากันทุกช่วงของค่าตัวเลขเรย์โนลด์ ส่วนระเบียบวิธีผลต่างเหนือลมอันดับที่หนึ่ง และระเบียบวิธีผลต่างยกกำลังจะให้ผลการคำนวณใกล้เคียงกัน แต่สิ่งที่ควรคำนึงถึง คือ ผลลัพธ์ที่ได้ของจากการคำนวณด้วยระเบียบวิธีผลต่างเหนือลมอันดับที่สองและระเบียบวิธีผลต่างควิก ย่อมมีความถูกต้องมากกว่าระเบียบวิธีผลต่างเหนือลมอันดับที่หนึ่งและระเบียบวิธีผลต่างยกกำลัง ทั้งนี้เป็นผลมาจากการการดิสครีไทซ์กำหนดให้มีค่าความถูกต้องสูงมากกว่าระเบียบวิธีผลต่างเหนือลมอันดับที่หนึ่งและระเบียบวิธีผลต่างยกกำลังนั่นเอง

10.1.2 ประเด็นทางด้านความละเอียดของจำนวนกริดเซลล์

โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริเวณใกล้กับชั้นขีดผิวรูปทรงปลากัด จะ เป็นบริเวณที่มีอิทธิพลและผลกระทบต่อผลเฉลยที่ได้เนื่องจากเป็น ตัวการสำคัญที่ส่งผลต่อเสถียรภาพและความถูกต้องในการคำนวณ

10.1.3 ประเด็นทางด้านกลไกและพฤติกรรมการไหล

การเลือกใช้รูปแบบจำลองการไหลนั้นควรพิจารณาอย่างถี่ถ้วนถึง ความถูกต้องสมเหตุสมผลที่ควรจะได้ใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุดดัง รายละเอียดในงานวิจัยนี้ได้พิสูจน์ให้เห็นอย่างชัดเจนแล้วว่า หากเลือกใช้พฤติกรรมการไหลไม่สอดคล้องกับแบบจำลองสนามการไหล ผลเฉลยที่ได้ย่อมไม่สามารถทำนายพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงได้

10.1.4 ประเด็นทางด้านอิทธิพลของลักษณะรูปทรง

จะเห็นว่ารูปทรงลำตัวปลากัดที่เหมาะสมที่สุดหรือมีค่าความต้านทานต่ำสุด คือ รูปทรงปลากัดป้าได้ ทั้งนี้เนื่องมาจากอิทธิพลของ รูปทรงเรขาคณิตของปลากัดป้าได้ที่ผิวด้านบนและด้านล่างค่อนข้าง สมมาตรกันมากกว่ารูปทรงอื่นนั่นเอง

10.3 ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

สำหรับความผิดพลาดในการคำนวณแบ่งออกได้ 3 ประการ คือ

10.3.1 ระยะต่ำสุดของกริดเซลล์มีค่าสูงเกินไป จากงานของ Liu [4] ได้เสนอว่าระยะกริดเซลล์ที่ต่ำสุด (Minimum Grid Space) ที่เหมาะสมและสอดคล้องกับผลการทดลองควรใช้ดังสมการนี้

$$\delta_{\min} = \frac{0.1}{\sqrt{Re}} \quad (3)$$

ตารางที่ 5 แสดงระยะต่ำสุดของระยะกริดที่เหมาะสมกับค่าของตัวเลขเรย์โนลด์

Re	$\delta_{\min} = \frac{0.1}{\sqrt{Re}}$
1000	0.0316
2500	0.0020
7500	0.0012
10000	0.0010

เนื่องจากงานวิจัยนี้เลือกใช้กริดแบบละเอียดซึ่งมีระยะกริดที่บริเวณผิวของรูปทรงปลากัดเท่ากับ 0.035 cm โดยคำนวณร่วมกับค่า Re ที่ระดับ 2500 จะเห็นได้ว่าระยะต่ำสุดที่ควรเลือกใช้จากตาราง 5 คือ 0.002 จะมีค่าความผิดพลาดเกิดขึ้น 42.86% แต่ทั้งนี้ที่เลือกใช้ที่ค่า Re=2500 เพื่อต้องการดูแนวโน้มของค่าเชิงปริมาณเท่านั้น

10.3.2 ข้อมูลในงานวิจัย เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยแรกของปลากัดในเชิงวิศวกรรมซึ่งโดยส่วนใหญ่จะมีเพียงเฉพาะข้อมูลทางด้านชีววิทยาและเป็นข้อมูลเชิงอนุกรมวิธาน จึงทำให้ในการหาข้อมูลเชิงวิศวกรรมในการวิจัยเป็นไปได้ยากลำบากหรือกล่าวได้ว่าขาดข้อมูลโดยสิ้นเชิง ทำให้เพียงตั้งสมมุติฐานแล้วเลือกใช้ค่าที่ครอบคลุมถึงพฤติกรรมการไหลให้มากที่สุด

11. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงสำหรับอาจารย์ทุกท่าน ทั้งในอดีตจนถึงปัจจุบันที่ตั้งใจมอบอิทธิพล คือ ความรู้อันไม่มีประมาณให้แก่ข้าพเจ้า และที่สำคัญอย่างที่สุดซึ่ง ได้แก่ ครอบครัวศรีมิตรรุ่งโรจน์อันแสนอบอุ่น ที่คอยเป็นกำลังใจให้ข้าพเจ้าเสมอในการทำงานวิจัย ตั้งแต่ งานวิจัยฉบับนี้ยังคงเป็นเพียงนามธรรม จนถึง ณ บัดนี้ ได้กลับกลายเป็นรูปธรรมที่จับต้องได้

12. เอกสารอ้างอิง

- [1] Michael Sfakiotakis, David M. Lane, and J. Bruce C.Davies. "Review of Fish Swimming Modes for Aquatic Locomotion." IEEE Journal of Oceanic Engineering., 1999 (April 1999). : 237-249.
- [2] Katz Joseph and Plotkin Allen. Low-Speed Aerodynamics. 2nd ed. United States of America : Cambrige University Press, 2001
- [3] Patrick, J.M. "Unsteady Navier-Stokes Simulation of Rainbow Trout swimming hydrodynamics." Master Thesis, Faculty of Civil Engineering, WashingtonState University, 2004
- [4] Hao Liu, Richard J.Wasserrug, and Keiji Kawachi. "A computational Fluid Dynamics Study of Tadpole Swimming." The journal of Experimental Biology 199.,(29 February 1996) : 1245-1260
- [5] Anderson, J.D. Introduction to computational fluid dynamics. Edited by Wendt, John F. New York : Spring-Verlag, 1992.
- [6] Chung, T.J. Computational fluid dynamics. Cambridge : Cambridge University Press, 2002.
- [7] H.K.Versteeg, W.Malalasekera. An introduction to Computational Fluid Dynamics. : Longman Group, 1995
- [8] Abbott, Ira H. and Alebrt, E. Von Doenhoff. Theory of Wing section. New York : Dover, 1959.