

การวิเคราะห์การไหลแบบน็อกซ์เซลล์ภายในกังหันพลังน้ำแบบไหลในแนวแกน
ความดันหัวน้ำต่ำ

Analysis of Nozzle Flow inside Low Head Propeller Turbine

ทศพร สุนทรภัส¹ อุดมเกียรติ นนทแก้ว¹ และ ยอดชาย เตียเป็น²

¹ศูนย์วิจัยวิศวกรรมคำนวณขั้นสูง ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล และการบิน-อวกาศ
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

โทร: 0-29132-5009 ต่อ 8320 โทรสาร: 02-5869-541 Email: tot_aero@yahoo.com

²ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลเรือ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา อ.ศรีราชา จ.ชลบุรี 20230

โทร: 0-3835-4850 โทรสาร: 0-385-4849 Email: yodchai_tp@yahoo.com

Tosaporn Soontornpasatch¹, Udomkiat Nontakaew¹, and Yodchai Tiaple²

¹Research Centre for Advanced Computational Engineering, Department of Mechanical and Aerospace Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok, Bangsue, Bangkok 10800, Thailand

Tel: 0-29132-5009 ext. 8320 Fax: 02-5869-541 Email: tot_aero@yahoo.com

²Department of Naval Architecture and Marine Engineering, Faculty of Engineering,

Kasetsart University, Siracha campus, Siracha, Chonburi 20230, Thailand

Tel: 0-3835-4850 Fax: 0-385-4849 Email: yodchai_tp@yahoo.com

บทคัดย่อ

การออกแบบกังหันพลังน้ำหัวน้ำต่ำแบบไหลในแนวแกนให้มีประสิทธิภาพสูงได้นั้น ผู้ออกแบบจำเป็นต้องมีความรู้ความเข้าใจในความสัมพันธ์ระหว่างรูปทรงของช่องทางการไหลและรูปแบบการไหลของน้ำเป็นอย่างดี การออกแบบช่องทางการไหลที่เหมาะสมจะทำให้การไหลเป็นไปอย่างมีเสถียรภาพและสามารถลดการสูญเสียพลังงานการไหลได้ สำหรับกังหันพลังน้ำหัวน้ำต่ำแบบไหลในแนวแกนนั้น ช่องทางการไหลที่มีความสำคัญในการบังคับการไหลของน้ำโดยตรงคือ โกว์เวนซึ่งสร้างการไหลแบบน็อกซ์เซลล์เพื่อเพิ่มพลังงานจลน์ของน้ำ และบังคับให้มีทิศทางการไหลที่เหมาะสมกับมุมปะทะของใบพัด

ในโครงการวิจัยชิ้นนี้จะเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ของรูปทรงและมุมเอียงของโกว์เวนต่อเสถียรภาพในการไหลเข้าปะทะใบกังหันและอัตราส่วนความเร็วในการไหลออกต่อความเร็วในการไหลเข้า การวิจัยจะใช้รูปทรงโกว์เวนจำนวนสี่โปรไฟล์ในการคำนวณ ใช้โปรแกรมคำนวณพลศาสตร์การไหลคำนวณความเร็วของของไหลในจุดต่าง ๆ บนผิวของโกว์เวน นำผลลัพธ์ที่ได้ไปทำการคำนวณการไหลในชั้นขีดผิวด้วยระเบียบวิธีอินทิกรัล จากนั้นจึงคำนวณเสถียรภาพของการไหลโดยคำนวณหาจุดการเปลี่ยนผ่านจากการไหลแบบราบเรียบเป็นการไหลแบบปั่นป่วนด้วยทฤษฎีเสถียรภาพ โดยทำการปรับเปลี่ยนมุม

เอียงของโกว์เวนเป็นจำนวนห้ามุม คือ 10 12.5 15 17.5 และ 20 องศา

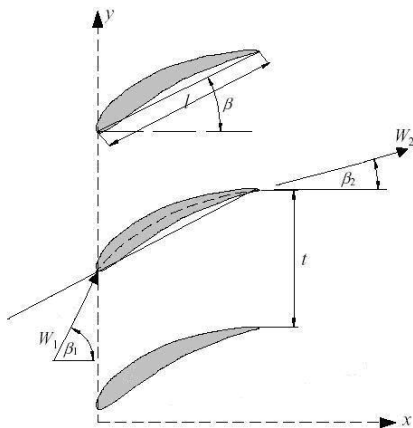
Abstract

An essential of the design of axial flow low head hydro turbine is the relationship between flow path and flow pattern. Since, the flow stability and low loss are the results of suitable flow path. Axial flow low head hydro turbine, in particular, guide vane which creates nozzle flow is important for turbine efficiency and water economy. Guide vane increases flow kinetic energy and controls incident angle of turbine blade.

The present study aims to find flow information of four different guide vane profiles for the improvement of turbine efficiency. Computational fluid dynamics program is used to calculate velocities distribution for five angles of stagger 0, 12.5, 15, 17.5 and 20 degree. Consequently, boundary layers are computed by integral method from the previous results. Finally, the instability point is identified using flow stability theory.

1. บทนำ

กังหันพลังน้ำแบบไหลในแนวแกนนั้นมีส่วนประกอบที่ใช้ในการบังคับทิศทางของไหลที่สำคัญอยู่สองส่วน คือ โกวด์เวิน (guide vane) และใบพัด (propeller) ซึ่งโกวด์เวินจะมีหน้าสร้างให้เกิดการไหลแบบน็อกซ์เซลล์และมีมุมปะทะที่เหมาะสมกับใบพัดเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในสภาวะการทำงานต่างๆ ดังนั้นการออกแบบรูปทรงของโกวด์เวินที่มีความเหมาะสมนั้น เป็นองค์ประกอบที่สำคัญอย่างหนึ่งในการออกแบบกังหันพลังน้ำแบบไหลในแนวแกนให้มีประสิทธิภาพสูง ผู้ออกแบบจะต้องมีความรู้ความเข้าใจถึงผลกระทบของรูปทรงโกวด์เวินต่อลักษณะการไหลเป็นอย่างดี เนื่องจากการไหลภายในกังหันพลังน้ำแบบไหลในแนวแกนนั้นเป็นการไหลที่มีความซับซ้อนสูง ดังนั้นในการวิเคราะห์ที่ปัญหานั้นจะใช้วิธีการลดความซับซ้อนของปัญหาโดยการสร้างพื้นผิวการไหล (stream surface) ที่มีความสมมาตรกับแกนหมุนของใบพัดขึ้น ในส่วนที่พื้นผิวการไหลแต่ละอันตัดกับโกวด์เวินนั้นจะพบว่าสามารถนำพื้นที่หน้าตัดของโกวด์เวินในแต่ละใบมาเรียงกันในแนวเส้นตรงและจากทำการวิเคราะห์การไหลบนพื้นผิวการไหลที่ผ่านพื้นที่หน้าตัดของโกวด์เวินได้แบบสองมิติ วิธีการดังกล่าวเรียกว่า cascade [9] ซึ่งแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงการเรียงตัวของ cascade

จากรูปที่ 1 β คือมุมเอียง (angle of stagger) มีค่าเป็นบวกเมื่อวัดเทียบกับแกน x ตามเข็มนาฬิกา, β_1 และ W_1 คือมุมและความเร็วของการไหลเข้า, β_2 และ W_2 คือมุมและความเร็วของการไหลออก, l คือความยาวคอर्ड , t คือ ระยะห่างระหว่างใบ (pitch)

การวิเคราะห์การไหลผ่าน cascade นั้นได้มีการทำกันอย่างแพร่หลาย Gergely และ Janous [1] ทำการเปรียบเทียบผลการทดลองกับการคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขของ cascade แบบใบปิด Lohrberg และคณะ [2] ได้ทำการวิเคราะห์การเกิดฟองอากาศเนื่องจากการไหลผ่าน cascade ด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขและทำการเทียบผลกับการทดลอง Schlichting และ Scholz [3] ได้แสดงวิธีการคำนวณการเกิดการสูญเสียพลังงานในการไหลผ่าน cascade แบบสองมิติ โดยทำการเปลี่ยนมุมการไหลเข้าที่มุมต่างๆ Gostelow [4] ได้ทำการคำนวณผลของการกระจายความดันบนผิวของ cusped blade

cascade ด้วยวิธีการประมาณค่าและทำการเปรียบเทียบผลการทดลองกับผลเฉลยแม่นยำ

ในโครงการวิจัยชิ้นนี้จะเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ของรูปทรงและมุมเอียงของโกวด์เวิน ต่อเสถียรภาพของการไหลบนผิวของโกวด์เวินและอัตราส่วนความเร็วในการไหลออกต่อความเร็วในการไหลเข้าโดยใช้รูปทรงโกวด์เวินที่มีเส้นแคมเบอร์แบบพาราโบลา (Parabolic-arc camber) มีจุดสูงสุดของแคมเบอร์ (Maximum camber) ที่ 0.3 0.4 0.6 และ 0.7 ของความยาวเส้นคอर्ड และมีการกระจายตัวของผิวโค้งแบบรูปทรงแพนอากาศ เบอร์ NACA 0012 เรียงกันในแบบ Linear Cascade มีระยะห่างกันในแนวตั้ง (space-chord ratio) เท่ากับหนึ่ง หน่วยความยาวเส้นคอर्डการคำนวณความเร็วของของไหลในจุดต่าง ๆ บนผิวโกวด์เวินด้วยโปรแกรมการคำนวณพลศาสตร์การไหลแบบวิธีพานเนล (Panel Method) ซึ่งทำการเขียนด้วยโปรแกรม MATLAB 6.0 โดยกำหนดมุมการไหลเข้าเป็นศูนย์กลาง ทำการปรับเปลี่ยนมุมเอียงของโกวด์เวินเป็นจำนวนห้ามุม คือ 10 12.5 15 17.5 และ 20 องศาตามลำดับ ทำการคำนวณอัตราส่วนความเร็วในการไหลออกต่อความเร็วในการไหลเข้าและทำการคำนวณการไหลในชั้นขีตติวิตัวระยะเบียดวิธีอินทิกรัล นำผลที่ได้มาทำการคำนวณเสถียรภาพของการไหล โดยคำนวณหาจุดไร้เสถียรภาพ (instability point) ตามทฤษฎีเสถียรภาพในการไหล

ผลของงานวิจัยชิ้นนี้จะนำไปเป็นข้อมูลในการออกแบบรูปทรงของโกวด์เวินให้มีความเหมาะสม เพื่อนำไปใช้ในการพัฒนาและปรับปรุงสมรรถนะและประสิทธิภาพกังหันพลังน้ำไหลในแนวแกนแบบหัวน้ำต่ำให้สูงขึ้นต่อไป

2. ทฤษฎี

2.1 การคำนวณด้วยวิธีพานเนล

การไหลแบบไม่มีความหนืด (inviscid) แบบไม่อัดตัว (incompressible flow) โดยการไหลไม่มีการไหลหมุนวน (irrotational flow) ตลอดทั้งสนามการไหล ยกเว้นบนพื้นที่สร้างแรงยกและผิวเวคสามารถเขียนสมการควบคุมในรูปแบบของสมการลาปลาซ (Laplace's equation)

$$\nabla^2 \phi = 0 \tag{1}$$

โดย ϕ คือ ศักยะความเร็วรบกวน (Perturbation velocity potential) ในการวิเคราะห์การไหลผ่านวัตถุที่มีแรงยกนั้น สามารถทำการคำนวณได้โดยการแบ่งพื้นผิวของวัตถุออกเป็นส่วนเล็ก ๆ เรียกว่า "พานเนล" (panel) และมีการกระจายตัวของจุดหมุนวน (vortex singularity) ในแต่ละพานเนลมีความเข้มคงที่ ความเร็วของการไหล ณ จุดต่างๆซึ่งถูกเหนี่ยวนำ (induce) โดยจุดหมุนวนคือ

$$dV = -\frac{\gamma ds}{2\pi r} \tag{2}$$

โดย V คือความเร็วของการไหล ณ จุดใดจุด, γ คือ ความเข้มของจุดหมุนวนต่อหน่วยความยาว, r คือระยะห่างระหว่างจุดหมุนวนและจุดใดจุดในการไหลในกรณีของโกวด์เวินที่เรียงตัวในแบบ cascade ที่มีความ

ห่างของแต่ละใบเท่าๆกันนั้น ความเร็วของการไหลบนผิวของโกดเวนที่จุดใดๆ สามารถเขียนได้เป็น

$$W_s = u_\infty \cos \beta_m + v_\infty \sin \beta_m + \frac{1}{2t} \int \gamma(\xi, \eta) k(\xi, \eta) ds(\xi, \eta) \quad (3)$$

โดย

$$k(\xi, \eta) = \frac{\sinh\left(\frac{2\pi}{t}(x-\xi)\right) \sin \beta_m - \sin\left(\frac{2\pi}{t}(y-\eta)\right) \cos \beta_m}{\cosh\left(\frac{2\pi}{t}(x-\xi)\right) - \cos\left(\frac{2\pi}{t}(y-\eta)\right)} \quad (4)$$

เมื่อ ξ และ η คือตำแหน่งของจุดหมุนบนผิวของโกดเวน, β_m คือมุมเอียงของแต่ละพาแนล, u_∞ และ v_∞ คือความเร็วของการไหลเข้าในแกน x และแกน y, W_s คือ ความเร็วของการไหลบนผิวของโกดเวนที่จุดใดๆ จากเงื่อนไขที่ความเร็วบนพื้นผิวด้านในของโกดเวนมีค่าเป็นศูนย์ และการใช้เงื่อนไขของ Kutta-Joukowski ที่กำหนดให้ความเข้มของจุดหมุนวนที่ขอบท้ายของโกดเวนที่ผิวด้านบนและด้านล่าง มีค่าความเข้มเท่ากันแต่มีทิศทางตรงข้ามกัน ซึ่งจะได้

$$\gamma(UTE) = -\gamma(LTE) \quad (5)$$

โดย $\gamma(UTE)$ และ $\gamma(LTE)$ คือ ความเข้มของจุดหมุนวนที่ขอบท้ายของโกดเวนที่ผิวด้านบนและด้านล่าง จากเงื่อนไขทั้งหมดทำให้สามารถแก้สมการที่ (3) เพื่อหาค่าความเข้มของจุดหมุนวนและนำมาหาค่าความเร็วของการไหลบนผิวของโกดเวนในจุดต่างๆได้

2.2 การคำนวณการไหลในชั้นขีดผิว

ในการคำนวณการไหลในชั้นขีดผิวนั้นเราจะให้วิธีการประมาณค่าของ Karman และ Pohlhausen [6] สำหรับการไหลในสองมิติมาทำการคำนวณ โดยทำการแก้สมการโมเมนตัมสำหรับการไหลในชั้นขีดผิว

$$U^2 \frac{d\delta_2}{dx} + (2\delta_2 + \delta_1)U \frac{dU}{dx} = \frac{\tau_0}{\rho} \quad (6)$$

โดยมี δ_1 คือ ความหนาแทนที่ (displacement thickness), δ_2 คือ ความหนาโมเมนตัม (momentum thickness), U คือความเร็วของของไหลเมื่อยังไม่พิจารณาความหนืด, τ_0 คือความเค้นเฉือนของของไหลที่ผิว, ρ ความหนาแน่นของของไหล ในการแก้สมการจะทำการสมมติรูปแบบของความเร็วในชั้นขีดผิวเป็นแบบสมการกำลังสี่

$$\frac{u}{U} = f(\eta) = a\eta + b\eta^2 + c\eta^3 + d\eta^4 \quad (7)$$

โดย $\eta = y/\delta(x)$ และ $\delta(x)$ คือ ความหนาของชั้นขีดผิว จากนั้นกำหนดตัวแปรไร้มิติ Λ และตัวแปรรูปร่าง K (Shape factor)

$$\Lambda = \frac{\delta_2^2}{v} \frac{dU}{dx} \quad (8)$$

$$K = \frac{\delta_2}{v} \frac{dU}{dx} \quad (9)$$

โดย V คือความหนืดจลนศาสตร์ จากสมการที่ (6) เราสามารถลดรูปสมการได้เป็น

$$\frac{dZ}{dx} = \frac{F(K)}{U} \quad (10)$$

โดย $Z = \delta_2/v$

ค่าของ F(K) เราจะใช้ค่าการประมาณค่า Walz [6] ซึ่งจะอยู่ในรูปของสมการ

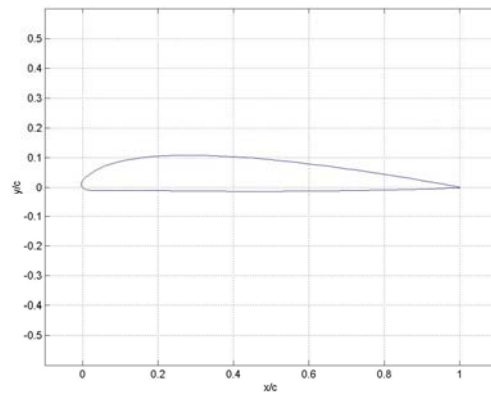
$$F(K) = 0.470 - 6K \quad (11)$$

จากสมการที่ (10) และ (11)ทำให้เราสามารถแก้สมการหาค่า Z(x) ด้วยวิธีอินทิกรัลได้ จากนั้นจึงทำการคำนวณหาค่า K โดยใช้ความสัมพันธ์

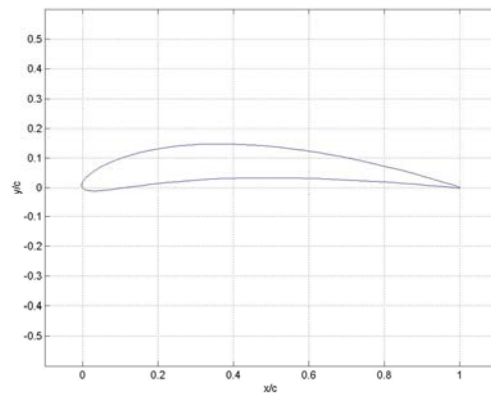
$$K = Z \frac{dU}{dx} \quad (10)$$

นำค่า K ที่ได้มาหาความหนาโมเมนตัม ค่าความหนาของชั้นขีดผิวและค่า Λ จากนั้นจึงทำการคำนวณค่าเรย์โนลด์เฉพาะแห่ง (local Reynolds number) และ ค่าเรย์โนลด์วิกฤติ (critical Reynolds number) ซึ่งทำให้เราสามารถทราบจุดไร้เสถียรภาพ (Instability point) ในการไหลได้

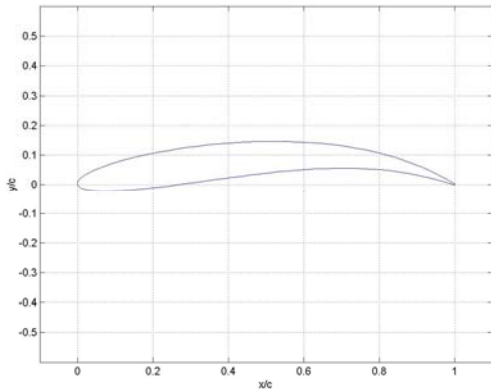
สำหรับรูปแบบโปรไฟล์ของโกดเวนที่ใช้ในการวิเคราะห์จะเป็นแบบเส้นแคมเบอร์พาราโบลา มีจุดสูงสุดของเส้นแคมเบอร์ที่ ตำแหน่ง 0.3 0.4 0.6 และ 0.7 ของความยาวครีต มีการกระจายตัวของผิวโค้งแบบรูปทรงแพนอากาศ เบอร์ NACA 0012 แสดงดังรูปที่ 2 ถึง 5



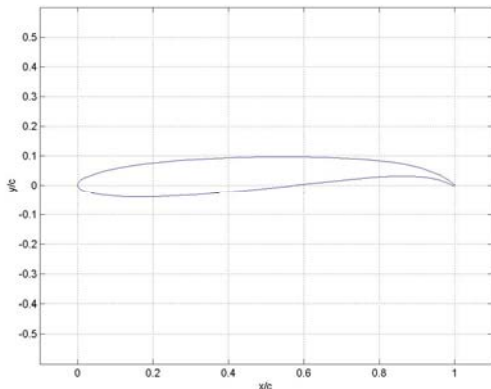
รูปที่ 2 โปรไฟล์แคมเบอร์ 0.3



รูปที่ 3 โปรไฟล์แคมเบอร์ 0.4



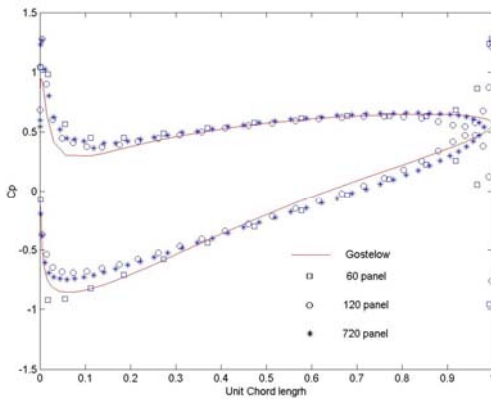
รูปที่ 4 โปรไฟล์แคมเบอร์ 0.6



รูปที่ 5 โปรไฟล์แคมเบอร์ 0.7

3. ผลการเปรียบเทียบการคำนวณกับผลการทดลอง

เพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้องของโปรแกรมที่ทำการพัฒนาขึ้น จึงได้ทำการทดสอบความถูกต้องของโปรแกรม ด้วยการคำนวณของ Gostelow [4] โดยใช้รูปทรงของ cusped blade ผลการคำนวณ สัมประสิทธิ์ความดันบนพื้นผิวของ cusped blade แสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 แสดงผลการคำนวณเทียบกับงานของ Gostelow

จากผลการทดสอบโปรแกรมพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความดัน ในช่วง 0 ถึง 0.8 ของความยาวคอร์ดนั้นใกล้เคียงกับการคำนวณของ Gostelow ในช่วง 0.8 ถึง 1 ของความยาวคอร์ดนั้น ที่จำนวนพานแนล 60 และ 120 จะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความดันมีการแกว่งค่อนข้างมาก โดยแบบ 60 พานแนลจะมีการแกว่งตัวของค่ามากกว่าแบบ 120 พานแนล แต่ในกรณีที่ทำกรแบ่งเป็น 720 พานแนลจะพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความดันไม่เกิดการแกว่งตัว ทั้งนี้เนื่องมาจากการแบ่ง พานแนลที่น้อยเกินไปจะทำให้ตำแหน่งของพานแนลที่กำหนดเงื่อนไขตาม สมการที่ (5) เกิดความคลาดเคลื่อนทำให้เกิดการแกว่งของค่าบริเวณ ปลายด้านหลังของ cusped blade

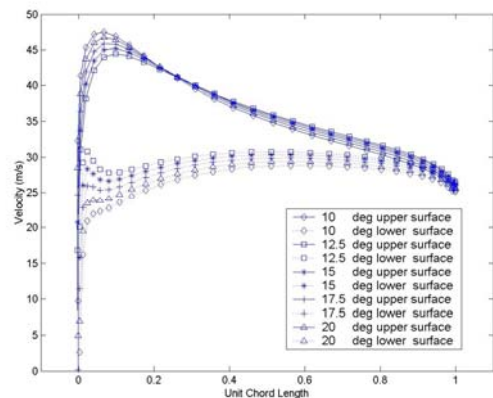
4. ผลการคำนวณ

อัตราส่วนความเร็วในการไหลออกต่อความเร็วในการไหลเข้า แสดงดังตารางที่ 1

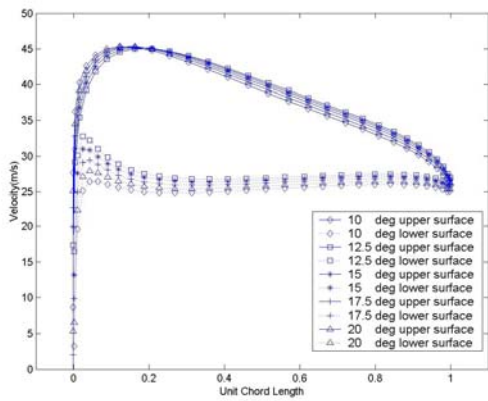
ตารางที่ 1 แสดงอัตราส่วนความเร็วในการไหลออกต่อความเร็วในการไหลเข้า

มุมเอียง โกด์เวน (องศา)	โปรไฟล์ แคมเบอร์ 0.3	โปรไฟล์ แคมเบอร์ 0.4	โปรไฟล์ แคมเบอร์ 0.6	โปรไฟล์ แคมเบอร์ 0.7
-10	1.032	1.069	1.124	1.102
-12.5	1.044	1.088	1.150	1.124
-15	1.058	1.108	1.179	1.149
-17.5	1.074	1.132	1.211	1.176
-20	1.093	1.158	1.245	1.205

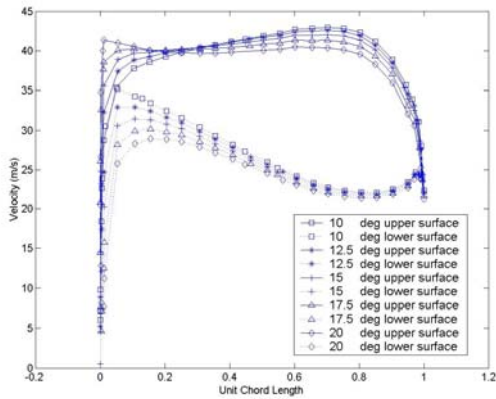
จากตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าทุกโปรไฟล์นั้นสามารถทำให้เกิดการไหลแบบน้อชเชิลได้ โดยแบบโปรไฟล์แคมเบอร์ 0.6 นั้นจะมีอัตราส่วนความเร็วในการไหลออกต่อความเร็วในการไหลเข้ามากที่สุดตรงลงมา คือ แบบแคมเบอร์ 0.7, แคมเบอร์ 0.4 และแคมเบอร์ 0.3 ตามลำดับ การกระจายตัวของความเร็วบนผิวของ โกด์เวนนั้นเป็นไปตามรูปที่ 7 ถึง 10



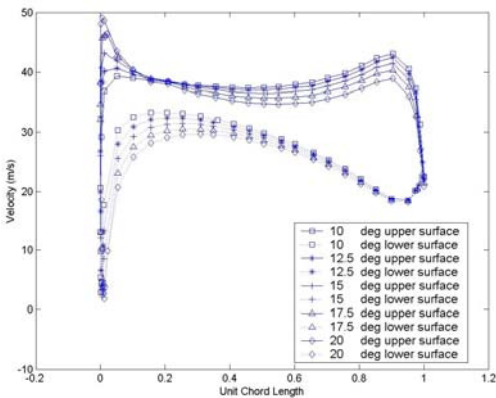
รูปที่ 7 แสดงผลการกระจายความเร็วบนผิวของโกด์เวนที่มีจุดสูงสุด แคมเบอร์ 0.3 ของความยาวคอร์ด



รูปที่ 8 แสดงผลการกระจายความเร็วบนผิวของโก้ดเวนที่มีจุดสูงสุดแคมเบอร์ 0.4 ของความยาวคอर्ड



รูปที่ 9 แสดงผลการกระจายความเร็วบนผิวของโก้ดเวนที่มีจุดสูงสุดแคมเบอร์ 0.6 ของความยาวคอर्ड

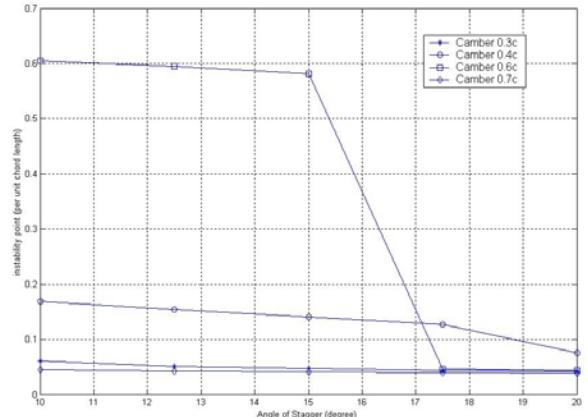


รูปที่ 10 แสดงผลการกระจายความเร็วบนผิวของโก้ดเวนที่มีจุดสูงสุดแคมเบอร์ 0.7 ของความยาวคอर्ड

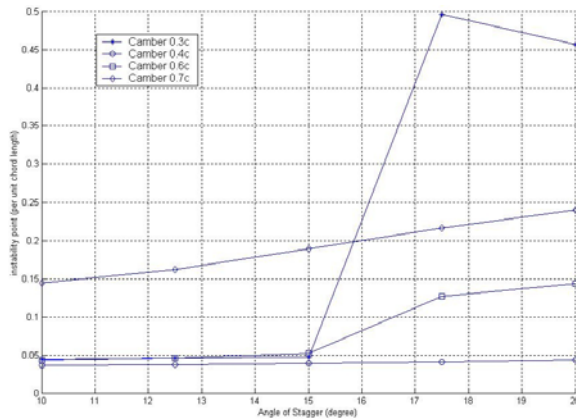
จากการคำนวณพบว่า โก้ดเวนที่มีแคมเบอร์ 0.3 ของความยาวคอर्डนั้น ที่ผิวด้านบนความเร็วจะค่อยๆเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่มีความเร็ว

สูงสุดอยู่ที่ตำแหน่ง 0.1 จากนั้นความเร็วจะค่อยๆลดลง ในส่วนของผิวด้านล่างนั้นที่มุมเอียง 10 องศาจะเกิดจุดความเร็วสูงสุดในช่วง 0.03 ถึง 0.05 ความเร็วจะค่อยๆลดลงและกลับมีค่ามากขึ้นอีกครั้งที่ตำแหน่ง 0.5 เมื่อปรับมุมเอียงเป็น 12.5 และ 15 องศาตามลำดับ จะพบว่าการกระจายตัวของความเร็วบนผิวของโก้ดเวนนี้นี้มีลักษณะเดียวกับที่มุมเอียง 10 องศา ค่าความเร็วสูงสุดจะมีค่าค่อยๆลดลง แต่ไม่เกิดการเปลี่ยนตำแหน่งบนความยาวคอर्डมากนัก ที่มุมเอียง 17.5 และ 20 องศา นั้น จะไม่เกิดจุดสูงสุดของความเร็วที่ด้านหน้าความยาวคอर्ड ความเร็วจะค่อยๆเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดอยู่ในช่วง 0.6 ถึง 0.65 แทน ในส่วนของโก้ดเวนที่มีจุดสูงสุดแคมเบอร์ที่ 0.4 ของความยาวคอर्डนั้น การกระจายตัวของความเร็วบนผิวด้าน มีลักษณะเดียวกับโก้ดเวนที่มีจุดสูงสุดแคมเบอร์ที่ 0.3 แต่จุดที่มีความเร็วสูงสุดนั้นจะอยู่ในช่วง 0.15 ถึง 0.3 และอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วมีค่าน้อยกว่าโก้ดเวนที่มีจุดสูงสุดแคมเบอร์ที่ 0.3 สำหรับที่ผิวด้านล่างนั้นจะพบว่า จะเกิดจุดสูงสุดของความเร็วอยู่ในช่วง 0.05 ถึง 0.1 หลังจุดที่เกิดความเร็วสูงสุดอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วจะมีค่าเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

สำหรับโก้ดเวนที่มีจุดสูงสุดของแคมเบอร์ที่ 0.6 ของความยาวคอर्डนั้น การกระจายตัวของความเร็วมีความแตกต่างจากสองแบบแรกอย่างเห็นได้ชัด บนผิวด้านบนที่มุมเอียง 10 ถึง 17.5 องศา จะไม่เกิดจุดที่มีความเร็วสูงสุดด้านหน้า แต่จะมีอยู่ในช่วง 0.7 ถึง 0.8 แทน ยกเว้นในกรณีที่มีมุมเอียง 20 องศา นั้น จะเกิดจุดที่มีความเร็วสูงสุดอยู่ที่ด้านที่หน้า ความเร็วจะค่อยๆลดลงเพียงเล็กน้อย และค่อยๆเพิ่มขึ้นจนมีค่าสูงสุดอยู่ในช่วง 0.7 ที่ผิวด้านล่างของโก้ดเวนจะเกิดจุดที่มีความเร็วสูงสุดอยู่ในช่วง 0.05 ถึง 0.1 หลังจากจุดดังกล่าวความเร็วจะค่อยๆลดลงจนถึงที่ตำแหน่ง 0.8 ของความยาวคอर्डความเร็วจะค่อยๆเพิ่มขึ้นอีกครั้ง สำหรับโก้ดเวนที่มีจุดสูงสุดของแคมเบอร์ที่ 0.7 นั้น การกระจายตัวของความเร็วบนผิวด้านบนและด้านล่าง จะมีลักษณะใกล้เคียงกับโก้ดเวนที่มีจุดสูงสุดของแคมเบอร์ที่ 0.6 ยกเว้นที่ผิวด้านบนนั้น จะเกิดจุดที่มีความเร็วสูงสุดอยู่ด้านหน้าในทุกๆค่าของมุมปะสำหรับการคำนวณจุดไร้เสถียรภาพในการไหลนั้น แสดงดังรูปที่ 11 และ 12



รูปที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงกับตำแหน่งจุดไร้เสถียรภาพในการไหลของผิวโก้ดเวนด้านบน



รูปที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงกับตำแหน่งจุดไร้เสถียรภาพในการไหลของผิวโกดเวนด์้านล่าง

จากการคำนวณเพื่อหาจุดไร้เสถียรภาพในการไหลนั้นพบว่า โกดเวนด์้านบนทุกแบบนั้นจะมีลักษณะไปในทิศทางเดียวกัน นั่นคือ ที่ผิวด้านบนนั้น ระยะทางจากจุดการไหลหยุดนิ่ง (stagnation point) ด้านหน้าจนถึงจุดไร้เสถียรภาพจะมีค่าอยู่จุดลงเมื่อมุมเอียงมีค่ามากขึ้น ยกเว้นในกรณีของโกดเวนด์้านบนที่มีจุดสูงสุดของแคมเบอร์ที่ 0.6 ของความยาวคอร์ดนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วเมื่อมุมเอียงมีค่ามากกว่า 15 องศา ทั้งนี้เนื่องจากที่มุมเอียง 10 ถึง 15 องศา นั้น จุดที่การไหลมีความเร็วสูงสุดจะอยู่ด้านหลังกึ่งกลางของความยาวคอร์ด แต่ที่มุมเอียงมากกว่า 15 องศา นั้น จุดที่การไหลมีความเร็วสูงสุดจะเลื่อนมาอยู่ด้านหน้ากึ่งกลางของความยาวคอร์ดแทน การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจึงทำให้จุดไร้เสถียรภาพในการไหลเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วสำหรับในผิวด้านล่างนั้น แนวโน้มจะแตกต่างไปจากผิวด้านบน เมื่อมุมเอียงมากขึ้น ระยะทางจากจุดการไหลหยุดนิ่งด้านหน้าจนถึงจุดไร้เสถียรภาพจะค่อยๆมีค่ามากขึ้น ในกรณีของโกดเวนด์้านบนที่มีจุดสูงสุดของแคมเบอร์ที่ 0.3 ของความยาวคอร์ดนั้นจะแตกต่างจากกรณีอื่นเล็กน้อยที่มุมเอียงมากกว่า 15 องศา นั้นการเปลี่ยนแปลงจะระยะทางของจุดไร้เสถียรภาพในการไหลนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วและมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อมุมเอียงมีค่ามากกว่า 17.5 องศา ซึ่งเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงจุดที่การไหลมีความเร็วสูงสุดอย่างรวดเร็วเช่นเดียวกับในกรณีของผิวด้านบนของโกดเวนด์้านบนที่มีจุดสูงสุดของแคมเบอร์ที่ 0.6

5. สรุป

โกดเวนด์้านบนที่มีเส้นแคมเบอร์แบบพาราโบลา มีจุดสูงสุดของแคมเบอร์ที่ 0.3 0.4 0.6 และ 0.7 ของความยาวเส้นคอร์ด และมีการกระจายตัวของผิวโค้งแบบรูปทรงแพนอากาศ เบอร์ NACA 0012 นั้นสามารถสร้างการไหลแบบน้อซเซิลได้เป็นอย่างดี ทุกแบบมีอัตราส่วนความเร็วในการไหลออกต่อความเร็วในการไหลเข้ามากกว่าหนึ่ง และมีค่าดังกล่าวเพิ่มขึ้นตามการเอียงของโกดเวนด์้านบน สำหรับเสถียรภาพในการไหลของโกดเวนด์้านบนนั้น ที่ผิวด้านบนจะมีเสถียรภาพลดลงตามการเอียงของใบ เนื่องจากตำแหน่งของจุดไร้เสถียรภาพในการไหลนั้น เคลื่อนที่เข้าหาจุดการไหลหยุดนิ่งด้านหน้ามากขึ้น แต่ในทางกลับกันที่ผิว

ด้านล่างการไหลจะมีเสถียรภาพมากขึ้นตามการเอียงของโกดเวนด์้านบน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเสถียรภาพการไหลที่ผิวด้านบนนั้น มีความสำคัญมากกว่าด้านล่างเนื่องจากเป็นด้านที่มีโอกาสเกิดการไหลแบบปั่นป่วนมากกว่า ดังนั้นการออกแบบโกดเวนด์้านบนที่มีความเหมาะสมที่สุดในการทำงานควรออกแบบให้มีจุดสูงสุดของแคมเบอร์อยู่ในช่วง 0.4 ของความยาวคอร์ด เนื่องจากการไหลที่ผิวด้านบน ไม่มีการเปลี่ยนตำแหน่งของจุดไร้เสถียรภาพอย่างรวดเร็วในทุกมุมเอียง และมีระยะห่างของจุดไร้เสถียรภาพกับจุดการไหลหยุดนิ่งด้านหน้ามากกว่าแบบแคมเบอร์ 0.3 และ 0.7

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Gergely, R., Janos, V., 2005. Validate of computational Fluid Dynamics Method to be applied to linear cascade of twisted-swept blades. Periodica Polytechnica SER. MECH. ENG., VOL. 49, NO. 2, pp. 163-180.
- [2] Lohrberg, H., Stoffel, B., Fortes, R., Rebound, J.L, 2001. Numerical and Experiment investigations on the cavitation flow in a cascade of hydrofoil. CAV2001:Session B1003.
- [3] Schlichting, H., Scholz, N., 1951. Über die theoretische Berechnung der Stromungsuverluste eines ebenen schoutelgitters. Ing-Arch 19,pp. 42-65.
- [4] Gostelow, J.P, 1964. Potential flow through cascade: a comparison Between exact and approximate solution. ARC CP807.
- [5] Arnold, M.K, Chuen, Y.C, 1986. Foundation of Aerodynamics : Base on aerodynamics design 4th edition. John Wiley&sons Inc.
- [6] Schlichting, H., 1979. Boundary layer theory 7th edition. McGraw Hill Company.
- [7] Gostelow, J.P, 1984. Cascade Aerodynamics. Pergamon Press Ltd.
- [8] Abbott, I.H, Doenhoff , A.E, 1958.Theory of Wing Sections. Dover Publications Inc.
- [9] Cengel ,Y., CIMBALA, J., 2006. Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications. McGraw-Hill Companies.