

วิธีคำนวณออกแบบใบพัดเครื่องจักรเทอร์โบแบบอ้อม

COMPUTATIONAL METHOD FOR INVERSE BLADE DESIGN

วันชัย อัสวภูษิตกุล
Wanchai Asvapoositkul

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ถนนสุขสวัสดิ์ 48 กรุงเทพฯ 10140
Mechanical Engineering Department
King Mongkut's Institute of Technology Thonburi
Bangmod, Bangkok 10140

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอพื้นฐานการออกแบบใบพัดเครื่องจักรเทอร์โบแบบสองมิติซึ่งพัฒนาโดย Hawthorne และคณะ [1] เทคนิคการออกแบบนี้จะใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาการออกแบบสามมิติ ซึ่งทางศูนย์วิจัยกลศาสตร์ของไหลและเครื่องจักรเทอร์โบ (FUTURE) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กำลังดำเนินการอยู่

ในการคำนวณนี้ เราสมมุติให้ความเร็วของการไหลแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ ความเร็วเฉลี่ยในแนวพิกซ์และเทอมพริออดิก ค่าเฉลี่ยในแนวพิกซ์เราพิจารณาได้จาก Stokes stream function และเทอมพริออดิก หาได้จากการประยุกต์ใช้ Clebsch formulation จากการกำหนดสภาวะขอบเขตที่ระยะไกลจากทางเข้าและออกของใบพัดมาก ก็จะสามารถคำนวณหารูปร่างของใบพัดได้ โดยสมมุติให้ความเร็วของการไหลของของไหลขนานไปในแนวเดียวกับรูปร่างของใบพัด จากสมการที่เป็นกรอบสามารถวิเคราะห์หาคำตอบโดยใช้วิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ ทั้งนี้รูปร่างสุดท้ายของใบพัด คือ คำคำตอบที่ converge จากการ iteration ได้มีการประยุกต์ใช้เทคนิคนี้ในการออกแบบ inlet guide vane, compressor และ impulse turbine ซึ่งสรุปได้ว่าวิธีการนี้สามารถดำเนินการได้ง่ายและมีประสิทธิภาพสูง

SUMMARY

The purpose of this paper is to present the basic ideas of an inverse methodology for the design of 2-D turbomachinery blade described by Hawthorne et al [1]. Its formulation could be viewed as a foundation for the design of 3-D configuration which is currently under development at the Fluid & Turbomachinery Research Centre (FUTURE) of KMITT.

The flow velocity is divided into pitch-averaged and periodic terms. The pitch-averaged velocity is determined by using Stokes stream function while the periodic velocity is computed by using Clebsch formulation. In the present implementation, the boundary conditions at far upstream and far downstream have been modified and the blade profile is computed iteratively by assuming that the blade shape and the flow velocity are parallel. The governing equations are solved using a finite-difference approach. Calculations are carried out for the design of highly-loaded inlet guide vane, compressor and impulse turbine. The computational results show the method is simple and effective.

บทนำ

เทคนิคการออกแบบใบพัดของเครื่องจักรเทอร์โบ (turbomachinery blade) แบ่งออกเป็น 2 วิธีใหญ่ๆ คือ แบบตรง (direct method) และแบบอ้อม (inverse method) ในการออกแบบด้วยวิธีแบบตรงเราจะกำหนดข้อมูลทางด้านกายภาพทั้งหมด (physical element) รวมถึงรูปร่างที่สมบูรณ์ของใบพัด (complete geometric specification) จากนั้นก็จะวิเคราะห์หาการไหลและสมรรถนะการไหลของของไหล จากรูปร่างใบพัดที่กำหนด อีกวิธีหนึ่งกระบวนการออกแบบจะย้อนกลับวิธีข้างต้น โดยเรากำหนดคุณลักษณะการไหล (flow characteristics) ที่ต้องการจากนั้นใช้เทคนิคทางคณิตศาสตร์ (mathematical technique) คำนวณหารูปร่างของใบพัดที่เหมาะสมกับการไหลของของไหลตามที่กำหนด

โดยทั่วไปการออกแบบด้วยวิธีแบบตรง (direct method) ง่ายแต่บางครั้งรูปร่างของใบพัดที่

กำหนด อาจให้คุณลักษณะการไหลไม่ตรงกับการใช้งานจริงได้ การออกแบบด้วยวิธีนี้จึงอาศัยประสบการณ์ในการออกแบบมาก เพราะผู้ออกแบบจะต้องทราบลักษณะรูปร่างของใบพัด ที่เหมาะสมกับคุณลักษณะการไหลที่ต้องการไปใช้งาน

ปัจจุบันการออกแบบด้วยวิธีแบบอ้อม (inverse method) เป็นที่นิยมกันมากเพราะสามารถออกแบบใบพัดให้ได้กับคุณลักษณะทางด้านพลศาสตร์ของไหลและสภาวะขอบเขตที่กำหนด แต่วิธีนี้ก็ยังมีข้อจำกัดในการใช้เทคนิคทางคณิตศาสตร์ในการหาคำตอบของสมการ

บทความนี้จะกล่าวถึงวิธีการคำนวณการออกแบบใบพัดเครื่องจักรเทอร์โบแบบอ้อมทฤษฎีพื้นฐานสำหรับการออกแบบนี้ ดูได้จากเอกสารอ้างอิงหลายๆ ฉบับ [1-4] และรวบรวมสรุปดังแสดงในบททฤษฎีของเอกสารฉบับนี้ Hawthorne และคณะ [1] ได้พัฒนาทฤษฎีการออกแบบใบพัด cascade แบบสองมิติด้วย

วิธีอ้อม (inverse design) และปรับปรุงสำหรับใบพัด annular แบบสามมิติ [2] จากนั้นได้มีการนำไปประยุกต์ในการออกแบบใบพัดที่ไหลในแนวรัศมี (radial) และในแนวผสม (mixed flow) แบบอัดตัวได้สามมิติ (3-D Compressible flow) โดย Zangeneh [4]

งานที่ศึกษานี้อาศัยการคำนวณแบบสองมิติของ Hawthorne แบบอัดตัวได้ เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบใบพัดเครื่องจักรเทอร์โบที่มีภาระสูง (highly-load) และเป็นต้นแบบในการพัฒนาการคำนวณแบบสามมิติ ซึ่งทางศูนย์วิจัยกลศาสตร์ของไหลและเครื่องจักรเทอร์โบ (FUTURE) ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กำลังดำเนินการอยู่ ความแตกต่างของวิธีนี้อยู่ที่เทคนิคการแก้สมการคณิตศาสตร์ โดยเขียนสมการหลักให้อยู่ในรูปของสมการพาหะดิฟเฟอเรนเชียลที่สามสามารถหาคำตอบด้วยการใช้การคำนวณแบบไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์

ทฤษฎี

ในการคำนวณนี้เราสมมุติว่า การไหลของของไหลเป็นแบบไม่มีความหนืด (inviscid) และใบพัดบางมาก (infinitely thin) เราอาจนิยามพื้นผิวของใบพัดได้ดังนี้

$$\alpha = y - f(x) = ns \quad (1)$$

โดย α คือ พื้นผิวของใบพัด (blade surface) x และ y คือ ระยะในแนวระดับและตั้งฉาก (Cartesian co-ordinate) ดังแสดงในรูปที่ 1 ที่ทางเข้า (leading edge) ของใบพัดแต่ละใบอยู่ที่ $x=0$ และทางออก (trailing edge) อยู่ที่ $x=1$ ดังนั้นระยะของทุกเทอมจะเป็นอัตราส่วนของความยาวในแนวแกน (axial) f คือ เส้น camber ของใบพัด n มีค่าเป็นศูนย์ หรือ เป็นเลขจำนวนเต็ม

และ s คือ ระยะของใบพัด (blade spacing) หรือ พิช (pitch)

จากทฤษฎี Circulation พบว่าใบพัดอาจแทนด้วยการกระจาย bound vorticity โดย strength ของมันพิจารณาได้จาก swirl schedule ดังแสดงในรูปที่ 1 โดย $\gamma(x)$ คือ strength ของ bound vorticity ตลอดเส้น camber ความเร็วของการไหล (flow velocity) แบ่งออกเป็นสองส่วนคือความเร็วเฉลี่ยในแนวพิช (pitch-average) $\bar{V}$ และเทอมพริ-อดิก (periodic) $\bar{v}$

ค่าเฉลี่ยในแนวพิช (pitchwise mean value)

ในการหาค่าเฉลี่ยในแนวพิช เราพิจารณาได้จาก

$$\bar{V} = \frac{1}{s} \int_0^s v \, dy \quad (2)$$

เมื่อใช้ Stokes stream function ในการพิจารณาความเร็วเฉลี่ยในแนวพิชโดยแบ่งออกเป็นในแนวแกน x และ แกน y ความเร็วเฉลี่ยในแนวสัมผัส (mean tangential velocity) $\bar{V}_y$ หาได้จาก mean boundary vorticity นั่นคือ

$$\frac{d\bar{V}_y}{dx} = \bar{\gamma}(x) \quad (3.a)$$

หรืออาจเขียนได้ว่า

$$\bar{V}_y = \bar{V}_{y1} + \int_0^x \bar{\gamma}(t) \, dt \quad (3.b)$$

โดยตัวห้อยท้าย 1 หมายถึง ตำแหน่งที่ทางเข้า (upstream) เพื่อให้สภาวะคูตตา (Kutta condition) เป็นตามที่กำหนดที่ตำแหน่งทางออก (trailing edge) จะต้องให้ $\bar{\gamma}(1) = 0$ และที่ทางเข้า (leading edge) $\bar{\gamma}(0) = 0$

การหาความเร็วเฉลี่ยในแนวแกน (mean axial velocity) $\bar{V}_x$ พิจารณาได้จากสมการพลังงาน

(energy equation) [3]

$$\nabla_x = \left\{ 1 + M_\infty^2 \frac{\gamma-1}{2} [1 - \bar{V}_x^2 x + \bar{V}_y^2] \cos^2 \beta_1 \right\}^{-\frac{1}{\gamma-1}} \quad (4)$$

โดย M_∞ คือ Mach number ที่ตำแหน่งไกลจากทางเข้ามาก (far upstream)

γ คือ ค่าคงที่ของก๊าซ (gas constant)

β_1 คือ มุมที่ไหลเข้าของใบพัด (flow angle)

เทอมปริกอดิก (periodic terms)

เทอมปริกอดิก หาได้จากการประยุกต์ใช้

Clebsch formulation โดยหาได้จาก

$$\tilde{V} = \nabla \phi(x, y) - S(\alpha) \nabla \bar{V}_y \quad (5.1)$$

โดย ϕ คือ potential function

S คือ sawtooth function ซึ่งอาจเขียนอยู่ในรูปของ Fourier series

$$S(\alpha) = 2 \operatorname{Re} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{i\lambda_n \alpha}}{i\lambda_n} = -2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(\lambda_n \alpha)}{\lambda_n}$$

$$\text{โดย } \lambda_n = \frac{2\pi n}{s}$$

Re คือ ส่วนของค่าจริง (real part) และ

$$i = \sqrt{-1}$$

สมการ (5.1) สามารถเขียนความเร็วในแต่ละแกนได้ดังนี้

$$\tilde{V}_x = \frac{\partial \phi}{\partial x} - S(\alpha) \bar{V}_y(x) \quad (5.2)$$

$$\tilde{V}_y = \frac{\partial \phi}{\partial y} \quad (5.3)$$

จากสมการความต่อเนื่อง (continuity equation) จะได้

$$\nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (6)$$

ทำนองเดียวกับความเร็วถ้าเราแยกความหนา

แน่น (ρ) ออกเป็นค่าเฉลี่ย และค่าปริกอดิก (periodic) ในแนวสัมผัสหรือเขียนได้ว่า

$$\rho = \bar{\rho} + \tilde{\rho} \quad (7)$$

แทนค่าในสมการ (6) และสมมุติว่า $\frac{\tilde{\rho}}{\bar{\rho}} \approx 0$ สมการ (6) สามารถเขียนอยู่ในรูป

$$\nabla \cdot \bar{V} + \nabla \cdot \tilde{V} = -(\bar{V} + \tilde{V}) \cdot \nabla \ln \bar{\rho} \quad (8)$$

ดังนั้น เราอาจประมาณสมการความต่อเนื่องของเทอมเฉลี่ยเป็น

$$\nabla \cdot \bar{V} = -\bar{V} \cdot \nabla \ln \bar{\rho} \quad (9)$$

และค่าประมาณสมการความต่อเนื่องของเทอมปริกอดิก (periodic) เป็น

$$\nabla \cdot \tilde{V} = -\tilde{V} \cdot \nabla \ln \bar{\rho} \quad (10)$$

นอกจากนี้ยังสรุปได้ว่า

$$\bar{\rho} = \rho_0 \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M_\infty^2 \right)^{-\frac{1}{\gamma-1}} \bar{V}_x \quad (11)$$

จากสมการ (5.1) และ (10) เราสามารถเขียนได้ว่า

$$\nabla^2 \phi(x, y) - \nabla \cdot [S(\alpha) \nabla \bar{V}_y] = -\tilde{V} \cdot \nabla \ln \bar{\rho} \quad (12)$$

จากสมการ (12), (5.2) และ (5.3) สามารถสรุปได้ว่า

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial \ln \bar{\rho}}{\partial x} \frac{\partial \phi}{\partial x} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = s(\alpha)$$

$$\left[\frac{\partial \bar{V}_y(x)}{\partial x} + \bar{V}_y(x) \frac{\partial \ln \bar{\rho}}{\partial x} \right] + \frac{\partial s(\alpha)}{\partial x} \bar{V}_y(x) \quad (13)$$

ถ้าเราให้

$$\phi(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} \phi_n(x) e^{i\lambda_n y} \quad (14)$$

$$\text{โดย } \lambda_n = \frac{2\pi n}{s}$$

แทนค่าสมการ (14) ลงในสมการ (13) และฟังก์ชัน S จะได้สมการพหุคูณดิฟเฟอเรนซ์กำลังสอง (second order partial differential equation) ดังนี้

$$\frac{\partial^2 \phi_n}{\partial x^2} + \frac{\partial \phi_n}{\partial x} \frac{\partial \ln(\bar{p})}{\partial x} - (\lambda_n)^2 \phi_n = e^{\frac{i\lambda_n f(x)}{i\lambda_n}} 2 \left[\frac{\partial \bar{\gamma}(x)}{\partial x} + \bar{\gamma}(x) \frac{\partial \ln(\bar{p})}{\partial x} \right] - e^{-i\lambda_n f(x)} 2 \bar{\gamma}(x) f'(x) \quad (15)$$

จะเห็นว่าสมการ (15) เป็นสมการเส้นตรง (linear equations) แบบมิติเดียว ไม่ใช่สองมิติเหมือนเดิม (13) การแก้สมการนี้ต้องทราบค่าสภาวะขอบเขต (boundary condition) ที่ทางเข้าและทางออก หากเราสมมุติว่าที่ระยะทางไกลๆ จากทางเข้า (far upstream) และไกลๆ จากทางออก (far downstream) เป็นการไหลแบบสม่ำเสมอ (uniform) ข้อสมมุตินี้เป็นจริงเนื่องจากที่ระยะทางดังกล่าว ความเร็วปริมาตร (periodic velocity) จะไม่มี จากสภาวะนี้จะได้ว่าที่ตำแหน่งดังกล่าว

$$\phi_n = 0 \quad \text{ที่ } x = -\infty \text{ และ } \infty \quad (16)$$

ดังนั้นคำตอบของสมการ (14) อาจหาได้โดยใช้วิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (finite difference) แบบความต่างศูนย์กลาง (central difference) สำหรับค่า derivative ในแนวแกน x โดยทั่วไปก่อนที่จะแทนค่าประมาณดังกล่าวสมการ (15) ควรแยกเป็นตัวแปรสองส่วน คือ ส่วนของค่าจริง (real part) และส่วนของค่าจินตนาการ (imaginary part) เมื่อแทนค่า derivative และจัดสมการออกเป็น 2 สมการดังกล่าว จะได้สมการแต่ละสมการอยู่ในรูปของเมตริกแบบ tridiagonal หรือเขียนอยู่ในรูปทั่วไปเป็น

$$a\phi_n^{i-1} + b\phi_n^i + c\phi_n^{i+1} = \text{RHS} \quad (17)$$

โดย a คือ sub-diagonal matrix
b คือ diagonal matrix
c คือ super-diagonal matrix
RHS คือ ตัวแปรที่ทราบค่า

ตัวห้อย n คือ เทอมที่ n ของ ϕ และตัวยก i คือ เทอมที่บอกตำแหน่งในแนวแกน x

สำหรับเทคนิคการหาคำตอบจากรูปสมการ (17) ที่เหมาะสมคือวิธีของ Thomas เนื่องจากสภาวะขอบเขต (16) อยู่ในระยะที่ไกลจากทางเข้าและออกของใบพัดมาก จึงเป็นการยากที่จะกำหนดตายตัวลงไป แต่โดยทั่วไปการกำหนดระยะที่ไกลจากทางเข้า (far upstream) จะอยู่ประมาณที่ห่างจากทางเข้า (leading edge) ในทิศสวนทางกับการไหลเป็นระยะประมาณครึ่งหนึ่งของระยะจากทางเข้า (leading edge) ถึงทางออก (trailing edge) และระยะที่ไหลจากทางออก (far downstream) จะอยู่ประมาณที่ห่างจากทางออก (trailing edge) และทิศเดียวกับการไหลเป็นระยะประมาณครึ่งหนึ่งของระยะจากทางเข้า (leading edge) ถึงทางออก (trailing edge)

การคำนวณหาแคมเบอร์ของใบพัด (Computation of Blade Camber)

จากหัวข้อที่แล้วเราสามารถหาความเร็วในการไหลของของไหลได้เมื่อทราบค่า ϕ อย่างไรก็ดีตามวัตถุประสงค์ของบทความนี้เพื่อคำนวณหาแคมเบอร์ของใบพัดหรือรูปร่างของใบพัด หากเรากำหนดว่าใบพัดมีความบางมาก และความเร็วของการไหลของของไหล ชนกันไปในแนวเดียวกับรูปร่างของใบพัด จากสภาวะนี้เราจะได้

$$V_{bl} \cdot \nabla \alpha = 0 \quad (18)$$

$$\text{โดย } V_{bl} = \frac{v^+ + \bar{v}}{2}$$

เครื่องหมาย + และ - คือค่าความเร็วเฉลี่ยที่ด้านบนของใบพัด หรือ pressure surface และค่าความเร็วเฉลี่ยที่ด้านล่างของใบพัด หรือ suction surface ตามลำดับ

เมื่อกระจายเทอมในสมการ (18) อยู่ในรูป
ของความเร็วจึงฟังก์ชันของใบพัดจะได้

$$f'(x) = \frac{(\bar{V}_y + \tilde{V}_y)}{(\bar{V}_x + \tilde{V}_x)} \quad (19)$$

โดย f' คือค่า derivative ของ f นั่นคือ
เมื่อเราทราบค่าความเร็วเฉลี่ยในการไหลก็สามารถ
หาแคมเบอร์ของใบพัดได้ โดยการ integrate สมการ
(19)

การหาคำตอบของสมการ (Numerical Procedure)

จากหัวข้อที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าเรา
สามารถคำนวณหาแคมเบอร์ของใบพัดได้เมื่อทราบ
ความเร็วของการไหล ในการหาคำตอบของสมการนี้
เริ่มจากการกำหนดข้อมูลทางด้านกายภาพ เช่น มุม
เข้า-ออก ของใบพัดที่ต้องการ จำนวนใบพัดตลอดจน
การกระจาย $\gamma(x)$ ตลอดเส้นแคมเบอร์ การคำนวณจะ
เริ่มดังนี้

1. คำนวณหาค่าความเร็วเฉลี่ยในแนวพิช
จากสมการ (3.b) และ (4)
2. ประมาณเส้นแคมเบอร์เบื้องต้นจาก
สมการ (19) โดยไม่คิดค่าความเร็วพรีอดิค
3. คำนวณความหนาแน่นเฉลี่ย (ρ) จาก
สมการ (11)
4. คำนวณหาค่าความเร็วเฉลี่ยพรีอดิคจาก
สมการ (5.2) และ (5.3) โดย ϕ ได้จากสมการ (17)
5. ประมาณเส้นแคมเบอร์จากการ inte-
grate สมการ (19)
6. เปรียบเทียบเส้นแคมเบอร์ที่ประมาณใน
เบื้องต้น และที่คำนวณจากข้อ 5 ถ้าความแตกต่างของ
ค่าทั้งสองสูงเกินกว่าความละเอียดที่กำหนด ทำการ
ปรับค่าใหม่แล้วดำเนินการคำนวณในข้อ 4-5 ใหม่
จนกว่าค่าความแตกต่างของค่าทั้งสองน้อยกว่าความ
ละเอียดที่กำหนด ก็จะได้รูปร่างของใบพัดที่เหมาะสมกับ
การไหลที่ต้องการ

ผลการทดสอบ (Results)

เพื่อเป็นการทดสอบวิธีการคำนวณรูปร่าง
ของใบพัดเครื่องจักรเทอร์โบแบบอัดที่นำเสนอผู้เขียน
ได้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ภาษาโฟรเทน สำหรับ
การคำนวณดังกล่าวข้างต้นโดยจำนวนข้อมูลในแนวแกน
 x มีขนาด 41 จุด หรือคิดเป็นระยะทางเท่ากับ 0.05
(Δx) นอกจากนี้ยังพบว่าจำนวนเทอมของ harmonic
ที่จะให้คำตอบที่ถูกต้องควรมี 20 เทอม ค่าความ
ละเอียดที่ใช้ในการเปรียบเทียบเส้นแคมเบอร์ในการ
คำนวณแต่ละครั้งต้องน้อยกว่า 1×10^{-4} การกระจาย $\gamma(x)$
สมมติให้เป็นแบบพาราโบลา (parabolic) นั่นคือแปร
ผันตาม $x(1-x)$ โปรแกรมคอมพิวเตอร์นี้ได้นำไปใช้
ในการออกแบบใบพัดเครื่องจักรเทอร์โบที่มีรูปร่าง
ต่างๆ กัน ได้แก่ inlet guide vane, compressor
cascade และ Impulse turbine ดังมีผลดังต่อไปนี้

การออกแบบ Inlet guide vane และ
กำหนดให้มุมเข้าและมุมออกเป็น 0° และ 35°
ตามลำดับรูปที่ 2 แสดงรูปร่างของใบพัด (blade
profile), มุมของใบพัด (blade angle) และกระจาย
ความดัน (pressure distribution) เมื่อมีการ
เปลี่ยนแปลงค่าอัตราส่วนระหว่างพิช (pitch) ต่อ
คอร์ด (chord) จะเห็นได้ว่ามุมของใบพัดที่ทางเข้ามี
ค่าเป็นลบที่สูงมาก และความโค้งของใบพัดจะย้อนกลับ
ที่ทางออก เมื่อ s มีค่าสูงขึ้น การเปลี่ยนแปลง เช่นนี้
เพราะเพื่อให้ได้ zero incidence ที่ทางเข้าของใบพัด
กรณีที่ $s=0$ หมายความว่า ใบพัดของเครื่องจักร
เทอร์โบมีจำนวนมหาศาล (infinity) กราฟการ
กระจายความดันแสดงทั้งที่ด้านบนและด้านล่างของใบพัด
โดยภาวะสูงสุดจะอยู่ที่ประมาณ 0.4 ของคอร์ด

กราฟรูปที่ 3 แสดงผลของของไหลแบบอัดตัว
ได้ จะเห็นได้ว่าเมื่อ M_∞ มีค่าสูงขึ้นจะทำให้เกิดการ
เปลี่ยนแนว (deflection) ของการไหลทั้งนี้เนื่องจาก
โหลดที่กระทำต่อใบพัดเท่ากัน (การกระจาย $\bar{V}_y$) ผล
การอัดตัวได้จะไปเปลี่ยนความเร็วในแนวแกน ดังนั้น

มุมของการไหล (flow angle) และรูปร่างของใบพัด จึงเปลี่ยนไป

ตัวอย่างที่ 2 เป็นการออกแบบ compressor cascade ที่มีมุมเข้าและมุมออกเป็น 45° และ 10° ตามลำดับ ผลการคำนวณแสดงในรูปที่ 4 และ 5 จะเห็นได้ว่าผลของการเปลี่ยนแปลง S และ M_∞ ต่อรูปร่างของใบพัด มีลักษณะคล้ายกับ ตัวอย่างแรก คือ พยายามปรับที่จะให้ได้ zero incidence ที่ทางเข้าของใบพัด

ตัวอย่างที่ 3 เป็นการออกแบบ impulse turbine ที่มีมุมเข้าและมุมออกเปลี่ยนแปลงถึง 90° ดังแสดงในรูปที่ 6 และ 7 จากการคำนวณนี้พบว่าเมื่อค่า S สูงกว่า 1.5 หรือเมื่อ M_∞ มีค่าสูง การ convergence ของคำตอบค่อนข้างช้าในกรณีของ S อาจแก้ไขโดยการเปลี่ยน loading ใหม่ เช่นที่ $\gamma(x) \propto (\sin\beta - \frac{1}{2}\sin 2\beta)$ นั่นคือค่าสูงสุดจะอยู่ที่ประมาณ $\frac{1}{2}$ ของคอร์ดจากทางเข้าของใบพัดดังที่ Hawthorne [1] แนะนำ ส่วนกรณีของการเปลี่ยนค่า Mach number เนื่องจากสมการพลังงานและสมการการไหลต่อเนื่องที่ใช้ไม่เหมาะสมกับการไหลที่เข้าในช่วง supersonic โดยทั่วไปแล้วการคำนวณ M_∞ ที่ต่ำกว่า 0.5 การ convergence ของคำตอบทำได้รวดเร็ว

สรุปผล (Conclusion)

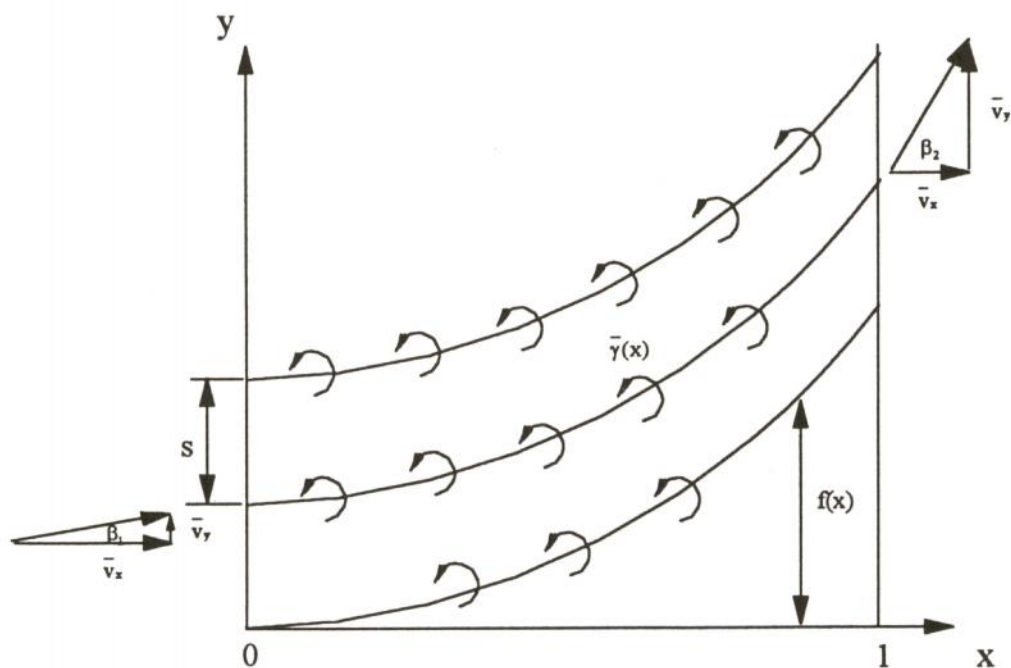
บทความนี้เสนอการคำนวณการออกแบบใบพัดเครื่องจักรเทอร์โบแบบอัดโดยการไหลเป็นแบบ 2 มิติ แบบอัดตัวได้ วิธีการคำนวณนี้เป็นการนำเสนอเบื้องต้น โดยให้การไหลอยู่ในช่วง subsonic, ไม่มีความหนืด (inviscid) และไม่มีความหนาของใบพัด จากสภาวะที่ไม่มี incidence ที่ทางเข้าของใบพัด และกำหนดว่าความเร็วของของไหลอยู่ในแนวขนานกับใบพัด ก็จะคำนวณหารูปร่างของใบพัดได้โดยวิธี iteration ความเร็วของของไหลหาได้จาก Clebsch formula-tion พร้อมกับสมการการไหลต่อเนื่อง (continuity) สมการหลักที่ใช้ในการหา ϕ_n จะถูกจัดให้อยู่ในรูป tridiagonal matrix ซึ่งง่ายและมีความรวดเร็วในการหาคำตอบ

เทคนิคการคำนวณทดสอบโดยการเขียนคอมพิวเตอร์โปรแกรม แล้วทดสอบใบพัดเครื่องจักรเทอร์โบที่รูปร่างต่างๆ กัน พบว่าถูกต้องแต่การ convergence จะช้าลงเมื่อ S และ M_∞ สูงขึ้น

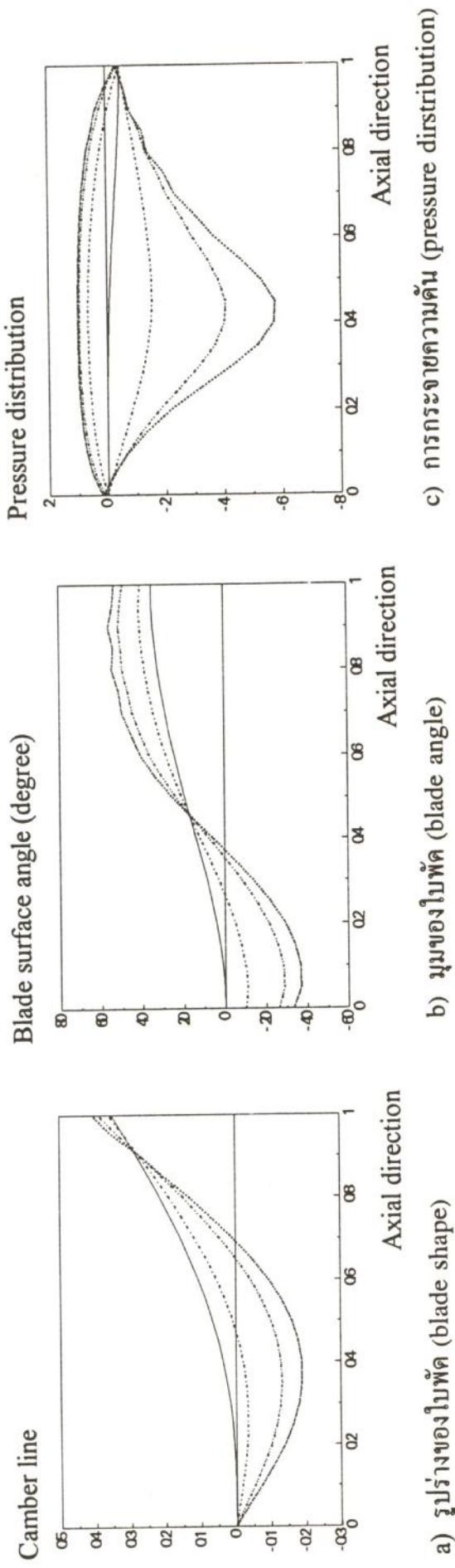
ดังนั้นเทคนิคการคำนวณนี้สามารถดำเนินการต่อไปในการคำนวณแบบ 3 มิติ หรืออาจนำคุณสมบัติของของไหลอื่นๆ เข้ามาปรับปรุงการไหลให้ใกล้เคียงกับการไหลของของไหลจริง เช่น ความหนืด (viscous) โดยเฉพาะผลจาก boundary layer หรือแม้แต่การปรับปรุงการไหลให้อยู่ในช่วง supersonic flow

เอกสารอ้างอิง

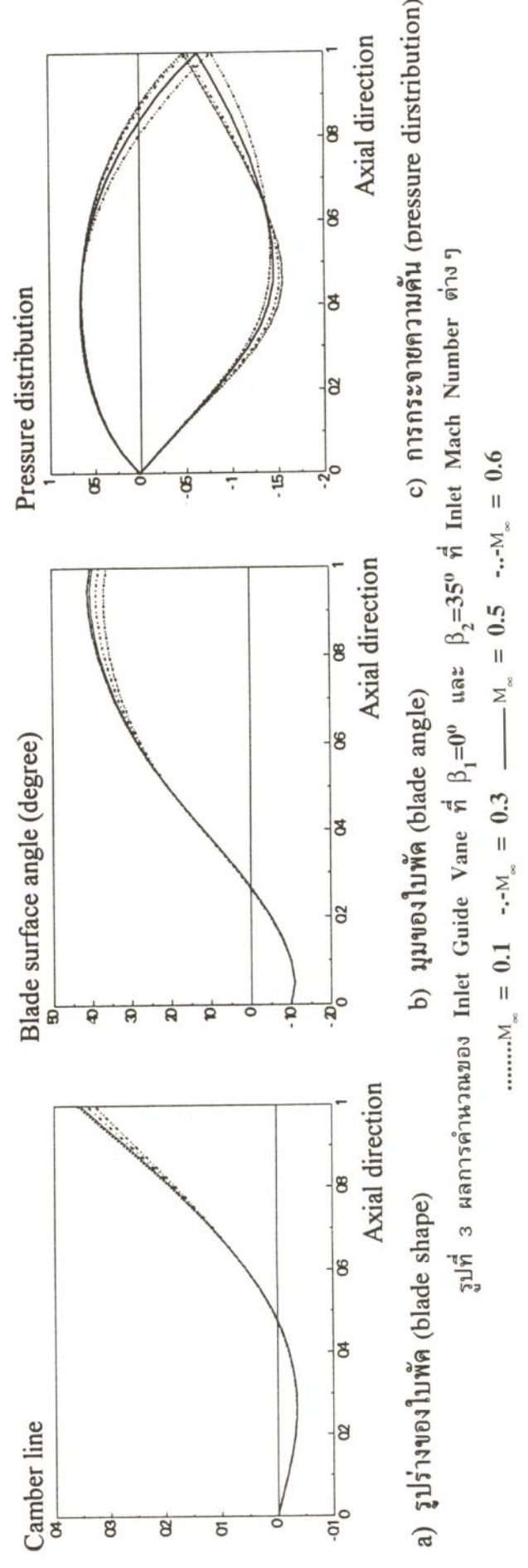
1. Hawthorne, W.R., Wang, C., Tan, C.S., and McCune, J.e., "Theory of Blade Design for Large Deflections, Part I: Two-Dimensional Cascade", ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 106, April 1984, pp. 346-353.
2. Tan, C.S., Hawthorne, W.R., McCune, J.E., and Wang, C., "Theory of Blade Design for Large Deflections: Part II Annular Cascades", ASME Journal of Engineering for Power, Vol. 106, April 1984, pp. 345-365.
3. Zangeneh, M., "A Compressible Inverse Design Method Based on an Analytical Approach", CUED/A-Turbo/TR 125, Cambridge University Engineering Laboratory, 1989.
4. Zangeneh, M., "Three dimensional design of radial-inflow turbines", PhD Thesis, Cambridge University Engineering Department, 1988.



รูปที่ 1 สัญลักษณ์ที่ใช้ในการคำนวณใบพัดแบบ 2 มิติ [1]

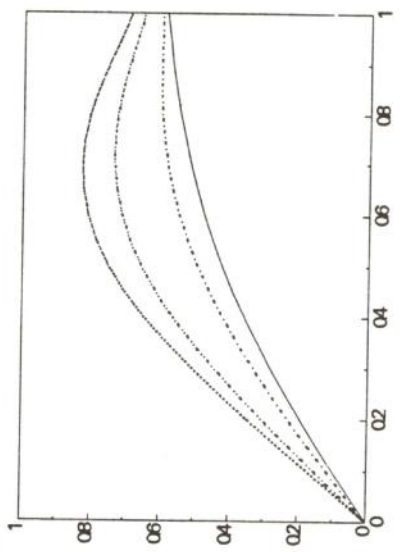


รูปที่ 2 ผลการคำนวณของ Inlet Guide Vane ที่ $\beta_1 = 0^\circ$ และ $\beta_2 = 35^\circ$ ที่ s ต่างๆ
 — $s = 0.0$ -.- $s = 1.0$ -.- $s = 2.0$ $s = 3.0$



รูปที่ 3 ผลการคำนวณของ Inlet Guide Vane ที่ $\beta_1 = 0^\circ$ และ $\beta_2 = 35^\circ$ ที่ Inlet Mach Number ต่างๆ
 $M_\infty = 0.1$ -.- $M_\infty = 0.3$ — $M_\infty = 0.5$ -.- $M_\infty = 0.6$

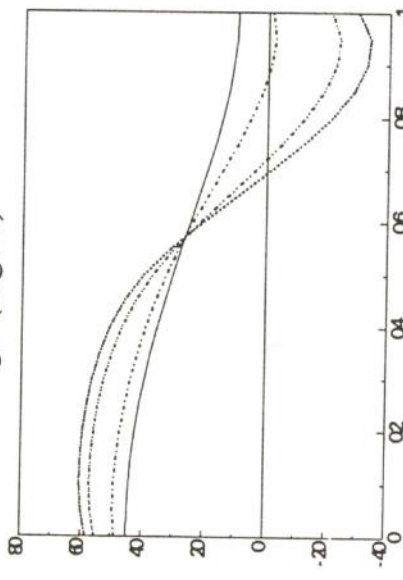
Camber line



Axial direction

a) รูปร่างของใบพัด (blade shape)

Blade surface angle (degree)



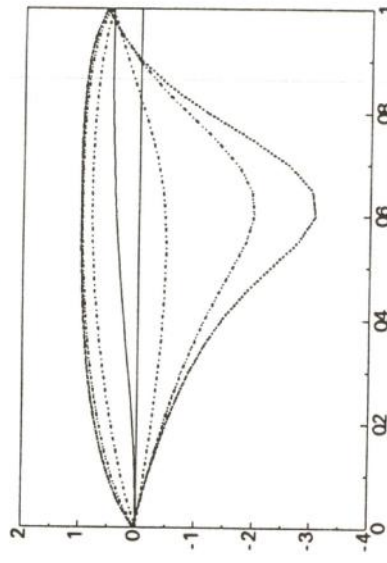
Axial direction

b) มุมของใบพัด (blade angle)

รูปที่ 4 ผลการคำนวณ Compressor Cascade ที่ $\beta_1=10^\circ$ และ $\beta_2=10^\circ$ ที่ s ต่างๆ

— $s = 0.0$ -.- $s = 1.0$ -.- $s = 2.0$ $s = 2.5$

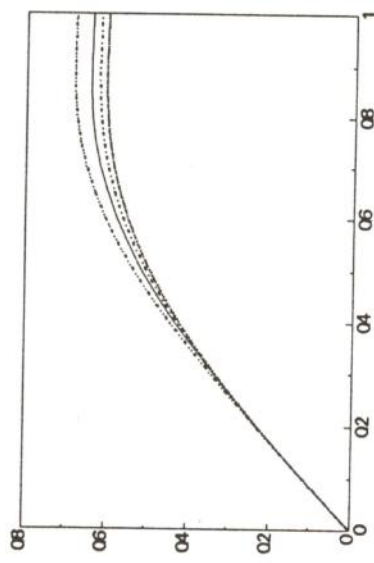
Pressure distribution



Axial direction

c) การกระจายความดัน (pressure distribution)

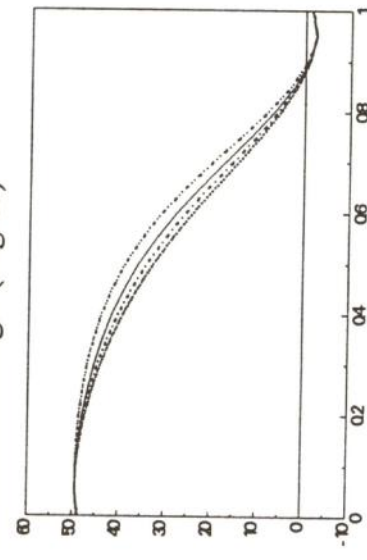
Camber line



Axial direction

a) รูปร่างของใบพัด (blade shape)

Blade surface angle (degree)



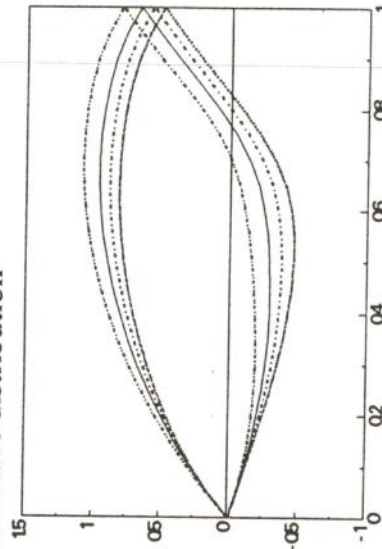
Axial direction

b) มุมของใบพัด (blade angle)

รูปที่ 5 ผลการคำนวณ Compressor Cascade ที่ $\beta_1=45^\circ$ และ $\beta_2=10^\circ$

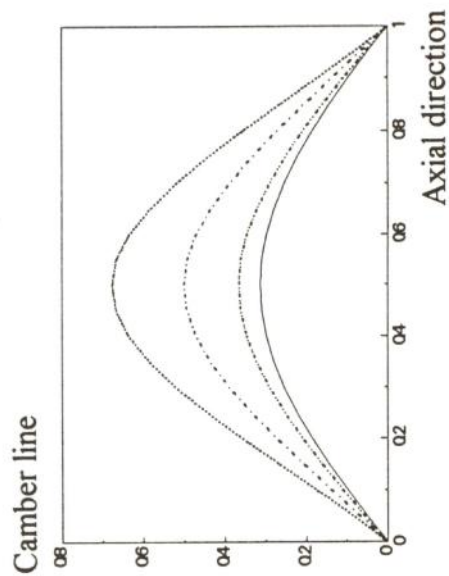
..... $M_\infty = 0.1$ -.- $M_\infty = 0.5$ — $M_\infty = 0.7$ -.- $M_\infty = 0.9$

Pressure distribution

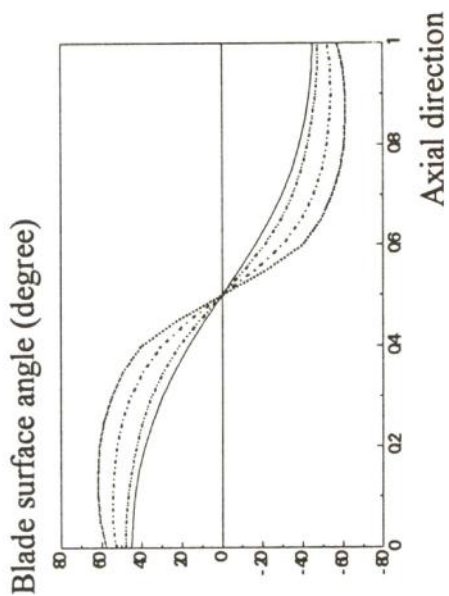


Axial direction

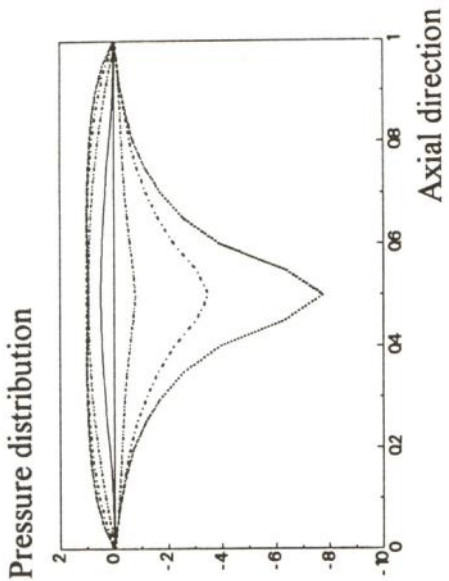
c) การกระจายความดัน (pressure distribution)



a) รูปร่างของใบพัด (blade shape)

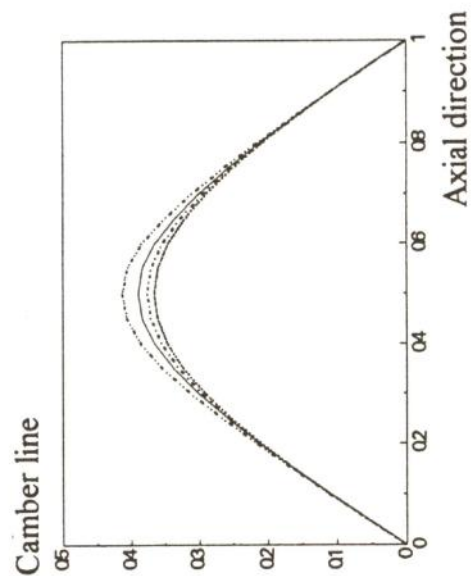


b) มุมของใบพัด (blade angle)

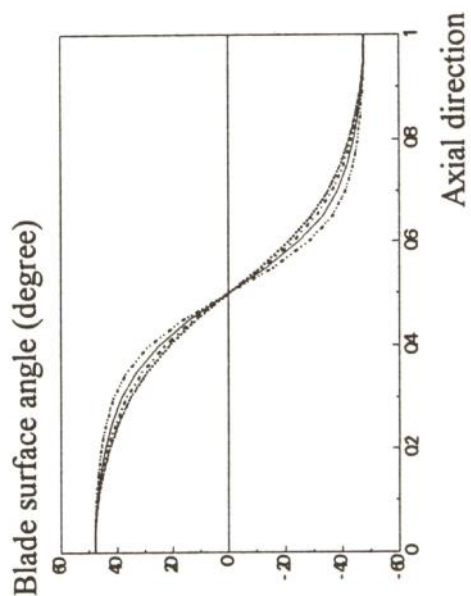


c) การกระจายความดัน (pressure distribution)

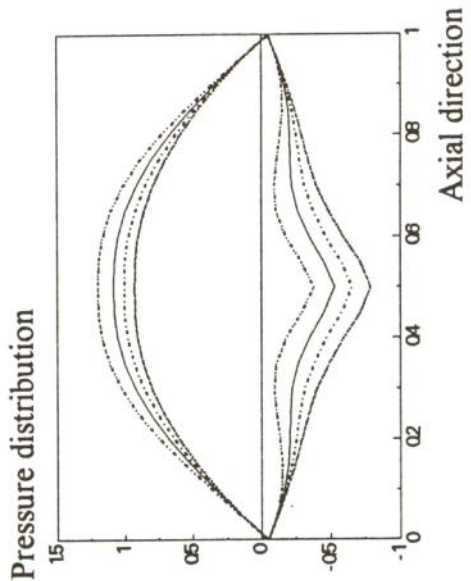
รูปที่ 6 ผลการคำนวณ Impulse turbine ที่ $\beta_1 = 45^\circ$ และ $\beta_2 = -45^\circ$ ที่ s ต่างๆ
 — $s = 0.0$ -.- $s = 0.5$ -.-.- $s = 1.0$ $s = 1.5$



a) รูปร่างของใบพัด (blade shape)



b) มุมของใบพัด (blade angle)



c) การกระจายความดัน (pressure distribution)

รูปที่ 7 ผลการคำนวณ Impulse turbine ที่ $\beta_1 = 45^\circ$ และ $\beta_2 = -45^\circ$ ที่ Inlet Mach Number ต่างๆ
 $M_\infty = 0.1$ -.- $M_\infty = 0.5$ — $M_\infty = 0.7$ -.-.- $M_\infty = 0.9$



เอกสารของ ว.ส.ท.
ห้ามนำออกนอกห้องสมุด

ขอเชิญส่งบทความ

วิศวกรรมสาร ฉบับวิจัยและพัฒนา (Research & Development Journal of the Engineering Institute of Thailand)

ในปัจจุบันนี้ประเทศไทยกำลังเร่งพัฒนาตัวเอง ทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสมัยใหม่ เพื่อรองรับการเจริญเติบโตของภาคอุตสาหกรรมในด้านต่าง ๆ ให้สามารถก้าวไปสู่ความเป็นประเทศพัฒนาทางอุตสาหกรรมสมัยใหม่ (Newly Industrialized Country) ได้ การพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีทำได้เร็วที่สุด คือ การซื้อเทคโนโลยีจากต่างประเทศ ดังเช่น ประเทศญี่ปุ่นในสมัยหลังสงครามโลก วิธีการนี้จะได้ผลเร็วเพราะไม่ต้องเสียเวลาการวิจัย แต่ในขณะเดียวกัน นอกจากจะเป็นการสิ้นเปลืองเงินตราแล้ว ยังทำให้ประเทศนั้นต้องพึ่งพาประเทศอื่น ๆ อยู่ตลอดไป ประเทศที่ยอมซื้อไม่ว่าจะเป็นประเทศญี่ปุ่นจนมาถึงไต้หวัน เกาหลี และประเทศเพื่อนบ้านเรา คือ สิงคโปร์ในขณะนี้ ประเทศเหล่านี้ต่างมองการณ์ไกลเล็งเห็นถึงความสำคัญของการทำการวิจัยเพื่อพัฒนาวิทยาการต่าง ๆ ให้สามารถรองรับการขยายตัวของอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้ เพื่อจะได้ค่อย ๆ ปลดตัวเองจากภาระที่เกิดจากการเอาเปรียบของประเทศที่เป็นเจ้าของเทคโนโลยีได้

ปัจจัยหนึ่งของการส่งเสริมการวิจัย คือ การมีวารสารวิจัยและพัฒนา มารองรับเพื่อเป็นการเผยแพร่ผลงานของนักวิชาการและนักวิจัยเอาไว้ประโยชน์ที่มีนอกจากช่วยไม่ให้เกิดการทำวิจัยซ้ำซ้อนกันแล้ว ยังช่วยให้เกิดความร่วมมือระหว่างนักวิชาการและนักวิจัยที่สนใจในปัญหาเดียวกัน เกิดมีการวิพากษ์วิจารณ์เพื่อให้ผลงานที่ติดตามมามีคุณภาพดียิ่งขึ้น วารสารทางวิชาการนี้จึงเป็นทรัพยากรทางความรู้ที่สามารถใช้เป็นเอกสารอ้างอิงในอนาคตสำหรับวิศวกร นักวิชาการ และนักวิจัยรุ่นหลังได้

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยฯ ได้เล็งเห็นความสำคัญของการมี “วารสารฉบับวิจัยและพัฒนา” จึงเห็นสมควรแยกเล่มออกมาจาก “วิศวกรรมสาร” (ซึ่งต่อไปจะเน้นไปทางสารคดีทั้งวิชาการและข่าวสารปริทรรศน์มากกว่า) ต่อไปนี้วารสารวิชาการของ ว.ส.ท. จะออกเป็นราย 6 เดือน โดยจะรวมทุกสาขาวิชาทางวิศวกรรมศาสตร์เข้าด้วยกัน บทความทุกบทความที่ลงพิมพ์ในวารสารจะได้รับการประเมิน (Review) โดยกรรมการสараณียกรและผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้มั่นใจว่าทุกบทความที่ได้รับการลงพิมพ์ใน “วารสารฉบับวิจัยและพัฒนา” เป็นบทความที่มีคุณภาพและมีคุณค่า

การส่งบทความ เพื่อให้วารสารทางวิชาการมีมาตรฐานไม่ด้อยกว่าวารสารของสมาคมวิชาชีพทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีอื่น ๆ ทั้งในประเทศและต่างประเทศ คณะกรรมการสараณียกรได้ให้ข้อเสนอแนะให้ผู้เขียนจะได้ใช้ในการพิจารณาส่งบทความมาลงตีพิมพ์ “วารสารฉบับวิจัยและพัฒนา” ดังนี้

1. บทความที่จะส่งควรเป็นผลงานการค้นคว้าวิจัยของผู้เขียนเอง และมีคุณค่าทางวิชาการพอสมควร
2. ภาษาที่ใช้อาจเป็นภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษก็ได้ แต่ชื่อบทความ (title) ต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ
3. เพื่อให้บทความมีความกะทัดรัดไม่เยิ่นเย้อ และบทความควรมีความยาวไม่เกิน 10 หน้า กระดาษพิมพ์ดีด รวมทั้งรูปและตาราง
4. บทความต้องมีบทคัดย่อยาวไม่เกิน 15 บรรทัดพิมพ์ โดยมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ
5. ทุกบทความควรมีบทนำ (Introduction) บทสรุป (Conclusion) และเอกสารอ้างอิง (Reference)
6. เอกสารอ้างอิงถ้ามาจากเอกสารภาษาต่างประเทศ ให้เขียนเอกสารอ้างอิงนั้นด้วยภาษาอังกฤษ เอกสารอ้างอิงจะต้องประกอบด้วยชื่อผู้เขียน ชื่อบทความ ชื่อเอกสารที่ตีพิมพ์ สถานที่ตีพิมพ์ (ถ้าเป็นหนังสือ) ปีที่พิมพ์ และหน้าของบทความดังกล่าวในเอกสารนั้น
7. ตารางและกราฟ ควรเป็นต้นฉบับที่ชัดเจน รูปถ่ายควรแนบฟิล์มมาด้วย คำบรรยายภาพควรเป็นภาษาอังกฤษ
8. โปรดส่งบทความมายังคณะกรรมการสараณียกรฉบับวิจัยและพัฒนา ณ สำนักงานวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยฯ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เขตปทุมวัน กทม. 10330 โทร. 218-6794-9, 251-2504 และ 250-1900
9. บทความทุกบทความจะได้รับการประเมินเพื่อตีพิมพ์โดยผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาวิชาเดียวกัน
10. คณะกรรมการสараณียกร อาจให้ผู้เขียนปรับปรุงบทความให้มีเหมาะสมยิ่งขึ้น และทรงไว้ซึ่งสิทธิในการดัดแปลงพิมพ์บทความหรือไม่ก็ได้
11. ผู้เขียนบทความเป็นผู้รับผิดชอบต่อผลทางกฎหมายใด ๆ ที่อาจเกิดขึ้นเนื่องมาจากบทความนั้น ๆ

RESEARCH AND DEVELOPMENT JOURNAL OF THE ENGINEERING INSTITUTE OF THAILAND

Notes for Contributors

1. Paper should be original contribution and substantial technical quality.
2. The main body of the paper can be written either in Thai or English. Regardless of the language of the main body, the title, the summary of the paper and the author name(s) must be submitted both in Thai and English.
3. The manuscript should typed one and a half space on one side of the paper. The total number of pages should normally not exceed 10 pages including figures and tables.
4. The paper should be reasonably divided into sections, which may include Introduction, Conclusions and References. Numbering of Sections should be avoided.
5. References should be quoted in the text sequentially by Arabic numerals and grouped together at the end in numerical order. References should include author(s), title, name of the publication (Journals, Reports, etc.), publisher, place and date of publication, and page numbers.
6. Original tables and figures must be submitted with the manuscript. Description should be English.
7. The manuscript should be submitted to the Chief Editor, Prof. Dr. Prida Wibulswas, The Engineering Institute of Thailand under H.M. The King's Patronage, Henry Dunant Road, Bangkok 10330, Thailand, or any of the Associate Editors whose field is close to the nature of the paper.
8. All papers will be evaluated by reviewers before the final decision on publication is made. The editors reserve the right to recommend for revision as a condition for final acceptance.
9. In submitting the manuscript, the author(s) transfer the copyright to TJEIT, but still accepts any legality consequence for having the paper published.