

# การประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีขอบเขตมูลฐานในการออกแบบใบจักรเรือ

## Applying Boundary Element Method for Design of Marine Propeller

สุรศักดิ์ เพิ่มทรัพย์ทวี\* และ อุดมเกียรติ นนทแก้ว \*

### บทคัดย่อ

ใบจักรเรือที่ผลิตภายในประเทศ ส่วนใหญ่สร้างขึ้น ด้วยการลอกเลียนแบบใบจักรเรือที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ ซึ่งผู้ผลิตไม่ค่อยมีความรู้เกี่ยวกับการทำงานของใบจักร และไม่ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างรูปทรงใบจักรกับประสิทธิภาพการใช้งาน ส่งผลให้ใบจักรที่สร้างขึ้นมักมีประสิทธิภาพด้อยกว่าต้นแบบ และทำให้ขาดการสะสมองค์ความรู้ในการออกแบบ จนไม่สามารถพัฒนาและออกแบบใบจักรเรือรุ่นใหม่ที่เหมาะสมกับสภาวะการใช้งานตามที่ต้องการได้ เพื่อสร้างองค์ความรู้ในการออกแบบ จำเป็นต้องศึกษาพฤติกรรมการไหลรอบใบจักรเรือและลักษณะการเกิดแรงพลศาสตร์ การศึกษานี้มุ่งเน้นศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการเกิดแรงพลศาสตร์กับรูปทรงของใบจักรเรือ โดยประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีขอบเขตมูลฐาน ซึ่งข้อดีของระเบียบวิธีนี้คือ สามารถพัฒนาต่อ เพื่อทำนายอิทธิพลของผิวอิสระและลักษณะการเกิดฟองอากาศได้

### Abstract

Most of marine propellers produced in Thailand are manufactured by imitating import propellers. Due to the lack of knowledge in hydrodynamics, this is not only why the manufactured propellers usually have efficiency lesser than that of the originals but also why the

manufacturers cannot create own designs. To design the marine propeller, it is necessary to understand the behavior of hydrodynamic mechanism. The objective of this paper is to study the hydrodynamic mechanism with respect to propeller geometry via boundary element method (BEM). The advantage of using BEM is that it can be developed to predict cavitations and free surface effect.

### 1. บทนำ

เรือเป็นยานพาหนะที่มีความสำคัญมาก ทั้งในแง่เศรษฐกิจและความมั่นคง จากข้อมูลทางสถิติพบว่าในปี พ.ศ.2538 ประเทศไทยมีเรือประมงที่ใช้เครื่องยนต์อยู่ถึง 51,599 ลำ [1] นับได้ว่าประเทศไทยเป็นประเทศที่มีการใช้เรือมากประเทศหนึ่ง ทั้งนี้ยังไม่นับรวมถึงเรือที่ใช้ในงานด้านอื่นๆ เช่น การคมนาคมขนส่ง ซึ่งในปัจจุบันเรือที่ใช้เครื่องยนต์โดยทั่วไปใช้ใบจักร เป็นตัวสร้างแรงขับเคลื่อน การออกแบบใบจักรเรือให้มีความเหมาะสมกับลักษณะการใช้งานมีความสำคัญเป็นอย่างมาก เรือที่ติดตั้งใบจักรที่ไม่เหมาะสมอาจไม่สามารถบรรลุวัตถุประสงค์ตามที่ต้องการได้ เช่น ไม่สามารถแล่นถึงความเร็วที่ต้องการ หรือไม่สามารถสร้างแรงขับเคลื่อนเมื่อรับน้ำหนักบรรทุกได้ นอกจากนี้ใบจักรเรือที่ได้รับการออกแบบที่ดียังสามารถช่วยให้การใช้พลังงานเป็นไป

\* ศูนย์วิจัยวิศวกรรมคำนวณขั้นสูง (ศคส.) ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

อย่างมีประสิทธิภาพ และยังสามารถลดความเสียหายจากการเกิดฟองอากาศ (Cavitation) ที่ผิวของใบจักรอีกด้วย

หัวใจของการออกแบบใบจักรเรือ คือ การคำนวณหาภาระพลศาสตร์ของใบจักร แต่เนื่องจากมีหลายปัจจัยที่มีผลต่อแรงพลศาสตร์ของใบจักรเรือ ทำให้การคำนวณมีความยุ่งยากซับซ้อนมาก วิธีการหนึ่งซึ่งเป็นที่นิยมและมีการใช้มาเป็นเวลานานคือ การคำนวณด้วยสูตรที่ได้จากการสังเกตผลการทดลอง (Empirical formula) [2] แต่วิธีการนี้มีข้อเสียคือรูปร่างของใบจักรจะต้องมีลักษณะตามข้อกำหนดของสูตร ทำให้ไม่สามารถออกแบบรูปร่างใบจักรที่แตกต่างออกไปได้ และความถูกต้องแม่นยำยิ่งขึ้นอยู่กับประสบการณ์ของผู้ที่ทำการคำนวณ อีกวิธีการหนึ่งคือการคำนวณแรงพลศาสตร์ของใบจักรเรือด้วยระเบียบวิธีขอบเขตมูลฐาน (Boundary Element Method) วิธีการนี้ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง ดังที่มีผู้ทำการศึกษาเพื่อปรับปรุงให้มีการคำนวณที่ถูกต้องยิ่งขึ้นมาตลอด อาทิเช่น Kerwin และ Lee [3] ศึกษาสมรรถนะของใบจักรในสภาวะการไหลแบบคงตัวและไม่คงตัว Wang [4] ศึกษาอิทธิพลของแกนเพลลาใบจักรที่มีผลต่อแรงพลศาสตร์ที่กระจายอยู่บนผิวของใบจักรเรือ Kerwin และคณะ [5] วิเคราะห์แรงพลศาสตร์ของใบจักรแบบที่ติดตั้งอยู่ภายในท่อ (Ducted propeller) Lee [6] เปรียบเทียบอัลกอริทึมการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีขอบเขตมูลฐานแบบต่างๆ เพื่อหาอัลกอริทึมที่เหมาะสมต่อการคำนวณแรงพลศาสตร์ของใบจักร Keenan [7] ศึกษาและทำการทดลอง เพื่อสร้างแบบจำลองเวกของใบจักรในสภาวะการไหลแบบไม่คงตัว Pyo [8-9] เสนอวิธีการแบ่งพาดสำหรับใบจักรแบบที่มีความกว้างคอรัศที่ปลายใบมาก และเสนอแบบจำลองรูปร่างเวกแบบวางตัวตามความเร็วจริง เพื่อใช้ในการทำนายการเกิดฟองอากาศ และ Kinnas [10] เปรียบเทียบวิธีการแบ่งพาด และวิธีการสร้างแบบจำลองรูปร่างเวกแบบต่างๆ และวิเคราะห์ผลกระทบของ

การติดตั้งแกนใบจักร ที่เอียงทำมุมกับทิศทางการเคลื่อนที่ของเรือ ซึ่งเป็นเงื่อนไขการติดตั้งจริง งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายที่จะศึกษาทำความเข้าใจอิทธิพลของ รูปร่างใบจักรที่มีผลต่อภาระพลศาสตร์ของใบจักรผ่านทางระเบียบวิธีขอบเขตมูลฐาน อีกทั้งยังเป็นการพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับเป็นเครื่องมือช่วยเหลือในการออกแบบใบจักรเรือ

## 2. ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

ระเบียบวิธีขอบเขตมูลฐาน เป็นระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้ในการหาสนามการไหลของการไหลแบบศักยะ (Potential flow) ซึ่งมีข้อสมมุติฐานให้การไหลเป็นแบบ ไม่มีการอัดตัว (Incompressible) ความหนืดมีอิทธิพลต่อการไหลน้อย (Inviscid) ไม่มีการไหลหมุนวน (Irrotational) เกือบทั่วทั้งสนามการไหลยกเว้นบนพื้นผิวที่สร้างแรงยกและพื้นผิวเวค (wake) และเป็นการไหลแบบถูกรบกวนน้อย (Small perturbation) การไหลแบบศักยะมีสมการควบคุม (Governing equation) เป็นรูปแบบของสมการลาปลาซ (Laplace's equation)

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (1)$$

เมื่อ  $\phi$  คือศักยะความเร็วรบกวน (Perturbation velocity potential)

ในกรณีของปัญหาแรงยก (Lifting problem) ศักยะความเร็ว รบกวนสามารถเขียนอยู่ในรูปการกระจายตัวของดับเลต (Doublet) ที่ตำแหน่งเส้นกลางหน้าตัดและพื้นผิวเวคได้ โดยอาศัยเอกลักษณ์ที่ 3 ของกรีน (Green's 3rd identity) ในการแปลงรูปสมการ

$$\phi(p) = \frac{1}{4\pi} \iint_{S_b+S_w} \left[ \mu \frac{\partial}{\partial n'} G(p, p') \right] dS(p') \quad (2)$$

โดยฟังก์ชันกรีนเป็นความสัมพันธ์ของระยะห่างระหว่างจุดซิงกูลาริตี (Singularity) กับจุดที่ทำการหาค่าฟังก์ชันศักยะความเร็วรบกวน

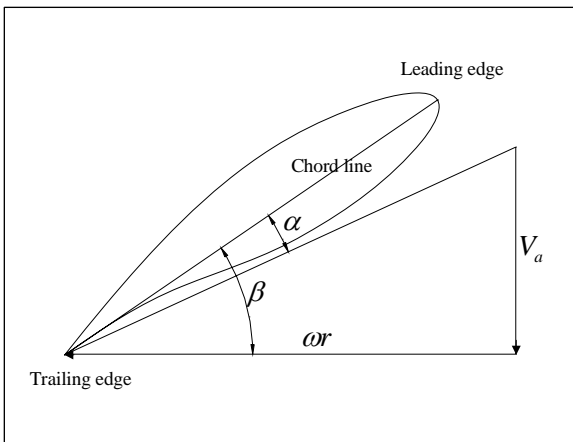
$$G = \frac{1}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}} \quad (3)$$

เมื่อ  $p(x, y, z)$  คือจุดที่ทำกรหาค่าฟังก์ชันศักยะความเร็วรบกวน และ  $p'(x', y', z')$  คือจุดซิงกูลาริตี

เงื่อนไขขอบ (Boundary condition) ของปัญหาคือไม่มีการไหลทะลุผิววัตถุ หรือก็คือผลรวมความเร็วรบกวน ( $\nabla\phi$ ) กับความเร็วอิสระ ( $\mathbf{U}_\infty$ ) ในแนวตั้งฉากกับผิววัตถุจะเท่ากับศูนย์

$$\frac{\partial\phi}{\partial n} = -\mathbf{U}_\infty \cdot \mathbf{n} \quad (4)$$

ความเร็วอิสระในการไหลรอบใบจักรเรือ ประกอบด้วยความเร็ว 2 ตัว คือ ความเร็วมุ่งหน้าของเรือ กับ ความเร็วเนื่องจากการหมุนของใบจักร ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 มุมปะทะที่หน้าตัดของใบจักร

$$\mathbf{U}_\infty = -(\mathbf{V}_a + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) \quad (5)$$

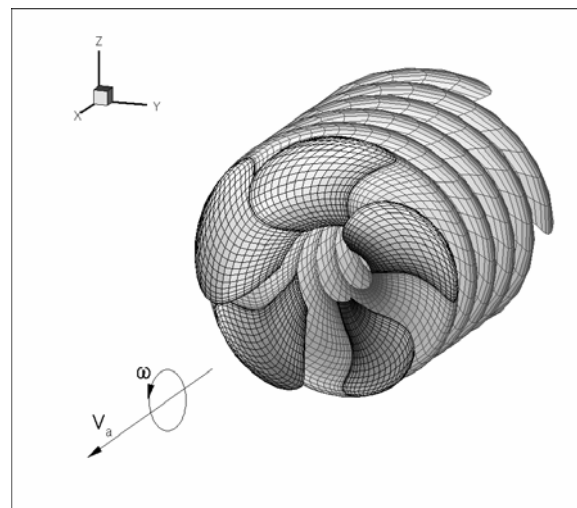
สมการที่ (2) มีความซับซ้อนมากจนไม่สามารถที่จะหาผลเฉลยเชิงวิเคราะห์ (Analytic solution) ได้ ดังนั้นจึงทำการแบ่งพื้นผิววัตถุและพื้นผิวเวด ออกเป็นพื้นที่เล็กๆ เรียกว่า “พาเนล” (Panel) แล้วสมมติให้ค่าความเข้มดับเลตคงที่ในแต่ละพาเนล ดังแสดงในรูปที่ 2 ทำการคิดเงื่อนไขไม่มีการไหลทะลุผิววัตถุที่จุดศูนย์กลาง

(Centroid) ของแต่ละพาเนลก็จะสามารถหาการกระจายตัวของดับเลตได้ โดยค่าความเข้มดับเลตที่กระจายอยู่บนพาเนลของพื้นผิวเวดจะเท่ากับค่าความเข้มดับเลตบนพาเนลที่ตำแหน่งขอบการไหลออก (Trailing edge) ของพื้นผิววัตถุ ( $\mu_w = \mu_{TE}$ ) ตามเงื่อนไขของ Morino [11]

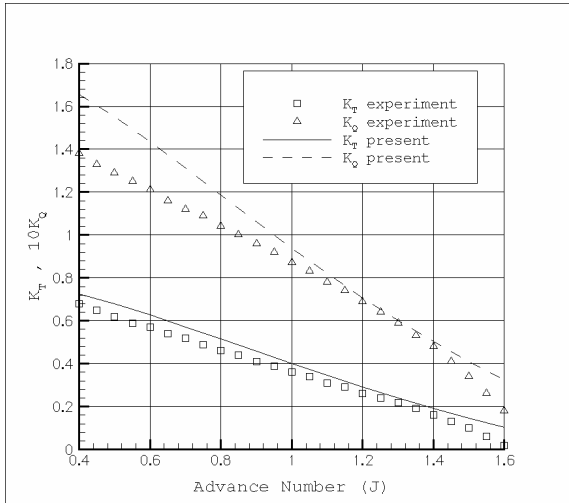
เมื่ออัตราส่วนของความเร็วมุ่งหน้า ( $V_a$ ) กับความเร็วรอบการหมุนของใบจักรเปลี่ยนไป จะทำให้มุมปะทะ (Angle of attack,  $\alpha$ ) เปลี่ยน (รูปที่ 1) ส่งผลให้สัมประสิทธิ์แรงผลักดัน (Trust coefficient) และสัมประสิทธิ์แรงบิด (Torque coefficient) เปลี่ยนแปลงไปตามอัตราส่วนนี้ด้วย เรียกอัตราส่วนนี้ว่า “แอดวานซ์นัมเบอร์” (Advance number,  $J$ )

$$J = \frac{V_a}{ND} \quad (6)$$

เมื่อ  $N$  คือความเร็วรอบ และ  $D$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางใบจักร

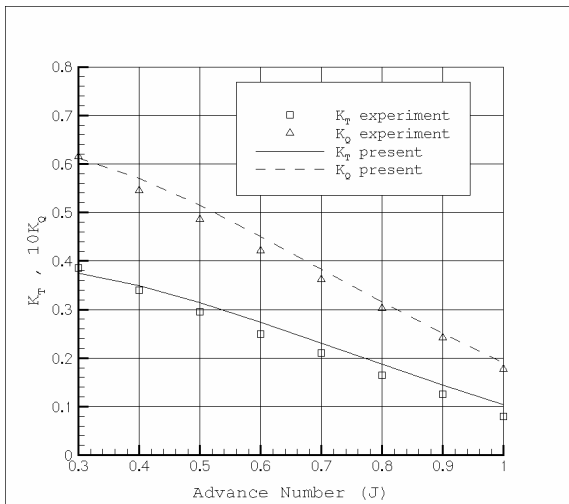


รูปที่ 2 ลักษณะการแบ่งพาเนลบนผิวใบจักรและผิวเวด



รูปที่ 3 ผลการคำนวณภาวะพลศาสตร์ของใบจักร

DTMB5168



รูปที่ 4 ผลการคำนวณภาวะพลศาสตร์ของใบจักร

NSRDC4118

### 3. ผลการเปรียบเทียบผลการคำนวณกับการทดลอง

เพื่อยืนยันความถูกต้องของโปรแกรมคำนวณที่พัฒนาขึ้น จึงทำการคำนวณภาวะพลศาสตร์ของใบจักร 2 แบบ คือ ใบจักรแบบ DTMB5168 [10] กับแบบ NSRDC4118 [6] เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ผลการเปรียบเทียบแสดงในรูปที่ 3 และ 4

จากรูปที่ 3 เห็นได้ว่าในช่วงแอดวานซ์นัมเบอร์ 1.0 ถึง 1.4 ซึ่งเป็นช่วงการทำงานของใบจักร ผลการ

คำนวณสอดคล้องเป็นอย่างดี โดยเฉพาะค่าสัมประสิทธิ์แรงผลึก แต่ในช่วงแอดวานซ์นัมเบอร์ต่ำกว่า 1.0 ผลการคำนวณแรงพลศาสตร์โดยเฉพาะค่าสัมประสิทธิ์แรงผลึก จะได้มากกว่าผลการทดลอง ทั้งนี้เพราะในช่วงนี้มุมปะทะของหน้าตัดจะมีค่ามาก ทำให้เกิดการไหลแยกชั้น (Separation) เนื่องจากอิทธิพลของความหนืด ซึ่งไม่สอดคล้องกับข้อสมมุติฐานที่กำหนดให้ความหนืดมีอิทธิพลต่อการไหลน้อย

ส่วนในช่วงที่แอดวานซ์นัมเบอร์มากกว่า 1.4 ค่าศักยะความเร็ว รอบวนมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะกลับไปกลับมา ทำให้ผลการคำนวณภาวะพลศาสตร์ที่คำนวณจากเกรเดียนต์ของศักยะความเร็ว รอบวนผิดพลาด

#### ผลการเปรียบเทียบผลการคำนวณภาวะ

พลศาสตร์ของใบจักรแบบ NSRDC4118 กับผลการทดลอง (รูปที่ 4) พบว่าผลการคำนวณสอดคล้องดีกว่าผลการคำนวณภาวะพลศาสตร์ของใบจักรแบบ DTMB5168 ทั้งนี้เพราะใบจักรแบบ NSRDC4118 มีรูปร่างที่ซับซ้อนน้อยกว่า มีระยะความโค้งตัวของหน้าตัด (Camber) น้อยกว่า ทำให้แบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ใช้มีความใกล้เคียงมากกว่าในกรณีของใบจักรแบบ DTMB5168

### 4. อิทธิพลของรูปร่างใบจักรต่อภาวะพลศาสตร์

ในส่วนนี้ เป็นการศึกษาถึงอิทธิพลของรูปร่างใบจักร เพื่อใช้ช่วยเป็นแนวทางในการออกแบบ โดยทำการศึกษาดูด้วยการดัดแปลงรูปร่างของใบจักรแบบ DTMB5168 เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของพารามิเตอร์ที่กำหนดรูปร่างใบจักรแต่ละตัว [2] ในการศึกษาครั้งนี้ใช้การคำนวณภาวะพลศาสตร์ผ่านทางแบบจำลองคณิตศาสตร์ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

#### 4.1 อิทธิพลของจำนวนใบ เมื่อพิจารณาที่แรงผลึกต่อใบ

ใบจักรแต่ละใบส่งผลกระทบต่อแรงพลศาสตร์ของกันและกัน โดยแรงพลศาสตร์ต่อใบจะลดลงเมื่อมี

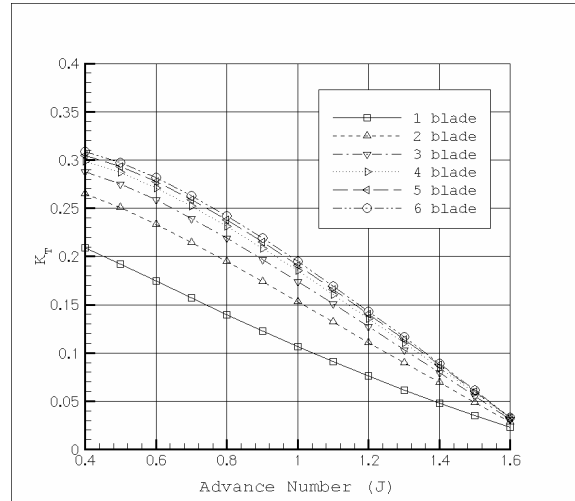
จำนวนใบเพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ดีแรงพลศาสตร์รวมของใบจักรทั้งพวงจะเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากว่ามีพื้นที่ขยาย (Expansion area) มากขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 1 ถึงแม้ว่าการเพิ่มจำนวนใบจะได้แรงพลศาสตร์ที่เพิ่มขึ้น แต่ทว่าก็เป็นกรเพิ่มต้นทุนการผลิตใบจักร เนื่องจากสิ้นเปลืองวัสดุเพิ่มขึ้นและผลิตได้ยากมีปัญหาความไม่สมดุลขณะหมุน ดังนั้นการเพิ่มจำนวนใบอาจทำให้การลงทุนไม่คุ้มค่าได้

ตารางที่ 1 อิทธิพลของจำนวนใบ

จำนวนใบ	อัตราส่วนพื้นที่ขยาย	สัมประสิทธิ์แรงผลักดันใบ	สัมประสิทธิ์แรงผลักรวม
1	0.1756	0.1063(100%)	0.1063
2	0.3513(+100%)	0.1011(95.1%)	0.202(+90.2%)
3	0.5269(+50%)	0.0942(88.6%)	0.283(+39.8%)
4	0.7026(+33.3%)	0.0870(81.8%)	0.348(+23.1%)
5	0.8782(+25%)	0.0801(75.4%)	0.401(+15.1%)

#### 4.2 อิทธิพลของจำนวนใบ เมื่อกำหนดให้พื้นที่ขยายคงที่

เมื่อทำการเพิ่มจำนวนใบจักรขึ้นแต่ลดความยาวคอर्डลง เพื่อให้ได้พื้นที่ขยายคงเดิม พบว่าเมื่อเพิ่มจำนวนใบจักรจาก 1 ใบ เป็น 2 ใบ แรงพลศาสตร์ของใบจักรจะเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มจำนวนใบจักรขึ้นไปอีก แรงพลศาสตร์ของใบจักรกลับไม่ค่อยมีการเปลี่ยนแปลงมากนัก (รูปที่ 5) ทั้งนี้เนื่องจากใบจักรแต่ละใบเริ่มส่งผลกระทบต่อแรงพลศาสตร์ของกันและกัน ข้อดีของการเพิ่มจำนวนใบโดยควบคุมให้พื้นที่ขยายคงเดิมนั้น คืออนุภาคของของไหลจะวิ่งผ่านผิวของใบจักรในเวลาทีน้อยลง เนื่องจากความยาวคอर्डทีน้อยลง ซึ่งทำให้การไหลแยกชั้น (Separation) หรือ ฟองอากาศ (Cavitation) เกิดได้ยากขึ้น แต่การเพิ่มจำนวนใบนี้มีข้อเสียคือเมื่อลดความยาวคอर्डลง จะทำให้ความแข็งแรงของใบจักรลดน้อยลงไปด้วย



รูปที่ 5 อิทธิพลของจำนวนใบเมื่อกำหนดให้พื้นที่ขยายคงที่

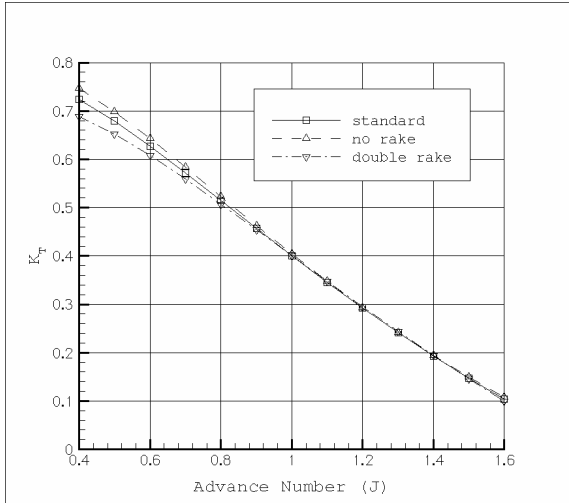
#### 4.3 อิทธิพลของพารามิเตอร์เรด (Rake) และ สกิว (Skew)

พารามิเตอร์ที่กำหนดรูปร่างใบจักร 2 ชนิดนี้ ไม่มีผลต่อภาวะพลศาสตร์ของใบจักรเร็วมากนัก ดังแสดงในรูปที่ 6 และ 7 ทั้งนี้เพราะไม่ได้มีผลทำให้มุมปะทะหรือพื้นที่ขยายของใบจักรเปลี่ยนแปลง แต่คาดว่าจะน่าจะมีผลต่อความแข็งแรงของใบจักร เช่นในกรณีที่ทำงานในสภาวะที่แอดวานซ์นัมเบอร์ค่อนข้างต่ำ (เรือกำลังออกตัว) บริเวณตำแหน่งขอบการไหลเข้าจะเป็นบริเวณที่มีค่าความดันแตกต่างสูงที่สุด ซึ่งถ้าทำให้ขอบการไหลเข้านี้ อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมด้วยการปรับพารามิเตอร์สกิว และเรดนี้ ก็น่าจะทำให้ค่าโมเมนต์การดัด (Bending moment) ที่ตำแหน่งโคนของใบจักร (Blade root) เปลี่ยนแปลงลดลงได้

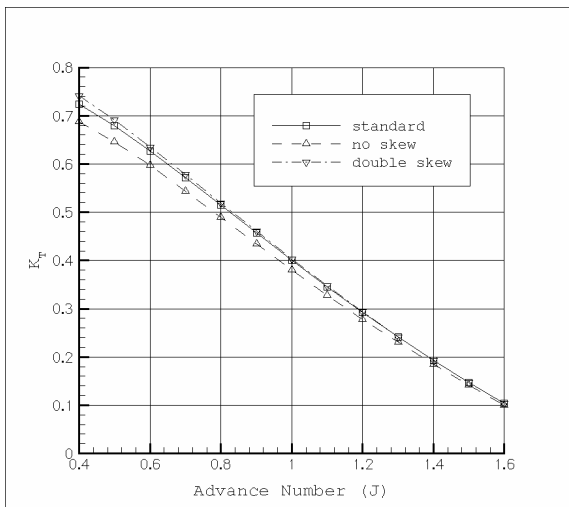
#### 4.4 อิทธิพลของมุมพิทช์ (Pitch)

การปรับมุมพิทช์ของใบจักร ส่งผลเป็นอย่างมากต่อภาวะพลศาสตร์ของใบจักร เพราะทำให้มุมปะทะที่แอดวานซ์นัมเบอร์เดียวกันเปลี่ยนแปลงไป ทำให้จุดที่เกิดค่าประสิทธิภาพสูงสุดเปลี่ยนแปลง ส่งผลให้ช่วงการทำงานของใบจักรเปลี่ยนแปลงไปด้วย โดยมุมพิทช์ที่

เพิ่มขึ้นจะทำให้จุดที่เกิดประสิทธิภาพสูงสุดเปลี่ยนไปที่ค่าแอดวานซ์นัมเบอร์ที่มากขึ้นตามไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 6 อิทธิพลของพารามิเตอร์เรด

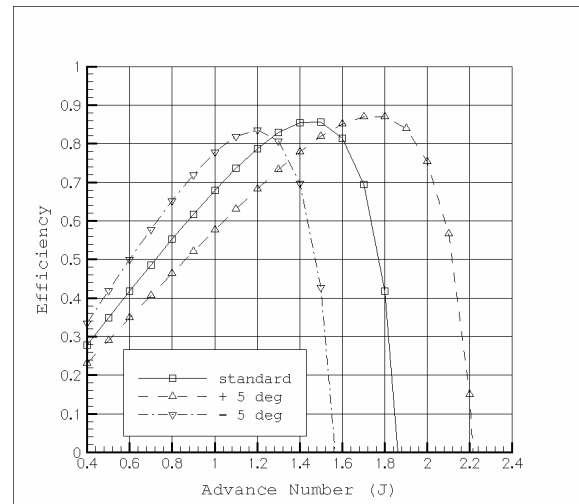


รูปที่ 7 อิทธิพลของพารามิเตอร์สควัวร์

## 5. สรุปและวิจารณ์

ระเบียบวิธีขอบเขตมูลฐาน สามารถนำมาประยุกต์ใช้คำนวณภาระพลศาสตร์ของใบจักรในช่วงการทำงานของใบจักรได้เป็นอย่างดี แต่ช่วงที่ค่าแอดวานซ์นัมเบอร์ต่ำกว่าช่วงการทำงานของใบจักร จะได้ผลการคำนวณแรงพลศาสตร์ที่มากกว่าผลการทดลอง โดยเฉพาะค่าสัมประสิทธิ์แรงบิด ทั้งนี้เพราะมุมปะทะมี

ค่ามาก จนทำให้เกิดการไหลแยกชั้นในบริเวณขอบการไหลเข้า ซึ่งไม่สอดคล้องกับแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่ใช้ ส่วนช่วงที่แอดวานซ์นัมเบอร์มากกว่าช่วงการทำงานของใบจักร จะได้ผลการคำนวณแรงพลศาสตร์ที่มากกว่าผลการทดลองเช่นกันแต่จะไม่ผิดพลาดมากนัก ซึ่งความผิดพลาดของการคำนวณในช่วงนี้เกิดขึ้นมาจากความผิดพลาดในการคำนวณเกรเดียนต์ของศักยะความเร็วรอบวง ที่มีลักษณะเปลี่ยนแปลงกลับไปกลับมา ทำให้การคำนวณเกรเดียนต์แบบ ผลต่างสี่เหลี่ยมลำดับที่ 1 (1st order finite difference) ที่ใช้เกิดความผิดพลาดขึ้น



รูปที่ 8 อิทธิพลของมุมพิทซ์

ผลการศึกษาอิทธิพลของรูปร่างใบจักร ผ่านทางแบบจำลองคณิตศาสตร์ พบว่าใบจักรแต่ละใบจะส่งผลกระทบต่อซึ่งกันและกัน ทำให้แรงพลศาสตร์ต่อใบลดลงเมื่อเพิ่มจำนวนใบขึ้น แต่ถ้าเพิ่มจำนวนใบขึ้นโดยควบคุมให้มีพื้นที่ขยาย (Expansion area) คงเดิม จะพบว่าภาระพลศาสตร์ของใบจักรไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก แต่น่าจะลดโอกาสที่จะเกิดฟองอากาศได้ เพราะอนุภาคของไหลใช้เวลาเคลื่อนที่ผ่านผิว ใบจักรน้อยลง

การปรับเปลี่ยนระยะเรด (Rake) และสควัวร์ (Skew) ของใบจักร ไม่ส่งผลให้ภาระพลศาสตร์ของใบจักรมีการเปลี่ยนแปลงมากนัก แต่น่าจะมีผลต่อความแข็งแรงของใบจักร เพราะระยะเรดและสควัวร์ สามารถ

ปรับเปลี่ยนตำแหน่งของขอบการไหลเข้าซึ่งเป็นบริเวณที่มีค่าความดันแตกต่างกันสูงสุดได้

การปรับระยะพิทช์ของใบจักรส่งผลกระทบอย่างมากต่อประสิทธิภาพศาสตร์ของใบจักรเพราะเป็นการปรับมุมปะทะ ทำให้ช่วงการทำงานของใบจักรเปลี่ยนแปลง โดยระยะพิทช์ที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ช่วงการทำงานของใบจักรเปลี่ยนไปในช่วงที่มีแควความชันัมเบอร์มากขึ้นตามไปด้วย

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่สนับสนุนเงินทุนในการจัดหาหนังสือและเอกสารทางวิชาการที่เกี่ยวข้อง

## เอกสารอ้างอิง

1. สำนักงานสถิติแห่งชาติ. สัมมะโนประมงทะเล. พ.ศ. 2538.
2. Carlton, J.S. Marine Propellers and Propulsion. Oxford : Butterworth-Heinemann Ltd., 1994.
3. Kerwin, J.E., and Lee, C.S. "Prediction of steady and unsteady marine propeller performance by numerical lifting-surface theory." Trans. SNAME 86 (1978).
4. Wang, Mo-Hwa. "Hub Effects in Propeller Design and Analysis." Ph.D. Thesis Department of Ocean Engineering Massachusetts Institute of Technology, 1985.
5. Kerwin, J.E. et al. "A surface panel method for the analysis of ducted propellers." Trans. SNAME 95 (1987).
6. Lee, Jin-Tae. "A Potential Based Panel Method for the Analysis of Marine Propellers in Steady Flow." Ph.D. Thesis Department of

Ocean Engineering Massachusetts Institute of Technology, 1987

7. Keenan, David P. "Marine Propellers in Unsteady Flow." Ph.D. Thesis Department of Ocean Engineering Massachusetts Institute of Technology, 1989
8. Pyo, Sangwoo. "Numerical Modeling of Propeller Tip Flows with Wake Sheet Roll-up in Three Dimensions." Ph.D. Thesis Department of Ocean Engineering Massachusetts Institute of Technology, 1995.
9. Pyo, Sangwoo., and Kinnas, Spyros A. "Propeller Wake Sheet Roll-up Modelling in Three Dimensions." Journal of Ship Research. 41 (June 1997) : 81-92.
10. Kinnas, Spyros A., and Pyo, Sangwoo. "Cavitating Propeller Analysis Including the Effects of Wake Alignment." Journal of Ship Research. 43 (March 1999) : 38-47.
11. Morino, Luigi. and Kuo, Ching-Chiang. "Subsonic potential aerodynamic for complex configurations: a general theory." AIAA Journal. 12, 2 (February 1974) :191-197.