เกณฑ์พิจารณาความสามารถในการทรงตัวเรือ
Ship Stability Criteria

น.อ.ผศ.สมศักดิ์ แจ่มแจ้ง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ฝ่ายศึกษา โรงเรียนนายเรือ

๑. กล่าวโดยทั่วไป

จากการที่ผู้เขียนได้เขียนบทความเกี่ยวกับการทดลองเอียงเรือ เพื่อหาระยะสูงศูนย์เสถียร (Metacentric Height ; GM) ของเรือ และเรื่องเกี่ยวกับการทรงตัวเรือในหัวข้อเรื่อง "Intact Stability" ในวารสารโรงเรียนนายเรือ ปีที่ ๒ ฉบับที่ ๑ และ ๒ ตามลำดับแล้วนั้น ในฉบับนี้จะขอนำประโยชน์ที่ได้จากการทดลองเอียงเรือประกอบกับคุณสมบัติของเส้นโค้งการทรงตัวเรือ (Stability Curves) มาวิเคราะห์หาความสามารถในการทรงตัวของเรือตามเกณฑ์สากลของ I.M.O. (International Maritime Organization) และ U.S.NAVY Criteria ต่อไป ที่เลือกนำสองหลักเกณฑ์ดังกล่าวมาเขียนก็เพราะเกณฑ์ของ I.M.O. (มีชื่อเรียกเฉพาะว่า "Code on Intact Stability") นั้น ใช้พิจารณาครอบคลุมเรือได้เกือบทุกชนิด โดยเฉพาะเรือสินค้าทั่วไป ส่วนเกณฑ์ของ U.S.NAVY Criteria นอกจากจะใช้ได้ดีกับเรือรบเกือบทุกประเภทแล้วยังสามารถนำไปใช้กับเรือเชิงพาณิชย์อื่น ๆ ทั่วไปได้เป็นอย่างดีเช่นกัน ถึงแม้ทั้งสองหลักเกณฑ์จะมีความแตกต่างอยู่บ้าง แต่ล้วนต้องการควบคุมให้เรือทุกลำมีความสามารถในการทรงตัวดี

๒. Code on Intact Stability โดย I.M.O.

I.M.O. Resolution A.749 (18) กำหนดเกณฑ์ควบคุมเรื่องเกี่ยวกับความสามารถในการทรงตัวของเรือประเภทต่าง ๆ ตั้งแต่ความยาว 24 m. เป็นต้นไป ดังนี้

- เรือสินค้า (Cargo Ships)
- เรือสินค้าที่บรรทุกสินค้าเป็นไม้บนดาดฟ้า (Cargo Ships Carrying Timber deck Cargo)
- เรือสินค้าบรรทุกสินค้าเทกอง (Cargo Ships Carrying Grain in Bulk)
- เรือโดยสาร (Passenger Ships)
- เรือประมง (Fishing Vessels)
- เรือเฉพาะกิจพิเศษ (Special Purpose Ships)
- เรือสนับสนุนนอกฝั่ง (Offshore Supply Vessels)
- ฐานขุดเจาะเคลื่อนที่ (Mobile Offshore Drilling Units)
- ทุ่น (Pontoons)
- ยานที่มีแรงพลศาสตร์ยกในขณะเคลื่อนที่ (Dynamically Supported Craft)
- เรือบรรทุกตู้คอนเทนเนอร์ (Container Ships)

นอกจากนั้น I.M.O. ได้ออกเกณฑ์สำหรับใช้พิจารณาออกแบบการทรงตัวที่เหมาะสมกับเรือทั่วไป (Design Criteria Applicable to All Ships) ไว้ด้วย ในที่นี้จะขออธิบายเฉพาะเกณฑ์สำหรับออกแบบเรือ

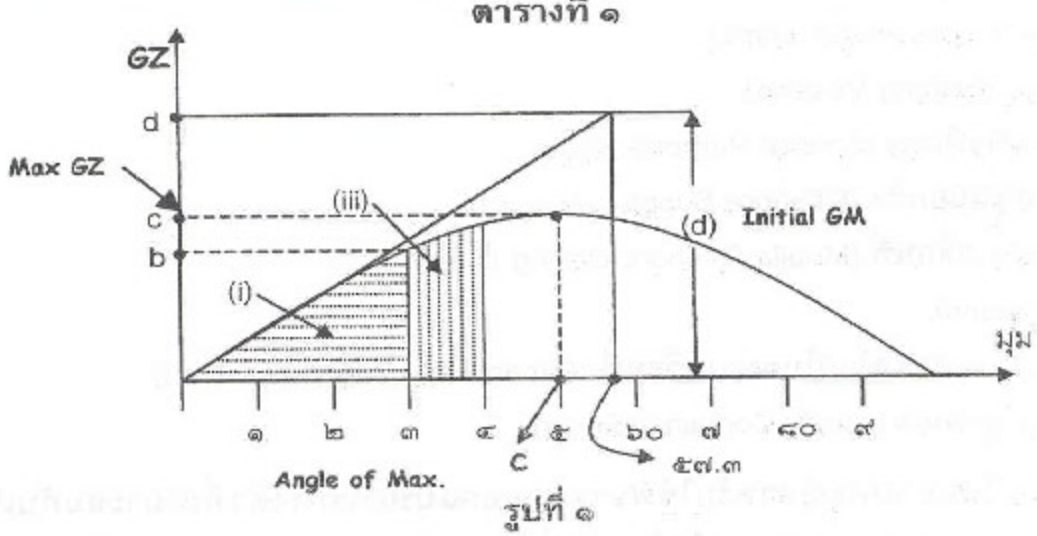
โดยสารและเรือสินค้าทั่วไปซึ่งนับว่าครอบคลุมเรือที่มีใช้อยู่มากที่สุด ซึ่งสามารถอธิบายภาพโดยรวมของเกณฑ์การทรงตัวได้เป็นอย่างดี ส่วนเรือรบจะได้อธิบายในหัวข้อของ U.S.NAVY Criteria ต่อไป

๓. เกณฑ์พิจารณาการทรงตัวของเรือโดย I.M.O.

ภายใต้ข้อกำหนด Load Line Rules, ๑๙๖๘, Part I (Ships in General), Paragraph ๒ ซึ่งตราขึ้นโดย International Maritime Organization (I.M.O.) ได้กำหนดเกณฑ์คุณสมบัติต่ำสุดของการทรงตัวที่เรือทั่วไปต้องมี สรุปได้ดังนี้ (ดูรูปที่ ๑ ประกอบ)

ปริมาณ	เกณฑ์
(a) พื้นที่ภายใต้เส้นโค้งการทรงตัว (Area Under Stability Curve)	
(i) จนถึงมุมเอียง ๓๐ องศา	ต้องไม่น้อยกว่า ๐.๐๕๕ m. radian
(ii) จนถึงมุมเอียง ๔๐ องศา หรือมุมที่ขอบล่างของช่องเปิด (Openings) ที่ตัวเรือ (Super structures, Deck- houses) ซึ่งผนึกน้ำไม่ได้เริ่มแต่กับน้ำ	ต้องไม่น้อยกว่า ๐.๐๙ m. radian
(iii) พื้นที่ระหว่างมุมเอียง ๓๐ องศา ถึง ๔๐ องศา [หรือตามข้อ (ii)]	ต้องไม่น้อยกว่า ๐.๐๓ m. radian
(b) ระยะ Righting Lever (GZ) ที่มุมเอียง ๓๐ องศา	ต้องไม่น้อยกว่า ๐.๒๐ m.
(c) ระยะ Righting Lever มากที่สุด (Max.GZ)	จะเป็นการดีถ้าเกิดที่มุมเอียงเกินกว่า ๓๐ องศาแต่จะต้องไม่น้อยกว่า ๒๕ องศา
(d) ระยะ Initial GM (ค่าเริ่มต้นที่เป็นความสูงศูนย์เสถียร) ที่มุม ๕๗.๓ องศา	ต้องไม่น้อยกว่า ๐.๑๕ m.

ตารางที่ ๑



รูปที่ ๑

ตารางที่ ๑ เป็นหัวข้อการพิจารณาและเกณฑ์ที่ I.M.O. กำหนดสำหรับพิจารณาความสามารถในการทรงตัวเรือจากเส้นโค้งการทรงตัวในปัจจุบันของเรือ ซึ่งการหาเส้นโค้งการทรงตัวในปัจจุบันดังกล่าวจำต้องอาศัยข้อมูลอ้างอิงที่มีอยู่ในเรือ เช่น เส้นโค้ง Hydrostatics เส้นโค้งรวมการทรงตัว (Cross Curves of Stability) ข้อมูลการทดลองเอียงเรือครั้งล่าสุด (ถ้ามี) และผังแสดงรายการตำแหน่งและจุดศูนย์ถ่วงของบรรดาน้ำหนักและของเหลวต่าง ๆ ในเรือ โดยข้อมูลที่กล่าวมาส่วนใหญ่มีอยู่ในหนังสือเกี่ยวกับการป้องกันความเสียหาย (D.C. Book) ของเรือแต่ละลำ ขั้นตอนการคำนวณหาเส้นโค้งการทรงตัวในสถานะปัจจุบันนี้เป็นหัวข้อหลักของวิชาการคำนวณการทรงตัวเรือที่มีการสอนในโรงเรียนนายเรือ และมีความซับซ้อนพอสมควร ในที่นี้ผู้เขียนขอสรุปเป็นขั้นตอนคร่าว ๆ ดังนี้

- หาระวางขับน้ำในปัจจุบันที่แท้จริงของเรือ จากระดับกินน้ำลึกหัวเรือ กลางลำ และท้ายเรือ
- เปรียบเทียบระวางขับน้ำจากค่ากินน้ำลึกเฉลี่ยที่อ่านได้ กับเส้นโค้ง Hydrostatics ซึ่งอาจต้องแก้ผลความโก่งเรือแบบ Hogging หรือ Sagging จนได้ค่าเฉลี่ยกินน้ำลึกที่แท้จริง
- ถ้ามีข้อมูลทดลองเอียงเรือให้คำนวณหาระยะ KG ที่สอดคล้องกับสถานะขณะทดลองเอียง ($KG_{As\ Inclined}$) และสถานะบรรทุกแบบ Light Ship Displacement ถ้าไม่มีข้อมูลทดลองเอียงเรือ อาจคำนวณจากโมเมนต์ทางดิ่ง (Vertical Moment) ของน้ำหนักหลัก ๆ ในเรือ ในการนี้จำต้องทราบข้อมูลการกระจายน้ำหนักให้มากที่สุดเท่าที่จะมากได้ หรือประมาณจากเรือคล้ายกันหรือใช้สูตรประมาณที่เหมาะสม
- คำนวณโมเมนต์ทางดิ่งและทางขวางของน้ำหนักส่วนที่ต่างจาก Light Ship Displacement จนกลายเป็นสถานะบรรทุกปัจจุบัน พร้อมทั้งแก้ผลจากการเกิดผิวหน้าอิสระ (Free Surface Effects) (ถ้ามี) ให้ได้ระยะ $\overline{GM}_{Fluid}$ ($\overline{GM}$ ที่รวมผลผิวหน้าอิสระ) และตำแหน่งของจุด CG ในทางขวาง (Transverse Center of Gravity ; T.C.G.)
- คำนวณแขนโมเมนต์ตั้งตรง (GZ) ด้วยสูตร Wall – sided Formula ดังนี้

$$GZ = SIN\phi\left(GM + \frac{BM}{2}tan^2\phi\right) \qquad (๑)$$

- พล็อตเส้นโค้งการทรงตัวที่ปรับแก้ผลความสูงที่จุด G ปัจจุบันต่างไปจากจุด G อ้างอิงในการสร้างเส้นโค้งรวมการทรงตัว (Cross Curves of Stability) และแก้ผลการเคลื่อนที่ทางขวางของจุด G (ถ้ามี)
- เส้นโค้งการทรงตัวที่พล็อตได้คือ เส้นโค้งการทรงตัวในปัจจุบันของเรือที่จะถูกนำไปประเมิณด้วยเกณฑ์การทรงตัวในตารางที่ ๑ ต่อไป

ตัวอย่างที่ ๑ เรือฟริเกตลำหนึ่งมีขนาดระวางขับน้ำปัจจุบันเท่ากับ ๒,๕๐๐ ตัน มีข้อมูลแขนโมเมนต์ตั้งตรงในปัจจุบันดังในตาราง (ข้อมูลเส้นโค้งการทรงตัวที่นำมาใช้ผ่านการคำนวณตามขั้นตอนก่อนหน้านี้จนเป็นเส้นโค้งการทรงตัวในปัจจุบันเรียบร้อยแล้ว) จะพิจารณาเกณฑ์การทรงตัวได้ดังในตารางที่ ๒

มุมเอียง	๐	๕	๑๐	๑๕	๒๐	๒๕	๓๐	๓๕	๔๐
GZ (m.)	๐	๐.๕๒	๑.๕๙	๒.๕๐๔	๔.๑๑๘	๕.๙๕๘	๗.๘๕๘	๙.๙๔	๑๒.๐
มุมเอียง	๔๕	๕๐	๕๕	๖๐	๖๕	๗๐	๗๕	๘๐	๘๕
GZ (m.)	๑๓.๒๕	๑๔.๐	๑๓.๙๕	๑๓.๑๘	๑๑.๐๕	๗.๕๕	๓.๗๓	๑.๖๖	๐.๔

วิธีทำ ใช้ Simpson's 1'st Rule คำนวณพื้นที่ใต้เส้นโค้งการทรงตัว เพื่อตรวจสอบกับเกณฑ์ของ I.M.O. ดังในตารางต่อไปนี้

มุมเอียง	GZ	S.M.	$f(A_1)$	S.M.	$f(A_2)$	S.M.	$f(A_3)$
๐	๐	๑	๐	๑	๐	-	-
๕	๐.๕๒	๔	๒.๐๘	๔	๒.๐๘	-	-
๑๐	๑.๕๙	๒	๓.๑๘	๒	๓.๑๘	-	-
๑๕	๒.๕๐๔	๔	๑๐.๐๑๖	๔	๑๐.๐๑๖	-	-
๒๐	๔.๑๑๘	๒	๘.๒๓๖	๒	๘.๒๓๖	-	-
๒๕	๕.๙๕๘	๔	๒๓.๘๓๒	๔	๒๓.๘๓๒	-	-
๓๐	๗.๘๕๘	๒	๑๕.๗๑๖	๑	๗.๘๕๘	๑	๑๕.๗๑๖
๓๕	๙.๙๔	๔	๓๙.๗๖		๕๕.๒๐๒	๔	๓๙.๗๖
๔๐	๑๒.๐	๑	๑๒.๐		$\sum f(A_2)$	๑	๑๒
			๑๑๔.๘๒				๕๙.๖๑๘
			$\sum f(A_1)$				$\sum f(A_3)$

ตารางที่ ๒

เกณฑ์พื้นที่ภายใต้เส้นโค้งการทรงตัวจนถึงมุมเอียง 40 องศา (ต้อง > 0.09 m. radian)

$$A_{0-40} = \frac{1}{3} \times h \times \sum f(A_1) \quad ; h = 5 \text{ องศา}$$

$$= \frac{1}{3} \times \frac{5\pi}{180} \times 114.82 = 3.34 \text{ m.radian} > 0.09 \text{ m.radian}$$ **(ผ่าน)**

เกณฑ์พื้นที่ภายใต้เส้นโค้งการทรงตัวจนถึงมุมเอียง 30 องศา (ต้อง > 0.055 m.radian)

$$A_{0-30} = \frac{1}{3} \times h \times \sum f(A_2) \quad ; h = 5 \text{ องศา}$$

$$= \frac{1}{3} \times \frac{5\pi}{180} \times 52.202 = 1.61 \text{ m.radian} > 0.055 \text{ m.radian}$$ **(ผ่าน)**

เกณฑ์พื้นที่ภายใต้เส้นโค้งการทรงตัวระหว่างมุมเอียง 30 องศา ถึง 40 องศา (ต้อง > 0.03 m.radian)

$$A_{30-40} = \frac{1}{3} \times h \times \sum f(A_3) \quad ; h = 5 \text{ องศาศา}$$

$$= \frac{1}{3} \times \frac{5\pi}{180} \times 59.618 = 1.73 \text{ m.radian} > 0.03 \text{ m.radian}$$ **(ผ่าน)**

เกณฑ์ขนาดแขนโมเมนต์ตั้งตรง (Righting Lever) ที่มุมเอียง 30 องศา (ต้องมากกว่า 0.20m.)
จากข้อมูลการทรงตัวในตารางที่ ๒ ที่มุมเอียง 30 องศา เรือมีระยะ GZ = 7.858 m. > 0.20 m. **(ผ่าน)**

เกณฑ์ขนาดแขนโมเมนต์ตั้งตรง (Righting Lever) มากที่สุดต้องเกิดที่มุมเอียง> 30 องศา
จากข้อมูลการทรงตัวในตารางที่ ๒ ระยะ GZ มากที่สุด เกิดที่มุมเอียงประมาณ 50 – 55 องศา ซึ่งมากกว่า 30 องศา หากต้องการตรวจสอบอย่างละเอียดควรพล๊อตเส้นโค้งการทรงตัว(GZ-มุมเอียง) แล้วหา

ตำแหน่งยอดของเส้นโค้ง เกณฑ์นี้บอกโดย นัยเกี่ยวกับขนาดมุมเอียงที่กราบเรือด้านที่เอียงเริ่มแตะกับน้ำ แต่ขอให้สังเกตว่าเรือจะยังคงมีการทรงตัวแบบ Stable Equilibrium ต่อไปได้จนถึงขีดจำกัดสูงสุดของย่านการทรงตัวเรือเป็นบวก (Range of Stability) **(ผ่าน)**

เกณฑ์ Initial GM คิดที่มุมเอียง 57.3 องศา (ต้องมากกว่า 0.15 m)

จากตารางที่ ๒ พบว่า Initial GM ย่อมมีค่ามากกว่า 0.15 m. เนื่องจากที่มุมเอียง 10 องศา เรือมีระยะ GZ ถึง 1.59 m. หากต้องการตรวจสอบอย่างละเอียดให้พล็อตเส้นโค้งการทรงตัวในตารางที่ ๒ แล้วลากเส้นจากมุมเอียง 0 องศาสัมผัสกับเส้นโค้งที่มุมเอียงประมาณ 10 องศาแล้วเลยไปตัดกับเส้นทางดิ่งที่ลากจากมุมเอียง 57.3 องศา แล้วอ่านค่า Initial GM จากสเกลของ GZ การที่เรียกว่าเป็น Initial GM ก็เพราะจะใช้ค่านี้คำนวณเป็นระยะ GM เมื่อเรือตั้งตรงต่อไป **(ผ่าน)**

๔. เกณฑ์พิจารณาการทรงตัวของเรือโดยกองทัพเรือสหรัฐ (U.S.NAVY Criteria)

กองทัพเรือสหรัฐ กำหนดเกณฑ์พิจารณาความสามารถในการทรงตัวของเรือโดยนำแขนโมเมนต์เอียงเรือ (Heeling Arm) มาพิจารณาประกอบกับเส้นโค้งการทรงตัว ดังนี้

๔.๑ ผลของลมกระทำด้านข้างเรือ (Beam Wind)

๔.๑.๑ ลมกระทำด้านข้างและการโคลง (Beam Wind Combined with Rolling)

ลมคลื่นและการโคลงเป็นสิ่งที่ต้องพิจารณาควบคู่กัน เวลาที่ลมแรง คลื่นก็จะแรงตามไปด้วยและทำให้เรือโคลงมาก ถ้าไม่มีคลื่น (เช่น ในท่าเรือหรืออ่างในอู่เรือ) เรือต้องการเฉพาะโมเมนต์เพื่อเอาชนะโมเมนต์เอียงเรือ (Heeling Moment) ที่เกิดจากลมกระทำต่อพื้นที่รับลมข้างเรือ หรือที่เรียกว่าเป็น "Sail Area" ที่เรียกเช่นนี้คงเป็นเพราะนำแนวคิดมาจากเรือใบที่อาศัยลมกระทำกับใบให้เรือแล่นไป ในกรณีที่มีคลื่นเรือย่อมได้รับการถ่ายทอดพลังงานจากคลื่นและตอบสนองด้วยการโคลง (Rolling) ซึ่งควรจะต้องนำผลพลศาสตร์ทางเรือที่มีต่อการทรงตัว (Dynamic Stability) มาพิจารณาประกอบด้วย

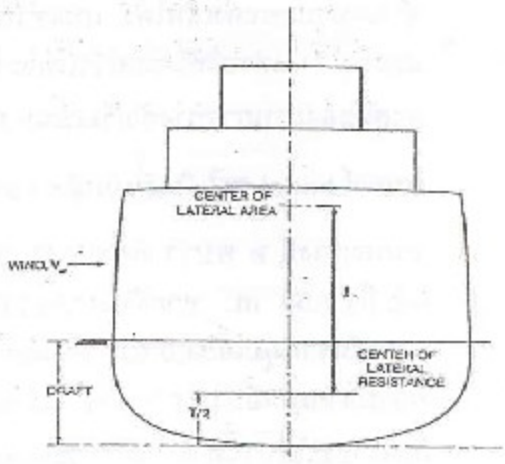
เกณฑ์การทรงตัวของ U.S.NAVY Criteria ได้รวมผลของลมและคลื่นดังกล่าวเข้าไว้ด้วยกัน การพิจารณาต้องนำแขนโมเมนต์เอียงเรือที่เกิดจากผลของลมและปัจจัยอื่นๆที่สำคัญมาหักออกจากเส้นโค้งการทรงตัวที่เรือเหลืออยู่ปัจจุบัน (คำนวณเช่นเดียวกับการย้ายน้ำหนักขวางเรือ (Transverse Weight Movements)) โดยมีรายละเอียดประกอบการพิจารณาดังนี้

๔.๑.๑.๑ ความเร็วลม (Wind Velocities)

ความเร็วลมที่ใช้เป็นเกณฑ์พิจารณาการทรงตัวเรือขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ประเภทของเรือ ลักษณะการใช้งาน พื้นที่ปฏิบัติงานและภารกิจของเรือ เกณฑ์ความเร็วลมที่ใช้ในกฎการออกแบบเรือแต่ละแบบจะมีความเหมาะสมแตกต่างกันไป หากมิได้กำหนดเป็นอย่างอื่นสามารถใช้ความเร็วลมที่ U.S.NAVY Criteria กำหนดดังในตารางที่ ๓ เป็นเกณฑ์ในการประเมินได้

Service	Minimum wind velocity for design purposes (knots)
1. Ocean	
(a) Ships which must be expected to weather full force of tropical cyclones. This includes all ships which will move with the amphibious and striking forces	100
(b) Ships which will be expected to avoid centers of tropical disturbances	80
2. Coastwise	
(a) Ships which will be expected to weather full force to tropical cyclones	100
(b) Ships which will be expected to avoid centers of tropical disturbances, but to stay at sea under all other circumstances of weather	60
(c) Ships which will be recalled to protected anchorages if winds over Force 8 are expected	60
3. Harbor	60

ตารางที่ ๓



รูปที่ ๒

๔.๑.๑.๒ โมเมนต์เอียงเรือเนื่องจากลม (Wind Heeling Moment)

จากการศึกษาพบว่า สามารถคำนวณแรงกดต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ด้านข้างเรือที่เกิดจากการกระทำของลม ได้ด้วยความสัมพันธ์ดังนี้

$$P = C\rho_a \frac{V_w^2}{2g} \qquad (๒)$$

โดย P = แรงกดที่กระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ด้านข้างเรือ

C = สัมประสิทธิ์ขึ้นกับชนิดของเรือ

ρ_a = ความหนาแน่นมวลของอากาศ

V_w = ความเร็วลม

g = อัตราเร่งสู่ศูนย์กลางโลก

เห็นได้ว่าค่าของสัมประสิทธิ์ C มีความไม่แน่นอนเช่นเดียวกับความแปรปรวนของความเร็วลมในทางดิ่งเหนือจากแนวน้ำขึ้นมา ซึ่งต่อมามีการพัฒนาสูตรคำนวณขนาดแรงกด P ในหน่วยอังกฤษ เป็น $P = 0.004\, V_w^2$ lb/ft^2 โดยที่ V มีหน่วยเป็น Knots ดังนั้นจึงคำนวณขนาดโมเมนต์เอียงเรือเนื่องจากการกระทำของลมได้ดังนี้ (ดูรูปที่ ๒ ประกอบ)

$$\text{Heeling Moment} = \frac{0.004\, V_w^2\, Al \cos^2 \phi}{2240 \times W} \qquad (๓)$$

โดย A = พื้นที่ตั้งฉากด้านรับลมข้างเรือ (Projected Sail Area) ในหน่วย ft^2

l = แขนโมเมนต์จากการกระทำของลม หน่วยเป็น ft. วัดจากจุดศูนย์กลางความด้านทานเรือ (ใช้ระยะครึ่งหนึ่งของระดับกินน้ำลึก) ถึงศูนย์กลางการกระทำของลมซึ่งก็คือจุดศูนย์กลางรวมของหน้าตัด A

V_w = ความเร็วลมในทิศตั้งฉาก หน่วยเป็น Knots

ϕ = มุมเอียงเรือ

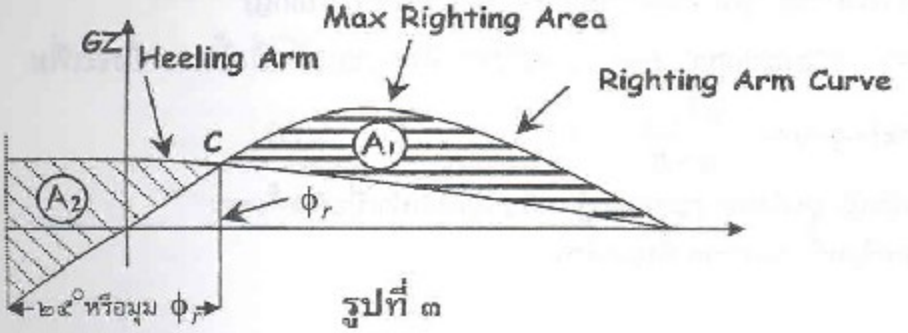
W = ระวางขับน้ำเรือในหน่วย Long tons

ส่วนในหน่วย S.I.มีรูปสมการเป็นดังนี้ $\text{Heeling Moment} = \frac{0.0195\, V_w^2\, Al \cos^2 \phi}{1000 \times \Delta}$ (๔)

โดย A มีหน่วยเป็น m^2 , l มีหน่วยเป็น m , Δ มีหน่วยเป็น metric tons แต่ V_w ยังคงมีหน่วยเป็น Knots เช่นเดิม แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเรือเอียงเป็นมุมมาก ๆ สมการที่ (๓) และ (๔) จะไม่ค่อยถูกต้องนัก เนื่องจากขนาดพื้นที่ A มิได้แปรเปลี่ยนในฟังก์ชั่น cosine ตามการเอียงของเรือ จากการทดลองอุโมงลมที่ศูนย์วิจัย David W.Taylor Naval Ship Research and Development Center กับแบบจำลองของเรือต่าง ๆ ชนิดที่มีลักษณะ Superstructures แตกต่างกัน พบว่าสัมประสิทธิ์ตัวเลขในสมการที่ (๓) และ (๔) ควรเปลี่ยนเป็น ๐.๐๐๓๕ และ ๐.๐๑๗ ตามลำดับ

๔.๒ เกณฑ์การทรงตัวของเรือในลมและคลื่น

ความสามารถในการทรงตัวของเรือเมื่อต้องเผชิญกับคลื่นและลมดังในหัวข้อ ๔.๑ ประเมินได้จากขนาดของแขนโมเมนต์ตั้งตรงและโมเมนต์เอียงเรือ (ดูรูปที่ ๓ ประกอบ) ดังนี้



รูปที่ ๓

๔.๒.๑ ขนาดแขนโมเมนต์เอียงเรือตรงจุดตัดกับแขนโมเมนต์ตั้งตรงเรือ(จุด *C*) ต้องมีขนาดไม่เกิน ๖๐% ของแขนโมเมนต์สูงสุด(Max.Righting Arm)

๔.๒.๒ พื้นที่ A_1 ในรูปที่ ๓ ต้องมีขนาดไม่น้อยกว่า ๑.๔ เท่าของพื้นที่ A_2 โดย A_2 คือพื้นที่ปิดล้อมโดยแขนโมเมนต์ทั้ง ๒ ก่อนถึงจุด *C* ๒๕ องศา หรือจากจุด *C* ไปในทิศทางการเอียงอีกเป็นมุมเท่ากับ ϕ_r (ในกรณีที่ทราบขนาดมุมโคลง (Roll Angle; ϕ_r) จากการทดลองด้วยเรือจำลอง) โดยที่ *C* เป็นจุดที่แขนโมเมนต์เอียงเรือมีขนาดเท่ากับโมเมนต์ตั้งตรงเรือ

๔.๓ ปัจจัยอื่น ๆ ที่สำคัญ

เกณฑ์ในข้อ ๔.๒ ใช้พิจารณาความสามารถในการทรงตัวของเรือในลมและคลื่น ยังมีปัจจัยสำคัญอื่นอีก ๓ กรณีที่ U.S.NAVY Criteria เห็นว่าอาจทำให้การทรงตัวของเรือในขณะปฏิบัติการลดลงจนเกิดอันตรายได้ คือปัญหาจากการย้ายน้ำหนักมาก ๆ ไปข้างเรือ การที่ลูกเรือและผู้โดยสารรวมกันอยู่กราบใดกราบหนึ่ง และแขนโมเมนต์เอียงเรือที่เกิดในขณะเรือหันเลี้ยว ผลดังกล่าวล้วนทำให้พื้นที่ในระหว่างแขนโมเมนต์ตั้งตรงกับแขนโมเมนต์เอียงเรือลดลงอีก ดังนี้

๔.๓.๑ การยกของหนักไปด้านกราบเรือ (Lifting of Heavy Weights over the Side) ทำให้เกิดผลกระทบเช่นเดียวกับการเคลื่อนย้ายน้ำหนักทางขวางในเรือ โดยจะเพิ่มแขนโมเมนต์เอียงเรือในแต่ละมุมเอียงขึ้นอีกดังนี้ $\text{Heeling Arm} = \frac{w_1 \times d_1 \times \cos\phi}{\Delta}$ (๕)

โดย w_1 = น้ำหนักที่ถูกย้าย

d_1 = ระยะทางขวางจากกึ่งกลางลำถึงศูนย์กลางน้ำหนักที่ย้าย

Δ = ระวางขับน้ำปัจจุบัน (รวมผลของน้ำหนัก w_1 ด้วย)

ϕ =มุมเอียง

๔.๓.๒ เมื่อลูกเรือหรือผู้โดยสารอยู่รวมกันจำนวนมากกราบใดกราบหนึ่ง (Crowding of Personal to one Side)

เกิดผลกระทบเช่นเดียวกับกรณี ๔.๓.๑ ซึ่งจะเพิ่มแขนโมเมนต์เอียงเรือขึ้นอีก ดังนี้

$$\text{Heeling Arm} = \frac{w_2 \times d_2 \times \cos\phi}{\Delta} \qquad (๖)$$

โดย w_2 = น้ำหนักรวมของลูกเรือหรือผู้โดยสารที่นำมาคิด

d_2 = ระยะทางขวางจากกึ่งกลางลำถึงศูนย์กลางน้ำหนัก w_2

Δ = ระวางขับน้ำปัจจุบัน (รวมผลของน้ำหนัก w_2 ด้วย)

ϕ = มุมเอียง

๔.๓.๓ ความเอียงเมื่อเรือหันเลี้ยวด้วยความเร็วสูง (High Speed Turning)

ทำให้เกิดแรงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal Force) เสริมการเอียงของเรือยิ่งขึ้น ซึ่งจะเพิ่มแขนโมเมนต์เอียงเรือขึ้นอีก ดังนี้ $\text{Heeling Arm} = \frac{V^2 \times a}{g \times R}\cos\phi$ (๗)

โดย a = ระยะจากจุดศูนย์ถ่วงเรือถึงจุดกึ่งกลางระหว่างท้องเรือกับแนวน้ำเมื่อเรือตั้งตรง (จุดศูนย์ถ่วงเรือถึงจุดครึ่งหนึ่งของระดับกินน้ำลึก)

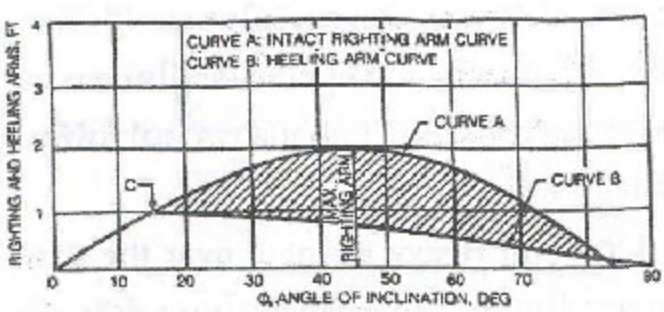
ϕ = มุมเอียงที่เกิดขึ้น

R = รัศมีวงหันเรือ (ครึ่งหนึ่งของ "Tactical Diameter") ในกรณีที่ไม่ทราบให้สมมติค่าที่เหมาะสม

V = ความเร็วสัมผัสในขณะเรือหัน

๔.๔ เกณฑ์การทรงตัวของเรือที่ได้รับผลกระทบในข้อ ๔.๓

เกณฑ์สำหรับพิจารณาความสามารถในการทรงตัวของเรือที่ได้รับผลกระทบจากการย้ายน้ำหนักมาก ๆ ไปข้างเรือ การที่ลูกเรือและผู้โดยสารรวมกันอยู่กราบใดกราบหนึ่ง และเกิดแขนโมเมนต์เอียงเรือที่ขึ้นในขณะหันเลี้ยว คือ (ดูรูปที่ ๔ ประกอบ)



รูปที่ ๔

๔.๔.๑. จุด C ต้องเกิดที่มุมเอียงไม่เกิน ๑๕ องศา

๔.๔.๒. แขนโมเมนต์เอียงเรือตรงจุดตัดกับแขนโมเมนต์ตั้งตรงเรือ (จุด C) ต้องมีขนาดไม่เกิน ๖๐ % ของแขนโมเมนต์ตั้งตรงสูงสุด

๔.๔.๓. Dynamic Stability ที่เหลือ(พื้นที่แลเงาในรูปที่ ๔) ต้องไม่น้อยกว่า ๔๐% ของพื้นที่ภายใต้เส้นโค้งการทรงตัวทั้งหมด

ตัวอย่างที่ ๒ ภายหลังจากที่ ร.ล.ป.ก. ของ ทร. ถูกดัดแปลงสะพานเดินเรือ จำต้องคำนวณหาความสามารถในการทรงตัวใหม่ โดยเลือกใช้เกณฑ์ U.S.NAVY Criteria ตรวจสอบเมื่อเรือต้องปฏิบัติการในคลื่นลมความเร็ว 60 knots และ 90 knots ซึ่งจากข้อมูลใน D.C.Book ของเรือและการคำนวณจุดศูนย์ถ่วงต่าง ๆ แล้ว มีข้อมูลสำหรับพิจารณาการทรงตัว ดังนี้

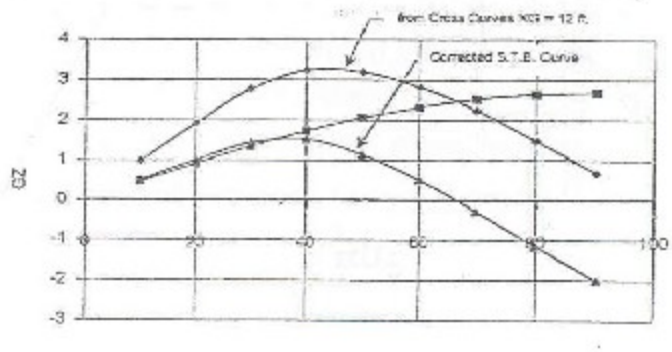
ระวางขับน้ำ = 1,689.6 tons ; KG สมมติสูง 12 ft. ; KG_{solid} = 14.35 ft.; F.S.C. = 0.33 ft.
KG_{Fluid} = 14.68 ft. ; Draft = 10.66 ft.;Sail Area = 5,850.7 ft^2 มี CG สูง 11.34 ft. จากแนวน้ำ
ข้อมูลแขนโมเมนต์ตั้งตรงจาก Cross Curves ที่ระวางขับน้ำ 1,689.6 tons เป็นดังนี้

มุมเอียง	๑๐	๒๐	๓๐	๔๐	๕๐	๖๐	๗๐	๘๐	๙๐
GZ	๐.๙๙	๑.๙๒	๒.๗๗	๓.๒๕	๓.๑๙	๒.๘๓	๒.๒๔	๑.๔๘	๐.๖๙

วิธีทำ เนื่องจากปัจจุบันจุด G อยู่สูงกว่าระยะ KG สมมติใน Cross Curves 2.68 ft. จึงต้องปรับแก้ทุกมุมเอียงด้วยความสัมพันธ์ 2.68 $\sin\phi$ เหลือขนาดแขนโมเมนต์ตั้งตรงดังในตารางต่อไปนี้

มุมเอียง	GZ จาก Cross Curves	ค่าแก้ 2.68 sin ϕ	GZ ปัจจุบัน	H.A. ที่ 60 Knt.	H.A. ที่ 90 Knt.	GZ เหลือ (60 Knt.)	GZ เหลือ (90 Knt.)
๐	๐.๐๐	๐.๐๐๐	๐.๐๐๐	๐.๓๒๕	๐.๗๓๑	-๐.๓๒๕	-๐.๗๓๑
๑๐	๐.๙๘	๐.๔๖๕	๐.๕๑๕	๐.๓๑๕	๐.๗๐๙	๐.๒๐๐	-๐.๑๙๔
๒๐	๑.๙๒	๐.๙๑๗	๑.๐๐๓	๐.๒๘๗	๐.๖๔๕	๐.๗๑๗	๐.๓๕๘
๓๐	๒.๗๗	๑.๓๙๐	๑.๔๓๐	๐.๒๕๔	๐.๕๔๘	๑.๑๘๖	๐.๘๘๓
๔๐	๓.๒๔	๑.๗๒๓	๑.๕๑๗	๐.๑๙๑	๐.๔๒๙	๑.๓๒๗	๑.๐๘๙
๕๐	๓.๑๙	๒.๐๕๓	๑.๑๓๗	๐.๑๓๔	๐.๓๐๒	๑.๐๐๓	๐.๘๓๕
๖๐	๒.๘๓	๒.๓๒๑	๐.๕๐๙	๐.๐๘๑	๐.๑๘๓	๐.๔๒๘	๐.๓๒๖
๗๐	๒.๒๔	๒.๕๑๘	-๐.๒๗๘	๐.๐๓๘	๐.๐๘๕	-๐.๓๑๖	-๐.๓๖๔
๘๐	๑.๔๘	๒.๖๓๙	-๑.๑๕๙	๐.๐๑๐	๐.๐๒๒	-๑.๑๖๙	-๑.๑๘๑
๙๐	๐.๖๘	๒.๖๘๐	-๒.๐๐๐	๐.๐๐๐	๐.๐๐๐	-๒.๐๐๐	-๒.๐๐๐

- การคำนวณ Heeling Arm ใช้สมการที่พัฒนาแล้ว คือ $H.A. = \dfrac{0.0035\ V^2 w\ Al \cos^2\phi}{2240 \times W}$
- รูปที่ ๕ แสดงเส้นโค้งการทรงตัวที่ระวางขับน้ำ ๑,๖๘๙.๖ tons และการปรับแก้ความสูงจุด G
- รูปที่ ๖ และ ๗ แสดงผลของโมเมนต์เอียงเรือจากการกระทำของลม ๖๐ Knots และ ๙๐ Knots
- ขนาดพื้นที่ A_1 และ A_2 ในรูปที่ ๘ และ ๙ คำนวณได้ด้วยวิธีการ Numerical Integration ใดๆ หรือวัดด้วยเครื่อง Planimeter ซึ่งจะขอไม่แสดงในที่นี้



รูปที่ ๕

๕. การพิจารณา (ดูรูปที่ ๖ ถึงรูปที่ ๙ ประกอบ)

๕.๑. เมื่อความเร็วลมเท่ากับ 60 knots

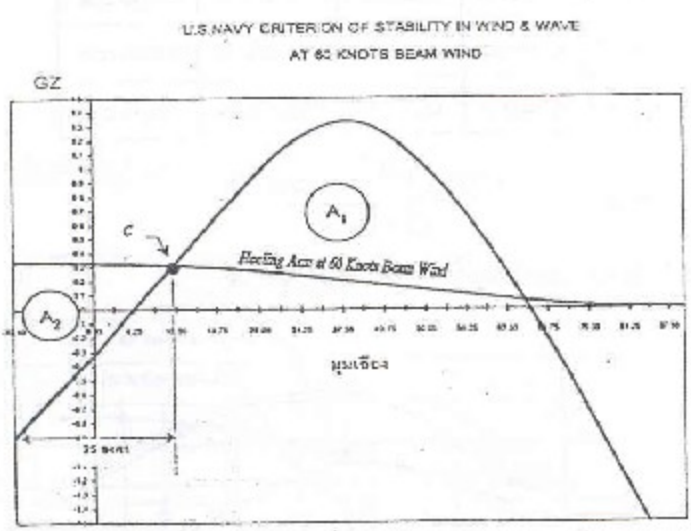
๕.๑.๑ แขนโมเมนต์เอียงเรือที่จุด C มีขนาด = 0.32 ft.
ในขณะที่แขนโมเมนต์สูงสุดมีขนาด = 1.34 ft.
แขนโมเมนต์เอียงเรือที่จุด C = 23.88 % ของแขนโมเมนต์สูงสุด
∴ แขนโมเมนต์เอียงเรือที่จุด C < 60% ของแขนโมเมนต์สูงสุด **(ผ่าน)**

๕.๑.๒ Dynamic Stability ที่เหลือ (A_1) มีขนาด = 0.811 ft-radian
พื้นที่จากจุด C ไปตามทิศทางการเอียงอีก 25 องศา (A_2) มีขนาด = 0.281 ft-radian
$A_1 = 2.88\ A_2$ ∴ $A_1 > 1.4\ A_2$ **(ผ่าน)**

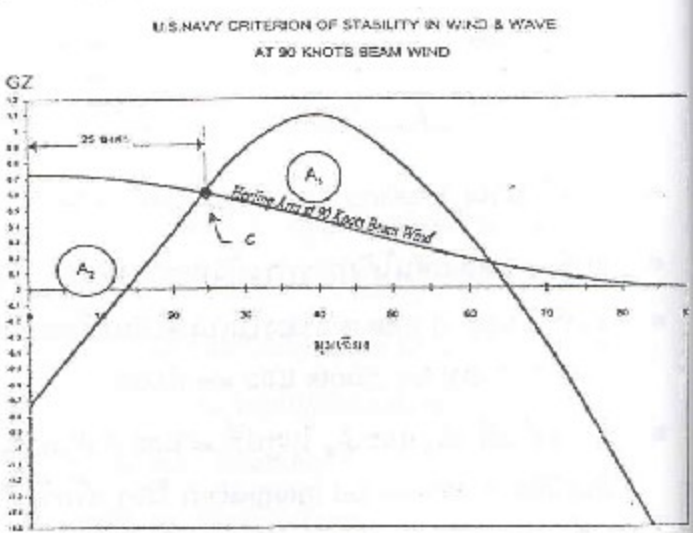
๕.๒. เมื่อความเร็วลมเท่ากับ 90 knots

๕.๒.๑ แขนโมเมนต์เอียงเรือที่จุด C = 0.58 ft.
ในขณะที่แขนโมเมนต์สูงสุดมีขนาด = 1.09 ft.
แขนโมเมนต์เอียงเรือที่จุด C = 53.21 % ของแขนโมเมนต์สูงสุด
∴ แขนโมเมนต์เอียงเรือที่จุด C < 60% ของแขนโมเมนต์สูงสุด **(ผ่าน)**

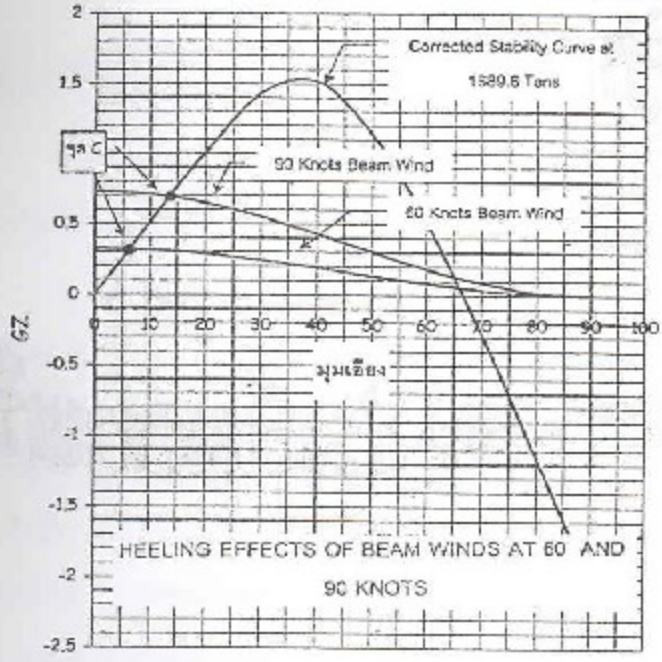
๕.๒.๒ Dynamic Stability ที่เหลือ (A_1) มีขนาด = 0.566 ft-radian
พื้นที่จากจุด C ไปตามทิศทางการเอียงอีก 25 องศา (A_2) มีขนาด = 0.319 ft-radian
$A_1 = 1.76\ A_2$ ∴ $A_1 > 1.4\ A_2$ **(ผ่าน)**



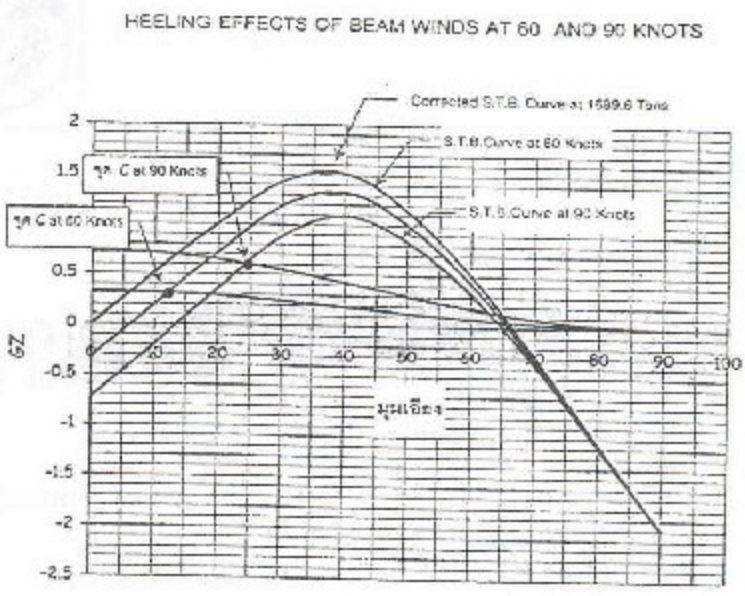
รูปที่ ๖



รูปที่ ๗



รูปที่ ๘



รูปที่ ๙

๖. สรุป

เรือทุกลำต้องผ่านเกณฑ์ความสามารถในการทรงตัว มิฉะนั้นจะถือว่าไม่ปลอดภัยและไม่สามารถออกทะเลได้ ผู้เขียนตั้งใจที่จะอธิบายภาพกว้างๆของการพิจารณาการทรงตัวเรือเพื่อเป็นแนวทางช่วยให้นักเรียนนายเรือและผู้สนใจสามารถศึกษาเพิ่มเติมต่อไปได้ง่าย เกณฑ์พิจารณาการทรงตัวที่นำมาเสนอในบทความนี้นับว่าครอบคลุมเรือแทบทุกชนิดที่มีใช้อยู่ ส่วนเกณฑ์อื่นๆล้วนมีแนวทางลักษณะคล้ายๆกันนี้ทั้งสิ้น ผู้เขียนหวังว่าสักวันเราคงมีเกณฑ์เฉพาะที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับสิ่งลอยน้ำและเรือแต่ละชนิดที่มีใช้กันอยู่ในประเทศไทย เพราะความปลอดภัยของเรือเกี่ยวข้องกับชีวิตและทรัพย์สินส่วนรวมโดยตรง นอกจากนั้นสิ่งนี้ยังเป็นปัจจัยสำคัญประการหนึ่งของการก้าวไปสู่การมีศักยภาพทางทะเลอย่างสมบูรณ์

..... Navy is not just a Job,It's an Advanture .....

เอกสารอ้างอิง

International Maritime Organization, ***Code on Intact Stability***, Resolution A. 749 (18), I.M.O., London

Lewis, E.V. (Ed.) (1988), ***Principle of Naval Architecture***, Volume 1, SNAME, New York.

NAVSEA (1977), ***Naval Ships Technical Manual***, NAVSEA 0904 – LP – 079 – 0010, Chapt. 079, Vol. 1

เอกสารประกอบการสอน ***วิชาการคำนวณการทรงตัวเรือ*** โดย น.อ.ผศ.สมศักดิ์ แจ่มแจ้ง, กองวิชาวิศวกรรมเครื่องกลเรือ, โรงเรียนนายเรือ