Intact Stability

น.อ.ผศ.สมศักดิ์ แจ่มแจ้ง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ฝ่ายศึกษา

ก่อนอื่นใคร่ขอเกริ่นนำก่อนว่า ความตั้งใจในเบื้องต้นของผู้เขียนนั้นอยากจะนำเสนอเรื่องราวเกี่ยวกับเกณฑ์ในการพิจารณาการทรงตัวเรือ แต่เกรงว่านักเรียนนายเรือและผู้อ่านที่สนใจหลายท่านอาจไม่ค่อยคุ้นเคยกับเรื่องของการทรงตัวเรือดี ดังนั้นจึงขอใช้โอกาสนี้เสนอเรื่องต่าง ๆ ที่ควรทราบเกี่ยวกับการทรงตัวของเรือ อันจะนำไปสู่ความเข้าใจเกี่ยวกับเกณฑ์พิจารณาการทรงตัวที่ผู้เขียนจะนำมาเสนอในโอกาสต่อไป

ที่ผ่านมาผู้เกี่ยวข้องกับการใช้งานเรือมักพูดเสมอว่า เรือควรจะมีการทรงตัวที่ดีหรือผู้ที่รู้ลึกสักหน่อยอาจอธิบายเพิ่มเติมว่า เรือต้องมีระยะ GM เป็นบวก หรือกล่าวกันว่า จุด M ต้องอยู่สูงกว่าจุด G สิ่งนี้เกี่ยวข้องกับคำว่า การทรงตัวของเรืออย่างไร จะใช้อะไรเป็นตัววัด คำถามเหล่านี้เป็นประเด็นที่น่าสนใจเป็นอย่างยิ่ง

Intact Stability คือ สถานะการทรงตัวสถิตย์ของเรือในน้ำนิ่ง (Static Condition in Clam Water) ที่ถือว่าเรือลอยทรงตัวได้อย่างปลอดภัยสมบูรณ์ดี ที่กล่าวเช่นนี้เพราะต่อไปหากเรือทะลุมีน้ำเข้ามาในเรือบางส่วนหรืออาจสูญเสียแรงลอยตัวไปจากการเกยตื้นหรือขณะกำลังถูกนำเข้าอู่แห้งหรือด้วยสาเหตุใดก็ตามที่ทำให้แรงลอยตัวของเรือโดยรวมลดลง จะถือว่าเรือเริ่มทรงตัวไม่ปลอดภัย โดยจะเรียกการทรงตัวภายใต้ สถานการณ์แรงลอยตัวที่ไม่สมบูรณ์ดังเดิมว่าเป็น “Damage Stability”

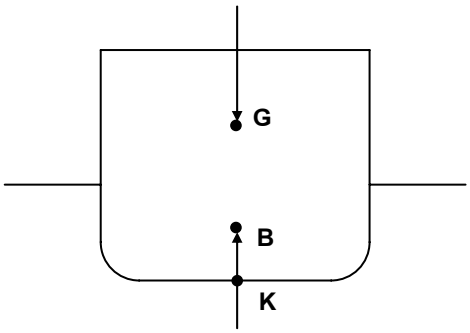
พิจารณาการทรงตัวเรือจากอะไร ?

สถานะการทรงตัวในแต่ละขณะของเรือพิจารณาได้จากชนิดและขนาดของโมเมนต์แรงคู่ควบที่เป็นแรงระหว่างแรงลอยตัว (ทิศทางขึ้นข้างบน) กับแรงเนื่องจากน้ำหนักเรือ (ทิศทางกระทำลงล่าง) หรือที่เรียกว่าเป็น “โมเมนต์ตั้งตรง” (Righting Moment) ระยะระหว่างแรงลอยตัวกับแรงเนื่องจากน้ำหนัก คือ แขนของโมเมนต์ตั้งตรง (Righting Arm) ขนาดของโมเมนต์ตั้งตรงและความยาวของแขนโมเมนต์จะถูกนำมาใช้เป็นข้อมูลในการแบ่งประเภทสถานะการการทรงตัวของเรือต่อไป ดังนั้นตำแหน่งการกระทำของแรงลอยตัวและแรงเนื่องจากน้ำหนักเรือจึงมีผลต่อความสามารถในการทรงตัวของเรือในแต่ละขณะ

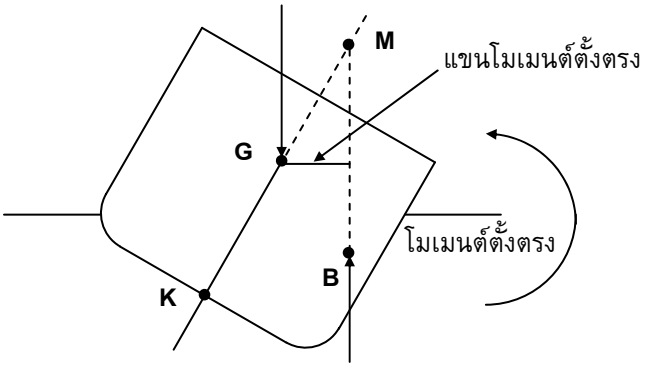
๑. นิยามที่เกี่ยวข้องกับการพิจารณาการทรงตัว

๑.๑ **โมเมนต์ตั้งตรง** (Righting Moment ; R.M.) ในขณะที่เรือลอยตั้งตรงแรงลัพธ์ของ

แรงลอยตัวที่พยุงเรือจะกระทำในทิศพุ่งขึ้นผ่านจุดศูนย์กลางการลอย (Center of Buoyancy จุด B) และอยู่ในแนวดิ่งเดียวกับแรงเนื่องจากน้ำหนักของเรือซึ่งกระทำผ่านจุดศูนย์ถ่วงเรือ G (จุด B และ G อยู่ในแนวเดียวกัน) (ดูรูปที่ ๑ ประกอบ)



รูปที่ ๑



รูปที่ ๒

เมื่อเรือเอียง (สมมุติว่าไม่มีน้ำหนักใดถูกเคลื่อนย้าย) แรงเนื่องจากน้ำหนักเรือจะยังคงกระทำที่จุด G เช่นเดิม ในขณะที่รูปร่างปริมาตรระวางขับน้ำของเรือย่อมเปลี่ยนไปตามการเอียง ทำให้จุดศูนย์กลางการลอย (B) เคลื่อนที่ไปยังด้านที่เรือเอียง เมื่อเป็นเช่นนี้จุด B และ G จึงไม่อยู่ในแนวเดียวกันอีกต่อไป เกิดโมเมนต์แรงคู่ควบระหว่างแรงลอยตัวและแรงเนื่องจากน้ำหนักดังกล่าวกระทำกับเรือ (ดูรูปที่ ๒) เห็นได้ว่าโมเมนต์ที่เกิดขึ้นนี้จะมีทิศทางต้านการเอียงของเรือหรือกล่าวได้ว่าเป็นโมเมนต์ที่พยายามทำให้เรือกลับไปลอยตั้งตรงดังเดิม ธรรมชาติการลอยเช่นนี้เกิดขึ้นกับเรือหรือวัตถุลอยน้ำใด ๆ เสมอ คือเมื่อเอียงไปย่อมเกิดโมเมนต์ต้านการเอียงขึ้นทันที กล่าวในทางกลับกันคือย่อมเกิดโมเมนต์ที่พยายามดึงเรือหรือวัตถุนั้นให้กลับไปลอยตั้งตรงดังเดิมอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นขนาดของโมเมนต์ตั้งตรงจึงเป็นตัวแปรที่สามารถอธิบายความสามารถของการทรงตัวในแต่ละขณะการเอียงของเรือได้เป็นอย่างดี

๑.๒ โมเมนต์คว่ำเรือ (Heeling Moment; H.M.) การลอยและการเอียงของวัตถุใด ๆ จะไม่เป็นดังที่อธิบายในหัวข้อที่ ๑.๑ เสมอ ตัวอย่างเช่น หากตำแหน่งของจุด G ในเรือลำเดียวกันกับในรูปที่ ๒ เลื่อนไปอยู่ทางขวามือของจุด B (ดูรูปที่ ๓) โมเมนต์ที่เกิดขึ้นจะมีทิศไปทางเดียวกับการเอียงของเรือทันที เท่ากับเป็นการเสริมการเอียงให้เรือเอียงต่อไปเรื่อย ๆ จนอาจพลิกคว่ำได้ในที่สุด โมเมนต์ที่ทำให้เรือเอียงต่อไปอีกนี้เรียกว่าเป็น "โมเมนต์คว่ำเรือ (Heeling Moment; H.M.)" สามารถพิจารณาได้จากความสัมพันธ์ของตำแหน่งจุด G และจุด B ในเบื้องต้นขอให้จุดสังเกตคร่าว ๆ โดยรวมว่า ขณะที่เรือเอียงหากจุดศูนย์ถ่วงเรือ (G) สามารถเลื่อนไปทิศทางเดียวกับการเอียงของเรือได้โอกาสที่จะเกิดโมเมนต์คว่ำเรือย่อมมีสูง สาเหตุโดยตรงที่ทำให้จุด G เลื่อนไปก็คือมีน้ำหนักในเรือเคลื่อนย้ายไปมาได้ในขณะที่เรือเอียง ตำแหน่งจุดศูนย์ถ่วงโดยรวมของเรือจึงเลื่อนไป แต่ถึงแม้ไม่มีน้ำหนักในเรือเคลื่อนย้ายก็อาจเกิดโมเมนต์คว่ำเรือได้เช่นกันถ้าตำแหน่งจุด G ในขณะนั้นของเรืออยู่สูงมาก ๆ ทั้งนี้เนื่องจากโดยทั่วไปแล้วรูปร่างของปริมาตรส่วนใต้น้ำเรือจะเป็นตัวจำกัดให้จุด B เคลื่อนที่ไปได้ไม่มากนัก ดังนั้น

ถ้าจุด G อยู่สูงมากจะทำให้แนวของจุด G เมื่อเรือเอียงไปอยู่เลยแนวของจุด B ออกไป เกิดเป็นโมเมนต์คว่ำเรือในที่สุด นี่เป็นสาเหตุสำคัญที่อธิบายว่าทำไมถึงไม่ควรจัดวางน้ำหนักไว้บริเวณที่สูงบนเรือ อีกทั้งจะต้องผูกมัดสิ่งของอย่าให้เคลื่อนที่ไปมาได้ เพราะอาจทำให้จุดศูนย์ถ่วงรวมของเรืออยู่สูงมากหรือเคลื่อนที่ไปตามการเอียงของเรือเกิดโมเมนต์คว่ำเรือได้ง่ายนั่นเอง

ประสบการณ์สำคัญของชาวเรือที่มีหลักฐานสมบูรณ์ และบทเรียนแก่นาวาสถาปนิก คือ การพลิกคว่ำของเรือ VASA ในศตวรรษที่ ๑๗ เมื่อออกจากท่าได้ไม่นาน ทั้งนี้เนื่องจากจุด G ของเรืออยู่สูงมากทำให้ระยะ GM ของเรือเหลือน้อย ลักษณะนี้ถึงแม้เรือ VASA จะมีการทรงตัวแบบ Stable Equilibrium แต่ถ้าเอียงไปย่อมเกิดโมเมนต์ตั้งตรงน้อยและยิ่งเป็นสถานการณ์ที่ไม่สามารถควบคุมน้ำหนักในเรือได้ด้วยแล้ว เรืออาจเปลี่ยนการทรงตัวไปเป็นแบบ Unstable Equilibrium ได้ เช่นเดียวกับเรือ VASA ของกองทัพเรือสวีเดน ที่เจตนาอยากให้มีอำนาจการยิงมาก จึงสร้างดาดฟ้าปืนขนาดใหญ่ถึง ๒ ชั้นไว้ในที่สูง เป็นเหตุให้จุด G ของเรืออยู่สูงมาก อีกทั้งในการออกจากท่าครั้งแรกและครั้งสุดท้ายนั้นมิได้ระวังปัญหาเรื่องน้ำที่อาจเข้ามาในเรือจึงเปิดช่องป้อมปืนไว้ ดังนั้น เมื่อเรือเอียงจนกราบเรือแตะน้ำทำให้น้ำเข้ามาในเรือได้ น้ำหนักของน้ำที่เข้ามา ส่วนหนึ่งดึงจุด G ของเรือให้สูงขึ้นเลยจุด M ขึ้นไป และอีกส่วนหนึ่งทำให้เรือหนักขึ้น เรือ VASA จึงเปลี่ยนการทรงตัวไปเป็นแบบ Unstable Equilibrium และคว่ำลงทันที ปัจจุบันซากเรือ VASA พร้อมประวัติถูกจัดเป็นนิทรรศการไว้ที่พิพิธภัณฑ์แห่งชาติสวีเดน เพื่อเป็นความรู้และอุทาหรณ์แก่ชาวเรือรุ่นหลัง ผู้สนใจสามารถดูได้ที่ www.vasamuseet.se/skeppet/darfor/why.html ซึ่งให้รายละเอียดการสอบสวนความเสียหายที่เกิดขึ้นไว้ด้วย

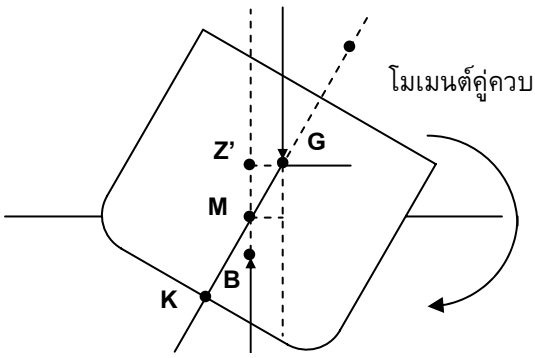
๑.๓ **แขนโมเมนต์ตั้งตรง** (Righting Arm; R.A.) แขนของโมเมนต์แรงคู่ควบในรูปที่ ๒ เรียกว่าเป็น “แขนโมเมนต์ตั้งตรง” นิยมกำหนดให้เป็นระยะ GZ ดังนั้นขนาดของโมเมนต์ตั้งตรงในแต่ละขณะการเอียงคำนวณได้โดยการนำขนาดแขนโมเมนต์คูณเข้ากับน้ำหนักเรือหรือแรงลอยตัวขณะนั้น ดังนี้

โมเมนต์ตั้งตรง = แขนโมเมนต์ตั้งตรง x น้ำหนักเรือ (๑)

R.M. = (R.A. x Δ)

โมเมนต์ตั้งตรงเป็นตัวแปรที่สามารถอธิบายความสามารถในการทรงตัวของเรือในแต่ละขณะได้เป็นอย่างดี ถ้าขณะนั้นเรือเกิดโมเมนต์ตั้งตรงมากก็ย่อมสามารถกลับมาตั้งตรงได้ง่าย โมเมนต์ตั้งตรงจึงถูกนำไปพล็อตกับค่ามุมเอียงเป็นเส้นโค้งแสดงสมรรถนะของเรือที่เรียกว่า “เส้นโค้งการทรงตัวเรือ (Stability Curve)” ถ้าน้ำหนักเรือไม่เปลี่ยนแปลงอาจใช้ขนาดแขนโมเมนต์ตั้งตรงเป็นตัวอธิบายความสามารถในการทรงตัวในแต่ละมุมเอียงของเรือที่ระวางขับน้ำขณะนั้นได้ ลักษณะเช่นนี้ทำให้สามารถพล็อตเส้นโค้งการทรงตัวที่แสดงความสามารถในการทรงตัวของเรือที่หลายขนาดระวางขับน้ำได้ในเวลาเดียวกัน เส้นโค้งดังกล่าวเรียกว่าเป็น “เส้นโค้งรวมการทรงตัว (Cross Curve of Stability)” ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อเกี่ยวกับคุณสมบัติการทรงตัวของเรือต่อไป

๑.๔ **จุดเปลี่ยนศูนย์เสถียร** (Metacenter) คือ จุด M ในรูปที่ ๒ เป็นจุดตัดของเส้นต่อแนวแรง

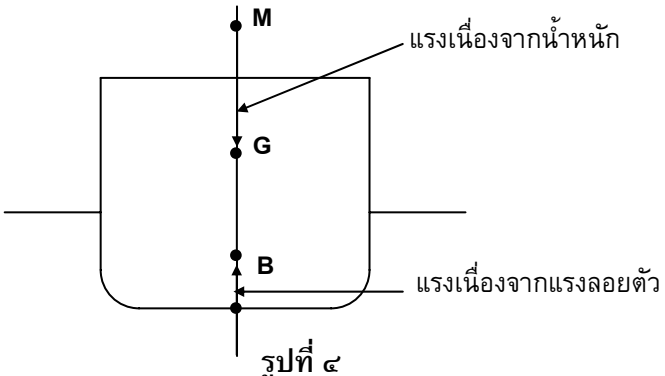


รูปที่ ๓

กำลังลอยกับแนวเส้นกึ่งกลางทางขวาง (Center Line) ของเรือ ที่เรียกว่าเป็นจุดเปลี่ยนศูนย์เสถียร เพราะว่า ถ้าจุดนี้อยู่ต่ำกว่าจุด G โมเมนต์จะเปลี่ยนเป็นโมเมนต์คว่ำเรือ (Heeling Moment) ทันที ดังนั้นตำแหน่งของจุด M (เทียบกับจุด G) จะเป็นตัวกำหนดชนิดของโมเมนต์แรงคู่ควบที่เกิดขึ้นเมื่อเรือเอียงไป (ดูรูปที่ ๓)

๑.๕ **ความสูงจุดเปลี่ยนศูนย์เสถียร** (Metacentric Height;GM) คือระยะวัดตามแนวเส้นกึ่งกลางทางขวางจากจุด G ถึงจุด M (ระยะ GM ในรูปที่ ๒) ถ้าจุด M อยู่สูงกว่าจุด G **จะถือว่าระยะ GM เป็นบวก** ก่อให้เกิดโมเมนต์ตั้งตรง (Righting Moment) หรือเป็น **โมเมนต์บวก** (Positive Moment) ในทางกลับกันถ้าจุด M อยู่ต่ำกว่าจุด G **จะถือว่าระยะ GM เป็นลบ** และก่อให้เกิดโมเมนต์คว่ำเรือ (Heeling Moment) หรือเป็น **โมเมนต์ลบ** (Negative Moment) ระยะ GM จึงใช้อธิบายความสามารถในการทรงตัวของเรือแทนโมเมนต์ตั้งตรงและแขนโมเมนต์ตั้งตรงได้อีกทางหนึ่ง

๑.๖ **รัศมีเปลี่ยนศูนย์เสถียรทางขวาง** (Metacentric Radius;BM) คือระยะวัดตามแนวเส้นกึ่งกลางเรือตามขวางจากจุด B ถึงจุด M (ดูรูปที่ ๔) ที่เรียกว่าเป็นรัศมีเปลี่ยนศูนย์เสถียรก็เพราะว่า ถ้าเรือเอียงไม่มาก (ประมาณไม่เกิน ๑๐ องศา) ระยะจากจุด B ไปถึงจุด M จะมีค่าเกือบคงที่จนสมมติได้ว่าจุด M อยู่คงที่ไม่เลื่อนไปไหน ระยะ BM ที่วัดตามแนวเส้นกึ่งกลางลำเรือจึงมีค่าประมาณเท่ากับระยะจากจุด B ปัจจุบันไปยังจุด M ทำให้ในการออกแบบเรือเบื้องต้นนักออกแบบสามารถ หาตำแหน่งของจุด M ได้โดยง่ายเพียงแต่ทราบความสูงของจุด B และคำนวณระยะ BM ดังในสมการที่ (๔) ก็จะทราบความสูงของ จุด M ได้ ถ้าให้ K เป็นจุดอ้างอิงตรงแนวกระดูกงู



รูปที่ ๔

ดังนั้นระยะ BM = KM – KB (๒)

= KB + BG (๓)

หรือคำนวณได้จากความสัมพันธ์ $BM = \frac{I_T}{\nabla}$ (๔)

โดย I_T = โมเมนต์อินเนอเชียทางขวาง (Transverse Moment of Inertia) ของพื้นที่แนวน้ำ (Waterplane Area) ขณะนั้นของเรือ

∇ = ปริมาตรระวางขับน้ำ (Volume of Displacement) ขณะนั้น

ตัวอย่างที่ ๑ เรือลำหนึ่งมีขนาดโมเมนต์อินเนอเชียทางขวางของพื้นที่แนวน้ำขณะนั้นเท่ากับ 1.5978 x 10^6 m^4 ในขณะที่มีปริมาตรระวางขับน้ำเท่ากับ 7.2535 x 10^5 m^3 และมีระยะ KM เท่ากับ 3.2 m. จะคำนวณความสูงของจุดศูนย์กลางการลอย (KB) ได้ดังนี้

$$BM = \frac{1.5978 \times 10^6}{7.253 \times 10^5} = 2.203 \quad m$$

เพราะฉะนั้นจุดศูนย์กลางการลอยอยู่สูงจากกระดูกงูเท่ากับ KB = KM – RM = 3.2-2.203 =0.907 m.

ตัวอย่างที่ ๒ เรือลำหนึ่งมีความยาวที่แนวน้ำขณะนั้นเท่ากับ 48 m. มีขนาดครึ่งความกว้างแนวน้ำขณะนั้นดังในตารางที่ ๑ เมื่ออ่านจากเส้นโค้ง Hydrostatic ของเรือพบว่าที่ระดับกินน้ำลึกปัจจุบันนี้เรือมีระวางขับน้ำเท่ากับ 2,000 tonnes ในน้ำทะเล (ρg =1.025 tonne/m^3) และมีระยะ KB สูง 1.65 m. จะคำนวณหาความสูงของจุดศูนย์เสถียร (Metacenter) ของเรือได้ดังนี้

ST	0	1	2	3	4	5	6	7	8
½ Ordi	0	2.1	3.8	5.2	5.1	4.7	3.5	1.9	0

ตารางที่ ๑

วิธีทำ สร้างตารางคำนวณที่สอดคล้องกับการอินทิเกรตด้วยวิธีการเชิงเลขของ Simpson ได้ดังนี้

ST.	1/2 Ordi.	S.M.	(1/2 Ordi.) ^{3}	f(I_T)
0	0	0.00	1	0.00
1	2.1	9.26	4	37.04
2	3.8	54.87	2	109.74
3	5.2	140.61	4	562.43
4	5.1	132.65	2	265.30
5	4.7	103.82	4	415.29
6	3.5	42.88	2	85.75
7	1.9	6.86	4	27.44
8	0	0.00	1	0.00
			$\sum f(I_T)$	1503.00

คำนวณหา Transverse Moment of Inertia ของพื้นที่แนวน้ำนี้ได้ จากสมการดังนี้

$$I_T = 2 \times \frac{1}{3} \cdot \int \left(\frac{1}{2} Ordi \right)^3 dx$$

ดังนั้นด้วยการอินทิเกรต ด้วยวิธิการเชิงตัวเลขของ Simpson จึงคำนวณได้ดังนี้ (H = 48/6 m)

$$I_T = \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{3} \times h \times \sum f(I_T) \times 2$$

เพราะฉะนั้น $BM_T = \frac{I_T}{\nabla} = \frac{I_T}{\Delta / \rho g} = \frac{2004}{2000} \times 1.025$ = 1.027 m.

เพราะฉะนั้นจุด Metacenter อยู่สูงจากกระดูกงูเท่ากับ

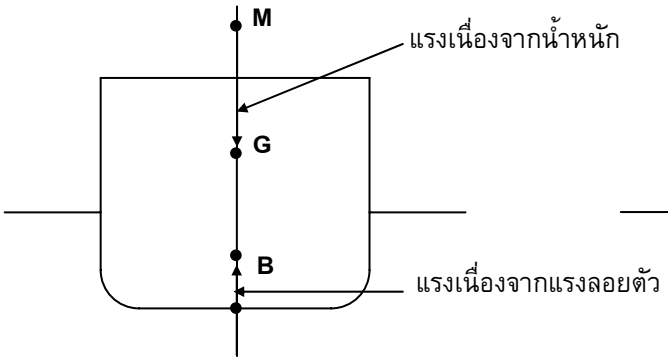
$$KM_T = KB + BM_T = 1.027 + 1.65 = 2.677\ m.$$

ดังนั้น จุดศูนย์ถ่วงของเรือ (G) จะอยู่สูงกว่า 2.677 m. ไม่ได้ เหตุผลนี้ขอให้ดูในหัวข้อที่จะอธิบายต่อไป

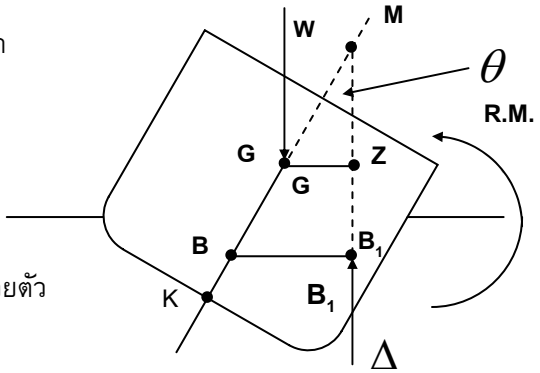
๒. คุณลักษณะการทรงตัวเรือ

๒.๑ สถานะการทรงตัวแบบต่าง ๆ

๒.๑.๑ Equilibrium คือ การลอยแบบสมดุลในลักษณะที่แรงลอยตัวมีขนาดเท่ากับแรงเนื่องจากน้ำหนักพอดีและกระทำสวนทางกันในแนวเส้นศูนย์กลางเรือทางขวาง (ดูรูปที่ ๕)



รูปที่ ๕



รูปที่ ๖

เรือที่ทรงตัวในลักษณะนี้มักจะไม่เอียงเพราะความสมมาตรกันของเรือ ดังนั้นถ้าเพิ่มน้ำหนักหรือเอาน้ำหนักออกจากเรือในแนวกึ่งกลางลำเรือแล้ว เรือจะจมลงหรือลอยขึ้นในลักษณะขนานกับเส้นแนวน้ำเดิม (Parallel Sinkage)

๒.๑.๒ Stable Equilibrium คือ การทรงตัวในช่วงที่เมื่อเรือเอียงไปแล้วจะสามารถกลับมาตั้งตรงในสถานะแบบ Equilibrium ได้เหมือนเดิม การเอียงในช่วงสถานะเช่นนี้ถือว่าเรือมีการทรงตัว เป็นบวก (Positive Stability) เพราะโมเมนต์แรงคู่ควบระหว่างแรงลอยตัวและแรงเนื่องจากน้ำหนักเป็นโมเมนต์ชนิดตั้งตรงเรือ (Righting Moment) และมักกำหนดให้ **มีค่าเป็นบวก** (ดูรูปที่ ๖)

การทรงตัวในสถานะนี้เกิดขึ้นเนื่องจากเมื่อเรือเอียงจุดศูนย์กลางการลอย (B) จะเลื่อนไปตามการเคลื่อนที่ของจุดศูนย์ถ่วงของปริมาตรระวางขับน้ำ (ไปทางด้านปริมาตรส่วนใหญ่) ในรูปที่ ๖ คือจากจุด B ไปยังจุด B_1 ดังนั้น แรงลัพธ์ของแรงลอยตัวจะกระทำผ่านจุด B_1 ตัดกับแนวเส้นกึ่งกลางทางขวางตรงจุด M ถ้าน้ำหนักเรือยังคงที่และไม่มีส่วนใดในเรือเคลื่อนย้ายตามการเอียง แรงเนื่องจากน้ำหนัก (W) จะยังคงกระทำผ่านจุด G เช่นเดิม เมื่อพิจารณาขนาดของแรงนี้กับแรงลอยตัวพบว่าเป็นแรงคู่ควบที่มีแขนยาวเท่ากับ GZ และมีทิศทางต้านการเอียงของเรือ ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

โมเมนต์ตั้งตรง = ระวางขับน้ำ x แขนโมเมนต์ตั้งตรง

(Righting Moment ; R.M.) = (Δ x GZ) (๕)

โดย Δ = ระวางขับน้ำหรือน้ำหนักเรือ

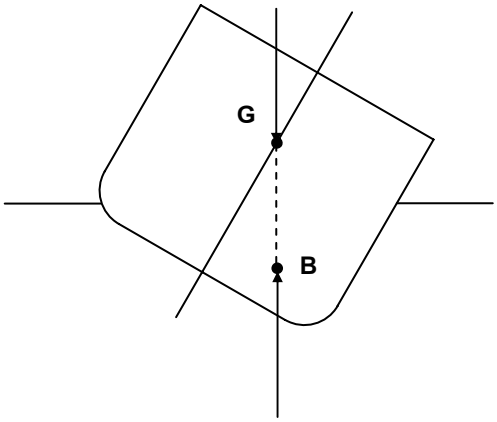
GZ = แขนโมเมนต์ตั้งตรง (Righting AR.M.)

= GM sin θ (GM = ความสูงจุดเปลี่ยนศูนย์เสถียร) (๖)

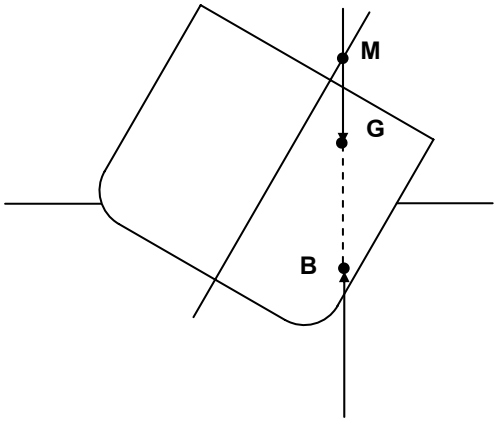
ดังนั้น R.M. = Δ x GZ = Δ x GM sin θ (๗)

สมการที่ (๖) ใช้พิจารณาเมื่อเรือเอียงไม่มาก ในกรณีที่มุมเอียงมากขึ้นจะใช้สูตรที่เรียกว่า Wall – Sided Formular พิจารณา

๒.๑.๓ Neutral Equilibrium คือ การทรงตัวที่เมื่อเรือเอียงไปแล้วจะไม่กลับมาตั้งตรงได้เองแต่จะเอียงอยู่ถาวรในลักษณะสมดุล คล้ายกับการทรงตัวแบบ Equilibrium



รูปที่ ๗ ก



รูปที่ ๗ ข

Neutral Equilibrium เป็นสมดุลแบบเรือเอียง สังเกตได้จากรูปที่ ๗ ก เมื่อเรือเอียงไปหากจุด G ยังคงอยู่ในแนวเส้นศูนย์กลางทางขวางและจุด B เลื่อนมาอยู่ตรงแนวเดียวกับจุด G จะทำให้จุด M ทับกับจุด G พอดี และเรือก็ยังคงลอยสมดุลอยู่ได้แต่ไม่มีโมเมนต์ตั้งตรงเกิดขึ้นเพราะแขนโมเมนต์มีค่าเป็นศูนย์ (GZ = 0) หรือในรูปที่ ๗ ข ถ้าจุด G เลื่อนตามการเอียงของเรือมาอยู่ตรงแนวเดียวกับจุด B ลักษณะเช่นนี้แนวแรงลอยตัวย่อมตัดกับเส้นแนวกึ่งกลางเกิดเป็นจุด M ถึงแม้จุด M จะอยู่สูงกว่าจุด G ก็ตาม (ระยะ GM เป็นบวก) แต่ก็ไม่มีโมเมนต์มาช่วยตั้งเรือเพราะแขนโมเมนต์มีค่าเป็นศูนย์เช่นกัน

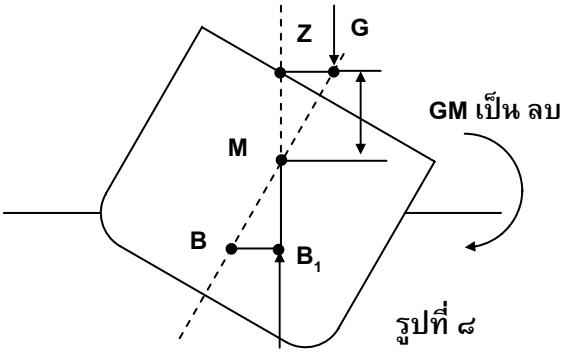
สถานะการทรงตัวของเรือแบบ Neutral Equilibrium จัดว่าไม่ค่อยปลอดภัยนัก เพราะต่อไปถ้ามีแรงจากภายนอกมากระทำในทิศเดียวกับการเอียงของเรือ หรือแม้กระทั่งสวนทางการเอียงเรือในรูปที่ ๗ ข ก็ตามที เรืออาจเอียงต่อไปจนล่มได้ หรืออาจกลับไปมีสถานการทรงตัวแบบ Stable Equilibrium (กรณีที่จุด G เลื่อนกลับไป) หรือกลับมาลอยแบบ Neutral Equilibrium ดังเดิมก็เป็นได้

๒.๑.๔ Unstable Equilibrium เป็นการทรงตัวในลักษณะกลับกับสถานะ Stable Equilibrium คือ เมื่อเรือเอียงไปแล้วจะไม่กลับไปตั้งตรงได้อีก แต่จะเอียงต่อไปเรื่อย ๆ ด้วยโมเมนต์คว่ำเรือ (Heeling Moment) ซึ่งมีทิศทางเสริมการเอียงของเรือ ดังนั้น เมื่อเทียบกับโมเมนต์ตั้งตรงแล้ว

โมเมนต์คว่ำเรือจึงเป็น **โมเมนต์ลบ** (Negative Moment) จากรูปที่ ๘ พบว่าจุด M อยู่ต่ำกว่าจุด G ความสูงจุดเปลี่ยน ศูนย์เสถียร (GM) ในลักษณะนี้จึง **มีค่าเป็นลบ** (Negative GM) นอกจากนั้นยังจะถือว่า **แขนโมเมนต์มีค่าเป็นลบ** (Negative Righting Arm) ด้วย ส่วนสาเหตุนั้นอาจเกิดจากเหตุผล 2 ประการนี้คือ

จุด G อยู่สูงเกินไปทำให้เมื่อเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของจุด B กับจุด G ในขณะเรือเอียงแล้วปรากฏว่าจุด B เคลื่อนที่ทางขวางได้น้อยกว่าจุด G ทำให้จุด G ในรูปที่ ๗ ก แซงไปอยู่ทางขวาของจุด B โมเมนต์แรงคู่ควบที่เกิดขึ้นจึงมีทิศทางเดียวกับการเอียงของเรือเท่ากับเสริมให้เรือเอียงต่อไปอีกเรื่อย ๆ

จุด G เคลื่อนที่ไปตามการเอียงของเรือจนแซงไปอยู่ทางขวาของจุด B (ดูรูปที่ ๗ ข) ทั้งนี้เนื่องจากมีน้ำหนักในเรือเคลื่อนที่ไปตามการเอียงทำให้จุดศูนย์ถ่วงรวมของเรือเลื่อนไป

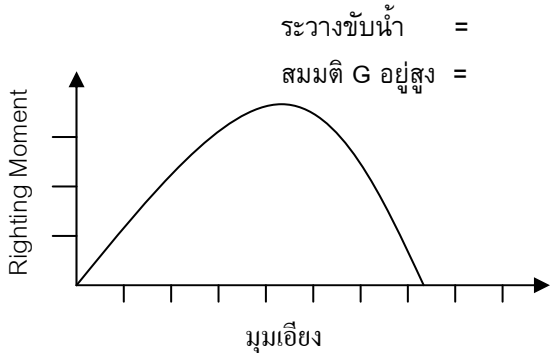


รูปที่ ๘

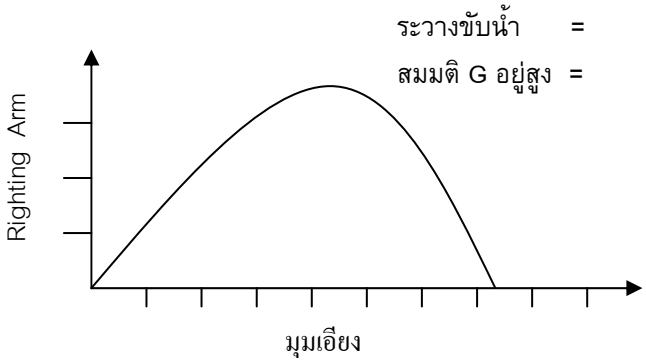
ถึงจุดนี้ผู้อ่านหลายท่านคงพอเข้าใจแล้วว่าทำไมข้อกำหนดเกี่ยวกับการปฏิบัติงานในเรือทั่วไปจึงแนะนำว่าควรวางสิ่งของต่าง ๆ ในที่ต่ำและผูกมัดจัดเก็บให้อยู่กับที่ โดยเฉพาะรายการที่มีน้ำหนักมาก ๆ เพราะอาจทำให้จุด G ของเรืออยู่สูงเกินไปหรืออาจเลื่อนไปตามการเอียงจนเกิดสถานะการทรงตัวแบบ Neutral Equilibrium หรือ Unstable Equilibrium ได้ และสิ่งนี้เป็นเหตุผลว่าทำไมเรือสินค้าจึงมีถังอับเฉาขนาดต่าง ๆ อยู่ตามที่ต่าง ๆ ต่ำบ้างสูงบ้างในเรือ หรือบางทีก็อยู่นอกแนวกึ่งกลางลำเรือออกไป ทั้งนี้เพื่อใช้ประโยชน์ในการถ่วงหรือปรับแต่งความสูงของจุด G ให้เหมาะสมนั่นเอง

จากสถานะการทรงตัวแบบต่าง ๆ ที่กล่าวมาข้างต้น ทำให้นาวาสถาปนิกจะต้องออกแบบให้เรือแต่ละลำให้มีการทรงตัวเป็นแบบ Stable Equilibrium ตลอดเวลา ซึ่งคุณสมบัติของการทรงตัวจะแตกต่างกันตามลักษณะของการบรรทุก โดยอธิบายในเทอมของขนาดแขนโมเมนต์ตั้งตรงหรือปริมาณโมเมนต์ตั้งตรงที่แต่ละมุมเอียงเรือ เมื่อพล๊อตความสัมพันธ์ดังกล่าวจะได้เส้นโค้งที่เรียกว่า “เส้นโค้งการทรงตัว (Stability Curve)” เส้นโค้งนี้จะเป็นตัวอธิบายสมรรถนะการทรงตัวของเรือที่ระวางขับน้ำนั้น ๆ แต่อย่างไรก็ตามการนำเสนอข้อมูลการทรงตัวอาจกระทำใน ๔ ลักษณะดังนี้

๒.๒ เส้นโค้งโมเมนต์ตั้งตรง – มุมเอียง คือ เส้นโค้งการทรงตัวที่อธิบายความสามารถในการทรงตัวของเรือที่แต่ละระวางขับน้ำในรูปความสัมพันธ์ระหว่างขนาดแขนโมเมนต์ตั้งตรง (ระยะ GZ ในรูปที่ ๖) กับค่ามุมเอียงต่าง ๆ (ดูรูปที่ ๙)



รูปที่ ๙



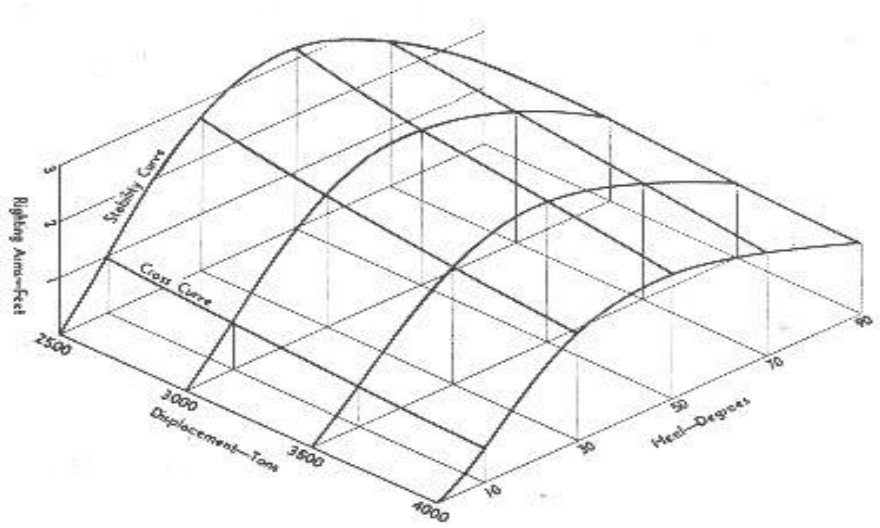
รูปที่ ๑๐

๒.๓ เส้นโค้งแขนโมเมนต์ตั้งตรง – มุมเอียง คือ เส้นโค้งการทรงตัวที่อธิบายความสามารถ ในการทรงตัวของเรือที่แต่ละระวางขับน้ำในรูปความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ตั้งตรง (โมเมนต์ R.M. ในรูปที่ ๒) กับค่ามุมเอียงต่าง ๆ (ดูรูปที่ ๑๐)

การนำเสนอเส้นโค้งการทรงตัว ดังในรูปที่ ๙ และ ๑๐ จะ*ต้องบอกค่าระวางขับน้ำของเรือและความสูงจุด G ที่ใช้เป็นจุดอ้างอิงในการคำนวณระยะ GZ กำกับไว้ด้วยเสมอ* เพราะถ้าระวางขับน้ำและตำแหน่งของจุด G เปลี่ยนตำแหน่งของจุด G และระยะ GZ ย่อมต้องเปลี่ยนไปตามลำดับ เป็นผลให้ขนาดโมเมนต์ตั้งตรงเปลี่ยนไป ถ้าสังเหตุสมการที่ (5) (R.M. = GZ x Δ) จะพบว่าเส้นโค้งการทรงตัวดังในรูปที่ ๙ และ ๑๐ ของเรือลำหนึ่ง ๆ ที่สถานเดียวกันย่อมมีรูปร่างเหมือนกัน จะต่างกันที่หน่วยและขนาดของตัวแปรที่ปรากฏบนแกน Ordinate (แกนตั้ง) เท่านั้น

๒.๔ เส้นโค้งรวมการทรงตัวแบบ “Cross Curve” หรือ Cross Curve of Stability คือ ข้อมูลการทรงตัวที่แสดงในรูปของเส้นโค้งการทรงตัวหลาย ๆ ขนาดระวางขับน้ำรวมกัน ดังนั้นจึงถูกเรียกว่าเป็น “Cross Curve of Stability” ซึ่งส่วนใหญ่นิยมพล๊อตเป็นแบบ ๒ มิติ ดังในรูปที่ ๑๑ เห็นได้ว่า Cross Curve of Stability แสดงความสัมพันธ์ของแขนโมเมนต์ตั้งตรง มุมเอียง และระวางขับน้ำไว้รวมกัน ทำให้สามารถนำไปใช้พิจารณาการทรงตัวที่สถานะการบรรทุกต่าง ๆ กันได้ ส่วนรูปที่ ๑๒ เป็นตัวอย่าง Cross Curve of Stability ที่พล๊อตเป็น ๓ มิติ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างโมเมนต์ตั้งตรง มุมเอียง และระวางขับน้ำต่าง ๆ เช่นกัน Cross Curve ในลักษณะหลังนี้จะอ่านค่าได้ค่อนข้างยาก แต่ช่วยให้เห็นขนาดและรูปร่างเส้นโค้งการทรงตัวที่แต่ละระวางขับน้ำได้เป็นอย่างดี

รูปที่ ๑๑



รูปที่ ๑๒

๒.๕ ตารางข้อมูลการทรงตัว คือ การนำเสนอข้อมูลการทรงตัวในรูปแบบตารางตัวเลข ซึ่งสามารถนำไปพล๊อตเป็นเส้นโค้งการทรงตัวดังในรูปที่ ๙ หรือรูปที่ ๑๐ ได้ในที่สุด วิธีการนี้ให้ความสะดวกเพราะเป็นการอ่านค่าโดยตรงจากตาราง แต่ข้อมูลที่นำเสนอในลักษณะนี้เป็นข้อมูลชนิดไม่ต่อเนื่อง ไม่เหมือนการนำเสนอข้อมูลการทรงตัวแบบกราฟที่ให้ข้อมูลการทรงตัวต่อเนื่องกัน ในการใช้งานข้อมูลการทรงตัวแบบตารางจึงมักต้องคำนวณหาค่าในระหว่าง (Interpolate) อยู่เสมอ ตัวอย่างเช่น แขนโมเมนต์ตั้งตรงของเรือในตารางที่ ๒ เมื่อมีระวางขับน้ำเท่ากับ 5,800 tonnes และเอียง ๑๕ องศา คือ ๒.๙๓ m.

ระวางขับน้ำ / มุมเอียง	GZ (m.)					
	5	10	15	20	25	30
5000	1.085	2.135	3.142	4.000	4.695	5.320
5500	1.025	2.030	3.005	3.870	4.580	5.230
6000	0.980	1.940	2.880	3.748	4.465	5.144
6500	0.940	1.868	2.770	3.640	4.375	5.068
7000	0.908	1.800	2.675	3.540	4.280	4.997
7500	0.883	1.750	2.597	3.452	4.210	4.932

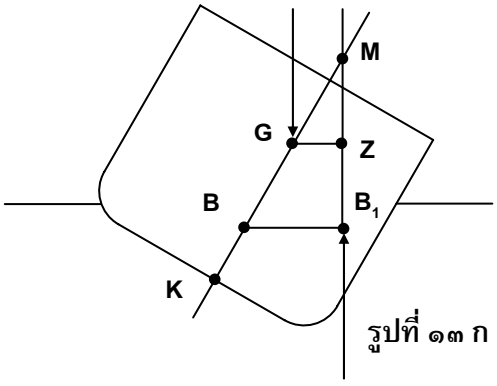
ตารางที่ ๒ Cross Curve of Stability แบบตารางตัวเลข

๓. คุณลักษณะและคุณสมบัติของเส้นโค้งการทรงตัว

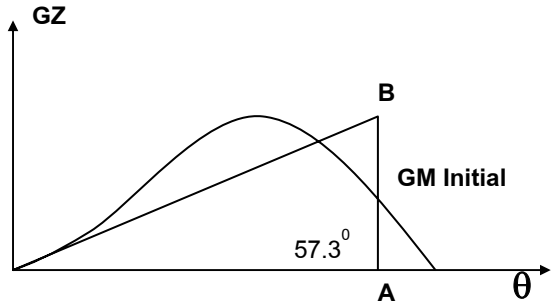
คุณสมบัติของการทรงตัวจะแตกต่างกันตามลักษณะของการบรรทุก โดยมักอธิบายในเทอมของขนาดแขนโมเมนต์ตั้งตรงหรือปริมาณโมเมนต์ตั้งตรงที่แต่ละมุมเอียงเรือเมื่อพล๊อตความสัมพันธ์ดังกล่าวที่ระวางขับน้ำหนึ่ง ๆ จะได้เส้นโค้งที่เรียกว่า “เส้นโค้งการทรงตัว” เส้นโค้งนี้จะถูกนำไปวิเคราะห์หาคุณภาพของการทรงตัวเรือในแต่ละขณะต่อไป

เส้นโค้งการทรงตัวมีคุณสมบัติที่สำคัญ ๕ ประการ ซึ่งอธิบายความสามารถในการทรงตัวโดยรวม (Overall Stability) ของเรือ ดังนี้

๓.๑ ให้ค่า Initial Stability



รูปที่ ๑๓ ก



รูปที่ ๑๓ ข

จากที่กล่าวแล้วว่าเมื่อเรือเอียงเล็กน้อย (ประมาณไม่เกิน 10^0) จะถือว่าตำแหน่งจุดเปลี่ยนศูนย์เสถียร (M) ยังคงไม่เปลี่ยนดังนั้นจึงใช้ความสูงจุดเปลี่ยนศูนย์เสถียร ($\overline{GM}$) ในช่วงนี้เป็นตัววัดความสามารถในการทรงตัวแรกเริ่มของเรือก่อนที่จะเอียงไป หรือเรียกว่าเป็น “Initial Stability” ของเรือที่สถานะบรรทุกขณะนั้น (ระยะ AB ในรูป ๑๓ ข) ดังนั้นเมื่อเรือเอียงไปอีกเล็กน้อย (มุมเล็ก ๆ) ความสัมพันธ์ระหว่างแขนโมเมนต์ตั้งตรง

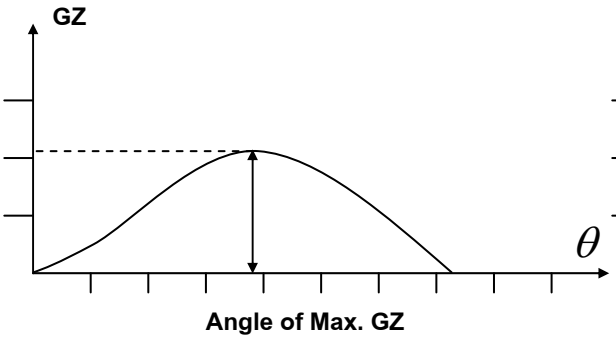
กับมุมเอียง คือ $$\overline{GZ} \approx \overline{GM}\,\theta \qquad (\text{มุม } \theta \text{ เล็ก}) \qquad (๘)$$

หรือ $\overline{GZ} = \overline{GM}\sin\theta$ (มุม θ มากกว่าประมาณ 10^0) (๙)

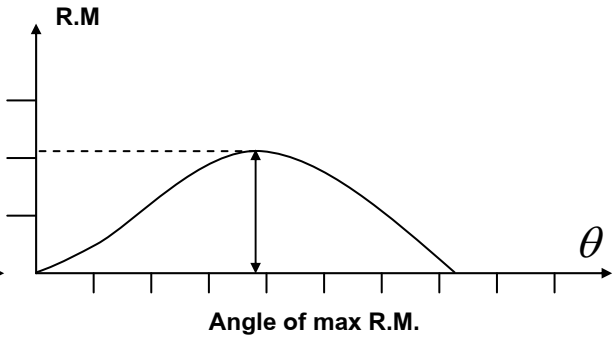
จากสมการที่ (๘) พบว่า $\overline{GM} = \frac{\overline{GZ}}{\theta}$ (๑๐)

หมายถึงเมื่อมุม θ เล็ก จะสามารถคำนวณหา GM ได้จากความชันของเส้นโค้งความสัมพันธ์ระหว่างแขนโมเมนต์ตั้งตรง (GZ) และมุมเอียง (θ) โดยตรง การหาค่า Initial Stability หรือ Initial $\overline{GM}$ ด้วยวิธีกราฟฟิกจะขยายความชันเส้นสัมผัสออกไปให้ตัดกับมุมเอียงที่มีค่าเท่ากับ 1 Radian (57.3^0) และค่า Initial GM โดยต่อเส้นสัมผัสกับเส้นโค้งการทรงตัวในช่วงมุมเอียงไม่เกินประมาณ 10^0 ออกไปตัดกับเส้นทางดิ่งตรงมุมเอียง 1 Radian (57.3^0) (จุด A ในรูปที่ ๑๓ ข) ซึ่งจะช่วยให้สามารถอ่านความยาวเส้น AB บนสเกล GZ ได้เป็นค่า Initial GM ของเรือที่สถานะการบรรทุกขณะนั้นพิสูจน์ได้ ดังนี้

๓.๒ **บอกขนาดสูงสุดของแขนโมเมนต์ตั้งตรง หรือโมเมนต์ตั้งตรง** (Maximum Righting Arm or Maximum Righting Moment)



รูปที่ ๑๔ ก

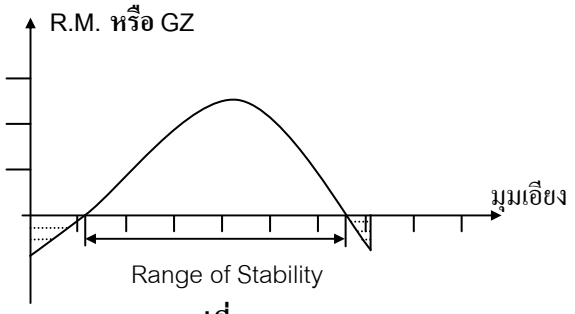


รูปที่ ๑๔ ข

ซึ่งก็คือจุดสูงสุดของเส้นโค้งการทรงตัวในรูปที่ ๑๔ ก และ ๑๔ ข ตามลำดับ

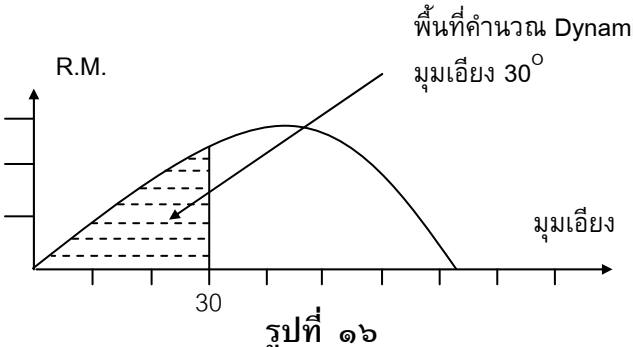
๓.๓ ให้ค่ามุมเอียงที่เกิดแขนโมเมนต์ตั้งตรงหรือมุมเอียงที่เกิดโมเมนต์ตั้งตรงสูงสุด (Angle of Maximum Righting Arm or Angle of Maximum Righting Moment) ซึ่งก็คือมุมตรงจุดสูงสุดของเส้นโค้งการทรงตัวดังในรูปที่ ๑๔ ก และ ๑๔ ข ตามลำดับ

๓.๔ บอกค่าช่วงการทรงตัว (Range of Stability) หมายถึง ช่วงมุมเอียงที่เรือมีสถานะการทรงตัวแบบ Stable Equilibrium (โมเมนต์ตั้งตรง และระยะ GM เป็นบวก) นอกเหนือช่วงมุมเอียงนี้เรือจะมีการทรงตัวไม่เสถียร (โมเมนต์เป็นชนิดคว่ำเรือและมีค่า GM เป็นลบ)



รูปที่ ๑๕

๓.๕ เป็นข้อมูลสำหรับคำนวณหา Dynamic Stability ถึงมุมเอียงที่กำหนด Dynamic Stability คือ งาน (work) ที่ต้องใช้เพื่อเอียงเรือไปถึงมุมที่กำหนด หรือในทางกลับกันคืองานที่ต้องการใช้ในการเอียงเรือจากมุมที่กำหนดให้กลับไปตั้งตรงดังเดิม



รูปที่ ๑๖

Dynamic Stability มีค่าเท่ากับขนาดพื้นที่ภายใต้เส้นโค้งการทรงตัวถึงมุมที่กำหนดคูณกับขนาดระวางขับน้ำขณะนั้น เพราะฉะนั้นคำนวณได้ดังนี้

$$\text{Dynamic Stability} = \Delta \cdot \int_{\theta}^{\theta+\Delta\theta} \overline{GZ} \cdot d\theta \qquad (๑๑)$$

$$= \Delta \cdot \int_{0}^{\theta} \overline{GZ} \cdot d\theta \qquad (๑๒)$$

เห็นได้ว่าหน่วยของ Dynamic Stability คือ โมเมนต์ – มุม (Radian) หรือ

หรือ $$Moment \times \frac{Degree \times \pi}{180} \qquad (๑๓)$$

ตัวอย่างที่ ๓ เรือขนาด 10,000 tonnes มีข้อมูลการทรงตัวตามมุมเอียงต่าง ๆ ดังในตารางที่ ๓ จะคำนวณหา Dynamic Stability ของเรือลำนี้ เมื่อเรือเอียงเป็นมุม 60^0 ได้ดังนี้

มุมเอียง	GZ	S.M.	f (M_{GZ})
0	0	1	0
15	0.275	4	1.10
30	0.515	2	1.03
45	0.495	4	1.98
60	0.33	1	0.33
75	0.12	-	-
90	-0.1	-	-
	$\sum f(M_{GZ})$		4.44

ตารางที่ ๓

วิธีทำ

ใช้ Simpson's 1st Rule คำนวณ Dynamic Stability ในช่วงมุมเอียง 0 ถึง 60^0 ได้ดังนี้

$$\text{Dynamic Stability} = \Delta \times \frac{h}{3} \times \sum f(M_{GZ})$$

$$= 10^4 \times \frac{15\pi}{3 \times 180} \times 4.44$$

$$= 3874.63 \text{ tonnes – m-Radian}$$

๓.๖ Dynamic Stability ทั้งหมด (Total Dynamic Stability

คือ งานทั้งหมดที่ใช้ในการเอียงหรือด้านการเอียงของเรือในช่วงการทรงตัวตามข้อ ๓.๔ หาได้โดยอินทิเกตพื้นที่ปิดภายใต้เส้นโค้งการทรงตัวในช่วงการทรงตัวที่เป็นบวกทั้งหมด

๔. ความทรงตัวโดยรวม (Overall Stability)

คือคุณสมบัติการทรงตัวของเรือทั้ง ๖ ประการ ตามข้อ ๓.๑ ถึง ๓.๖ ที่อธิบายความสามารถในการทรงตัวโดยรวมของเรือ อันประกอบด้วย

Initial Stability
ขนาดมากที่สุดของแขนโมเมนต์ตั้งตรง หรือ
โมเมนต์ตั้งตรงมากที่สุด
มุมเอียงที่เกิดแขนโมเมนต์ตั้งตรง หรือปริมาณ
โมเมนต์ตั้งตรงที่มากที่สุด
ช่วงการทรงตัวเป็นบวก
Dynamic Stability ถึงมุมเอียงที่กำหนด
Dynamic Stability ทั้งหมด

รูปที่ ๑๗

๕. สรุป

การทรงตัวเรือเป็นคุณสมบัติที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง ตำแหน่งของจุดเปลี่ยนศูนย์เสถียร (Metacenter) เป็นตัวกำหนดสถานะการทรงตัว ถ้าจุด M อยู่ต่ำกว่าจุด G เรือจะเสียความเสถียร ในสภาวะที่เรือลอยเสถียรหรือยังมีการทรงตัวที่ดีอยู่จะใช้ระยะแขนโมเมนต์ตั้งตรง (GZ) เป็นตัวบ่งคุณภาพในการทรงตัว เมื่อนำระยะดังกล่าวมาพล๊อตกับค่ามุมเอียงจะได้เส้นโค้งการทรงตัวของเรือที่สถานะบรรทุกนั้น ๆ ประโยชน์ของเส้นโค้งการทรงตัวคือแสดงคุณสมบัติการทรงตัวหลายประการพร้อมกันที่เรียกว่าเป็นความทรงตัวโดยรวม (Overall Stability) และเป็นข้อมูลสำหรับพิจารณาการทรงตัวของเรือ ผู้เขียนหวังว่าความเข้าใจเกี่ยวกับการทรงตัวเรือจะช่วยให้ผู้อ่านเข้าใจเรื่องเกณฑ์พิจารณาการทรงตัวของเรือได้ง่ายดายต่อไป

เอกสารอ้างอิง

K.J. Rawson and E.C. Tupper, *Basic Ship Theory*, Volume 1 (3 rd Ed.), Longman.

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

NAVSEA (1977), *Naval Ships Technical Manual,* NAVSEA 0904 – LP – 079 – 0010,

Chapt. 079, Vol. 1.

น.อ.กำจาย ปองเงิน, *ทฤษฎีการออกแบบเรือเบื้องต้น*, กองวิชาวิศวกรรมเครื่องกลเรือ, โรงเรียนนายเรือ

เอกสารประกอบการสอนวิชาการคำนวณการทรงตัวเรือ โดย น.อ.ผศ.สมศักดิ์ แจ่มแจ้ง, กองวิชาวิศวกรรมเครื่องกลเรือ, โรงเรียนนายเรือ.