ภาคผนวก ก

Internal wave

คลื่นใต้น้ำ (Internal Wave)

เป็นคลื่นที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงของโลก มีลักษณะของคลื่นที่มีความถี่ต่ำและความสูงของคลื่น มากกว่าคลื่นที่พบที่ผิวน้ำ เป็นคลื่นที่เกิดระหว่างชั้นน้ำทะเลที่ความหนาแน่นแตกต่างกัน เนื่องด้วยใน ทะเลที่ห่างจากชายฝั่งมีระดับน้ำที่ลึก จะพบว่าในแนวความลึกจากผิวน้ำลงไปยังพื้นท้องทะเลนั้น จะมี ลักษณะของน้ำถูกแบ่งเป็นชั้น โดยมวลน้ำที่พบที่ชั้นผิวน้ำ (20-150 เมตร โดยประมาณ) จะมีความเค็ม อยู่ในช่วงประมาณ 32-33 ส่วนในพันส่วน อุณหภูมิน้ำประมาณ 25-30 องศาเซลเซียส และมีปริมาณ ธาตุอาหารต่ำ ส่วนชั้นน้ำทะเลที่อยู่ลึกลงไปนั้นความเค็มของน้ำทะเลจะสูงกว่าที่ชั้นผิวน้ำ (33-35 ส่วน ในพันส่วน) อุณหภูมิน้ำต่ำกว่า 20-25 องศาเซลเซียส และมีปริมาณสารอาหารที่สูง

จากลักษณะที่น้ำทะเลมีการแบ่งเป็นชั้นน้ำนี่เองทำให้ที่บริเวณที่มีการแบ่งชั้นน้ำนี้มีการ เปลี่ยนแปลงของความเก็มต่อความลึกอย่างรวดเร็ว (เรียกชั้นน้ำนี้ว่า Pycnocline) การเกิดคลื่นใต้น้ำ (internal wave) จะเกิดขึ้นที่บริเวณชั้นน้ำนี้

สาเหตุและลักษณะการเกิดคลื่นใต้น้ำ

คลื่นใต้น้ำจะพบเกิดที่บริเวณรอยต่อของชั้นน้ำที่มีความแตกต่างของความหนาแน่นของน้ำชั้น บน (ความหนาแน่นต่ำ) และน้ำชั้นล่าง (ความหนาแน่นสูง) โดยพบว่ามีความเกี่ยวพันกับการไหลของ กระแสน้ำ ในหลายพื้นที่พบว่าได้รับอิทธิพลจากกระแสน้ำขึ้น-ลง (Tidal Currents) ที่ไหลผ่านพื้นท้อง น้ำที่มีความสลับซับซ้อน หรือแนวภูเขา-สันเขาใต้ทะเล นอกจากนี้อาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของแรง กดอากาศเหนือพื้นท้องทะเล เช่นการเกิดพายุ



คลื่นใต้น้ำมีพบที่ไหนได้บ้าง

มีรายงานการพบคลื่นใต้น้ำในทะเลหลายแห่งทั่วโลก เช่น บริเวณฟอริคาในมหาสมุทร แอตแลนติกฝั่งตะวันตก บริเวณทะเลจีนใต้ในมหาสมุทรแปซิฟิกฝั่งตะวันตก และทะเลอันคามัน เป็น ต้น



ภาพถ่ายคาวเทียบ ERS-2 (C-band, VV) SAR แสคงให้เห็นถึงชุดคลื่นใต้น้ำที่เกิดขึ้นในทะเลอันคามัน (แหล่งที่มา ของภาพจาก Global Ocean Associates, 2004)

คลื่นใต้น้ำส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศชายฝั่งอย่างไรบ้าง

คลื่นใต้น้ำเป็นคลื่นที่มีความขาวคลื่นมากและความสูงของคลื่นน้อย แต่เมื่อคลื่นมีการเคลื่อน ตัวใกล้แนวชายฝั่งน้ำที่ตื้น คลื่นก็จะเปลี่ยนเป็นมีลักษณะคลื่นที่มีความสูงเพิ่มมากขึ้นความขาวคลื่น น้อยลง โดยความสูงของคลื่นอาจเพิ่มขึ้นเป็นหลายสิบเมตรถึงร้อยเมตร และแตกตัวลงเมื่อถึงที่ชายฝั่งที่ มีระดับความลึกของน้ำระดับหนึ่ง หรือในกรณีที่นอกชายฝั่งมีแนวไหล่ทวีปที่ลาดชั้น เมื่อคลื่นใต้น้ำ เกลื่อนตัวมากระแทกกับแนวไหล่ทวีปก็จะทำให้เกิดการแตกตัว การแตกตัวของคลื่นใต้น้ำจะทำให้เกิด การฟุ้งกระจายมวลน้ำชั้นลึกขึ้นสู่ใกล้ผิวน้ำ หรือชายฝั่ง ปริมาณและการฟุ้งกระจายนี้จะมากน้อย เพียงใดขึ้นอยู่กับลักษณะของคลื่น (ความขาวและความสูงของคลื่น) และความลึกของชั้นน้ำ (pycnocline) ที่เกิดคลื่น หากชั้นน้ำที่เกิดคลื่นนี้อยู่ใกล้ผิวน้ำก็จะทำให้โอกาสที่มวลน้ำลึกไหลทะลัก เข้ามาในชายฝั่งได้มาก



ความลึกของชั้นน้ำ (pycnocline) ที่เกิดกลื่นใต้น้ำนั้นจะเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลหรือกระบวนการทางสมุทร ศาสตร์ที่เกิดขึ้นในทะเลนั้นๆ อิทธิพลของกลื่นใต้น้ำต่อการฟุ้งกระจายของมวลน้ำทะเลลึกต่อระบนิเวศ ชายฝั่งนั้นขึ้นอยู่กับความลึกของชั้นน้ำที่เกิดกลื่นและความลึกของทะเลด้วย

มวลน้ำลึกที่ฟุ้งกระจายหรือไหลทะลักเข้ามาในชายฝั่งมีลักษณะคุณสมบัติ คือ มีควาวมเก็มที่ สูง (>33-35 สว่นในพันส่วน) อุณหภูมิต่ำ (<20 ถึง 25 องศาเซลเซียส) ระดับอ๊อกซิเจนละลายน้ำต่ำ (<2 ถึง 4 มิลลิกรัมต่อลิตร) และมีปริมาณชาตุอาหารสูง โดยน้ำที่มาจากมวลน้ำที่ลึกมากก็จะมีความเก็มและ ปริมาณชาตุอาหารมากขึ้น และมีอุณหภูมิและระดับอ๊อกซิเจนละลายน้ำที่ต่ำลง ดังนั้นการที่มี สารอาหารฟุ้งกระจายขึ้นสู่ผิวน้ำและชายฝั่งมากขึ้นก็จะเพิ่มควาวมอุดมสมบูรณ์ของชายฝั่ง โดยเฉพาะ แพลงตอนพืช และสาหร่ายในทะเลบริเวณนั้นๆ แต่ในบางกรั้งการมีสารอาหารมากเกินไปก็อาจส่งผล กระทบต่อระบบนิเวศ เช่นทำให้เกิดการสะพรั่งของแพลงตอนพืชหรือสาหร่ายได้ โดยเฉพาะในบริเวณ แนวปะการัง หากมีการสะพรั่งของสาหร่ายขึ้นก็อาจนำไปสู่ความเสื่อมโทรมของแนวปะการังขึ้น และ โดยปกติระบบนิเวศแนวปะการังนั้นปริมาณสารอาหารจะมีไม่สูงมาก แต่ระบบนิเวศแนวปะการังมีการ "หล.เย็นของสารอาหารได้รวดเร็วจึงทำให้แนวปะการังมีความอุดมสมบูรณ์ได้ การที่มีสารอาหารเพิ่ม ขึ้นมามากในแนวปะการังจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโกรงสร้างสิ่งมีชีวิตในแนวปะการัง โดยเฉพาะ สัตว์ที่อาศัยเจาะชัยอาศัยในแนวปะการังจะมีมากขึ้นและทำให้แนวปะการังมีความเปราะและจะแตกหัก หรือพังทะลายได้ง่ายขึ้น

นอกจากนี้หากมวลน้ำที่ฟุ้งกระจายเข้าสู่ชายฝั่งเกิดจากกลื่นใต้น้ำขนาดใหญ่ ได้นำมวลน้ำจาก ชั้นน้ำที่ลึกกว่า 100-150 เมตร ที่มีอุณหภูมิน้ำที่ต่ำกว่า 20 องศาเซลเซียส และระดับออกซิเจนละลายน้ำ ต่ำกว่า 2 มิลลิกรัมต่อลิตร เข้ามาปกกลุมพื้นท้องน้ำชายฝั่ง โดยระยะเวลาที่ปกกลุมนั้นอาจนานพอที่จะ ทำให้สิ่งมีชีวิตที่พื้นท้องน้ำบริเวณชายฝั่งตายลงในจำนวนมากได้ หากเกิดปรากฏการณ์ดังกล่าว บ่อยครั้งและเป็นเวลานานอาจส่งผลกระทบทำให้เกิดสภาพเสื่อมโทรมของทรัพยากรชายฝั่งได้



คลื่นใต้น้ำในทะเลอันดามัน

ภาพที่ได้จากเครื่อง Biosonic ที่ใช้แสกนชั้นน้ำเพื่อดูความแตกต่างของความหนาแน่นของมวลน้ำในชั้นน้ำจากผิวเพื่อหา คลื่นใต้น้ำที่บริเวณนอกฝั่งด้านตะวันตกของหมู่เกาะสิมิลัน จากภาพจะเห็นชั้นน้ำที่มีความแตกต่างของความหนาแน่นอยู่ ที่ประมาณ 25-40 เมตร (เส้นสีแดง) และจะเห็นลักษณะชั้นน้ำที่เป็นคลื่น เมื่อคลื่นที่ชั้นน้ำดังกล่าวเคลื่อนตัวไปทางขวาเข้า ใกล้ชายฝั่งที่ดิ้น (ความลึกประมาณ 90-70 เมตร) จะเห็นลักษณะการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชั้นน้ำ (เริ่มยกตัวสูงขึ้น และ ท้ายที่สุดจะแตกตัวเป็นก้อนมวลน้ำ) คลื่นที่แสดงในภาพเป็นคลื่นที่มีความยาวคลื่นไม่มากนัก จากข้อมูลที่ได้จาก การศึกษาพบว่าในหนึ่งรอบการขึ้นลงของน้ำในช่วงน้ำเป็นจะมีกลื่นใต้น้ำขนาดใหญ่เข้ามาหนึ่งครั้ง



ภาพที่ได้จากเกรื่อง Biosonic ที่บริเวณชาฝั่งความลึกของน้ำ 70-80 เมตร (ต่อจากภาพบน) พบว่าชั้นกลื่นมีการแตกตัวเป็น ก้อนมวลน้ำกระจายเข้าหาแนวเกาะ

เกิดขึ้นเกือบตลอดทั้งปี โดยมีการเคลื่อนตัวของคลื่นใต้น้ำจากทางฝั่งตะวันตกของทะเลอันดามัน (ใกล้ แนวหมู่เกาะอันดามัน และนิโคบาร์) มายังฝั่งทะเลอันดามันด้านตะวันออก (ชายฝั่งประเทศพม่า ไทย และมาเลเซีย) แต่จาการสังเกตุพบว่าอิทธิพลของมวลน้ำลึกที่เกิดจากการเคลื่อนตัวของคลื่นใต้น้ำเข้าสู่ ชายฝั่งของประเทศไทยนั้นมักพบในช่วงต้นปี คือ เดือนมกราคม ถึง เมษายน

ผลเบื้องต้นจากการศึกษาวิจัยภายใต้ความร่วมมือระหว่างสถาบันวิจัยและพัฒนาทรัพยากรทาง ทะเล ชายฝั่งทะเลและป่าชายเลน ร่วมกับจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และ ศูนย์วิจัยระบบนิเวศวิทยาใน เขตร้อน (Tropical Marine Ecological Research Center) เมือง Bremen ประเทศเยอรมันนี โดยการ สนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการสภาวิจัยแห่งชาติของประเทศไทย และมูลนิธิสนับสนุนการวิจัย แห่งชาติของประเทศเยอรมันนี ในต้นปี 2550 พบว่าในช่วงเวลาดังกล่าวมีปรากฏการณ์ของคลื่นใต้น้ำ เกิดขึ้น และได้มีอิทธิพลต่อการพัดพาเอามวลน้ำจากทะเลลึกจำนวนมากเข้าสู่ชายฝั่งบ่อยครั้ง และ ในช่วงเวลาดังกล่าว (ระหว่างเดือนมกราคม ถึงเดือนเมษายน) มีรายงานการพบการสะพรั่งของแพลง ตอนพืช และการตายของสัตว์น้ำจำนวนมากในทะเลนอกชายฝั่งตามเกาะแก่งต่างๆ ตั้งแต่ทางด้านเหนือ



ภาพบน: อุณหภูมิที่ความลึกต่างๆ บริเวณฝั่งตะวันตกของหมู่เกาะสิมิลันที่ความลึกของน้ำ 150 เมตร ในรอบ 24 ชั่วโมง ของชั่วน้ำเป็นในเดือนมีนาคม 2550

ภาพถ่าง: แสดงการเกลื่อนตัวในแนวดิ่งของมวลน้ำที่ได้จากเกรื่องวัดกระแสน้ำแบบ Acoustic Doppler Current Profile (ACDP) ที่สถานีตรวจวัดเดียวกันกับอุณหภูมิ (ค่าที่เป็นลบเกลื่อนที่ลงพื้นท้องน้ำ ค่าบวกเกลื่อนที่ขึ้นผิวน้ำ) จากภาพทั้งสองพบว่าในช่วงรอบวันของน้ำเป็นจะมีมวลน้ำที่มีการเกลื่อนตัวในแนวดิ่งจากผิวลงไปที่ความลึกประมาณ 100-120 เมตรแล้วมีการเกลื่อนตัวขึ้นในแนวดิ่งถึงที่ระดับความลึกประมาณ 20-30 เมตร เป็นลักษณะของกลื่นใต้น้ำที่มี ขนาดใหญ่ ซึ่งสามารถมีอิทธิพลต่อชายฝั่งได้มาก

คลื่นใต้น้ำและผลกระทบที่เกิดขึ้นในทะเลอันดามัน

ผลการศึกษาพบว่าคลื่นใต้น้ำที่มีขนาดใหญ่และมีการเคลื่อนตัวเข้าสู่ชายฝั่งนั้นจะพบว่าเกิด ในช่วงน้ำเป็น (ช่วงตั้งแต่ก่อนจนถึงหลังขึ้นหรือแรม 15 ก่ำ) และจะหายไปในช่วงน้ำตาย (ช่วงขึ้นหรือ แรม 7 ก่ำ) และการเกิดจะสัมพัน์กับการขึ้นลงของน้ำ โดยชุดคลื่นขนาดใหญ่ที่เกิดมีการเคลื่อนตัวเข้าสู่



สามารถสังเกตุบริเวณที่มีคลื่นใต้น้ำ เคลื่อนตัวได้จากบริเวณผิวน้ำ โดย บริเวณนั้นจะมีลักษณะพื้นผิวน้ำที่มี ลักษณะคลื่นขนาดใหญ่กว่าบริเวณรอบ และบางครั้งอาจสังเกตุกล้ายกับมีคลื่นที่ มีลักษณะคล้ายน้ำเดือด

ชายฝั่งจะพบวันละ 2 ครั้ง ตามลักษณะการขึ้น-ลงของน้ำ โดยกลื่นแต่ละชุดจะห่างกันโดยประมาณ 12 ชั่วโมง คลื่นใต้น้ำขนาดใหญ่พบว่านอกจากจะพัดนำมวลน้ำชั้นล่างขึ้นสู่ชั้นบนแล้วยังสามารถทำให้ เกิดการฟุ้งกระจายของตะกอนที่พื้นท้องน้ำขึ้นสู่มวลน้ำชั้นบนได้ด้วย



แพลงตอนพืชที่พบสะพรั้งบริเวณเกาะแกร่งใน ทะเลอันดามันในช่วงต้นปี 2550 บ่อยกรั้งคือ Ceratium furca

การสะพรั่งของแพลงตอนพืชพบว่าชนิดที่พบส่วนใหญ่เป็น Ceratium spp และจากผล การศึกษาพบว่าแพลงตอนพืชที่พบมากับคลื่นใต้น้ำมืองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นชนิดเดียวกับที่เกิดการ สะพรั่ง จึงเป็นไปได้ที่แพลงตอนพืชเหล่านี้อาจมีอยู่มากที่บริเวณเหนือที่การเกิดการแบ่งชั้นน้ำ (พบว่า ส่วนใหญ่บริเวณนี้จะมีแพลงตอนพืชอยู่มาก) และถูกนำเข้าสู่พื้นผิวน้ำชายฝั่งของแนวเกาะแกร่ง มวล น้ำที่เข้ามาจึงมีการผสมผสานของแพลงตอนพืชและสารอาหารจำนวนมากจึงกระตุ้นให้เกิดการสะพรั่ง ของแพลงตอนพืชดังกล่าว

ภาพความหนาแน่นของชั้น มวลน้ำ (Sigma-t) คลอโรฟิลล์ (Fluorescence) และ อ๊อกซิเจนละลายน้ำ ใน ความลึกต่างจากผิวถึงพื้น ท้องน้ำในแนวจากชายฝั่ง ตะวันออกของเกาะเมียงไป ยังนอกชายฝั่งด้านตะวันตก จากภาพแสดงให้เห็นว่าที่ บริเวณใกล้ชายฝั่งของแนว เกาะจะมีมวลน้ำจากน้ำชั้น ล่างฟุ้งกระจายขึ้นสูน้ำชั้นผิว ทำให้บริเวณรอบๆ เกาะมีค่า ความเค็มและปริมาณ คลอโรฟิลล์เพิ่มขึ้น งณะเดียวกันก็พบว่าบริเวณ น้ำที่ใกล้พื้นรอบเกาะมีค่า อ๊อกซิเจนละลายน้ำลดต่ำลง จากการติดตามในรอบ 24 ชั่วโมงพบว่าบางครั้งมีค่าต่ำ กว่า 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่ง ต่ำกว่าค่าที่สัตว์น้ำหลายชนิด จะอยู่ได้



สำหรับการตาขของสัตว์น้ำที่พบรายงานบ่อยครั้งในช่วงต้นปี 2550 ในทะเลอันดามัน รวมทั้ง การพบน้ำทะเลมีอุณหภูมิต่ำกว่าปกติ ซึ่งส่งผลกระทบต่อการประมง (ใช้เครื่องมือประมงประเภทลอบ น้ำลึก) และการท่องเที่ยวทางทะเลนั้น พบว่ามาจากการที่มวลน้ำที่ถูกคลื่นใต้น้ำขนาดใหญ่พัดพาเข้าสู่ ชายฝั่งนั้นทำให้อุณหภูมิพื้นท้องน้ำในหลายพื้นที่มีอุณหภูมิลดต่ำลง (มีค่าน้อยกว่า 20 องศาเซลเซียส) ซึ่งระดับอุณหภูมิขนาดนี้อาจมีผลต่อการคำรงชีพของสัตว์น้ำ นอกจากนี้ยังพบว่าระดับอ๊อกซิเจนละลาย น้ำยังต่ำกว่า 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นระดับอ๊อกซิเจนที่สัตว์น้ำจำนวนมากไม่สามารถคำรงชีพอยู่ได้ เช่น พื้นที่บริเวณเกาะหินม่วงหินแดง จังหวัดกระบี่ พบก่าอ๊อกซิเจนละลายน้ำที่ระดับความลึกพื้นท้อง น้ำมีก่า ต่ำกว่า 2 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อเนื่องนานกว่า 10 ชั่วโมง หรือที่พบที่เกาะเมียง (หมู่เกาะสิมิลัน) มี ก่าอ๊อกซิเจนต่ำกว่า 2 มิลลิกรัมต่อลิตรเป็นครั้งคราว

ความรู้ความเข้าใจในกระบวนการทางสมุทรศาสตร์ที่เกิดขึ้นและผลกระทบที่ตามมานั้น จะ ช่วยทำให้ประชานชนไม่ตื่นตระหนกจนเกินไป เนื่องจากหลังเหตุการณ์สินามิในวันที่ 26 ธันวาคม 2547 ประชาชนมีความอ่อนไหวต่อมากกฎการณ์ธรรมชาติทางทะเลมากขึ้น นอกจากนี้ความรู้ดังกล่าว ยังสามารถเป็นข้อมูลที่จะช่วยจะมีการวางแผนการจัดการทรัพยากรทางทะเลได้อย่างเหมาะสม รวมทั้ง การใช้ประโยชน์จากทะเล

ภาคผนวก ข

บทคัดย่อผลงานวิจัยที่จะนำเสนอในการประชุมปะการัง ที่รัฐฟอริดา ประเทศสหรัฐอเมริกา ในเดือน กรกฎาคม 2551

Ocean dynamics drive coral reef processes in the Andaman Sea

Claudio Richter¹, Mélanie Bon¹, Laura Fillinger¹, Carin Jantzen¹, Cornelia Roder¹, Gertraud Schmidt¹, Niphon Phongsuwan², Somkiat Khokiattiwong²

¹Center for Tropical Marine Ecology, Fahrenheitstr. 6, D-28359 Bremen, Germany ²Phuket Marine Biological Center, Sakdidet Rd., Phuket, Thailand

Coral reefs are rich benthic ecosystems thriving in nutrient-poor waters. A striking feature of the Andaman Sea is the exposure of offshore reefs to large amplitude internal waves. These solitary-like waves (or solitons) are generated by the ebb and flow of water across the shallow ridges of the Andaman-Nicobar island arc and propagate along the density discontinuity (pycnocline) between warm surface and colder deep waters pycnocline with speeds of ~2 m s-1 and amplitudes of up to 80 m. Here, we show that the dissipation of the solitons energy in shoaling water enhances pelagic-benthic coupling along the continental margin, due to turbulent mixing near the sea bed, entrainment of interstitial and subpycnocline nutrients, and formation of bores. These 'solibores' supply nutrients and plankton to the benthos of the Similan Islands. Lowered

temperature, pH and light hamper, however, coral photosynthesis and calcification, and their resilience against macroalgal competitors and grazers, resulting in low or negative reef growth. The frequency and intensity of cold bores (with temperatures drops of up to 10°C within only minutes) may on the other hand increase the corals. resilience to thermal stress. The findings have important repercussions on the Similan reefs which have been impacted by earlier bleaching and recent Tsunami. Because solitons are ubiquitous in the Andaman Sea and elsewhere, they may be an important yet so far overlooked mechanism structuring benthic communities in tropical waters.

โปสเตอร์ผลงานวิจัยที่นำเสนอในการประชุม ประเทศญี่ปุ่น ในปี 2550





Ocean forcing of coral reef processes Solibore-induced upwelling in the Similan Islands

ORCAS Team

Introduction

Coral reefs are rich benthic ecosystems thriving in warm and nutrient-poor waters, where high aragonite supersaturation (Ω >3.5) and high light intensities favour calcification and reef growth in well-flushed shallow waters. Coral reefs are thus most well developed along the windward sides of barrier reefs and oceanic islands. The offshore Similan Islands facing the Andaman Sea harbour flourishing reefs of international acclaim - albeit on their sheltered eastern sides; the exposed western sides are barren granite rock. Here, we explore the hypothesis that the paradoxical pattern of reef development is due to the breaking of very large amplitude internal waves (Fig. 1), generating bores furnishing cold, nutriert-rich, low aragonite and turbid subpycnocline waters into shallow waters where they effectively inhibit reef growth.

Methods and Results

We combined oceanographic surveys, sensor arrays on moorings and marine ecological work to assess the occurrence and fate of solitons impinging on the Similan shelf, their effect on the biogeochemical environment and the benthos. Simultaneous temperature records on either sides of Koh Miang, Similan Islands, separated by less than 200 m (yellow and green arrows in Fig. 1 E) show marked differences in temperature variability and level (Fig. 2): W Miang is overall ~1°C colder than E Miang, with violent oscillations of temperature of up to 10°C within only minutes. E Miang, by constrast, features only moderate temperature changes.

Combined temperature and current records show that the negative temperature spikes are due to the arrival of bores which spill cold and turbid water onshore (Fig. 3).

The low temperature, and concomitant drops in pH (Fig. 4) and, hence, aragonite saturation (Ω <3.5) decrease coral calcification.



Fig. 2. Ten-day time series of temperature recorded at 20 m depth on the W (blue) and E (red) sides of Koh Miang, Similan Islands. Solid lines are median hourly values, stippled lines the hourly max. and min. values. Temperatures may drop up to 10°C in the course of only minimers.

Jadesch, C.R. (2004) An Alter of Hiermel Bullery-Ne Waars and Hefr Properties, 2nd Ballon, Orice of Hause Restands, (Askal Coarn Area coldes, Alexandria, VA, USA Octoore A.R., Burdh,T.L. (1950) Internel sollions in He Anderson Sea, Belence (Math), 200(++4): +57-400

showing the Andaman-Nicobar Island arc enclosing the deep basin. The waxing and waning of the tides forces water across the shallow sill and downslope in cascades. When the tides abate lee waves are generated which detach from the island slope and propagate eastwards along the density interface (pycnocline) between surface and deep waters as solitary-like wave packets (solitons). They are identified in the deep ocean as waves of depression with amplitudes of 61-80 m (B, temperature vs depth and time, from Osborne & Burch 1980). Surface waves of 1-2 m height and 10s to 100 kms long indicate the leading leading edge of the solitons and allow detection of solitons by remote sensing (C, synthetic aperture radar image of one of the generation sites near Aceh at the northern tip of Sumatra, Indonesia); D, visible light image, from Jackson 2004). Shoaling solitons contour the 90 m isobath near the Similan Sland shelf edge off Phuket, Thailand. A striking feature of the Similans (E) and other Andaman Sea offshore islands is the islands (azur waters, yellow arrow Wo Koh Miang).

Fig 3. Six-hour time series of temperature (contours, upper panel), currents (upper and lower panel, onshore: arrow to the right, up: arrow-up), and backscatter intensity (contours, lower panel) recorded at various depths of the t of Solibores (blue intrusions of cold water, upper panel, are associated with strong and oscillating currents, as well as turbid waters (red contours, lower

Conclusions

Both, direct and indirect effects (e.g. increased bioerosion and competitive advantage of macroalgae due to enhanced nutrient inputs) of soliton-generated bores hamper coral reef growth in the Similan Islands, Andaman Sea. Because solitons are ubiquitous in the Andaman Sea and elsewhere, they may be an important yet so far overlooked mechanism structuring benthic communities in the tropics and contribute to the dazzling species richness around the volcanic island arcs of Southeast Asia - the center of coral biodiversity.

Fig 4. Twentyfour-hour time series of (up to low panels) temperature, salinity, oxygen, pH, Chlorophyll a and tidal heights on the W side of Koh Miang, Similan Islands. Solibores are visible as jagged deviations from ambient levels. Physico-chemical variables are closely correlated, whereas biological parameters (chlorophyll) is only weakly associated with solitons.

Ocean-Reef Coupling in the Andaman Sea (ORCAS) Team: C. Richteri*, M. Bon*, L. Fillinger*, C. Jantzen*, U. Krumme*, N. Phongsuwan*, C. Roder*, S. Satapoomin*, G. Schmidt*, S. Khokiattiwong* ¹ZMT; *Phuket Marine Biological Center, Sakdidet Road, Phuket, Thailand; *crichter@zmt-bremen.de

> ¹Center for Tropical Marine Ecology Fahrenheitstr. 6, 28359 Bremen www.zmt-bremen.de



บทคัดย่อผลงานวิจัยที่จะนำเสนอ ในการประชุม Oceanography and Limnology ที่รัฐเซนต์จอห์น ประเทศแคนาดา ในเดือน พฤศภาคม 2551

Soliton-enhanced mixing in the Andaman Sea

Richter, C.¹, Khokiattiwong, S.² and ORCAS Team

¹Center for Tropical Marine Ecology, Fahrenheitstr. 6, D-28359 Bremen, Germany ²Phuket Marine Biological Center, Sakdidet Rd., Phuket, Thailand

A striking feature of the Andaman Sea is the occurrence of very large amplitude internal waves. These solitary-like waves (or solitons) are generated by the ebb and flow of water across the shallow ridges of the Andaman-Nicobar island arc and propagate along the density discontinuity (pycnocline) between warm surface and colder deep waters pycnocline with speeds of $\sim 2 \text{ m s}^{-1}$ and amplitudes of up to 80 m. Here, we show that the dissipation of the solitons' energy in shoaling water enhances pelagic-benthic coupling along the continental margin, due to turbulent mixing near the sea bed, entrainment of interstitial and subpycnocline nutrients, and formation of bores. These 'solibores' supply nutrients into the surface layer which fuel pelagic productivity, but low temperature and low aragonite saturation state impedes coral development in shallow waters. Because solitons are ubiquitous in the Andaman Sea and elsewhere, they may be an important yet so far overlooked mechanism structuring marine communities in tropical waters.

รายชื่อคณะวิจัยในโครงการฯ

สถาบันวิจัยและพัฒนาทรัพยากรทางทะเล และชายฝั่งทะเล

คร. สมเกียรติ ขอเกียรติวงศ์ หัวหน้าโครงการฯ ฝ่ายไทย
คร. สุรีย์ สตภูมินทร์
นางสาววรารินทร์ วงษ์พานิช
นางพิมพ์วลัญช์ เชื้อผู้ดี
นางสาวครุณวรรณ สกุณา
นางจิรพร เจริญวัฒนาพร
นายนิพนธ์ พงศ์สุวรรณ
จุพาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
คร. ปราโมชย์ โศจิศุภร

Center for Tropical Marine Ecology (ZMT), University of Bremen

Dr. Claudio Richter หัวหน้าโครงการฯ ฝ่ายเยอรมันนี

ภาคผนวก ค บทคัดย่อนักศึกษาภายใต้โครงการ

บทคัดย่อนักศึกษาภายใต้โครงการ

โครงการได้มีนักศึกษาระดับปริญญาโท 2 ท่านจาก Bremen University สาธารณรัฐเยอรมัน คือ Miss. Laura Fillinger และ Miss. Mélanie Bon เข้าร่วมศึกษาทำงานวิจัย โดยมี Prof. Dr.Claudio Richter ดร. สมเกียรติ ขอเกียรติวงศ์ และนายนิพนธ์ พงษ์สุวรรณ เป็นอาจารย์ที่ปรึกษา โดยนักศึกษาทั้งสองท่านได้ จบการศึกษาเรียบร้อยแล้วและผลการศึกษาของหัวข้อวิจัยดังกล่าว มีดังต่อไปนี้

1. วิทยานิพนธ์ เรื่อง :	Zooplankton and seston near coral reefs impacted by solitary internal waves
	in the Similan Island, Andaman Sea Thailand
โดย :	Laura Fillinger
อาจารย์ที่ปรึษา:	Prof. Dr. Claudio Richter
	คร.สมเกียรติ ขอเกียรติวงศ์

บทคัดย่อ

คลื่นเดี่ยวใด้น้ำขนาดใหญ่ได้มีการเคลื่อนตัวเข้าสู่ทะเลอันดามันจากทางด้านตะวันตกบริเวณ แนวหมู่เกาะนิโคบาร์ และอันดามัน (เป็นบริเวณที่เกิดการก่อตัวของกลิ่นใต้น้ำ) สู่ชายฝั่งด้านตะวันออก ที่เป็นแผ่นดิน หมู่เกาะสิมิลันเป็นหมู่เกาะที่มีความอุดมสมบูรณ์และสวยงานเป็นที่รู้จักทั่วโลกเป็นส่วน หนึ่งที่เป็นทางผ่านของกลิ่นใต้น้ำดังกล่าว จุดประสงค์ของการศึกษาครั้งนี้เพื่อประเมินทั้งโดยทางตรง และทางอ้อมถึงผลกระทบของกลื่นใต้น้ำดังกล่าว จุดประสงค์ของการศึกษาครั้งนี้เพื่อประเมินทั้งโดยทางตรง และทางอ้อมถึงผลกระทบของกลื่นใต้น้ำดังกล่าวต่อแพลงก์ตอนสัตว์และแพลงก์ดอนพืชและเศษอิทท รีย์สารขนาดเล็กที่ล่องลอยอยู่ในมวลน้ำทะเลรอบๆ หมู่เกาะสิมิลัน และผลกระทบของมันที่อาจมีต่อ ประชาคมสิ่งมีชีวิตในแนวปะการัง ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทำการเก็บตัวอย่างแพลงก์ตอน น้ำทะเลจาก นอกชายฝั่งที่ชั้นน้ำเทอร์โมไกลน์ (Thermocline) และที่บริเวณใกล้แนวชายฝั่งของเกาะทางด้านที่รับ กลื่นใต้น้ำโดยตรง (ฝั่งตะวันตกของเกาะ) และด้านที่ไม่ได้รับผลจากกลื่นใต้น้ำโดยตรง (ด้านที่มีการ กำบังของเกาะ คือฝั่งตะวันออก) โดยพบว่าในบางช่วงเวลาอุณหภูมิของน้ำทะเลลดลงถึง 10 องสา เป็น เวลาหลายนาทีที่ระดับกวามลึก 20 เมตร โดยเฉพาะทางด้านฝั่งตะวันดกของเกาะ ในมวลน้ำทะเลที่เย็น นั้นพบว่ามีมวลของแพลงก์ตอนสัตว์ปริมาณน้อย แต่มีปริมาณสารอาหารอยู่สูงมากกว่าระดับปกติที่พบ ในแนวปะการังโดยเฉพาะในเตรท ลักษณะดังกล่าวเปรียบเทียบได้กับมวลน้ำในชั้นน้ำเทอร์โมไกลน์ นอกจากนี้ในกลื่นเดียวใต้น้ำดังกล่าวยังพบว่ามีปริมาณตะกอนแขวนลอยอยู่มาก รวมถึงตัวอ่อนของ เพรียง กลื่นเดียวใต้น้ำจัดเป็นปัจจัยที่ก่อให้เกิดความเครียดต่อปะการัง เนื่องด้วยมันนำมวลน้ำที่มี อุณหภูมิต่ำ มีตะกอนทรายแขวนลอยอยู่มาก และมีปริมาณแพลงก์ตอนสัตว์ที่เป็นแหล่งอาหารของ ปะการังอยู่ในระดับที่น้อยมาก จากลักษณะดังกล่าวสามารถที่จะใช้ในการอธิบายเกี่ยวกับปะการังที่พบ ในบริเวณหมู่เกาะสิมิลันได้ อย่างไรก็ตามมันอาจเป็นประโยชน์ต่อระบบนิเวศในแง่ของการนำตัวอ่อน สิ่งมีชีวิตในกลุ่ม meroplankton และสารอาหารจากนอกชายฝั่งในทะเลลึกเข้าสู่พื้นที่ชายฝั่ง อย่างไรก็ ตามปรากฏการณ์ดังกล่าวขึ้นอยู่กับความลึกของชั้นน้ำเทอร์โมไคนล์ ซึ่งหากชั้นน้ำเทอร์โมไคนล์อยู่ลึก เกินไป มวลน้ำลึกนอกชายฝั่งดังกล่าวอาจมาไม่ถึงแนวชายฝั่งของเกาะ ดังนั้นปรากฏการน้ำเย็นดังกล่าว จึงไม่พบตลอดปีในบริเวณชายฝั่งของเกาะสิมิลัน

Abstract

High amplitude solitary internal waves, or solitons, travel from West to East in the Andaman Sea. The Similan Islands, worldwide known for their coral reefs lie in the path of these solitons. The point of this study was to assess the direct and indirect impacts of internal waves on the zooplankton and seston around the Similan, and how this might affect the enthic community. For this purpose, plankton and water samples were taken offshore in the thermocline and near the islands on the side exposed to the solitons (West) and on the heltered side (East). Periodically, internal waves can cause temperature drops of up to 10°C over a few minutes by 20m depth, particularly on the west side of the Similan. Their cold water contains less zooplankton and more nutrients, especially nitrates than the normal reef water. These characteristics were comparable to parameters measured in the thermocline. The solitons also presented a high sediment load and were related to an increase of barnacle arvae. Solitons are a source of stress for the corals: they bring cold waters charged with sand and don't represent a significant supply of zooplanktonic food. This could partly explain the configuration of the coral reefs in the Similan Islands. Nevertheless, they might also benefit to the ecosystem by transporting meroplanktonic larvae from offshore and nutrients from the thermocline. Their occurrence in related to the depth of the hermocline, as such, they might not be reaching the islands all year round.

M.Sc. Thesis in International Studies in Aquatic Tropical Ecology Presented to the University of Bremen, Faculty for Biology & Chemistry

2. วิทยานิพนธ์ เรื่อง :	Influence of solibores in the response of <i>Porites lutea</i> to thermal stress,
	Similan Island, Andaman Sea, Thailand
โดย :	Mélanie Bon
อาจารย์ที่ปรึษา:	Prof. Dr. Claudio Richter
	บายบิพบธ์ พงศ์สวรรณ

บทคัดย่อ

้ปรากฏการณ์ปะการังฟอกขาวพบว่าความถี่ในการเกิดนั้นมีมากขึ้นทั่วโลก การเข้าใจถึง กระบวนการเกิดปรากฏการณ์ดังกล่าวมีความสำคัญยิ่งต่อปะการังต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิโลก (จาก การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลก) การเกิดปรากฏการปะการังฟอกขาวในประเทศไทยพบว่าใน ทะเลอันดามันนั้เกิดปารกฎการณ์ดังกล่าวน้อยกว่าในฝั่งทะเลอ่าวไทย มีความเป็นไปได้ในการอธิบาย ถึงความสามารถต่อการทนต่อการเกิดปะการังฟอกขาวในทะเลอันดามันโดยเฉพาะจากเงื่อนไขทาง ้สมุทรศาสตร์อันเนื่องจากการเกิดคลื่นใต้น้ำในทะเลอันดามัน ปรากฏการณ์คลื่นใต้น้ำทำให้เกิดการ เปลี่ยนแปลงสภาพแวคล้อมอย่างมากในมวลน้ำที่มาถึงแนวปะการัง รวมทั้งการลคลงของอุณหภูมิน้ำ ทะเลอย่างกระทันหันหลายองศาเซลเซียสภายในไม่กี่นาที ในการศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาประเมินผล กระทบจากการเปลี่ยนแปลงอณหภมิน้ำทะเลต่อความเครียดของปะการังชนิด Porites lutea ปัจจัยที่ใช้ ในการประเมินผลกระทบดังกล่าวประกอบด้วย ปริมาณความหนาแน่นของ Zooxanthellae. การวัด ปริมาณคลอโรฟิลล์โดยการเก็บตัวอย่างมาวิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐานในห้องปฏิบัติการ และเครื่องมือที่ ใช้วัดปริมาณคลอโรฟิลล์ในเนื้อเยื่อปะการังโดยตรง (ปะการังสามารถมีชีวิตอยู่ได้) คือ PAM จากผลการศึกษาพบว่าปะการังที่มาจากพื้นที่บริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงของ Fluorometer สภาพแวคล้อมสูง (ฝั่งตะวันตกของเกาะสิมิลัน) ได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิน้อย กว่าปะการังที่อยู่ในพื้นที่ที่มีสภาพแวคล้อมค่อนข้างคงที่ (ฝั่งตะวันออกของเกาะสิมิลัน) โดยพบว่า ้ความหนาแน่นของ Zooxanthellae และประสิทธิภาพของการสังเคราะห์แสงนั้นมีมากกว่า จากผล การศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าปะการังที่อยู่ในพื้นที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมากมี ้ความสามารถที่จะปรับตัวหรือทนต่อสภาพแวคล้อมที่มีอุณหภูมิสูงได้ดีกว่าปะการังที่อยู่ในพื้นที่ที่มี สภาพแวดล้อมที่ค่อนข้างคงที่

นอกจากนั้นยังมีการประชุมร่วมของนักวิจัยในโครงการความร่วมมือระหว่างไทย-เยอรมัน เพื่อติดตามความก้าวหน้าของการคำเนินการของโครงการภายใต้กรอบความร่วมมือ และแลกเปลี่ยน ความกิดเห็นรวมทั้งแนวทางในการพัฒนาโครงการในระยะต่อไปของแต่ละโครงการย่อย ภายใต้ โครงการพลวัตรและการเชื่อมโยงระหว่างระบบนิเวศของมหาสมุทรและแนวปะการังมีนักวิจัยใน โครงการทั้งหมด 4 ท่านที่เข้าร่วมการประชุมดังกล่าว คือ Prof.Dr.Claudio Richter, ดร.สมเกียรติ ขอ เกียรติวงศ์, คร.สุรีย์ สตภูมินทร์, และคร.ปราโมชย์ โศจิสุภร นอกจากนี้ทางผู้วิจัยในโครงการยังได้มี การพูดคุยและนำเสนอโครงการโดย Dr.Peter Damm จาก Hamburg University ที่จะเสนอการ สนับสนุนโครงการศึกษาทางด้าน Physical Oceanography เข้าร่วมโครงการจากทาง DFG โดยเฉพาะ เรื่องการศึกษาการใหลเวียนของมวลน้ำในทะเลอันดามันและแนวชายฝั่ง รวมทั้งการฟุ้งและ แพร่กระจายของตะกอนคินในชายฝั่งและจากขบวนการของคลื่นใต้น้ำ ซึ่ง Dr.Peter Damm ได้เคย เสนอโครงการเรื่องการศึกษาการใหลเวียนของกระแสน้ำในทะเลอันดามันและบริเวณแนวชายฝั่ง แต่ โครงการไม่ได้ผ่านความเห็นชอบจาก DFG จากการดำเนินการ 2 ปี ที่ผ่านมาเรื่องดังกล่าวนับว่ามี ้ความสำคัญมาก และด้วยข้อจำกัดทางเทคนิค โดยเฉพาะเรื่อง Model ที่จะต้องใช้ในการศึกษาที่ในตอน ทำโครงการครั้งแรกคาดหวังว่าทาง Dr.Peter Damm จะร่วมในโครงการ ซึ่งมีความพร้อมในเรื่อง Model และข้อมูลทางสมุทรศาสตร์ที่เกี่ยวกับอุตุนิยมวิทยาระยะยาวในทะเลอันดามันที่จะใช้สนับสนุน ในโครงการวิจัย และจากที่ทางฝ่ายไทยได้พยายามใช้ Model ที่มีใช้อยู่ในจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยใน การศึกษาเรื่องดังกล่าวก็พบว่าได้ผลไม่ดีเท่าที่กวร และจากผลการดำเนินการที่ผ่านมา 2 ปี พบว่าข้อมูล ้ดังกล่าวมีความสำคํญมากที่จะนำมากใช้สนับสนุนให้เข้าใจกระบวนการทางสมุทรศาสตร์ให้มากยิ่งขึ้น ซึ่งโครงการย่อยอื่นๆ ภายใต้ความร่วมมือไทย-เยอรมันก็ต้องการข้อมูลดังกล่าวเช่นกัน เช่น โครงการ ้ศึกษาตะกอนดินชายฝั่งจากสึนามิ เป็นต้นดังนั้นจึงเห็นว่า Dr.Peter Damm น่าจะนำเสนอโครงการเข้า มาใหม่และให้สอดกล้องกับความต้องการของโครงการ ซึ่งการพัฒนาโครงการเพื่อนำเสนอต่อ DFG นั้นทาง Dr.Peter Damm จะรับไปดำเนินการต่อไป โดยหลังการประชุมได้มีการพบปะหารือในเรื่อง ้โครงการดังกล่าวระหว่างนักวิจัยจากฝ่ายไทยและเยอรมัน โดยผลการประชุมได้บันทึกไว้ดังต่อไปนี้

Abstract

Bleaching events are getting more and more frequent all around the world, and the understanding of the mechanisms responsible for this are considered of great importance for the future of coral reef in a context of global warming. The corals from Thailand have been reported to bleach less intensively on the Andaman coast than on the Gulf of Thailand. A possible explanation for this resistance could be the particularity of the oceanographic conditions due to the presence of internal waves in the Andaman Sea. They produce a highly variable environment reaching the reef as solibores and inducing rapid and drastic drops of temperature of several degrees in few minutes. In this study, it was experimentally tested if the massive coral *Porites lutea* is impacted by these temperature fluctuations in its response

to thermal stress. For this, traditional parameters like zooxanthellae density and chlorophyll concentration were used, as well as a more recent technique: the diving PAM fluorometer. Corals coming from a high variable environment were in general less affected by thermal stress than the ones used to more constant conditions. This suggests that they are more resistant. Under thermal stress, the symbiont densities and the photosynthetic efficiencies were higher in presence of temperature variations. This implies that frequent but short-time cooling could help corals to cope with high temperature.

M.Sc. Thesis in International Studies in Aquatic Tropical Ecology Presented to the University of Bremen, Faculty for Biology & Chemistry

ภาคผนวก ง Manuscript และ บทความที่ตีพิมพ์ในวารสาร

Manuscript Abstract

Carin Jantzen^{1,2}, Gertraud M Schmidt^{1,3}, Cornelia Roder¹, Christian Wild², Somkiat Khokiattiwong⁴, and Claudio Richter³

¹Leibniz Center for Tropical Marine Ecology, ZMT, Fahrenheitstr. 6, 28359 Bremen, Germany ²CORE Group, GeoBio Centre, LMU, Richard Wagnerstr 10, 80333 München ³Alfred Wegener Institute, Am Alten Hafen 26, 27568 Bremerhaven, Germany

⁴Phuket Marine Biological Center, PMBC, P.O.Box 60, Phuket 83000, Thailand

Abstract

The Andaman Sea features large amplitude internal waves (LAIWs) of exceptional amplitude (> 80 m). The Similan Islands are located in the swash zone of LAIWs and their LAIW-exposed west sides (W) experience perturbations in temperature (cold drops of up to 4 °C), total inorganic nutrients (> 1.84 μ M) and light levels (~30 %), compared to the sheltered east sides (E). Here, we oppose relative cover and metabolism of the main benthic primary producers (sedimentary microphytobenthos, turf algae, scleractinian corals) at LAIW-exposed and LAIW-sheltered sites at Koh Miang, Similan Islands. The LAIW-exposed W coincided with lower live coral (28 %), and higher turf algae (36 %) cover compared to the sheltered E reef (68 % and 8 % cover, respectively). Respective algae and sediment samples displayed similar chl-a contents at all sites, but net photosynthesis by turf algae increased with rising LAIW influence, whereas the sedimentary metabolism had a reduced overall activity on W. The dominant reef-building coral *Porites lutea* showed comparable net photosynthesis on both island sides, but 40 % higher pigment concentrations at W, indicating adaptation to lower light availability, facilitated by higher nutrient concentrations. Turf algae were the dominant primary producers on the W of Koh Miang, and the microphytobenthos on the sheltered E, with corals contributing less than 15 % to the gross primary production on either side. In spite of the profound effects of LAIWs on the metabolism of each respective primary producer, the overall primary production was similar at both W and E, respectively, indicating high adaptability of benthic ecosystems to cope with different environmental conditions.

Coral community and physico-chemical characteristics in response to Large Amplitude Internal Waves

Gertraud M. Schmidt¹, Niphon Phongsuwan², Cornelia Roder³, Carin Jantzen³, Somkiat Khokiattiwong² & Claudio Richter¹

¹Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research, Bremerhaven, Germany ²Phuket Marine Biological Center, Phuket, Thailand ³Leibniz Center for Tropical Marine Ecology, Bremen, Germany

Abstract

The Similan Islands (Thailand), Andaman Sea, feature an unusual coral reef distribution: reefs flourish on the sheltered shelf sides east of the islands (E) whereas the ocean-facing west (W) sides lack a true reef framework. Here, we show that the striking differences in reef development, occurring at spatial scales of only tens to hundreds of metres, are consistent among the islands and related to Large Amplitude Internal Waves (LAIW). Two year temperature records show that LAIW have their strongest impact on the deeper parts of the W Similans where they may cause frequent (several events per hour) and abrupt (up to 10°C, in the order of minutes) drops in temperature with peak activity during the NE monsoon (January through April). Physical and chemical oceanographic analyses show that LAIW advect deep cold, nutrient-rich, suboxic and low-pH waters (0.6 pH units below ambient) into shallow near shore areas, and provide a dramatically altered growth environment for W slope benthic communities. In contrast to E reefs, which are dominated by a low number of frame-building species, the W slopes harbour only loose, however more diverse communities of scattered corals growing directly on the granite basement, often with modified phenotypes (broadened bases, reduced ramification). LAIW, which are ubiquitous in SE Asia and beyond, provide a so far understudied source of physico-chemical-biological disturbance operating at different spatio-temporal scales compared to the well-known physical effects of storms. In the light of the wide range and complex nature of environmental variability involved, LAIW may hold a clue to coral resilience in an era of global change.

This manuscript is planned to be submitted to Marine Ecological Progress Series

คลื่นเดี่ยวใต้น้ำบริเวณชายฝั่งตะวันตกของหมู่เกาะสิมิลัน Internal Solitary Waves in the Western Coasts of Similan Islands

ชาลี ครองศักดิ์ศิริ^{1*}, ปราโมทย์ โศจิศุภร¹, สมเกียรติ ขอเกียรติวงศ์² และ Claudio Richter³ ¹ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ²สถาบันวิจัยและพัฒนาทรัพยากรทางทะเล ชายฝั่งทะเล และป่าชายเลน Charlie Krongsaksiri^{1*}, Pramot Sojisuporn¹, Somkiat Khokiattiwong² and Claudio Richter³ ¹Department of Marine Science, Faculty of Science, Chulalongkorn University, ²Phuket Marine Biological Center, ³Center for Tropical Marine Ecology, University of Bremen, Germany

บทคัดย่อ

ได้ทำการตรวจวัดคลื่นเดี่ยวใต้น้ำที่เคลื่อนที่สู่ชายฝั่งตะวันตกของหมู่เกาะสิมิลัน ในฤดูลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ จากการตรวจวัดพบคลื่นเดี่ยวใต้น้ำชนิดกดลงมีแอมปลิจูดและความเร็วกระแสน้ำในแนวราบไม่เกิน 65 เมตรและ 1.3 เมตร ต่อวินาทีตามลำดับ คลื่นชนิดนี้ปรากฏขึ้นในช่วงน้ำเกิดเมื่อพิสัยของน้ำขึ้นน้ำลงที่อ่าวทับละมุเกิน 0.8 เมตรและโอกาสการปรากฏขึ้น ของคลื่นจะเพิ่มขึ้นเมื่อพิสัยของน้ำขึ้นน้ำลงเพิ่มขึ้น ความเร็วกระแสน้ำสูงสุดในแนวราบเนื่องจากคลื่นเดี่ยวใต้น้ำแปรผันตรงกับ แอมปลิจูดของคลื่นเดี่ยวใต้น้ำ ทิศทางของความเร็วกระแสน้ำเนื่องจากคลื่นเดี่ยวใต้น้ำในแนวราบแสดงให้เห็นว่าคลื่นส่วนใหญ่ ที่ปรากฏขึ้นในบริเวณนี้อาจเกิดมาจากภูเขาใต้น้ำใกล้บริเวณ 8° 50′ เหนือ ลองติจูด 94° 56′ ในทะเลอันดามัน นอกจากนี้ การเปลี่ยนแปลงความเข้มของเสียงสะท้อนบริเวณใกล้พื้นท้องทะเล ทำให้คาดว่าเกิดการฟุ้งกระจายของตะกอนที่พื้นท้องทะเลมี สาเหตุมาจากคลื่นสั้นชนิดนี้

คำสำคัญ : คลื่นเดี่ยวใต้น้ำ หมู่เกาะสิมิลัน อ่าวทับละมุ ทะเลอันดามัน

*Corresponding author. E-mail: kr_charlie@hotmail.com

88 Charlie Krongsaksiri, Pramot Sojisuporn, Somkiat Khokiattiwong and Claudio Richter / Burapha Sci. J. 14 (2009) 1 : 88-98

Abstract

Observations of internal solitary wave propagating to the western coast of Similan Islands were conducted during the northeast monsoon. Depressing internal solitary waves, whose amplitudes and horizontal velocities up to 65 m and 1.3 ms⁻¹, respectively, were discovered. The internal waves occurred only during spring tides, when the tidal ranges at Thap Lamu bay exceeded 0.8 m, and the probability of their occurrence increased with tidal range. Maximum horizontal current velocities induced by wave propagation were found to be proportional to the wave amplitudes. Directions of such currents suggested that most of the waves be generated from the sills near 8° 50'N 94° 56'E in the Andaman Sea. These short-period waves were assumed to trigger remobilization of bottom sediments, which was observed by variation of echo intensity near sea bootom.

Keywords : internal solitary wave, Similan islands, Thap Lamu bay, Andaman Sea

คลื่นเดี่ยวใต้น้ำถูกตรวจพบครั้งแรกในทะเลอันดามันโดย Osborne & Burch (1980) จากการสำรวจภาคสนามในบริเวณ ที่ห่างจากตอนเหนือสุดของเกาะสุมาตราทางทิศตะวันตกเฉียงเหนือ ประมาณ 200 กิโลเมตรโดยตรวจพบกลุ่มคลื่นเดี่ยวใต้น้ำเคลื่อนที่ ไปทางทิศตะวันออกเข้าสู่ชายฝั่ง คลื่นเดี่ยวใต้น้ำแต่ละลูกมีระยะ เวลาการเกิดประมาณ 10 นาทีโดยที่เส้นไอโซเทิร์ม (isotherm) ถูกกดลง (depression) สูงสุดเท่ากับ 60 เมตร ซึ่งคลื่นเดี่ยวใต้น้ำ แต่ละกลุ่มประกอบด้วยคลื่นจำนวน 5-6 ลูก ปรากฏขึ้นโดยเฉลี่ย ทุกๆ 12 ชั่วโมง 26 นาที ตามวัฏจักรน้ำขึ้นน้ำลงชนิดน้ำคู่ และ คลื่นในกลุ่มมีการจัดเรียงตัวตามแอมปลิจูดโดยเรียงจากมากไปน้อย นอกจากนั้นจากการวิเคราะห์ภาพถ่ายเรดาร์ในทะเลอันดามันโดย Alper et al. (1997) ทำให้คาดการณ์ได้ว่าในทะเลอันดามันนั้นมี แหล่งกำเนิดคลื่นเดี่ยวใต้น้ำอย่างน้อย 3 บริเวณอันได้แก่บริเวณ แนวปะการังน้ำตื้นที่ละติจูด 6° 10′ เหนือ ลองติจูด 95° 0′ ้ตะวันออก บริเวณภูเขาใต้น้ำที่ละติจูด 8º 50' เหนือ ลองติจูด 94° 56′ ตะวันออก และบริเวณโขดหินน้ำตื้นที่ละติจูด 12° 34′ เหนือ ลองติจูด 94º 40' ตะวันออก

หมู่เกาะสิมิลันตั้งอยู่ในบริเวณไหล่ทวีปติดชายฝั่งตะวันตก ของจังหวัดพังงา โดยเรียงตัวตามแนวทิศเหนือใต้ในทะเลอันดามัน จากข้อมูลการรับรู้จากระยะไกล (remote sensing) พบว่ามี คลื่นเดี่ยวใต้น้ำที่ก่อตัวขึ้นในทะเลอันดามัน และเคลื่อนตัวเข้าสู่ แนวชายฝั่งตะวันตกของหมู่เกาะสิมิลัน และมีการคาดการณ์กันว่า คลื่นเดี่ยวใต้น้ำที่เคลื่อนตัวเข้าสู่บริเวณดังกล่าวอาจจะทำให้เกิด การฟุ้งกระจายของตะกอนพื้นท้องน้ำขึ้นสู่มวลน้ำซึ่งอาจส่ง ผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในบริเวณดังกล่าว อย่างไรก็ตามยังไม่เคย มีการศึกษาพฤติกรรมของคลื่นเดี่ยวใต้น้ำในบริเวณมาก่อน ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึงเป็นครั้งแรกที่ทำการตรวจวัดเพื่อ ศึกษาพฤติกรรมของคลื่นเดี่ยวใต้น้ำในบริเวณชายฝั่งตะวันตก ของหมู่เกาะสิมิลัน

ทฤษฎีคลื่นเดี่ยวใต้น้ำ

พฤติกรรมของคลื่นเดี่ยวใต้น้ำที่เคลื่อนที่ในมหาสมุทรนั้น สามารถอธิบายในเชิงคณิตศาสตร์ได้โดยแบบจำลองของของไหล ที่แบ่งเป็น 2 ชั้นในมหาสมุทร (Jeans & Sherwin, 2001) แสดง ดังสมการที่ (1) ซึ่งตั้งสมมติฐานว่าของไหลไม่มีการหมุน (nonrotating fluid) และความแตกต่างของความหนาแน่นบริเวณ รอยต่อระหว่างของไหล 2 ชั้นมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความ หนาแน่นเฉลี่ยตามความลึก

บทนำ

คลื่นเดี่ยวใต้น้ำ (internal solitary wave หรือ internal soliton) เป็นคลื่นที่มีลักษณะไม่เชิงเส้น (non-linear wave) มีคุณลักษณะเฉพาะเช่นเดียวกับคลื่นเดี่ยว (solitary wave หรือ soliton) กล่าวคือสามารถคงรูปร่างและความเร็วหลังจากที่ชน ้กับคลื่นลูกอื่น (Osborne & Burch, 1980) คลื่นเดี่ยวใต้น้ำ เกิดขึ้นใต้ผิวน้ำเมื่อมีการรบกวนบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นน้ำ เนื่องจากความแตกต่างของความหนาแน่นของน้ำในแนวดิ่ง บริเวณทะเลชายฝั่งหรือมหาสมุทร เชื่อกันว่าการรบกวนรอยต่อ ระหว่างชั้นน้ำเกิดจากกระแสน้ำเนื่องจากน้ำขึ้นน้ำลงปะทะ สิ่งกีดขวางใต้น้ำ เช่น แนวโขดหินใต้น้ำ (sill) ภูเขาใต้น้ำ (seamount) (Inall et al., 2001; Hyder et al., 2005; Susanto et al., 2005; Quaresma et al., 2007) ซึ่งมักเกิดขึ้นในบริเวณ ที่มีการแบ่งชั้นของน้ำเป็น 2 ชั้นเนื่องจากความหนาแน่น ทำให้ เกิดคลื่นเดี่ยวใต้น้ำเคลื่อนที่ไปตามรอยต่อที่แบ่งระหว่างชั้นน้ำหรือ pcynocline ซึ่งเป็นชั้นที่กั้นระหว่างน้ำ 2 ชั้น (Susanto *et al.,* 2005) นอกจากนั้นคลื่นเดี่ยวใต้น้ำนั้นมีพฤติกรรมที่แตกต่างกับ ้น้ำขึ้นน้ำลงใต้น้ำ (internal tide) ซึ่งเป็นคลื่นใต้น้ำ (internal wave) อีกชนิดหนึ่ง กล่าวคือคลื่นเดี่ยวใต้น้ำมีแอมปลิจูดสูง (ตั้งแต่ ้ไม่กี่เมตรไปจนถึงหลายสิบเมตร) และมีความยาวคลื่นสูง (ตั้งแต่ 100 เมตรไปจนถึงมากกว่า 1.000 เมตร) และมีระยะเวลาการเกิด (duration) สั้น (ประมาณ 10 นาที) แตกต่างจากน้ำขึ้นน้ำลง ใต้น้ำซึ่งมักจะมีแอมปลิจูดต่ำกว่า และมีคาบยาวซึ่งอยู่ช่วงคาบของ น้ำขึ้น น้ำลง (Yanagi, 1999)

การเคลื่อนที่ของคลื่นเดียวใต้น้ำในมหาสมุทรนั้นเป็น กระบวนการสำคัญหนึ่งในการถ่ายทอดพลังงานและโมเมนตัม ในมหาสมุทร และเป็นที่เกรงกันว่าการปรากฏขึ้นของคลื่นชนิดนี้ ในขณะปฏิบัติงานขุดเจาะน้ำมันหรือก๊าซธรรมชาติในทะเลอาจ ทำให้เกิดอันตรายได้ เนื่องจากคลื่นชนิดนี้จะเหนี่ยวนำให้เกิด กระแสน้ำในแนวราบซึ่งมีความเร็วสูงทำให้ท่อขุดเจาะน้ำมัน หรือก๊าซธรรมชาติแตกได้ (Osborne & Burch, 1980; Hyder et al., 2005) อีกทั้งคลื่นชนิดนี้ยังอาจส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมของ สัตว์ทะเลบางชนิด (Osborne & Burch, 1980) นอกจากนั้น กระแสน้ำเนื่องจากคลื่นดังกล่าวยังปะปนกับกระแสน้ำที่แท้จริง ส่งผลกระทบต่อการวิเคราะห์ข้อมูลกระแสน้ำจากการตรวจวัด อีกด้วย

$$\eta_t + c_0 \eta_x + \alpha \eta \eta_x - \gamma \eta^2 \eta_x + \beta \eta_{xxx} = 0$$
 (1)

สมการที่ (1) อยู่ในรูปสมการเชิงอนุพันธ์ โดยที่ตัวห้อย เป็นเครื่องหมายแสดงการหาอนุพันธ์เทียบกับระยะทางในแนว ตะวันออก-ตก (*x*) และเวลา (*t*) โดยที่ η คือการกระจัด (displacement) ของรอยต่อระหว่างชั้นน้ำ α คือสัมประสิทธิ์ ไม่เชิงเส้นกำลังสอง (quadratic non-linear coefficient) γ คือ สัมประสิทธิ์ไม่เชิงเส้นกำลังสาม (cubic non-linear coefficient) β คือสัมประสิทธิ์การกระจาย (dispersive coefficient) และ c₀ คือความเร็วของคลื่นใต้น้ำเชิงเส้น (linear internal wave) มีค่าเท่ากับ

$$c_0 = \sqrt{g' h_e} \tag{2}$$

โดยที่ g' คือความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงที่ลดลง (reduced gravity) มีค่าเท่ากับ

$$g' = g \frac{\Delta \rho}{\rho} \tag{3}$$

โดยที่ g คือความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก ρ คือความ หนาแน่นเฉลี่ยตามความลึก $\Delta \rho$ คือความแตกต่างของความ หนาแน่นบริเวณรอยต่อระหว่างของไหล 2 ชั้น และ $h_{_{\rho}}$ คือ ความลึกเทียบเท่า (equivalent depth) มีค่าเท่ากับ

$$h_e = \frac{h_1 h_2}{h} \tag{4}$$

โดยที่ h₁ คือความลึกของน้ำชั้นบน, h₂ คือความลึกของน้ำชั้นล่าง และ h คือความลึกของน้ำทั้งหมด

ในกรณีที่การกระจัดของคลื่นเดี่ยวใต้น้ำมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับความลึกของน้ำ (η << h) และความลึกของน้ำทั้ง 2 ชั้นไม่เท่ากัน (h₁ ≠ h₂) ทำให้พจน์ γη²η_x สามารถตัดทิ้งได้ และสมการที่ 1 จะถูกลดรูปเป็นสมการที่ (5) เรียกว่าสมการ Korteweg de Vries (KdV)

$$\eta_t + c_0 \eta_x + \alpha \eta \eta_x + \beta \eta_{xxx} = 0$$
(5)

สมการ KdV ใช้ในการอธิบายพฤติกรรมของคลื่นเดี่ยวใต้น้ำ ขณะเคลื่อนที่เข้าสู่ชายฝั่ง (Osborne & Burch, 1980; Inall et al., 2001; Jeans & Sherwin, 2001; Hyder et al., 2005; Susanto et al., 2005) โดยพจน์ αηη_x และพจน์ βη_{xx} จะต้อง สมดุลกัน ซึ่งในความหมายเชิงกายภาพ (physical meaning) ทมายถึงแรงยึดติดไม่เชิงเส้น (non-linear cohesive force) และ แรงกระจายเชิงเส้น (linear dispersive force) ต้องสมดุลกัน ในของไหล (Osborne & Burch, 1980) จึงจะทำให้คลื่นเดี่ยว ใต้น้ำสามารถเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางไปได้ (ภาพที่ 1) โดยที่ สัมประสิทธิ์ไม่เชิงเส้นกำลังสองและสัมประสิทธิ์การกระจาย มีค่าเท่ากับ

$$\alpha = -\frac{3c_0}{2} \left(\frac{h_2 - h_1}{h_2 h_1} \right) \tag{6}$$

$$\beta = \frac{c_0 h_1 h_2}{6} \tag{7}$$



ภาพที่ 1 ไดอะแกรมคลื่นเดี่ยวใต้น้ำ ตัวแปรแต่ละตัวถูกใช้อธิบายตามสมการ KdV

ชาลี ครองศักดิ์ศิริ , ปราโมทย์ โศจิศุภ , สมเกียรติ ขอเกียรติวงศ์ และ Claudio Richter / วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา. 14 (2552) 1 : 88-98 91

เนื่องจากน้ำในมหาสมุทรชั้นล่างหนากว่าชั้นบน ดังนั้นคำตอบ เชิงวิเคราะห์ (analytical solution) ของสมการที่ (5) จะอยู่ในรูป (Gardner *et al.*, 1967; Ostrovsky & Stepanyants, 2005)

$$\eta = -\eta_0 \sec h^2 \left[\frac{(x - ct)}{L} \right] \tag{8}$$

โดยที่ $\eta_{_0}$ คือแอมปลิจูด (amplitude) ของคลื่นเดี่ยวใต้น้ำ, c คือ ความเร็วของคลื่นเดี่ยวใต้น้ำมีค่าเท่ากับ

$$c = c_0 \left(1 - \frac{\alpha \eta_0}{3c_0} \right) \tag{9}$$

และ *L* คือความยาวเฉพาะของคลื่นเดี่ยวใต้น้ำ (characteristic length) มีค่าเท่ากับ

$$L = \left(-\frac{12\beta}{\alpha\eta_0}\right)^{\frac{1}{2}}$$
(10)

จากการศึกษาโดยอาศัยสมการ KdV ของ Osborne & Burch (1980) พบว่าความเร็วของกระแสน้ำเนื่องจากคลื่นเดี่ยว ใต้น้ำในแนวราบในทิศทางตะวันออก-ตกของน้ำชั้นบนและชั้นล่าง คือ

$$U_{upper}(x,t) = \frac{c_0 \eta_0}{h_1} \sec h^2 \left[\frac{(x-ct)}{L}\right]$$
(11)

$$U_{lower}(x,t) = -\frac{c_0 \eta_0}{h_2} \sec h^2 \left[\frac{(x-ct)}{L}\right]$$
(12)

สมการที่ 11 และ 12 สามารถอธิบายได้เฉพาะในบริเวณที่ การกระจัดของคลื่นเดี่ยวใต้น้ำมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความลึก ของน้ำ (η << h) เท่านั้น ความเร็วกระแสน้ำในแนวราบเนื่องจาก คลื่นเดี่ยวใต้น้ำจะคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามความลึก มวลน้ำชั้นบน มีทิศทางเคลื่อนที่เข้าสู่ชายฝั่งซึ่งมีทิศตรงข้ามกับน้ำชั้นล่างโดยที่ ชั้น pcynocline ถูกกดลงในกรณีที่น้ำชั้นล่างหนากว่าน้ำชั้นบน อย่างไรก็ตามน้ำชั้นบนอาจจะมีความหนากว่าน้ำชั้นล่างได้เมื่อ คลื่นเดี่ยวใต้น้ำเคลื่อนที่สู่บริเวณน้ำตื้น โดยที่ชั้น pcynocline ยังคงถูกกดลง (Osborne & Burch, 1980) หรือชั้น pcynocline อาจจะมีลักษณะถูกยกขึ้น (elevation) ได้ในบริเวณที่น้ำชั้นบน หนากว่าน้ำชั้นล่างในบริเวณให้กำเนิดคลื่น (Hyder *et. al.*, 2005)

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการ 1. การเก็บข้อมูลภาคสนาม

เครื่องวัดกระแสน้ำแบบ Acoustic Doppler Current Profilers (ADCPs) รุ่น RDI 150 kHz Broadband และ ้เครื่องบันทึกอุณหภูมิ (temperature recorder) ถูกติดตั้งที่ สถานีตรวจวัดที่ 1 2 และ 3 (ภาพที่ 2) ในวันที่ 18 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2550 ถึงวันที่ 1 มีนาคม พ.ศ. 2550 โดยสถานีตรวจวัดทั้ง 3 จุดมีความลึกจากพื้นท้องน้ำเท่ากับ 148 82 และ 45 เมตร ตามลำดับ เครื่องวัดกระแสน้ำถูกติดตั้งที่ใกล้พื้นท้องน้ำโดย ผูกติดกับเครื่องบันทึกอุณหภูมิ ทุ่นใต้ผิวน้ำและทุ่นผิวน้ำ (ภาพที่ 3) ส่วนระดับความลึกจากพื้นท้องน้ำที่ติดตั้งเครื่องบันทึกอุณหภูมิ แสดงดังตารางที่ 1 เครื่องวัดกระแสน้ำและเครื่องบันทึกอุณหภูมิ ถูกตั้งค่าให้วัดและบันทึกข้อมูลความเร็วกระแสน้ำและอุณหภูมิทุกๆ 5 นาที โดยเครื่องวัดกระแสน้ำถูกตั้งค่าให้วัดและบันทึกข้อมูล ที่ระดับความลึกแรกจากพื้นท้องน้ำเท่ากับ 132 77 และ 42 เมตร ที่สถานีตรวจวัด 1 2 และ 3 ตามลำดับ โดยระยะห่างในแต่ละ ระดับความลึกที่เครื่องวัดกระแสน้ำวัดและบันทึกข้อมูลเท่ากับ 8 2 และ 2 เมตรที่สถานีตรวจวัด 1 2 และ 3 ตามลำดับ และ ทำการวัดโพรไฟล์ (profile) อุณหภูมิและความเค็มโดยใช้ เครื่องบันทึกความนำไฟฟ้า-อุณหภูมิ-ความลึก (Conductivity-Temperature-Depth recorder) ที่ใกลัสถานีตรวจวัดที่ 1 ในวันที่ 24 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2550 เวลา 16.30 น.





92 Charlie Krongsaksiri, Pramot Sojisuporn, Somkiat Khokiattiwong and Claudio Richter / Burapha Sci. J. 14 (2009) 1 : 88-98





a	. v	a a	<u>ລັ</u>	a	é	a	9
ตารางท 1	ระดบคว	วามลักท	ติดตั้ง	บเครอ	งบน	เทกอ	าณหภม

สถานีตรวจวัด	ความลึกจากพื้นท้องน้ำที่ติดตั้งเครื่องบันทึกอุณหภูมิ (เมตร)				
1	15 25 35 45 55 65 75 85 95 105 115 125 135 143				
2	27 37 47 57 67 77				
3	20 30 40				

2. การวิเคราะท์ข้อมูล

การปรากฏขึ้นของคลื่นเดี่ยวใต้น้ำวิเคราะห์จากข้อมูล คาดร ความเร็วกระแสน้ำในแนวทิศตะวันออก-ตกซึ่งมีหลักเกณฑ์คือ เนื่อง มวลน้ำในแนวดิ่งแบ่งเป็น 2 ชั้นโดยที่มวลน้ำชั้นบนมีทิศทาง (dens กระแสน้ำอยู่ในทิศตะวันออกและมวลน้ำชั้นล่างมีทิศทางกระแสน้ำ อยู่ในทิศตะวันตก ระยะเวลาการเกิดของคลื่นสังเกตจากระยะ กับสะ เวลาที่มวลน้ำในแนวดิ่งแบ่งเป็น 2 ชั้น ในขณะเดียวกันแอมปลิจูด น้ำชั้น ของคลื่นเดี่ยวใต้น้ำวัดได้จากการกระจัดของเส้นไอโซเทิร์มเส้นที่ ของห เกิดกระจัดมากที่สุด โดยข้อมูลความเร็วกระแสน้ำและอุณหภูมิ (สมก ที่นำมาวิเคราะห์นั้นเป็นข้อมูลระหว่างวันที่ 18 กุมภาพันธ์ พ.ศ. จึงนำ

2550 เวลา 20.00 น. ถึง 1 มีนาคม พ.ศ. 2550 เวลา 6.00 น. ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกระแสน้ำสูงสุดในแนวราบ เนื่องจากคลื่นเดี่ยวใต้น้ำกับแอมปลิจูดของคลื่นวิเคราะห์โดยใช้ วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least square method) เพื่อหลีกเลี่ยง ความคลาดเคลื่อนที่จะเกิดขึ้นจึงนำข้อมูลกระแสน้ำที่ความลึก 132 เมตรมาเป็นตัวแทนของข้อมูลกระแสน้ำในแนวราบ เนื่องจาก คาดว่ากระแสน้ำที่ใกล้พื้นท้องน้ำได้รับอิทธิพลจากกระแสน้ำ เนื่องจากลม (wind-induced current) และความหนาแน่น (density-induced current) น้อยที่สุด

ทิศทางการวางตัวระหว่างแหล่งกำเนิดคลื่นเดี่ยวใต้น้ำ กับสถานีตรวจวัดสังเกตจากความเร็วกระแสน้ำในแนวราบของ น้ำชั้นล่างเนื่องจากคลื่น เนื่องจากทิศทางของความเร็วกระแสน้ำ ของน้ำชั้นล่างมีทิศตรงข้ามกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่น (สมการที่ 12) และเพื่อที่จะหลีกเลี่ยงความคลาดเคลื่อนที่จะเกิดขึ้น จึงนำข้อมูลกระแสน้ำที่ความลึก 132 เมตรมาเป็นตัวแทนของ ข้อมูลกระแสน้ำในแนวราบเนื่องจากคลื่นของน้ำชั้นล่าง

ผลกระทบของคลื่นเดี่ยวใต้น้ำต่อการฟุ้งกระจายของ ตะกอนจากพื้นท้องน้ำขึ้นมาสู่มวลน้ำสังเกตจากการเปลี่ยนแปลง ของโพรไฟล์ความเข้มของเสียงสะท้อนในขณะที่คลื่นปรากฏ คำนวณความน่าจะเป็นในการปรากฏขึ้นของคลื่นเดี่ยว ใต้น้ำในแต่ละช่วงของพิสัยของน้ำขึ้นน้ำลง โดยพิสัยของน้ำขึ้น น้ำลงนั้นนำมาจากข้อมูลระดับน้ำทำนายของสถานีอ่าวทับละมุ จังหวัดพังงา จากกรมอุทกศาสตร์ กองทัพเรือที่ละติจูด 8° 34′ 26′′ เหนือ ลองติจูด 98° 13′ 29′′ ตะวันออก ซึ่งเป็นสถานีที่อยู่ ใกล้สถานีตรวจวัดคลื่นมากที่สุด

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

จากการวิเคราะห์ข้อมูลกระแสน้ำพบว่ามีคลื่นเดี่ยวใต้น้ำ ปรากฏขึ้นที่สถานีตรวจวัดที่ 1 เพียงสถานีเดียว เป็นไปได้ว่าคลื่น เกิดการแตกตัวไปก่อนที่จะเคลื่อนที่เข้าสู่สถานีตรวจวัดที่ 2 โดยที่ โพรไฟล์อุณหภูมิ ความเค็ม และความหนาแน่นบริเวณใกล้ สถานีตรวจวัดที่ 1 แสดงดังภาพที่ 4 คลื่นที่ตรวจพบที่สถานี ตรวจวัดที่ 1 เป็นคลื่นเดี่ยวใต้น้ำชนิดกดลง (ภาพที่ 5ก) สังเกต ้ได้จากเส้นไอโซเทิร์มถูกกดลง เส้นไอโซเทิร์มที่ 24 องศาเซลเซียส ถูกกดลงมากที่สุด คลื่นที่ปรากฏแต่ละครั้งมีจำนวน 1-5 ลูก คลื่นที่ปรากฏตลอดช่วงการตรวจวัดมีจำนวนทั้งหมด 39 ลูก มีแอมปลิจูดอยู่ในช่วง 17-65 เมตร ระยะเวลาการเกิด 5-15 นาที ซึ่งการปรากฏของคลื่นเดี่ยวใต้น้ำชนิดกดลงในบริเวณนี้สอดคล้อง กับการวิเคราะห์ภาพถ่ายดาวเทียมของ Alper et al. (1997) ที่แสดงให้เห็นว่าเมื่อคลื่นเดี่ยวใต้น้ำเคลื่อนที่จากทะเลอันดามัน เข้าสู่ไหล่ทวีป คลื่นยังคงรักษาสภาพเดิมของการเป็นคลื่นชนิด ึกดลง นอกจากนั้นคลื่นยังเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสน้ำในแนวราบ เนื่องจากคลื่นดังกล่าวทำให้น้ำแบ่งเป็น 2 ชั้น กระแสน้ำในแนว

ทิศตะวันออก-ตกของน้ำชั้นบนมีทิศทางไหลเข้าสู่ชายฝั่งไหล สวนทางกับกระแสน้ำในแนวทิศตะวันออก-ตกของน้ำชั้นล่างซึ่ง มีทิศทางไหลออกจากชายฝั่ง โดยที่ความเร็วกระแสน้ำในแนวราบ ของน้ำทั้ง 2 ชั้นไม่คงที่ตามความลึก อีกทั้งจากภาพที่ 5ก จะเห็นได้ว่าคลื่นลูกที่ 2 และ 3 มีกระแสน้ำชั้นบนหนากว่า กระแสน้ำชั้นล่าง โดยปกติแล้วกระแสน้ำเนื่องจากคลื่นในทะเล อันดามันนั้น น้ำชั้นบนจะบางกว่ากระแสน้ำชั้นล่าง (Osborne & Burch, 1980; Hyder et al., 2005) เนื่องจากการแบ่งชั้นน้ำ เนื่องจากความหนาแน่นในแนวดิ่งในทะเลอันดามันนั้น น้ำชั้นบน บางกว่าน้ำชั้นล่าง คลื่นที่เกิดขึ้นจึงมีกระแสน้ำชั้นบนบางกว่า กระแสน้ำชั้นล่าง จากผลดังกล่าวทำให้คาดการณ์ได้ว่าเมื่อ คลื่นดังกล่าวเคลื่อนที่อยู่ในเขตน้ำลึกนั้นกระแสน้ำชั้นล่างมี ความหนากว่ากระแสน้ำน้ำชั้นบน จากนั้นเมื่อคลื่นเคลื่อนที่เข้าสู่ ไหล่ทวีปที่มีความลึกลดลง ความลึกที่ลดลงทำให้ความหนาของ น้ำชั้นล่างลดลงตามไปด้วย เป็นผลให้น้ำชั้นบนหนากว่าน้ำชั้นล่าง ซึ่งสอดคล้องกับการอภิปรายผลการศึกษาเชิงทฤษฎีของ Osborne & Burch (1980) ซึ่งตลอดการตรวจวัดนั้นมีคลื่นจำนวนเพียง 7 ลูกเท่านั้นที่น้ำชั้นบนมีบางกว่าน้ำชั้นล่าง นอกจากนี้ยังพบว่า คลื่นชนิดนี้เหนี่ยวนำให้เกิดกระแสน้ำในแนวดิ่ง มีกระแสน้ำไหลลง และไหลขึ้นตามลำดับ (ภาพที่ 5ข) โดยมีความเร็วกระแสน้ำ ในแนวดิ่งมีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับความเร็วกระแสน้ำในแนวราบ อย่างไรก็ตามคลื่นทุกลูกในบริเวณนี้ไม่ได้เหนี่ยวนำให้เกิดกระแสน้ำ ในแนวดิ่งเสมอไป อาจเป็นผลจากอันตรกิริยาระหว่างคลื่นกับ พื้นท้องน้ำในบริเวณไหล่ทวีป



ภาพที่ 4 โพรไฟล์อุณหภูมิ (ซ้าย) ความเค็ม (กลาง) และความหนาแน่น (ขวา) ในวันที่ 24 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2550 เวลา 16.30 น. ที่ใกลัสถานีตรวจวัดที่ 1



ภาพที่ 5 ก) (บน) คอนทัวน์อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส) ลูกศรแสดงเวกเตอร์ความเร็วกระแสน้ำในทิศตะวันออก-ตก (เมตรต่อวินาที) ในวันที่ 19 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2550 เวลา 0.00 น. ถึง 4.30 น. ที่สถานีตรวจวัดที่ 1 ข) (ล่าง) คอนทัวน์ความเข้มเสียงสะท้อน (count) ลูกศรแสดงเวกเตอร์ความเร็วกระแสน้ำในแนวดิ่ง (เซนติเมตรต่อวินาที) ในวันที่ 19 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2550 เวลา 0.00 น. 4.30 น. ที่สถานีตรวจวัดที่ 1

ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกระแสน้ำสูงสุดในแนวราบ เนื่องจากคลื่นเดี่ยวใต้น้ำแปรผันตรงกับแอมปลิจูดของคลื่นเดี่ยว ใต้น้ำ (ภาพที่ 6) โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เชิงเส้น (R²) มีค่าเท่ากับ 0.834 การที่ไม่ได้คำนึงคุณลักษณะของชั้นน้ำที่ แตกต่างกันของคลื่นแต่ลูกอาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนขึ้น อย่างไรก็ตามในอนาคตควรมีการเก็บข้อมูลในจำนวนที่มากขึ้น ในบริเวณที่คลื่นเคลื่อนที่มาจากแหล่งกำเนิดคลื่นเพียงแหล่งเดียว และนำมาวิเคราะห์เพื่อให้สามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่าง ปัจจัยดังกล่าวให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

การแจกแจงความถี่ของกระแสน้ำในแนวราบเนื่องจาก คลื่นเดี่ยวใต้น้ำ (soliton current pulses distribution frequency) ของน้ำชั้นล่าง (ภาพที่ 7) โดยที่กระแสน้ำของน้ำชั้นล่างเนื่องจาก คลื่นเดี่ยวใต้น้ำตลอดการตรวจวัดมีทิศทางอยู่ในช่วง 235.8 ถึง 293.9 องศา ซึ่งทิศทางของกระแสน้ำในแนวราบในช่วงดังกล่าว นั้น ทำให้คาดการณ์ได้ว่าคลื่นส่วนใหญ่ที่ปรากฏขึ้นในบริเวณนี้ อาจเกิดมาจากภูเขาใต้น้ำใกลับริเวณ 8° 50′ เหนือ ลองติจูด 94° 56′ (Alper *et. al.*, 1997) ในทะเลอันดามัน และจะเห็นได้ว่า ความแตกต่างของทิศทางของกระแสน้ำดังกล่าวนั้นมีค่าสูงสุดถึง 58.1 องศา อีกทั้งจากการศึกษาของ Osborne & Burch (1980) โดยการตรวจวัดคลื่นชนิดนี้ในทะเลอันดามัน พบว่าคลื่นในกลุ่ม มีการจัดเรียงตัวตามแอมปลิจูดโดยเรียงจากมากไปน้อย สอดคล้อง กับสมการที่ 9 กล่าวคือคลื่นที่มีแอมปลิจูดสูงกว่าจะเคลื่อนที่ ้ด้วยความเร็วสูงกว่า ดังนั้นจึงเคลื่อนที่นำหน้าคลื่นที่มีแอมปลิจูด ต่ำกว่า ดังนั้นถ้าคลื่นเกิดมาจากแหล่งกำเนิดคลื่นเดียวก็ควรจะมี การจัดเรียงตัวตามแอมปลิจูดตามที่ได้กล่าวมา แต่จากการตรวจวัด ในบริเวณชายฝั่งตะวันตกของหมู่เกาะสิมิลันกลับพบว่าคลื่นที่ เคลื่อนที่ผ่านบริเวณนี้แต่ละครั้งมีทั้งการจัดเรียงตัวตามแอมปลิจด ทั้งจากมากไปน้อย น้อยไปมาก และไม่มีการจัดเรียงตัวตาม แอมปลิจูดอย่างเป็นระเบียบ ดังนั้นคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณนี้ ้น่าจะเกิดมาจากหลายแหล่งกำเนิดในทะเลอันดามัน นอกจากนี้ จากการวิเคราะห์ภาพถ่ายเรดาร์ของ Alper et. al. (1997) แสดง ให้เห็นว่ามีคลื่นเคลื่อนที่จากบริเวณแนวปะการังน้ำตื้น (shallow reefs) ที่ละติจูด 6° 10′ เหนือ ลองติจูด 95° ตะวันออกเข้าสู่ บริเวณชายฝั่งตะวันตกของหมู่เกาะสิมิลันอีกด้วย จึงคาดการณ์ว่า คลื่นเดี่ยวใต้น้ำที่เคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณชายฝั่งตะวันตกของ หมู่เกาะสิมิลันมาจากอย่างน้อย 2 แหล่งกำเนิดคลื่นในทะเล อันดามัน ได้แก่ ภูเขาใต้น้ำใกล้บริเวณ 8° 50′ เหนือ ลองติจูด 94° 56' และบริเวณแนวปะการังน้ำตื้นที่ละติจูด 6° 10' เหนือ ลองติจูด 95° ตะวันออก



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกระแสน้ำสูงสุดในแนวราบเนื่องจากคลื่นเดี่ยวใต้น้ำกับแอมปลิจูดของคลื่นเดี่ยวใต้น้ำ





96 Charlie Krongsaksiri, Pramot Sojisuporn, Somkiat Khokiattiwong and Claudio Richter / Burapha Sci. J. 14 (2009) 1 : 88-98

มาจากตะกอนที่อยู่บนพื้นท้องน้ำ การฟุ้งกระจายของตะกอน บริเวณพื้นท้องน้ำนั้นน่าจะเกิดจากการเหนี่ยวนำของกระแสน้ำ เนื่องจากคลื่นชนิดนี้ที่บริเวณใกล้พื้นท้องน้ำ (Quaresma *et al.*, 2007) นอกจากนั้นยังพบว่าคลื่นเดี่ยวใต้น้ำที่มีแอมปลิจูด 36 เมตร ขึ้นไปจึงทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของความเข้มเสียงสะท้อนบริเวณ ใกล้พื้นท้องน้ำ (ภาพที่ 8) เป็นไปได้ว่าคลื่นที่มีแอมปลิจูด 36 เมตร ขึ้นไปจึงทำให้เกิดการฟุ้งกระจายของตะกอนบริเวณพื้นท้องน้ำ

คลื่นเดี่ยวใต้น้ำบริเวณชายฝั่งตะวันตกของหมู่เกาะสิมิลัน ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของความเข้มเสียงสะท้อนตามแนวดิ่ง ในขณะที่คลื่นปรากฏ (ภาพที่ 5ข) โดยที่คลื่นจำนวน 22 ลูก ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของความเข้มเสียงสะท้อนบริเวณใกล้ พื้นท้องน้ำอย่างฉับพลัน การเพิ่มขึ้นของค่าความเข้มเสียงสะท้อน แสดงถึงจำนวนอนุภาคในมวลน้ำที่เพิ่มมากขึ้น คาดว่าอนุภาค บริเวณใกล้พื้นท้องน้ำที่เพิ่มขึ้นนั้นมาจากตะกอนที่ฟุ้งกระจายขึ้น



ภาพที่ 8 การเปลี่ยนแปลงความเข้มเสียงสะท้อนบริเวณใกล้พื้นท้องน้ำที่ตอบสนองต่อคลื่นเดี่ยวใต้น้ำแต่ละลูกที่แอมปลิจูดต่างๆ

ความน่าจะเป็นที่คลื่นเดี่ยวใต้น้ำจะปรากฏขึ้นแปรผันตามพิสัย ของน้ำขึ้นน้ำลงสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Hyder *et. al.* (2005) ที่ทำการตรวจวัดคลื่นเดี่ยวใต้น้ำบริเวณทะเลอันดามันเหนือ (ละติจูด 14° 12′ เหนือ ลองติจูด 94° 10′ ตะวันออก)

ความน่าจะเป็นที่คลื่นเดี่ยวใต้น้ำจะปรากฏขึ้นบริเวณ ชายฝั่งตะวันตกของหมู่เกาะสิมิลัน (ตารางที่ 2) ความน่าจะเป็น ที่คลื่นจะปรากฏขึ้นสูงสุด (100%) ระหว่างน้ำเกิด (spring tide) และไม่มีการปรากฏขึ้นของคลื่นระหว่างน้ำตาย (neap tide)

ตารางที่ 2 การปรากฏของคลื่นเดี่ยวใต้น้ำในพิสัยของน้ำขึ้นน้ำลงแต่ละช่วง

พิสัยของน้ำขึ้นน้ำลง (เมตร)	จำนวนวัฏจักรน้ำขึ้นน้ำลง ที่ปรากฏ (ครั้ง)	จำนวนคลื่นใต้น้ำ ที่ปรากฏ (ครั้ง)	ความน่าจะเป็นที่คลื่นเดี่ยว ใต้น้ำปรากฏ (%)
< 0.8	3	0	0
0.8 - 1.2	4	2	50
1.2 - 1.6	3	2	67
> 1.6	10	10	100

5. สรุป

คลื่นเดี่ยวใต้น้ำที่เคลื่อนที่จากทะเลอันดามันเข้าสู่บริเวณ ชายฝั่งตะวันตกของหมู่เกาะสิมิลันในฤดูมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ เป็นคลื่นเดี่ยวใต้น้ำชนิดกดลงซึ่งคาดว่าคลื่นส่วนใหญ่เกิดขึ้นบริเวณ ภูเขาใต้น้ำที่ละติจูด 8° 50′ เหนือ ลองติจูด 94° 56′ ตะวันออก คลื่นที่ตรวจพบมีแอมปลิจูดอยู่ในช่วง 17 ถึง 65 เมตร ระยะเวลา การเกิด 5 ถึง 15 นาที ขนาดของความเร็วกระแสน้ำสูงสุดและ ต่ำสุดในแนวราบเนื่องจากคลื่นชนิดนี้มีค่าเท่ากับ 1.33 และ 0.20 เมตรต่อวินาทีตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าความเร็วกระแสน้ำ สูงสุดในแนวราบเนื่องจากคลื่นเดี่ยวใต้น้ำแปรผันตรงกับแอมปลิจูด ของคลื่น นอกจากนั้นยังพบการเพิ่มขึ้นของความเข้มเสียงสะท้อน ตามแนวดิ่งในขณะที่คลื่นปรากฏ ทำให้คาดการณ์ว่าคลื่นเดี่ยว ใต้น้ำอาจก่อให้เกิดการฟุ้งกระจายของตะกอนจากพื้นท้องน้ำ

ในการศึกษาพฤติกรรมของคลื่นเดี่ยวใต้น้ำในบริเวณ ชายฝั่งตะวันตกของหมู่เกาะสิมิลันในครั้งนี้เป็นการตรวจวัด ในช่วงฤดูมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ ฤดูกาลที่เปลี่ยนแปลงอาจ ส่งผลให้การแบ่งชั้นน้ำเนื่องจากความหนาแน่นในแนวดิ่งใน ทะเลอันดามันเกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งอาจส่งผลต่อพฤติกรรม ของคลื่นเดี่ยวใต้น้ำเกิดในบริเวณดังกล่าวด้วย ดังนั้นในอนาคต ควรทำการตรวจวัดในฤดูมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ เพื่อศึกษา พฤติกรรมของคลื่นเดี่ยวใต้น้ำที่อาจจะเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. อนุกูล บูรณประทีปรัตน์ ภาควิชาวาริชศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่กรุณาสละเวลาช่วยตรวจแก้ไขต้นฉบับ และให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อานนท์ สนิทวงศ์ ณ อยุธยา ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้การสนับสนุน การวิจัยในครั้งนี้ งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยภายใต้โครงการ ความร่วมมือไทย-เยอรมันระหว่าง National Research Council of Thailand และ Deutsche Forschungsgemeinschaft (NRCT-DFG)

เอกสารอ้างอิง

- Alper, W., Wang-Chen, H., & Hock, L. (1997). Observation of internal waves in the Andaman Sea by ERS SAR. The third proceeding ERS Symposium on Space at the Service of our Environment in Italy, 1287-1291.
- Gardner, C.S., Green, J.M., Kruskal, M.D., & Miura, R.M. (1967). Method for solving the Korteweg-deVries equation. *Physics Revolution Letter*, *19*, 1095-1097.
- Hyder, P., Jeans, D.R.G., Cauquil, E., & Nerzic, R. (2005). Observation and predictability of internal solitons in the northern Andaman Sea. *Applied Ocean Research, 27*, 1-11.
- Inall, M.E., Shapiro, G.I., & Sherwin, T.J. (2001). Mass transport by non-linear internal waves on the Malin Shelf. *Continental Shelf Research, 21*, 1449-1472.
- Jeans, D.R.G., & Sherwin, T.J. (2001). The variability of strongly non-linear solitary internal waves observed during an upwelling season on Portuguese shelf. *Continental Shelf Research, 21*, 855-1878.
- Osborne, A.R., & Burch, T.L. (1980). Internal solitons in the Andaman Sea. *Science, 208*, 451-460.
- Ostrovsky, L.A., & Stepanyants, Y.A. (2005). Internal solitons in laboratory experiments: Comparison with theoretical models. *Chaos, 15*, 037111-1 - 037111-28.
- Quaresma, L.S., Vitorino, J., Oliveira, A., & Da Silva, J.C. (2007). Evidence of sediment resuspension by nonlinear internal waves on the western Portuguese mid-shelf. *Marine Geology, 246*, 123-143.
- Susanto, R.D., Mitnik, L.,& Zheng, Q. 2005. Ocean internal waves observed in the Lombok Strait. Oceanography, 18, 80-87.
- Yanagi, T. (1999). *Coastal Oceanography*. Tokyo: Terra Scientific Publishing.