

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 คลื่น (Wave)

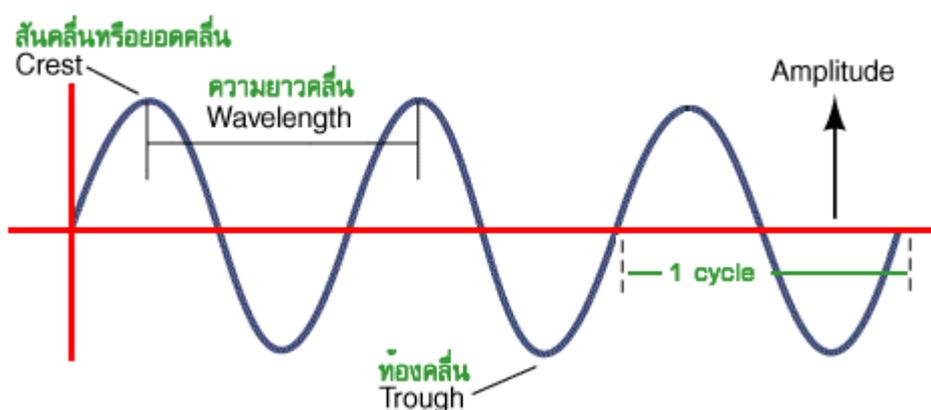
2.1.1 การเกิดคลื่น (Wave Generation) คือ การเคลื่อนที่ของพลังงานผ่านตัวกลางโดยที่ตัวกลางมีการจัดเป็นศูนย์กลาง คลื่นเกิดขึ้นบริเวณรอยบรรจบของตัวกลาง 2 ชนิด คือ ผิวทะเลกับบรรยากาศ บางครั้งเกิดคลื่นในตัวกลางชนิดเดียวแต่ความหนาแน่นต่างกัน คลื่นบนผิวทะเลเป็นแบบคลื่นแรงดึงดูด (Gravity Wave) คือ ใช้แรงดึงดูดของโลกเป็นตัวการทำให้คลื่นสงบ คลื่นบนผิวทะเลอีกชนิดเป็นคลื่นผิวเล็กๆ เรียกว่า คลื่นเกิดจากดึงดูดระหว่างโมเลกุลของน้ำ (Capillary Wave) คลื่นนี้จะใช้แรงดึงผิวของน้ำทำให้ผิวน้ำสงบเมื่อปราศจากลมพัด คลื่นผิวน้ำจัดเป็นคลื่นตามขวางโดยคลื่นและพลังงานคลื่นเคลื่อนที่ในแนวราบในขณะที่ผิวน้ำขยับขึ้นลงในแนวตั้ง คลื่นในทะเลส่วนใหญ่เป็นคลื่นที่เคลื่อนที่ไปข้างหน้า (Progressive Wave) คือ มีสันคลื่นและท้องคลื่นเคลื่อนที่ผ่านจุดอ้างอิงใดๆ จุดหนึ่งในทะเลสลับกันไปอย่างต่อเนื่อง เมื่อใดที่คลื่นวิ่งกระทบขอบฝั่งจะเกิดการสะท้อนกลับ คลื่นที่วิ่งเข้ามาจะผสมกับคลื่นที่สะท้อนออกไปเกิดเป็นคลื่นนิ่ง (Standing Wave) คือ มีบางจุดของผิวน้ำที่ระดับน้ำกระเพื่อมขึ้นสูงแล้วต่ำสลับกันไป (ปฏิบัพ หรือ Antinode) และบางจุดที่ระดับทรงอยู่กับที่ตลอดเวลา (บัพหรือ Node) (วิไลลักษณ์ ตั้งเจริญ, 2540 : 12)

2.1.2 สาเหตุของการเกิดคลื่น

1. ลม
2. แผ่นดินไหว ภูเขาไฟระเบิด แผ่นดินใต้น้ำถล่ม
3. แรงดึงดูดจากดวงอาทิตย์และดวงจันทร์
4. การเปลี่ยนแปลงความกดดันอากาศ
5. ข้อแตกต่างของความหนาแน่นระหว่างมวลน้ำชั้นบนและล่าง
6. เมื่อกระแสน้ำไหลผ่านพื้นที่องทะเลซึ่งไม่เรียบ

คลื่นที่ปรากฏให้เราเห็นเป็นประจำทุกวัน เป็นคลื่นที่เกิดจากลมเป็นส่วนใหญ่ (Wind Waves) ส่วนคลื่นที่เกิดจากสาเหตุอื่น มักจะมองไม่เห็นเพราะเกิดขึ้นในระหว่างชั้นของน้ำ (Internal Waves) หรือเป็นคลื่นที่มียอดคลื่นเตี้ยมาก และมีคาบของคลื่นยาวนานมาก (Tides, Tsunami) น้ำขึ้นน้ำลงเป็นคลื่นชนิดหนึ่ง มีความยาวคลื่นมากที่สุดประมาณ 20,000 กิโลเมตร (ประมาณครึ่งหนึ่งของเส้นรอบวงโลก) และมีคาบของคลื่นนานมากประมาณ 12 วัน 25 นาที (ประมาณครึ่งหนึ่งของเวลาที่ดวงจันทร์โคจรรอบโลก) เนื่องจากเกิดจากแรงดึงดูดของดวงอาทิตย์และดวงจันทร์ ซึ่งมีต่อเนื่องกันตลอดเวลา คลื่นน้ำขึ้น-น้ำลงจึงไม่อิสระในการเคลื่อนที่ ต้องคล้อยตามแรงดึงดูดหรือคล้อยตามระบบการหมุนของโลก ดวงอาทิตย์ และดวงจันทร์ เรียกว่า คลื่นในควบคุม (Forced Waves) ส่วนคลื่นที่เกิดจากแรงระเบิด แผ่นดินไหว แผ่นดินใต้น้ำถล่ม และภูเขาไฟระเบิด เป็นคลื่นอิสระ (Free Wave) หมายความว่า ครั้งหนึ่งเมื่อมีแรงมากระทำให้เกิดแล้วคลื่นจะเคลื่อนที่ไปได้ตลอด ไม่ต้องมีแรงมากระทำหรือคอยผลักดันอีก คลื่นพวกนี้มีความเร็วสูงมากและยอดคลื่นเตี้ยมากเมื่อเทียบกับความยาวคลื่น แรงดึงดูดของโลกจึงไม่ค่อยมีอำนาจในการรุดลากหรือทำลาย ส่วนแรงจุดที่เกิดจากแรงดึงผิวก็มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความเร็วคลื่น คลื่นเหล่านี้เป็นคลื่นขนาดใหญ่ (คาบของคลื่นมากกว่า 5 นาที) โดยธรรมชาติถือว่าเป็นการถ่ายทอด (Propagate) ทั้งพลังงานและมวลน้ำจึงมีแรงเสมือนเข้ามาเกี่ยวข้อง ส่วนคลื่นที่เกิดจากลมอาจเป็นทั้งคลื่นอิสระและคลื่นในควบคุม (มรรณพ บรรพพงศ์. 2533 : 21)

2.1.3 ส่วนประกอบของคลื่น



ภาพที่ 2 องค์ประกอบของคลื่น

(ที่มา : มรรณพ บรรพพงศ์. 2533 : 24)

1. ยอดคลื่น คือ ส่วนที่สูงที่สุดของคลื่น (Crest)
2. ท้องคลื่น คือ ส่วนที่ต่ำที่สุดของคลื่น (Trough)
3. ความสูงของคลื่น (Wave Height; H) คือ ผลต่างระหว่างยอดคลื่นกับท้องคลื่น มีหน่วยเป็นเมตร (m)
4. ความยาวคลื่น (Wave Length; λ) คือ ความยาวของคลื่น 1 คลื่น เป็นระยะทางที่วัดระหว่างจุดสองจุดที่สั้นที่สุดบนคลื่นที่เฟสตรงกัน มีหน่วยเป็นเมตร (m)
5. คาบคลื่น (Wave Period; T) คือ เวลาที่ยอดคลื่น 2 ลูกจะเคลื่อนที่ผ่านจุดใดจุดหนึ่งที่อยู่คงที่ หน่วยเป็นวินาที (s)
6. ความถี่ของคลื่น (Wave Frequency; f) คือ จำนวนลูกคลื่นที่ผ่านจุดสังเกตภายในหนึ่งหน่วยเวลา มีค่าเป็นส่วนผกผันกับคาบเวลา มีหน่วยเป็น วินาที⁻¹ (s⁻¹) หรือ เฮิรตซ์ (Hz)

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.1)$$

7. อัตราเร็วของคลื่น (Wave Speed; v) คือ ระยะทางที่คลื่นเคลื่อนที่ได้ในหนึ่งหน่วยเวลา และเนื่องจากขณะคลื่นเคลื่อนที่ไปด้วยอัตราเร็วค่าหนึ่ง เฟสของคลื่นก็เคลื่อนที่ไปด้วยอัตราเร็วเท่ากัน ดังนั้นในบางครั้งจึงเรียกว่า อัตราเร็วเฟส (Phase Speed) ของคลื่น มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที (ms⁻¹) สามารถคำนวณได้จาก

$$v = f\lambda \quad (2.2)$$

8. แอมพลิจูด (Amplitude; A) คือ ความสูงระหว่างระดับน้ำนิ่งถึงยอดคลื่น (Crest) หรือท้องคลื่น (Through) เป็นการขจัดสูงสุด มีหน่วยเป็นเมตร (m)

$$H = 2a \quad (2.3)$$

9. อนุภาคน้ำ (Particle) คือ การเคลื่อนที่หมุนเป็นวงกลมตามผิวหน้าของคลื่น ด้วยความเร็ว

$$v = \frac{2\pi a}{T} = \frac{\pi H}{T} \quad (2.4)$$

10. ความชันของคลื่น (Steepness) คือ อัตราส่วนระหว่างความสูงของคลื่นกับความยาวคลื่น

$$\text{steepness} = \frac{H}{L} \quad (2.5)$$

2.1.4 ขนาดของคลื่น

คลื่นที่ปรากฏในธรรมชาติมีรูปร่างและขนาดแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับมหาสมุทร เขตทางภูมิศาสตร์และฤดูกาล โดยหลักเกณฑ์เบื้องต้นขนาดของคลื่นขึ้นอยู่กับ

1. ความเร็วลม (Wind Speed; W)
2. ระยะทางที่ลมพัดผ่าน (Fetch; F)
3. ช่วงเวลาที่ลมพัดต่อเนื่องกันในทิศทางคงที่ (Duration; D)

ถ้าใช้คาบของคลื่น (T) และความสูงของคลื่น (H) เป็นเครื่องวัดขนาดของคลื่น สามารถเขียนเป็นสัญลักษณ์ ได้ดังนี้

$$T, H = f(W, F, D)$$

ช่วงการเปลี่ยนแปลงฤดูกาล อากาศเหนือแผ่นดินและแผ่นน้ำมีลักษณะแตกต่างกัน มักทำให้เกิดลมหรือพายุที่มีความเร็วสูงทำให้ทะเลมีคลื่นขนาดใหญ่กว่าในเวลาปกติ คลื่นในทะเลเปิด (Open Sea) ซึ่งมีระยะทางที่ลมพัดผ่านยาว (Fetch) ย่อมมีขนาดใหญ่กว่าคลื่นในทะเลปิด (Lakes, Bays และ Marginal Sea) นักสมุทรศาสตร์ได้พยายามคิดค้นสมการความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของคลื่นกับปัจจัยของลม พบว่า

$$H_{\max} = \frac{0.26}{g} W^2 \quad (2.6)$$

$$H_{\max} = \frac{1}{3} \sqrt{F} \quad (2.7)$$

เมื่อ

- H คือ ความสูงคลื่น มีหน่วยเป็น เมตร (m)
 W คือ ความเร็วลม มีหน่วยเป็น เมตร/วินาที (m/s)
 F คือ ระยะทางที่ลมพัดผ่าน มีหน่วยเป็น กิโลเมตร (km)

2.1.5 ชนิดของคลื่น

1. คลื่นพริ้ว (Ripple) คลื่นเกิดจากลม (Wind Wave) และ คลื่นใต้น้ำ (Swell) เกิดจากลมตรงรอยต่อระหว่างบรรยากาศกับผิวน้ำ คลื่นพริ้วจะมีขนาดเล็กๆ บนผิวน้ำ ส่วนคลื่นใต้น้ำ คือ คลื่นเนื่องจากลมที่เคลื่อนตัวมาจากทะเลไกล จะมีคาบและความสูงคงที่

2. คลื่นใต้น้ำ (Internal Wave) คือ คลื่นระหว่างชั้นน้ำ เกิดจากน้ำมีความหนาแน่นไม่เท่ากัน เช่น ชั้นน้ำจืดลอยอยู่เหนือชั้นน้ำทะเลทำให้ความเร็วกระแสน้ำไม่เท่ากัน หรือมีสิ่งรบกวนระหว่างชั้นรอยต่อของน้ำ เช่น เรือแล่น เป็นต้น

3. สึนามิ (Tsunami) คือ คลื่นที่เกิดจากแผ่นดินไหวหรือแผ่นดินถล่มใต้น้ำ ทำให้น้ำเกิดการกระเพื่อมอย่างรุนแรง คลื่นสึนามิเป็นคลื่นคาบยาวที่เคลื่อนที่จากฟากมหาสมุทรหนึ่งไปยังฟากตรงข้ามได้อย่างรวดเร็ว

4. ผิวน้ำหรือระหว่างชั้นน้ำ (Gyroscopic-gravity Wave) คือ คลื่นมีคาบยาวเป็นชั่วโมง และได้รับอิทธิพลจากแรงโคริโอลิสเกิดจากหลายสาเหตุ เช่น แรงเฉือนจากลม การเปลี่ยนความกดอากาศ เป็นต้น

5. คลื่นที่กำเนิดจากรูปร่างและการหมุนของโลก (Rossby or Planetary Wave) เป็นคลื่นคาบยาวคลุมพื้นที่ขนาดใหญ่ เกิดแรงเฉือนจากลมเปลี่ยนแปลง หรือความไม่เสถียรของคอลัมน์น้ำแบบความหนาแน่นน้ำเปลี่ยนตามความลึก (Baroclinic) หรือ ความหนาแน่นน้ำคงที่ (Barotropic) เป็นต้น

6. น้ำขึ้นน้ำลง (Tide) คือ คลื่นผิวน้ำชนิดหนึ่งที่เกิดจากแรงดึงดูดของดวงจันทร์และดวงอาทิตย์

ตารางที่ 1 การแบ่งคลื่นตามคาบเวลาของคลื่น

คาบเวลา	ความยาวคลื่น	ชนิดของคลื่น
0 - 0.2 วินาที	เซนติเมตร	คลื่นพริ้ว (Ripple)
0.2 - 9 วินาที	ถึง 130 เมตร	คลื่นลม (Wind Wave)
9 - 15 วินาที	หลายร้อยเมตร	คลื่นใต้น้ำ (Swell)
15 - 30 วินาที	หลายหลายร้อยเมตร	คลื่นใต้น้ำที่มีขนาดใหญ่ Long Swell หรือ Forerunner
0.5 นาที – ชั่วโมง	พันกิโลเมตร	Long Period Wave รวมทั้ง สึนามิ (Tsunami)
12.4, 24.84 ชั่วโมง	หลายพันกิโลเมตร	น้ำขึ้นน้ำลง (Tide)

2.1.6 การจำแนกคลื่นในมหาสมุทรใช้เกณฑ์ในการแบ่งได้เป็น 3 แบบ

1. แรงที่ทำให้คลื่นก่อตัวขึ้น (Disturbing Force) หมายถึง พลังงานหรือแรงที่ทำให้คลื่นก่อตัวขึ้น ได้แก่ แรงลมหรือพายุ แรงสั่นสะเทือนจากปรากฏการณ์ทางธรณีวิทยาใต้พื้นท้องมหาสมุทรหรือ แรงที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแรงดึงดูดระหว่างโลก ดวงจันทร์ และดวงอาทิตย์ ร่วมกับผลจากการหมุนของโลก

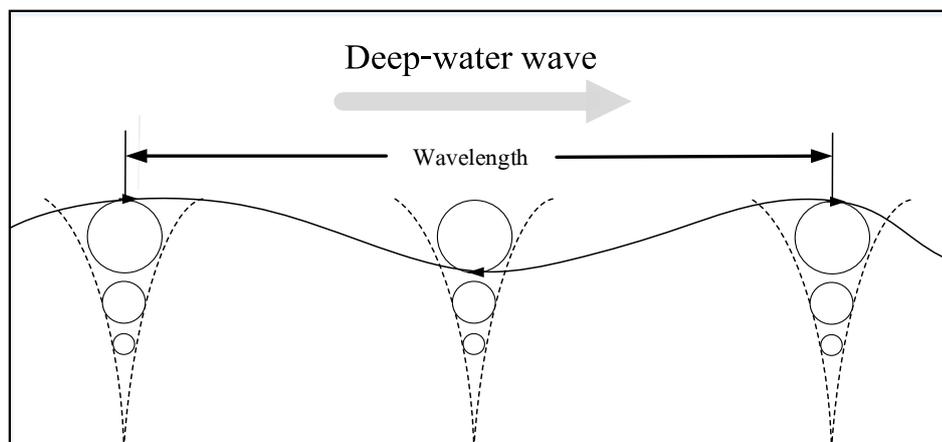
2. แรงดึงดูระหว่างโมเลกุลของน้ำ (Restoring Force) หมายถึง แรงที่พยายามทำให้ผิวน้ำกลับคืนสู่สภาวะปกติ ถ้าแรงนี้มีค่าสูงจะทำให้ผิวน้ำน้ำทะเลเรียบได้เร็ว

3. ความยาวคลื่นเป็นวิธีในการวัดขนาดของคลื่นได้

2.1.7 ลักษณะของคลื่น

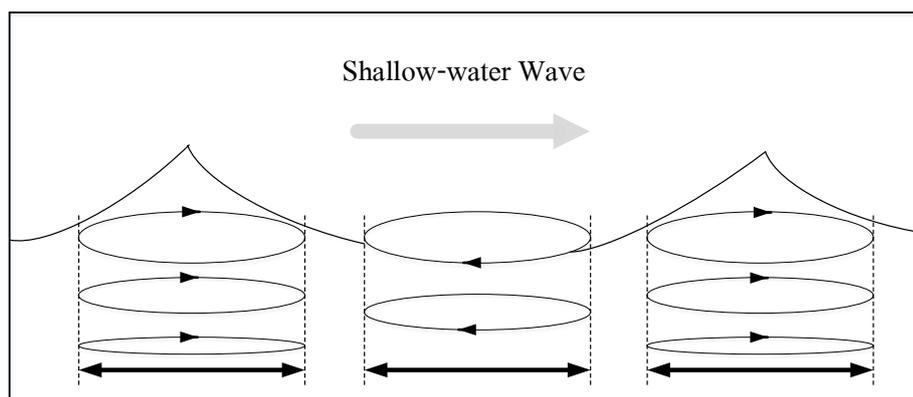
ลักษณะของคลื่นโดยทั่วไปบริเวณผิวน้ำในมหาสมุทรจะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ ระหว่างความยาวคลื่นและความลึก โดยความยาวคลื่นจะเป็นตัวกำหนดขนาดของการเคลื่อนตัวของโมเลกุลของน้ำภายในคลื่น ส่วนความลึกจะเป็นตัวกำหนดรูปร่างของคลื่น โดยลักษณะของคลื่นจะมี 3 แบบ ดังนี้

1. คลื่นน้ำลึก (Deep Water Waves) คือ คลื่นแบบนี้ของคลื่นจะมีรูปร่างเป็นวงกลมเมื่อคลื่นเดินทางในบริเวณที่มีความลึกมากกว่าครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น โดยชั้นน้ำด้านล่างต่ำลงไปจากระดับนี้จะไม่ได้รับผลใดๆ จากการเดินทางของคลื่นจากภาพที่ 3 จะเห็นได้ว่าวงกลมที่เกิดจากการหมุนของโมเลกุลของน้ำจะค่อยๆ เล็กลงตามระดับความลึก ตัวอย่างเช่น คลื่นที่เกิดจากลมที่มีความยาวคลื่น 20 เมตร จะเป็นคลื่นน้ำลึกเมื่อมันเดินทางผ่านบริเวณที่มีความลึกมากกว่า 10 เมตร (หมั่น โพธิ์วิจิตร. 2529 : 12)



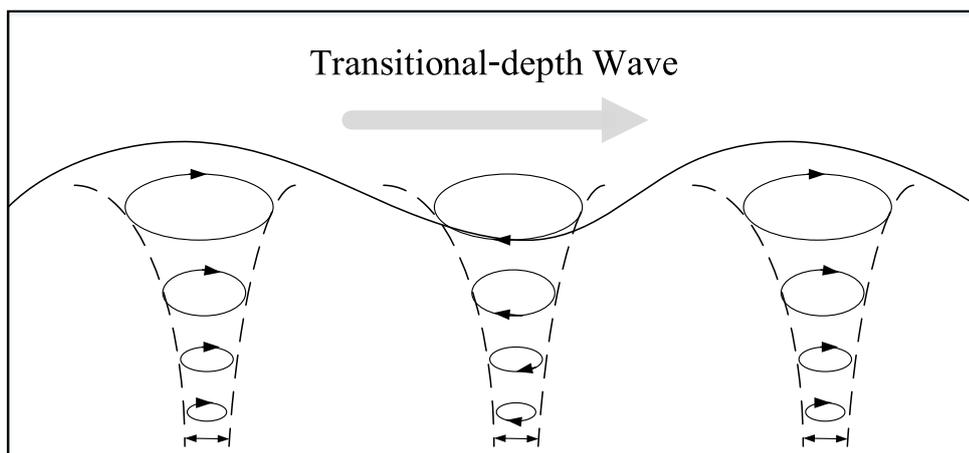
ภาพที่ 3 คลื่นน้ำลึก
(ที่มา : หมั่น โพธิ์วิจิตร. 2529 : 12)

2. คลื่นน้ำตื้น (Shallow Water Waves) คือ คลื่นที่เกิดจากลมเดินทางมาที่ตื้น เช่น ใกล้ชายฝั่งที่ความลึกน้อยกว่า 1 ใน 20 ของความยาวคลื่น วงของคลื่นจะค่อยๆ แบนลงเรื่อยๆ แต่จะมีขนาดเท่าเดิมจนกระทั่งเมื่อถึงพื้นทะเลน้ำจะไม่หมุนเป็นวงแต่จะเคลื่อนที่กลับไปกลับมาเท่านั้น คลื่นที่มีความยาวคลื่น 20 เมตร จะเป็นคลื่นน้ำตื้นเมื่อคลื่นเดินทางมาถึงบริเวณที่มีความลึกน้อยกว่า 1 เมตร ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 คลื่นน้ำตื้น
(ที่มา : หมั่น โพธิ์วิจิตร. 2529 : 13)

3. คลื่นส่งผ่าน (Transitional Waves) คือ เมื่อคลื่นเดินทางมาถึงบริเวณที่มีความลึกกว่า 1 ใน 20 ของความยาวคลื่น แต่น้อยกว่าครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น ลักษณะวงและขนาดของคลื่นจะเล็กลงเรื่อยๆ คลื่นที่มีความยาวคลื่น 20 เมตร จะเป็นการส่งผ่านของคลื่นเมื่อเดินทางมาถึงความลึกระหว่าง 10 เมตร ถึง 1 เมตร



ภาพที่ 5 คลื่นส่งผ่าน

(ที่มา : หมั่น โพธิ์วิจิตร. 2529 : 13)

คลื่นน้ำลึก คือ สภาพน้ำที่มีความลึกเพียงพอ คือ ลึกกว่า $L/2$ และไม่มีสิ่งกีดขวางใดๆ คลื่นเหล่านี้จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วค่อนข้างมาก สามารถประมาณความเร็วของคลื่นใน 2 ลักษณะคือ คลื่นน้ำลึกหรือคลื่นสั้น และคลื่นน้ำตื้นหรือคลื่นตามยาว ตารางที่ 2.2 จะเห็นว่าความเร็วของคลื่นจะขึ้นอยู่กับตัวพารามิเตอร์เพียงตัวเดียว คือ L ในกรณีที่เป็นคลื่นน้ำลึก (คลื่นสั้น) หรือ d ในกรณีที่เป็นคลื่นน้ำตื้น ความเร็วของคลื่นจัดอยู่ระหว่างคลื่นน้ำลึกและคลื่นน้ำตื้นสามารถคำนวณโดยใช้สมการที่ 2.8

$$v = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right)} \quad (2.8)$$

เมื่อ $\tanh(x) = \frac{(e^x - e^{-x})}{(e^x + e^{-x})}$ ถ้า x มีค่าน้อย $\tanh(x)$ จะมีค่าใกล้เคียงกับ x และถ้า x มีค่ามากกว่า $\pi \tanh(x)$ มีค่าใกล้

ตารางที่ 2 ความเร็วของคลื่นน้ำลึกและคลื่นน้ำตื้น

	คลื่นน้ำลึกหรือคลื่นสั้น	คลื่นน้ำตื้นหรือคลื่นยาว
อัตราส่วน d/L	$> 1/2$	$< 1/20$
ความเร็วคลื่นจากสมการ	$\sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}}$	\sqrt{gd}

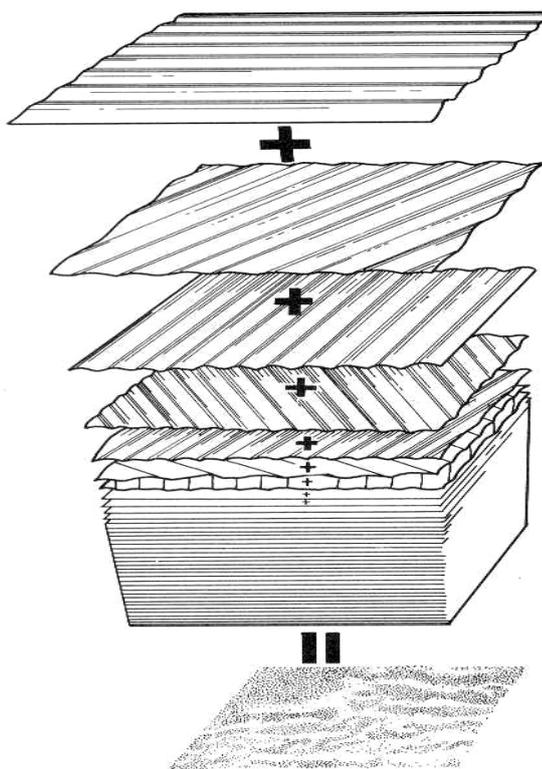
สำหรับน้ำลึก เมื่อแทนที่ v ด้วย λ/T จะได้ความสัมพันธ์ระหว่าง λ และ T ดังนี้

$$\lambda = \frac{g}{2\pi} T^2 \quad (2.9)$$

คลื่นเมื่อก่อตัวขึ้นครั้งแรกจะเป็นคลื่นน้ำลึก กระบวนการในการเกิดคลื่นนั้นมียุ่หลายทฤษฎีและยังไม่รู้กันอย่างชัดเจน แต่เกี่ยวข้องกับกระบวนการแกว่งตัวอย่างปั่นป่วนของลมเมื่อปะทะกับคลื่นผิวน้ำและส่งผ่านพลังงานจากบรรยากาศสู่มหาสมุทร จากการศึกษาพบว่า

1. ถ้าลมที่มีความเร็วสม่ำเสมอ
2. พัดผ่านผิวน้ำอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลาหนึ่ง
3. ตามระยะทางของผิวน้ำ (Fetch) ที่พอเพียงจะทำให้เกิดรูปแบบของคลื่นลักษณะหนึ่งซึ่งสัมพันธ์กับความเร็วลม

คลื่นในทะเลมีความซับซ้อนเนื่องจากเกิดจากการผสมผสานของคลื่นจากลมที่พัดด้วยความเร็วและทิศทางต่างๆ กัน ดังภาพที่ 6 จึงไม่สามารถวิเคราะห์คลื่นด้วยตาเปล่าได้ ต้องใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์เรียกว่าฮาร์โมนิก (Harmonic) หรือการวิเคราะห์สเปกตรัม (Spectral Analysis) ซึ่งคิดค้นโดยฟูเรียร์ (Fourier 1768-1830) โดยแยกข้อมูลที่ต่อเนื่องออกเป็นผลรวมขององค์ประกอบของคลื่นรูปไซน์ (Sine Wave) ย่อยๆ ที่มีความถี่และแอมพลิจูดต่างๆ กัน (หมั่น โพธิ์วิจิตร. 2529 : 18)



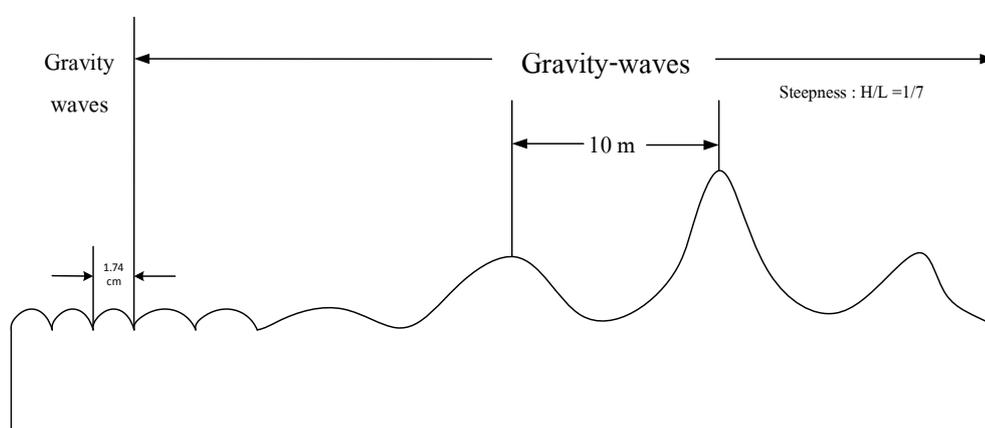
ภาพที่ 6 คลื่นที่เห็นบนผิวน้ำเกิดจากการซ้อนทับกันขององค์ประกอบคลื่นหลายขนาดเคลื่อนที่
ในทิศทางต่างๆ กัน
(ที่มา : หมั่น โพธิ์วิจิตร. 2529 : 19)

2.1.8 ชนิดของคลื่น

ลมเป็นสาเหตุหลักที่ก่อให้เกิดคลื่นขึ้นในน้ำระดับผิวน้ำ น้ำทะเลซึ่งมีความหนืด (Viscosity) เมื่อถูกลมพัดผ่านน้ำผิวน้ำจะยืดออกตามแรงลมแล้วจะหดตัวกลับเพื่อรักษาสมดุลด้วยแรงตึงผิว (surface tension) ทำให้น้ำผิวน้ำโค้งขึ้นและโค้งลง (Undulate) เกิดคลื่นขนาดเล็กขึ้นในที่สุด (Ripples or Wavelets) คลื่นขนาดเล็กๆ เหล่านี้จะปรากฏให้เห็นเมื่อมีลมพัดเท่านั้น ถ้าลมหยุดพัดคลื่นเหล่านี้จะสลายตัวเกือบทันที เมื่อมีลมพัดต่อเนื่องกันเป็นเวลานานพอสมควรคลื่นเหล่านี้จะค่อยๆ ขยายโตขึ้นเพราะผิวน้ำที่ขรุขระเนื่องจากมีคลื่นขนาดเล็กๆ ทำให้เกิดพื้นที่ผิวในส่วนที่จะรับลมเพิ่มขึ้น

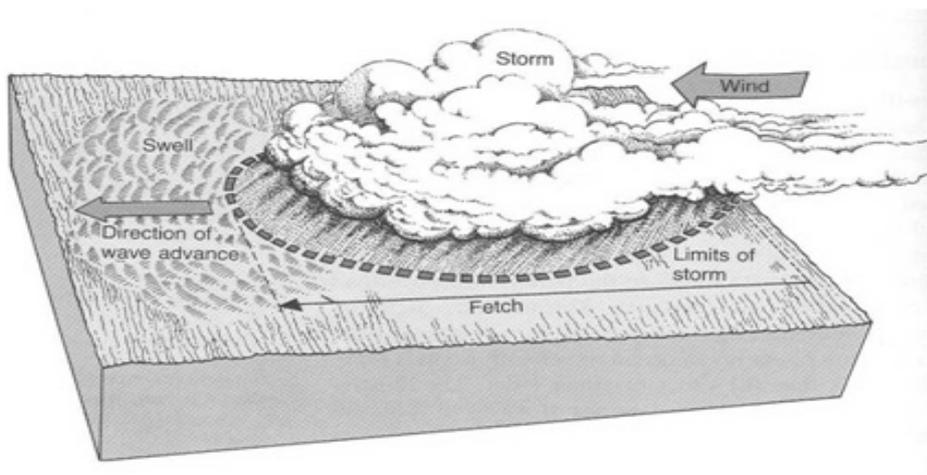
ในมหาสมุทรเปิดส่วนใหญ่จะมีความสูงน้อยกว่า 3 เมตร และมีความยาวคลื่นตั้งแต่ 60-150 เมตร คลื่นที่เกิดจากลมจะเริ่มต้นจากคลื่นเกิดจากคิงคูระหว่างโมเลกุลของน้ำ ซึ่งจะมียอดคลื่นเป็นรูปโค้งและท้องคลื่นเป็นรูปตัววี จะเกิดจากแรงเสียดทานเนื่องมาจากลมที่กระทำกับผิวน้ำ โดยแรงตึงผิวบริเวณผิวน้ำจะทำหน้าที่ต้านแรงลมเพื่อให้ผิวน้ำเรียบเหมือนเดิม

และทำให้เกิดคลื่น เมื่อการดึงดูดระหว่างโมเลกุลของน้ำทวีจำนวนมากขึ้นจะทำให้ผิวหน้าน้ำทะเลไม่เรียบ ซึ่งจะทำให้ปฏิสัมพันธ์ระหว่างลมและบริเวณผิวหน้าน้ำมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น จึงทำให้มีการถ่ายทอดพลังงานเข้าสู่ผิวหน้าน้ำมากตามไปด้วย ทำให้คลื่นที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยจะมีความยาวคลื่นมากกว่า 1.74 เซนติเมตร จัดเป็นคลื่นเกิดจากดึงดูดระหว่างโมเลกุลของน้ำ ซึ่งจะมีลักษณะเป็นเส้นโค้งรูปไซน์ ดังภาพที่ 7 คลื่นแรงดึงดูด ที่เกิดขึ้นใหม่ๆ โดยทั่วไปจะมีความยาวคลื่นมากกว่าความสูง 15-35 เท่า และเมื่อมีพลังงานส่งผ่านมากทำให้อัตราการเพิ่มความสูงเร็วว่าการเพิ่มความยาวคลื่นยอดคลื่นจะมีลักษณะแหลมขณะที่ท้องคลื่นจะโค้ง (มหรณพ บรรพพงศ. 2533 : 21)



ภาพที่ 7 กระบวนการเกิดคลื่นเนื่องจากลม เมื่อพลังงานจากลมผ่านเข้าสู่ผิวหน้า
น้ำในมหาสมุทร โดยเริ่มจาก Capillary Wave และเมื่อมีการสะสมพลังงาน
มากขึ้นขนาดของคลื่นก็จะเปลี่ยนไปเป็น Gravity Wave
(ที่มา : มหรณพ บรรพพงศ. 2533 : 23)

พลังงานจากลมจะทำให้ความสูง ความยาวคลื่น และความเร็วในการเคลื่อนตัวของคลื่นเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนเมื่อความเร็วในการเคลื่อนตัวของคลื่นเท่ากับความเร็วลม คลื่นจะมีขนาดใหญ่ที่สุดบริเวณที่ลมทำให้เกิดคลื่นลม ซึ่งคลื่นที่เริ่มเกิดขึ้นนี้จะมีขนาดเล็กและเคลื่อนที่ไปในทุกทิศทางและมีคาบและความยาวคลื่นต่างๆ กันไป สำหรับปัจจัยที่จะมีผลต่อการเพิ่มของพลังงานที่คลื่นจะได้รับ คือ (1.) ความเร็วลม (2.) ช่วงเวลา จะต้องนานพอสมควร และ (3.) ระยะทางที่ลมพัด (Fetch) ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 บริเวณคลื่นที่เกิดจากลม และ คลื่นที่เคลื่อนออกจากคลื่นใต้น้ำ
(ที่มา : มหรรณพ บรรพพงศ์. 2533 : 25)

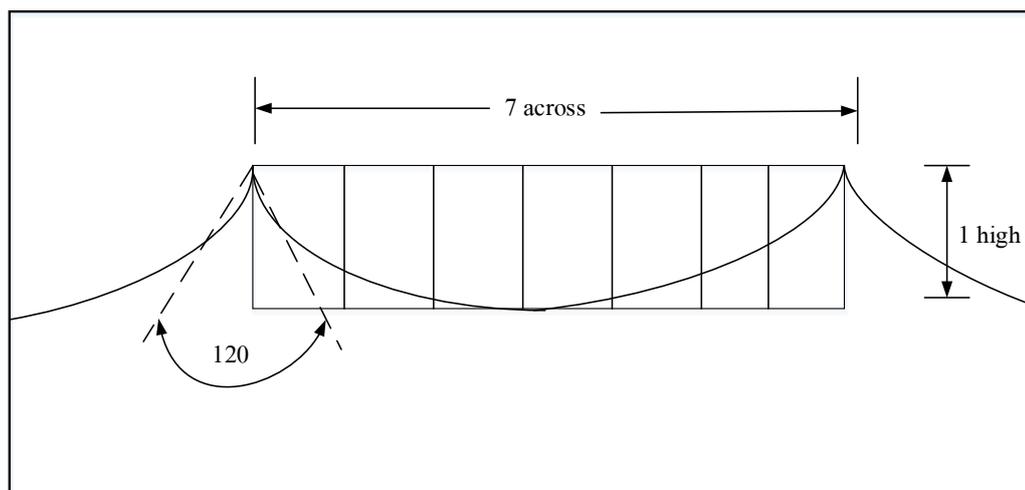
ความสูงของคลื่นจะมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพลังงานที่ผิวหน้าน้ำได้รับจากแรงลม ความสูงของคลื่นบริเวณทะเล โดยเฉลี่ยจะน้อยกว่า 3 เมตร แต่บางครั้งอาจสูงถึง 10 เมตร และคลื่นที่เกิดจากแรงลมที่มีความสูงมากที่สุดเท่าที่พบคือ 34 เมตร โดยบันทึกไว้ในปี ค.ศ. 1935 บริเวณมหาสมุทรแปซิฟิกตอนเหนือ เมื่อยอดคลื่นมีความสูงมากขึ้นโดยความชัน ซึ่งหาได้จากสัดส่วนระหว่างความสูงของคลื่นและความยาวคลื่นมากกว่า $1/7$ จะเกิดการแตกของคลื่นในมหาสมุทรเรียกว่า คลื่นที่แตกเป็นฟองสีขาว (Whitecap) การจำแนกกระแบลมที่ก่อให้เกิดคลื่นที่มีความสูงในระดับต่างๆ กัน

คลื่นเกิดจากลม มีหลายขนาดและมีความเร็วต่างกันจะค่อยๆ ปรากฏทรวงตรงให้เห็นชัดขึ้น กล่าวคือที่มีความเร็วมากกว่าจะวิ่งล้ำหน้าพวกที่เคลื่อนที่ช้ากว่า นับว่าเป็นการแยกคลื่นหลายชนิดซึ่งเกิดพร้อมกันออกจากกันตามธรรมชาติ คลื่นที่แยกออกจากกันแล้วจะมียอดคลื่น และท้องคลื่น ดีขึ้นกว่าเดิม เรียกคลื่นในตอนนี้ว่า คลื่นใต้น้ำ หมายถึง คลื่นที่เกิดขึ้นนอกเขตลมพัดยอดคลื่นเตี้ยมนกลมกว่าเดิมเล็กน้อย โดยธรรมชาติของคลื่นที่ค่อยๆ โตขึ้นในขณะที่มีลมพัดจะได้รับพลังงานจากลมเพิ่มขึ้น คลื่นจึงค่อยๆ มีความเร็วเพิ่มขึ้นในตอนแรกคลื่นเคลื่อนที่ช้ากว่าลมต่อมาจะเท่ากับลมและในที่สุดจะเร็วกว่าลม ด้วยเหตุนี้คลื่นจึงเคลื่อนที่ออกนอกเขตที่มีลมพัด ในธรรมชาติจึงเห็นคลื่นเคลื่อนที่นำหน้าลมหรือเคลื่อนที่เข้าหาฝั่งได้อย่างอิสระ โดยไม่มีลมพัดเลยจึงอาจเรียกคลื่นใต้น้ำว่าเป็นคลื่นอิสระ ในบริเวณที่มีคลื่นใต้น้ำ ผิวน้ำทะเลจะลดความสับสนและขรุขระมาก เริ่มมองเห็นคลื่นเคลื่อนที่อย่างเป็นระบบ คลื่นหลายขนาดและด้วยความเร็วต่างๆ กันจะเคลื่อนที่ตามหลังกันเป็นขบวน หรือเป็นกลุ่มมีลักษณะเฉพาะ คลื่นที่นำหน้าอาจรวมตัวเมื่อเข้าเขตที่มีความ

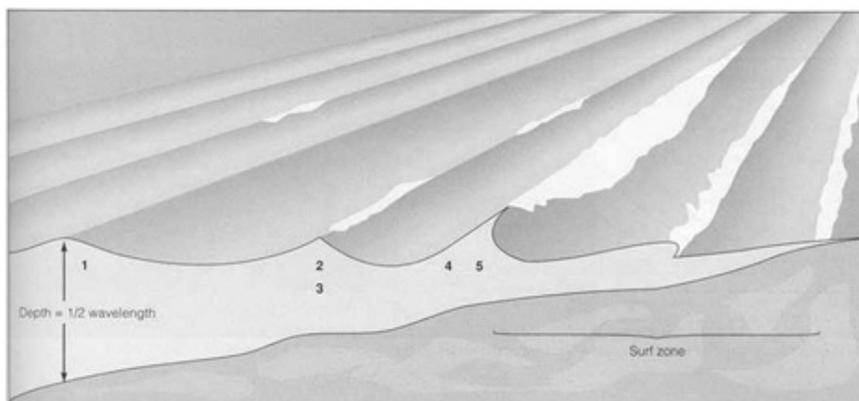
ต้น เช่น เกาะไต้ น้ำ สันทรายไต้ น้ำ ฯลฯ ในขณะที่คลื่นอายุสั้นกว่าแนวหลังจะวิ่งติดตามคลื่นที่หายไปในลักษณะนี้เราจะเห็นคลื่นตลอดเวลา

2.1.9 การแตกของคลื่น (Wave Breaking)

คลื่นจะแตกได้เมื่อยอดคลื่นแหลมเกินไป คือ มุมของยอดแหลมน้อยกว่า 120 องศา และความชันของยอด (อัตราส่วนระหว่างความสูงและความยาวคลื่น) น้อยกว่า 1/7 ที่ความชันดังกล่าวยอดคลื่นจะเคลื่อนที่เร็วกว่าฐานทำให้เสียความสมดุล จึงทำให้เกิดการแตกตัวและเมื่อพัดเข้าสู่ฝั่งจะเกิดการถ่ายทอดพลังงานจากคลื่นเข้าสู่ฝั่ง ซึ่งจะเรียกบริเวณนี้ว่าบริเวณไต้คลื่น ดังภาพที่ 9 ซึ่งจะมีการถ่ายทอดพลังงานเกิดขึ้นอย่างมากมาย ลักษณะการแตกของคลื่นมี 3 แบบด้วยกัน คือ (มณฑล แก่นมณี. สืบค้นเมื่อ 6 เมษายน 2555, จาก www.agri.kmitl.ac.th/elearning/courseware/aquatic/6_wave_breaking.html)



ภาพที่ 9 คลื่นจะแตกตัวเมื่ออัตราส่วนระหว่างความสูงและความยาวคลื่นน้อยกว่าหนึ่งต่อเจ็ด (ที่มา : มณฑล แก่นมณี. สืบค้นเมื่อ 6 เมษายน 2555, จาก www.agri.kmitl.ac.th/elearning/courseware/aquatic/6_wave_breaking.html)



ภาพที่ 10 การถ่ายทอดพลังงานของคลื่นเมื่อเข้าสู่ฝั่งก่อให้เกิดคลื่นที่ซัดฝั่ง
(ที่มา : มณฑล แก่นมณี. สืบค้นเมื่อ 6 เมษายน 2555, จาก www.agri.kmitl.ac.th/elearning/courseware/aquatic/6_wave_breaking.html)

1. พลังค์กึ่งเบรกเกอร์ (Plunging Breaker) เป็นคลื่นที่มีการปล่อยพลังงานอย่างรวดเร็วและรุนแรง เดินทางด้วยความเร็วสูง คลื่นจะม้วนตัวไปข้างหน้าและแตกออกอย่างรวดเร็ว เกิดบริเวณที่คลื่นเดินทางเข้าฝั่งที่มีความลาดชันมากน้ำจะคลุมอากาศไว้ทำให้มีการใช้พลังงานอย่างรวดเร็ว และมีเสียงดังเกิดขึ้น ดังภาพที่ 11



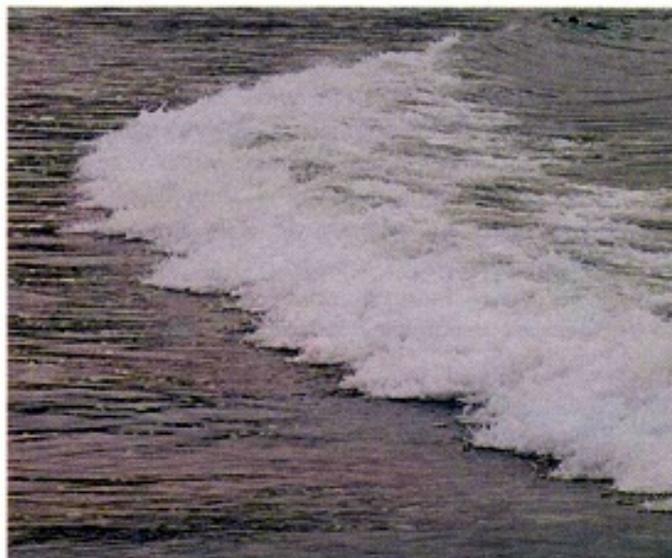
ภาพที่ 11 การแตกของคลื่นแบบพลังค์กึ่งเบรกเกอร์
(ที่มา : มณฑล แก่นมณี. สืบค้นเมื่อ 6 เมษายน 2555, จาก www.agri.kmitl.ac.th/elearning/courseware/aquatic/6_wave_breaking.html)

2. สฟิปลิ่งเบรกเกอร์ (Spilling Breaker) คลื่นจะแตกโดยยอดคลื่น ไค้งไปข้างหน้า ปลายยอดแตกเป็นฟองขาว ทางด้านหน้า และคลื่นจะเว้าทั้งสองข้างเรียกว่า ไชคลอยด์ (Cycloid) คลื่นแบบนี้จะมีความชันมากกว่า 0.01 โดยเฉพาะเมื่อมีลมพัดเข้าสู่ฝั่งในชายหาดที่มีความลาดเอียงน้อย ดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 การแตกของคลื่นแบบสฟิปลิ่งเบรกเกอร์
(ที่มา : มณฑล แก่นมณี. สืบค้นเมื่อ 6 เมษายน 2555, จาก
www.agri.kmitl.ac.th/elearning/courseware/aquatic/6_wave_breaking.html)

3. เซอร์จเบรกเกอร์ (Surging Breaker) เกิดกับชายฝั่งที่มีลักษณะแหว่ง (มีบางบริเวณที่น้ำซัดไม่ถึง) และมีความชันที่มีการเปลี่ยนแปลงความชันจากบริเวณที่มีความชันสูงมายังความชันน้อย คลื่นจะถอยหลังกลับและกระแทกกับคลื่นลูกหลังที่ไล่มา ดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 การแตกของคลื่นแบบเซอร์จเบรกเกอร์
(ที่มา : มณฑล แก่นมณี. สืบค้นเมื่อ 6 เมษายน 2555, จาก
www.agri.kmitl.ac.th/elearning/courseware/aquatic/6_wave_breaking.html)

นอกจากนี้ยังพบคลื่นบริเวณชายฝั่งอีกประเภทหนึ่งเรียกว่า กระแสน้ำชายฝั่ง (Longshore Current) และกระแสน้ำออกจากฝั่ง (Rip Current) โดยคลื่นที่เคลื่อนที่ถึงชายหาดหลังจากถ่ายทอดพลังงานให้แก่ชายหาดแล้วน้ำบางส่วนจะเคลื่อนไปยังชายหาดและถ้าคลื่นเหล่านั้นเกิดการซ้อนกัน จะเกิดเป็นกระแสน้ำเลียบชายฝั่ง บางครั้งกระแสน้ำเลียบชายฝั่งอาจไหลสวนทางมาพบกันจะเกิดเป็นกระแสน้ำเคลื่อนที่ออกจากฝั่งเป็นระยะทางไกลๆ ซึ่งจะเป็นอันตรายต่อผู้ที่ว่ายน้ำเล่นตามชายฝั่งและถ้าเกิดในระดับที่ลึกลงไป (Under Flow) จะยังเป็นอันตรายมากขึ้น

2.1.10 การเปลี่ยนทิศทางของคลื่น

1. การสะท้อน เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ไปปะทะสิ่งกีดขวางที่สามารถสะท้อนคลื่น ผลจากการปะทะทำให้อนุภาคของน้ำไม่สามารถเคลื่อนที่เป็นวงได้จึงเคลื่อนที่ไปทางด้านข้างของวัตถุที่ปะทะ โดยอนุภาคของน้ำจะเคลื่อนที่ขึ้นสูงเมื่อเคลื่อนที่เข้ามาที่วัตถุปะทะ และเคลื่อนที่ลงต่ำเมื่อเคลื่อนที่ออกมาจากวัตถุที่ปะทะ ปรากฏการณ์ดังกล่าวจะเห็นได้ชัดเจนตามบริเวณท่าเรือ อ่าวหรือสิ่งก่อสร้างขนาดใหญ่ที่มีลักษณะเป็นแผ่นกว้าง

2. การหักเห เป็นการโค้งงอของคลื่นซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงความลึกของน้ำ ทำให้ดูเหมือนว่าคลื่นเคลื่อนที่เข้าหาฝั่งในลักษณะที่ขนานกับฝั่งเสมอ การหักเหของคลื่นใต้น้ำอธิบายได้โดยใช้กฎของสเนลล์ เช่นเดียวกับที่ใช้ในการหักเหของแสง คลื่นในมหาสมุทรสามารถเขียนเส้นที่เรียกว่า เส้นตั้งฉาก ในทุกแห่งตั้งฉากกับยอดคลื่นเพื่อบอกทิศทางของการเคลื่อนที่ของคลื่น มุมที่เกิดขึ้นระหว่างเส้นตั้งฉาก และเส้นที่ลากตั้งฉากกับเส้นแสดงความลึกเท่า (Depth Contour) โดยค่านี้อาจมีความสัมพันธ์กับความแรงของคลื่นที่ความลึกต่างๆ กัน

3. การเลี้ยวเบนของคลื่น เป็นปรากฏการณ์ของคลื่นซึ่งเป็นไปตาม Huygen's law ซึ่งกล่าวว่าแต่ละจุดบนยอดคลื่นทำตัวเหมือนจุดกำเนิดจุดหนึ่งสำหรับยอดคลื่นใหม่อื่นๆ ได้โดยจะทำให้เกิดการโค้งงอแยกออกไปเมื่อพบกับสิ่งกีดขวางและจะต่างไปจากการสะท้อนของคลื่น โดยการแยกโค้งของคลื่นนี้จะแผ่ออกไปด้านข้างและก่อให้เกิดคลื่นใหม่ที่แตกต่างไปจากคลื่นที่มากระทบ วัตถุกีดขวางโดยการแยกโค้งของคลื่นจะเป็นประโยชน์อย่างมากในการสร้างกำแพงกันคลื่น เพราะจะทำให้ความสูงของคลื่นลดลงเนื่องจากคลื่นจะมีการแผ่กระจายออกไปด้านข้างทำให้หลังกำแพงกันคลื่นเป็นบริเวณที่สงบ (มณฑล แก่นมณี. สืบค้นเมื่อ 6 เมษายน 2555, จาก www.agri.kmitl.ac.th/elearning/courseware/aquatic/6_wave_breaking.html)

2.1.11 การเปลี่ยนแปลงเมื่อคลื่นเข้าหาฝั่ง

ก่อนที่คลื่นในกลุ่มคลื่นใต้น้ำ กลายเป็นคลื่นที่เรียกว่า โต้คลื่น ได้มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ทิศทางและอื่นๆ มากมาย จุดที่การเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นเริ่มที่ความลึกของน้ำประมาณครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น คลื่นที่เคลื่อนที่เข้าหาฝั่งตั้งแต่จุดนี้จนถึงจุดที่คลื่นแตก เรียกว่า คลื่นน้ำตื้น ฉะนั้นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างๆ เป็นการเปลี่ยนแปลงของคลื่นน้ำตื้นไปเป็นคลื่นน้ำตื้น คลื่นจะมีการเปลี่ยนแปลงดังนี้

1. ความเร็วคลื่นลดลง
2. ความยาวคลื่นลดลง
3. ความสูงคลื่นเพิ่มขึ้น
4. คาบของคลื่นยังคงเดิม
5. คลื่นสะท้อนกลับ
6. คลื่นเลี้ยวเบน
7. คลื่นเบน

2.1.12 ความสูงของคลื่น

ค่าความสูงของคลื่นทะเลเฉลี่ย (Significant Wave Height) โดยนำข้อมูลความสูงคลื่นมาเรียงลำดับจากน้อยไปหามาก ซึ่งนำความสูงคลื่นด้านยอดสูงจำนวน 1/3 ของยอดคลื่นทั้งหมดมาหาค่าเฉลี่ย เรียกว่า ความสูงของคลื่นทะเลเฉลี่ย นักสมุทรศาสตร์จะใช้ความสูงของคลื่นทะเลเฉลี่ยในการหาค่าพลังงานของคลื่น ซึ่งสัมพันธ์กับความสูงคลื่น เมื่อความเร็วลมเพิ่มความสูงคลื่น และพลังงานก็จะเพิ่มขึ้น และคาบเวลาที่มีพลังงานสูงสุดก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วลมกับสภาพท้องทะเลแสดงไว้ในตาราง Beaufort Scale เมื่อทราบ Beaufort Scale จะสามารถประมาณความเร็วลมและประมาณสภาพคลื่นที่พัฒนาได้เต็มที่แล้วที่พื้นที่บริเวณนั้น (ระยะเวลาที่ลมพัดและระยะทางของผิวน้ำเพียงพอ) เช่น Beaufort Scale ระดับ 5 ต้องมีลมพัด 10 ชั่วโมง ระยะทาง 100 กิโลเมตร Beaufort Scale ระดับ 8 ต้องมีลมพัด 40 ชั่วโมง ระยะทาง 1,000 กิโลเมตร นอกจากนี้ Beaufort Scale แล้วยังมีการจัดสถานะของทะเล (State of the Sea) ของ World Meteorological Organization – No. 306 (1971) ซึ่งกรมอุตุนิยมวิทยาใช้พยากรณ์คลื่นในทะเลดังนี้

ตารางที่ 3 นิยามสถานะของทะเล

เลขรหัส	ลักษณะของทะเล	อักษรย่อ	ความสูงของคลื่น (เมตร)
0	ทะเลสงบ (เรียบเหมือนกระจก-glassy) calm	-	0
1	ทะเลสงบ (คลื่นน้อยๆ – ripples) calm	ง, พ	0.0-0.1
2	ทะเลเรียบ (เป็นระลอกน้อยๆ -wavelets) smooth	ร	0.1-0.5
3	ทะเลมีคลื่นเล็กน้อย	คน	0.5-1.25
4	ทะเลมีคลื่นปานกลาง	คป	1.25-2.5
5	ทะเลมีคลื่นจัด	คจ	2.5-4.0
6	ทะเลมีคลื่นจัดมาก	จม	4.0-6.0
7	ทะเลมีคลื่นใหญ่	คญ	6.0-9.0
8	ทะเลมีคลื่นใหญ่มาก	คญม	9.0-14.0
9	ทะเลมีคลื่นใหญ่และจัดมาก (ทะเลบ้า)	-	>14

(ที่มา : สุชาติ สรวินุตร. สืบค้นเมื่อ 22 เมษายน 2555, จาก www.marine.tmd.go.th/thai/oceanwave-thai.html)

2.2 พลังงานจากคลื่น (Wave Energy)

พลังงานคลื่นที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้จำนวนมาก เพียงแต่มีขนาดช่วงกว้างของคลื่นเล็กและไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับแรงลมที่พัดผ่าน ฉะนั้นในการจะนำพลังงานคลื่นมาใช้จึงต้องอาศัยพื้นที่ที่กว้างใหญ่มาก นั่นหมายถึง จำนวนเงินที่นำมาลงทุนต้องมากมายมหาศาลเช่นกัน คลื่นเป็นพลังงานอีกรูปแบบหนึ่ง ซึ่งค่าพลังงานของคลื่นจะขึ้นอยู่กับความเร็วของคลื่นและขนาดความสูงของคลื่น โดยการประมาณจากทฤษฎีสามารถกล่าวได้ว่าคลื่นที่เกิดขึ้นในบริเวณชายฝั่งยาว 100 กิโลเมตร สามารถใช้ผลิตไฟฟ้าได้ประมาณ 2,000 เมกะวัตต์ โดยเป็นการประเมินค่าพลังงานที่จะได้จากคลื่นเฉพาะแถบชายฝั่ง ส่วนนอกชายฝั่งออกไปการใช้พลังงานคลื่นเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าทำได้ค่อนข้างยากเพราะถึงแม้ในเขตทะเลลึกจะมีพลังงานคลื่นมหาศาล แต่การนำเอาพลังงานคลื่นในบริเวณดังกล่าวมาใช้ประโยชน์จะต้องมีการสร้างสถานีเพื่อผลิตไฟฟ้ากลางทะเลลึก ซึ่งเป็นงานที่มีความยุ่งยากและซับซ้อนมากและต้องใช้ทุนอย่างมหาศาล การประเมินค่าพลังงานของคลื่นต่อหน่วยพื้นที่สามารถคำนวณได้ตามสมการ (มณฑล แก่นมณี. สืบค้นเมื่อ 2 เมษายน 2555, จาก www.agri.kmitl.ac.th/elearning/courseware/aquatic/2_deepwater_waves_and_shallow_water_waves.html)

$$E_t = \rho g H^2 / 8 \quad (2.11)$$

การคำนวณผลรวมของฟลักซ์พลังงานที่แผ่ออกมาของทิศทางคลื่นมีค่าเท่ากับ

$$P = E_t C_g \quad (2.12)$$

เมื่อ C_g คือ คือความเร็วกลุ่ม
ในกรณีที่น้ำลึก C_g สามารถแสดงได้ :

$$C_g = \frac{g}{2\omega} \quad (2.13)$$

ที่ ความถี่คลื่น ω เป็น $2\pi/T$

สำหรับทะเลที่คลื่นในช่วงเวลาระดับความสูงแบบสุ่ม (และทิศทาง) ค่าพารามิเตอร์สเปกตรัมจะต้องใช้ความสูงของคลื่นการคำนวณจะขึ้นอยู่กับช่วงเวลาที่ของสเปกตรัมประมาณได้โดย

$$H_{mo} = 4\sqrt{m_0} \quad (2.14)$$

นอกจากนี้สามารถคำนวณหาระยะเวลาของคลื่น ดังสมการ

$$T_e = \frac{m_{-1}}{m_0} \quad (2.15)$$

เมื่อ m_n หมายถึง ช่วงเวลาสเปกตรัม อันดับ n

ซึ่งในการคำนวณพลังงานคลื่น สามารถคำนวณโดยใช้สมการ

$$E = \frac{\rho g^2 H^2 T_e}{64\pi} \quad (2.16)$$

- เมื่อ E คือ พลังงานของคลื่น (จูลต่อเมตร)
 ρ คือ ความหนาแน่นของน้ำ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
 H คือ ความสูงของคลื่นทะเลเฉลี่ย (เมตร)
 T คือ คาบการเคลื่อนที่ของคลื่น (วินาที)
 g คือ ความเร่งของแรงโน้มถ่วงโลก (9.8 เมตรต่อวินาที²)

2.3 การตรวจวัดคลื่นและวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้น

การตรวจวัดคลื่น คือ การวัดการกระเพื่อมของระดับน้ำทุกๆ วินาทีหรือถี่กว่านั้นเพื่อคำนวณหาคาบเวลา (ความถี่) และความสูงคลื่นนัยสำคัญ ความสูงคลื่นสูงสุด เครื่องมือวัดคลื่นวิวัฒนาการตามกาลเวลา การตรวจวัดมีได้หลายวิธี เช่น

2.3.1. วัดโดยสร้างทุ่นลอยไปทิ้งไว้ในทะเลที่ระยะ 200 - 1000 เมตร จากฝั่งติดตามการเคลื่อนขึ้นลงของทุ่นลอยโดยโยกคันโยกซึ่งจะเชื่อมต่ออยู่กับปากกาที่จะลากเส้นระดับน้ำไปบนกระดาษกราฟบันทึกคลื่นที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสม่ำเสมอ โดยปกติจะตรวจวัดทุกต้นชั่วโมงเป็นเวลา 10 นาที เครื่องวัดระดับน้ำแบบนี้ เรียกว่า สเตาเดียม (Stadia)

2.3.2. เครื่องมือวัดอยู่เหนือระดับน้ำ จะส่งสัญญาณเสียงไปยังผิวน้ำแล้วสะท้อนกลับมา เครื่องจะวัดระยะห่างระหว่างหัววัดกับระดับน้ำเบื้องล่าง ข้อมูลจะถูกบันทึกอยู่ในที่เก็บข้อมูลของ คอมพิวเตอร์ เช่น ดิสเก็ต จานแม่เหล็กแข็ง เครื่องมืออีกแบบมีสายลวดหย่อนลงไปถึงน้ำทะเล ตรวจวัดความนำไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามความยาวของลวดซึ่งจะต้องแปลงสัญญาณไฟฟ้าเป็น ความสูงคลื่นอีกทีหนึ่ง

2.3.3. เครื่องวัดความกดของน้ำ ซึ่งต้องติดตั้งคงที่ไว้ที่ท้องน้ำหรือผูกติดไว้กับเสาหรือ โครงสร้างใต้น้ำ ความกดของน้ำจะสัมพันธ์กับคลื่นที่เคลื่อนตัวอยู่เหนือน้ำ วิธีนี้จะใช้ได้เฉพาะเขต น้ำตื้นเพราะในเขตนํ้าลึกนั้นไม่สามารถสังเกตเห็นได้

เครื่องมือที่กล่าวมาข้างต้นนี้ติดตั้งอยู่กับที่เพียงแห่งเดียว จึงให้ข้อมูลเฉพาะคาบเวลา และ ความสูงคลื่นเท่านั้น การจะหาความยาวคลื่นหรือทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นต้องติดตั้งเครื่องมือ ใ้ไว้มากกว่า 1 จุด นอกจากนี้การตรวจวัดระยะไกลด้วยดาวเทียมโดยใช้อุปกรณ์ตรวจวัดต่างๆ กัน (Radar Altimetry, Synthetic Aperture Radar (SAR)) สามารถให้ข้อมูลได้เพิ่มเติม เช่น ความหนาแน่นของพลังงานคลื่น ความยาวคลื่น เป็นต้น

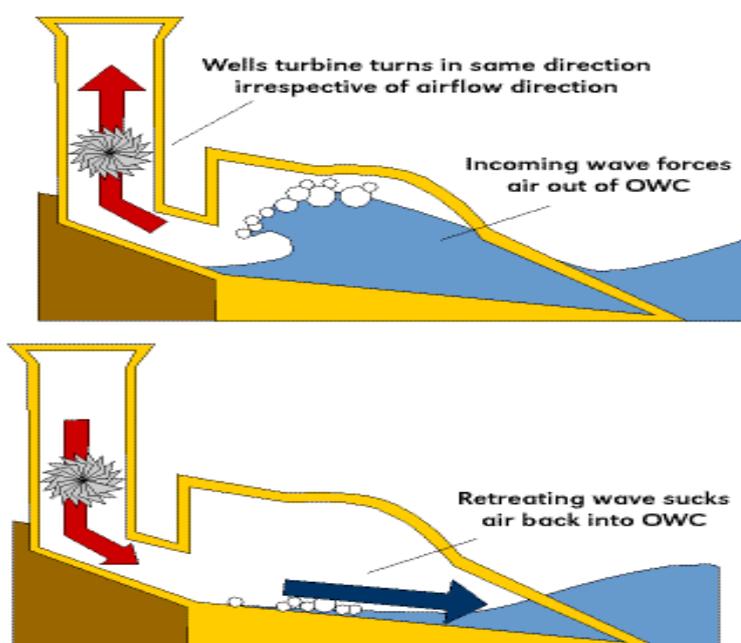
การตรวจวัดคลื่นทะเล หรือมหาสมุทรซึ่งเป็นแหล่งพลังงานคลื่นที่สามารถนำมาใช้ ประโยชน์ได้จำนวนมหาศาล เพียงแต่มีขนาดความกว้างของคลื่นเล็กและไม่แน่นอนขึ้นอยู่กั บแรงลมที่พัดผ่าน ฉะนั้นในการจะนำพลังงานคลื่นมาใช้จึงต้องอาศัยพื้นที่กว้างใหญ่มาก นั่นหมายถึง จำนวนเงินที่จะนำมาลงทุนต้องมากมายมหาศาลเช่นกัน ในประเทศไทยเองยังไม่มีกรนำเอา พลังงานจากคลื่นมาใช้ แต่ในต่างประเทศมีการศึกษาและใช้พลังงานจากคลื่นตั้งแต่ปี ค.ศ. 1967 โดยประเทศที่ริเริ่มนำพลังงานจากคลื่นมาใช้ ได้แก่ ประเทศญี่ปุ่นและประเทศอังกฤษ ในการนำ พลังงานจากคลื่นมาใช้มีอยู่ 2 ประเภท ได้แก่ แบบอยู่กับที่ (Fixed) และแบบลอย (Floating)

2.4 เครื่องผลิตกระแสไฟฟ้าจากคลื่น

2.4.1 อุปกรณ์ผลิตพลังงานจากคลื่นแบบอยู่กับที่ (Fixed Generating Devices) มีอยู่ 2 แบบด้วยกันคือ แบบการเคลื่อนแบบสั้นของน้ำในแนวตั้ง (Oscillating Water Column) และแทปเชน (Tapchan) สามารถติดตั้งได้ทั้งบริเวณชายฝั่งและแหลมที่ยื่นออกไปในทะเล การเคลื่อนแบบ สั้นของน้ำในแนวตั้ง (Oscillating Water Column) อุปกรณ์ผลิตพลังงานจากคลื่นแบบการเคลื่อน แบบสั้นของน้ำในแนวตั้ง มีกระบวนการทำงาน 2 ขั้นตอนด้วยกัน เมื่อคลื่นเข้าไปในอุปกรณ์ตาม แนวตั้งแรงอัดอากาศในแนวตั้งจะสูงขึ้น ซึ่งแรงอัดนี้จะอยู่ในอุปกรณ์แนวตั้งที่ปิดสนิทและกั้นหั้น เมื่อคลื่นลดระดับลงอากาศจะถูกดันให้ไหลกลับผ่านกังหันเพื่อลดแรงอัดในอุปกรณ์แนวตั้ง หาก

ทะเลบริเวณใดมีคลื่นที่สูง แรง และบ่อย ก็จะทำให้สามารถผลิตพลังงานได้มาก ซึ่งอุปกรณ์นี้มักจะติดตั้งบริเวณที่เป็นแหลมที่ยื่นออกไปในทะเลและมีชายฝั่งเป็นแนวตั้ง ดังภาพที่ 14 และ ภาพที่ 15

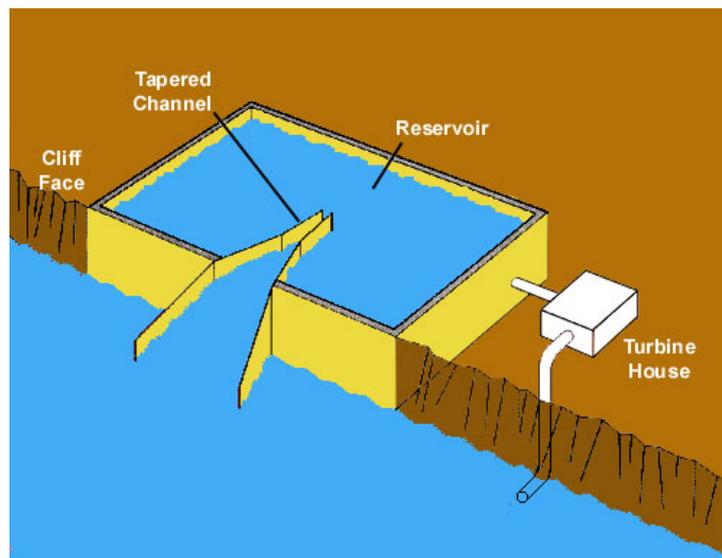
ระบบแทปแชน (Tapchan) หรือระบบแทปแชน ชเนล (Taperad Channel) มักจะติดตั้งบริเวณหน้าผา ดังภาพที่ 16 บริเวณช่องแคบจะเป็นสาเหตุให้ยอดคลื่นสูงขึ้น เมื่อคลื่นเหล่านี้ผ่านเข้าไปในหน้าผาระดับของน้ำทะเลในหน้าผาจะสูงขึ้นจากผิวน้ำทะเลมาก พลังงานจลน์ของคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าไปในหน้าผาจะถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานศักย์ซึ่งเกิดจากน้ำทะเลที่ไหลออกมาทางกั้นด้านขวามือ ข้อดีของระบบนี้ คือ ต้องการการบำรุงรักษาน้อย แต่ต้องติดตั้งบริเวณหน้าผาที่มีความสูงของคลื่นคงที่ เพื่อให้ได้พลังงานจากคลื่นที่สูง (Bouali and Larbi. 2013 : 565)



ภาพที่ 14 แผนภาพการทำงานของ Oscillating Water Column
(ที่มา : Bouali and Larbi. 2013 : 565)

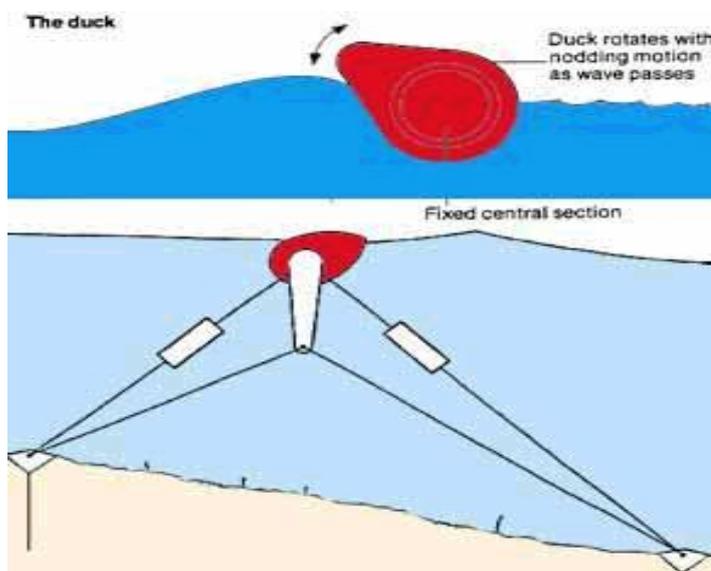


ภาพที่ 15 ตัวอย่าง Oscillating Water Column
(ที่มา : Bouali and Larbi. 2013 : 567)



ภาพที่ 16 เครื่องเปลี่ยนพลังงานคลื่นแบบแทปแชน (Tapchan)
(ที่มา : Bouali and Larbi. 2013 : 567)

2.4.2 อุปกรณ์ผลิตพลังงานจากคลื่นแบบลอย (Floating Devices) มีชื่อเรียกว่า Shelter Duck ซึ่งสร้างไฟฟ้าจากการเคลื่อนที่กลับไปมาของอุปกรณ์ที่ลอยอยู่ โดยมีประสิทธิภาพในการสร้างพลังงานสูงมาก ดังภาพที่ 17



ภาพที่ 17 อุปกรณ์ผลิตพลังงานจากคลื่น
(ที่มา : Bouali and Larbi. 2013 : 568)

คลื่นในทะเล คือ การแปรปรวนบริเวณผิวหน้าน้ำทะเลโดยการได้รับพลังงานจากลม แผ่นดินไหว หรือการระเบิดของภูเขาไฟ โดยมากจะอาศัยคลื่นในอุดมคติในการศึกษา ส่วนสมการทางคณิตศาสตร์จะถูกนำมาใช้อธิบายถึงองค์ประกอบและความซับซ้อนของคลื่น เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ผ่านคลื่นน้ำลึกจะกลับเข้าสู่บริเวณเดิมหากความลึกของน้ำที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่านลึกมากกว่าครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่นจะไม่ได้รับผลกระทบจากพื้นทะเลในบริเวณน้ำตื้น ถ้าความลึกของน้ำน้อยกว่า $1/20$ ของความยาวคลื่นจะได้รับผลกระทบจากพื้นทะเล

คลื่นขนาดใหญ่สามารถเกิดขึ้นโดยการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน เช่น การเคลื่อนที่ของพื้นทะเลจากการเกิดแผ่นดินไหว หรือการระเบิดของภูเขาไฟ คลื่นอิสระเคลื่อนที่จากแหล่งกำเนิด คลื่นในการควบคุม (Forced Waves) อยู่ภายใต้อิทธิพลของแรงที่ก่อให้เกิดคลื่น การจัดจำแนกคลื่นโดยคลื่นที่ขนาดเล็กที่สุด เรียกว่า คลื่นพริ้ว ยอดคลื่นมีลักษณะกลมมนท้องคลื่นเป็นรูปตัววีความยาวคลื่นน้อยกว่า 1.7 เซนติเมตร และมีคาบคลื่นน้อยกว่า 0.1 วินาที คลื่นที่มีขนาดใหญ่กว่าโดยทั่วไปมีคาบคลื่นประมาณ 5 วินาที โดยที่มีแรงดึงดูดเป็นหลักคลื่นส่วนใหญ่เกิดจากลมที่พัดผ่านบริเวณผิวหน้าน้ำทะเล เมื่อคลื่นเริ่มก่อตัวบริเวณผิวหน้าน้ำทะเลจะเริ่มปั่นป่วนโดยเริ่มก่อตัวจากระลอกคลื่นเล็กๆ จากนั้นจะกลายเป็นคลื่นที่มีขนาดใหญ่ขึ้น หากมีกระแสลมพัดให้พลังงานกับผิวน้ำอย่างต่อเนื่องภายนอกบริเวณที่เกิดคลื่น คลื่นจะแตกตัวออกโดยขึ้นอยู่กับขนาดคลื่นได้น้ำ คลื่นมีลักษณะปกติและมียอดคลื่นเรียบ ซึ่งคลื่นยาวสามารถเดินทางได้เร็วกว่าคลื่นสั้น โดยส่วน

ใหญ่คลื่นในทะเลจะมีความสูงไม่เกิน 6 เมตร คลื่นที่มีขนาดสูงที่สุดอยู่ในมหาสมุทรแปซิฟิกและมหาสมุทรแอตแลนติกตอนใต้คลื่นจะมีการเปลี่ยนแปลง เมื่อเข้าสู่เขตน้ำตื้นคลื่นจะมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางเนื่องจากหักเห วงโคจรของคลื่นลากไปบนพื้นทะเลคลื่นจะเคลื่อนที่เข้าในน้ำตื้นและเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าในเขตนน้ำลึก คลื่นสามารถหักเหเพื่อเคลื่อนที่ไปในทิศทางอื่นได้ เหมือนกับการเคลื่อนที่ในน้ำลึกที่สุดคลื่นจะไม่เสถียรและแตกออกเป็นรูปแบบที่เรียกว่า เบรกเกอร์ คลื่นสามารถเกิดได้ผิวน้ำได้ในบริเวณที่ชั้นน้ำมีความหนาแน่นต่างกัน เรียกว่า คลื่นในแนวตั้ง (standing wave) ในแอ่งของมหาสมุทรเมื่อพลังงานของคลื่นมีการสะท้อนกลับรูปแบบของคลื่นจะไม่มีเคลื่อนที่แต่บริเวณผิวน้ำจะอยู่ในรูปแบบปกติ (Bouali and Larbi, 2013 : 569)

2.5 อุตุนิยมวิทยาและปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาที่มีผลต่อคลื่นในประเทศไทย

ความสูงของคลื่นสำหรับบริเวณพื้นที่อ่าวไทยและทะเลอันดามันส่วนหนึ่งเกิดขึ้นจากลมบริเวณที่อยู่ภายใต้อิทธิพลของลมมรสุมซึ่งมี 3 รูปแบบ คือ ลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ และช่วงเปลี่ยนฤดูมรสุม

2.5.1 ลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ (Northeast Monsoon) ประมาณกลางเดือนตุลาคมจนถึงกลางเดือนกุมภาพันธ์ ซึ่งพัดจากแถบไซบีเรียและจีนพาดอากาศแห้งและเย็นลงมาปกคลุมตอนเหนือถึงตอนกลางของประเทศไทย แล้วหอบความชื้นไปตกเป็นฝนในแถบภาคใต้ฝั่งอ่าวไทย โดยลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือจะทำให้เกิดคลื่นขนาดใหญ่กว่าปกติในบริเวณอ่าวไทยด้านตะวันตก

2.5.2 ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ (Southwest Monsoon) ระหว่างกลางเดือนพฤษภาคมถึงกลางเดือนตุลาคม เป็นลมที่พัดจากมหาสมุทรอินเดียเข้าสู่ประเทศไทย โดยหอบเอาความชื้นจากทะเลมาปะทะแนวเขาเกิดเป็นฝนตกชุก โดยลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ทำให้เกิดคลื่นขนาดใหญ่กว่าปกติในบริเวณอ่าวไทยด้านตะวันออก สำหรับอ่าวไทยตอนบนลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ที่พัดผ่านจะมีกำลังอ่อนและเกิดช่วงสั้นๆ จึงทำให้คลื่นในบริเวณนี้มีขนาดไม่ใหญ่มากนัก

2.5.3 ช่วงเปลี่ยนฤดูมรสุม ระหว่างกลางเดือนกุมภาพันธ์ถึงกลางเดือนพฤษภาคมเป็นช่วงเวลาที่มีทิศทางไม่แน่นอน คลื่นส่วนใหญ่จะมีขนาดเล็ก

โดยปกติคลื่นในอ่าวไทยจะมีขนาดเล็กความสูงประมาณ 1-2 เมตร ส่วนคลื่นที่มีผลกระทบต่อชายฝั่งจะต้องพิจารณาถึงคาบของคลื่น (Wave Period) ด้วย เช่น คลื่นขนาดเล็กที่มีคาบของคลื่นยาวจะก่อให้เกิดผลกระทบมากกว่าคลื่นขนาดใหญ่แต่คาบคลื่นสั้น ฝั่งทะเลอันดามันคลื่นจะเกิดจากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ มีขนาดใหญ่และเคลื่อนที่เข้าหาฝั่ง โดยทิศทางของคลื่นจะเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะภูมิประเทศและความลึกของท้องทะเล (รังสรรค์ อากาศัททะกุล. 2547 : 24)

2.6 แบบจำลองคลื่น

แบบจำลองเชิงตัวเลข Simulating Waves Nearshore (SWAN)

แบบจำลอง SWAN เป็นแบบจำลองคลื่นรุ่นที่ 3 ที่พัฒนาโดย Delft University of Technology ประเทศเนเธอร์แลนด์ ซึ่งคลื่นจะอธิบายด้วย Wave Action Density Spectrum $N(\sigma, \theta)$ แบบ 2 มิติ เพื่อให้คำนวณคลื่นในบริเวณที่มีอิทธิพลของปรากฏการณ์แบบไม่เชิงเส้น (Nonlinear Phenomena) มีผลมากกว่า ปรากฏการณ์เชิงเส้น (Linear Phenomena) (Veeramony, Walker and Hsu. 2010 : 207)

สมการหลักที่ใช้ในการคำนวณคลื่นที่มาจากสมการอนุรักษ์พลังงาน

2.6.1 สมการอนุรักษ์พลังงาน

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(c_x N)}{\partial x} + \frac{\partial(c_y N)}{\partial y} + \frac{\partial(c_\sigma N)}{\partial \sigma} + \frac{\partial(c_\theta N)}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma} \quad (2.17)$$

เมื่อ $N(\sigma, \theta)$ คือ สเปกตรัมความหนาแน่นของการเคลื่อนที่ (Action Density Spectrum)

σ คือ ความถี่ของคลื่น (เฮิรตซ์)

θ คือ ทิศทางของคลื่น

c_x, c_y คือ อัตราเร็วในแนวแกน x และ y (เมตรต่อวินาที)

2.6.2 สมการพลังงานที่ทำให้เกิดคลื่น

$$S = S_{in} + S_{ds} + S_{nl} \quad (2.18)$$

เมื่อ พลังงานที่ถ่ายทอดจากลม (S_{in}) การเกิดคลื่นเนื่องจากลม สามารถอธิบายด้วยสมการ

$$S_{in} = (\sigma, \theta) = A + BE(\sigma, \theta) \quad (2.19)$$

เมื่อ A เป็นตัวแทนของการเกิดคลื่นแบบเชิงเส้น และ BE เป็นตัวแทนของการเกิดคลื่นแบบ Exponential ลมที่ใช้สำหรับสมการเป็นข้อมูลลมที่ความสูง 10 เมตรจากระดับน้ำทะเล (U_{10}) ซึ่งถูกคำนวณเป็น Friction Velocity (U_*) อีกครั้ง

$$U_*^2 = C_D U_{10}^2 \quad (2.20)$$

เมื่อ C_D คือ ค่า Drag Coefficient ตามเงื่อนไข ดังนี้

$$\begin{aligned} (U_{10}) &= 1.2875 \times 10^{-3} && \text{เมื่อ } U_{10} < 7.5 \text{ เมตร/วินาที} \\ (0.8 + 0.065 \times U_{10}) &\times 10^{-3} && \text{เมื่อ } U_{10} \geq 7.5 \text{ เมตร/วินาที} \end{aligned}$$

การสลายตัวของพลังงานคลื่น (S_{ds})

แบบจำลอง SWAN ได้อธิบายการสลายตัวของพลังงานคลื่นมี 3 รูปแบบ คือ การแตกตัวของยอดคลื่น (White Capping) แรงเสียดทานจากพื้นดินใต้ท้องน้ำ (Bottom Friction) และการแตกตัวของคลื่นเนื่องจากการเหนี่ยวนำของความลึก (Depth-induced Wave Breaking)

กระบวนการปฏิสัมพันธ์ระหว่างคลื่นกับคลื่นแบบไม่เชิงเส้น (S_{nl})

กระบวนการสำคัญที่เกิดขึ้นเพื่อถ่ายทอดพลังงานของคลื่นจากความถี่หนึ่งไปสู่ความถี่อื่นๆ เมื่อคลื่นมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจากหลายๆ สาเหตุ เช่น การแตกตัวของยอดคลื่น การเคลื่อนที่ของคลื่นไปสู่บริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงความลึก ซึ่งแบบจำลอง SWAN อธิบายกระบวนการปฏิสัมพันธ์ระหว่างคลื่นกับคลื่นแบบไม่เชิงเส้นไว้ 3 แบบ คือ

1. Quadruplet Wave-wave Interactions คือ กระบวนการที่เกิดขึ้นเพื่อถ่ายทอดพลังงานจากคลื่นที่มีความถี่สูงสุดไปสู่คลื่นที่มีความถี่ต่ำกว่าในบริเวณน้ำลึก

2. Triad Wave-wave Interactions คือ การเกิดขึ้นในบริเวณน้ำตื้นเพื่อถ่ายทอดพลังงานจากคลื่นที่มีความถี่ต่ำลงไปยังคลื่นที่มีความถี่สูงกว่า

3. Diffraction (การเลี้ยวเบน) คือ ลักษณะของรูปร่างของชายฝั่งและการเปลี่ยนแปลงความลึกของน้ำที่ส่งผลให้คลื่นแต่ละความถี่เกิดการเลี้ยวเบนแตกต่างกันและมีผลกระทบต่อคลื่นที่ความถี่อื่นๆ

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.7.1 งานวิจัยภายในประเทศ

วัฒนา กันบัว (2552 : 1) ศึกษาแบบจำลองการพยากรณ์คลื่นลมทะเล (Ocean Wave Forecast Model) โดยแบบจำลองดังกล่าวมีความละเอียดของข้อมูลที่ระดับความแม่นยำในการพยากรณ์คลื่นที่ความละเอียดสูง (25 x 25 กม.) คลื่นเป็นพลังงานรูปหนึ่งซึ่งมีแหล่งกำเนิดหรือตัวกระทำให้เกิดคลื่นหลายรูปแบบแต่ตัวกระทำที่พบเห็นได้ชัดเจน ได้แก่ ลมคลื่นลมมีผลกระทบต่อชีวิตและทรัพย์สินของมนุษย์ดังนั้นจึงมีการศึกษาคลื่นลมในทะเลและมหาสมุทรในเชิงคณิตศาสตร์ โดยสร้างเป็นแบบจำลองพยากรณ์คลื่นลมขึ้นแบบจำลองการพยากรณ์คลื่นในทะเลมีการพัฒนามาเป็นลำดับปัจจุบันนี้เป็นรุ่นที่ 3 (Third Generation Wave Model) ซึ่งได้รับการพัฒนามากว่า 10 ปี โดยกลุ่มของนักวิทยาศาสตร์นานาชาติ (SWAMP, 1984) แบบจำลองนี้ได้รับการทดสอบกับพื้นที่ส่วนต่างๆของโลกที่มีสภาพคลื่นต่างๆ กันและรวบรวมไว้ในเอกสาร พลวัตและการสร้างแบบจำลองของคลื่นทะเล ปัจจุบันแบบจำลองนี้ได้ถูกแจกจ่ายและใช้งานโดยนักวิจัยทั่วโลกและถูกนำไปใช้ในระดับปฏิบัติการโดยสถาบันอุดมศึกษาแห่งชาติหลายแห่ง

วิริยะ เหลืองอร่าม (2547 : 5) ได้ศึกษาการจำลองเชิงตัวเลขของคลื่นใกล้ฝั่งในอ่าวไทย ระหว่างพื้นที่ ละติจูด 6-14 องศาเหนือ ลองจิจูด 99-103 องศาตะวันออก ความละเอียดในการคำนวณ 3x3 กิโลเมตร ใช้ข้อมูลลมที่ความสูง 10 เมตร จากระดับน้ำทะเล ผลจากการคำนวณคลื่นที่ได้จากแบบจำลอง SWAN ในบริเวณอ่าวไทยในช่วงสภาวะอากาศปกติ จะมีค่าใกล้เคียงกับผลการคำนวณจากแบบจำลองเชิงตัวเลข NOGAPS ส่วนผลการคำนวณความสูงคลื่นในช่วงพายุไต้ฝุ่นลินดา เมื่อเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดจากทุ่นลอยระยองและหัวหินพบว่า ความสูงคลื่นที่คำนวณได้ทั้งสองจุดต่ำกว่าผลที่ได้จากการตรวจวัด เนื่องจากความเร็วลมที่ได้จากแบบจำลองยังคงมีค่าต่ำกว่าความเร็วลมที่ได้จากการตรวจวัดด้วย

วาทีน ธนาธารพร (2554 : 1) ได้นำแบบจำลอง SWAN ศึกษาลักษณะคลื่นในอ่าวไทย ในช่วงที่เกิดพายุไต้ฝุ่นห่มุ่ยฟ้า ในระหว่างวันที่ 25-26 พฤศจิกายน พ.ศ. 2547 พบว่าความสูงคลื่นที่ได้จากแบบจำลองจะมีค่าต่ำกว่าความสูงคลื่นที่ตรวจวัดจากดาวเทียม แต่ยังคงมีค่าใกล้เคียงกับความสูงคลื่นที่ตรวจวัดอยู่ประมาณร้อยละ 85.00 - 90.17 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบบจำลอง SWAN มีความสามารถเพียงพอในการพยากรณ์ความสูงคลื่นในอ่าวไทย

ฮัมฟรี และ เว็บ (Humphries and Webb 2008 : 183) ได้วิเคราะห์การทำงานของแบบจำลองมหาสมุทร OCCAM ระดับ 1/4 ของโลกซึ่งเป็นการใช้ลมภูมิอากาศรายเดือน และเป็นหนึ่งในการใช้ ECMWF วิเคราะห์ลมหกชั่วโมงสำหรับช่วง 1993-1998 การไหลรูปแบบระยะยาว

สอดคล้องกับข้อสังเกตและค่าที่คาดการณ์โดย Godfrey's Island Rule มีทักษะในการทำนายสัญญาณรายปีในแต่ละปี ซึ่งบางอย่างยากที่จะทำนายซึ่งรูปแบบที่เปลี่ยนแปลงในระยะของการไหลทั้งหมด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในปีที่ El Nino สเปกตรัมของการขนส่งในทางเดินของแต่ละที่แสดงความแตกต่างที่สำคัญระหว่างการเชื่อมต่อภูมิภาคของมหาสมุทรแปซิฟิกและเชื่อมต่อกับมหาสมุทรอินเดีย เกี่ยวกับการตรวจสอบพบการเปลี่ยนแปลงในทางเดินทางตอนเหนือมีความสัมพันธ์อย่างยิ่งกับการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของกระแสในทะเล Celebes และนอก Halmahera ซึ่ง โปร์ไฟล์ตามแนวตั้งของการขนส่งอยู่ในข้อตกลงที่เหมาะสมกับการสังเกตการณ์ แต่รูปแบบการขนส่ง การประเมินพื้นผิวที่อยู่ใกล้ผ่านช่องแคบ Lombok และความหนาแน่นจากมหาสมุทรแปซิฟิกผ่านช่องแคบ Lifamatola ลงไปในทะเล Banda ในทั้งสองกรณีแสดงความหายาของทางเดิน โดยรูปแบบจะปรากฏขึ้นในทิศตะวันตกเฉียงเหนือ แสดงให้เห็นรูปแบบตามที่คาดไว้ว่าการขนส่งที่ใหญ่ที่สุดคือผ่านทางช่องแคบ Makassar แต่นี้มีค่าน้อยกว่าที่คาดไว้และแทนที่จะมีการไหลที่สำคัญทางทะเล Halmahera กรณีในเกาะ Godfrey โดยการไหลไปทางทิศเหนือระหว่างออสเตรเลียและอเมริกาใต้แล้วเส้นทางทะเล Halmahers ควรจะมีความสำคัญที่เป็นเส้นทางทางทิศใต้มากที่สุดทั่วเกาะนิวกินี ไปในมหาสมุทรอินเดียและไม่มีเหตุผลชัดเจนว่าทำไมการไหลจะไปทางทิศเหนือต่อไปเพื่อผ่านช่องแคบ Makassar ผลลัพธ์แบบจำลองจึงทำให้เกิดคำถามของเหตุผลของกระแสน้ำ

ฮัมฟรีย์, วองไวซิส และเชนนาราตรี (Humphries, Wongwises and Chinnarasri. 2009 : 139) ได้ศึกษาแบบจำลองมหาสมุทรสามมิติ (POM) นำมาใช้ในการศึกษาระดับความสูงจากระดับน้ำทะเลและมหาสมุทรในรูปแบบการไหลเวียนบังคับ โดยเขตข้อมูลลมพายุใต้ฝุ่นในอ่าวไทย การจำลองที่เกี่ยวข้องกรณีของพายุใต้ฝุ่น Linda ที่เกิดขึ้นในช่วง 1-4 พฤศจิกายน 1997 พายุใต้ฝุ่น Linda รูปแบบเป็นที่ขึ้นกับเวลา สมการพื้นฐานพิกัดของคาร์ทีเซียนในพิกัดแนวนอนและซิกมาในตามแนวตั้งในตาราง 37×97 ตั้งฉากจุดกริด ในแนวนอน ที่มีระยะห่างจากตัวแปร 2 กิโลเมตรอยู่ใกล้กับ GOT ไป 55 กิโลเมตร ด้านตะวันออกที่ระดับซิกมา 10 อยู่ในแนวตั้ง ซึ่งขอบเขตจะถูกกำหนดโดยเงื่อนไขการแผ่รังสีและการยกระดับพื้นผิวทะเลมี การเก็บข้อมูลผ่านดาวเทียมสมุทรศาสตร์ (AVISO) โดยใช้การคำนวณความเครียดลมจากภูมิภาคลมเฉลี่ยรายเดือน ความร้อนที่พื้นผิว และค่าความเค็มเฉลี่ยรายเดือน รูปแบบการคาดการณ์ระดับความสูงจากระดับน้ำทะเลขึ้นถึง 68.5 เซนติเมตร ที่บริเวณชะอำตั้งอยู่ในทิศเหนือของที่เส้นใต้ฝุ่นที่ชายฝั่ง ผลการค้นหจากระดับความสูงจากระดับน้ำทะเลแสดงให้เห็นว่ามีพื้นที่ส่วนบนอ่าว โดยเฉพาะในฝั่งตะวันตกและผลกระทบของพายุที่มีขนาดที่ต่ำกว่าอ่าวในระหว่างช่วงเวลาทั้งหมดของการศึกษานี้ คลื่นในอ่าวถูกชักนำโดยลมตะวันออกเฉียงเหนือ

2.7.2 งานวิจัยต่างประเทศ

อีเกลเซียส และคาร์บาโล (Iglesias and Carballo, 2010 : 1) ได้อาศัยข้อมูลจาก SIMAR-44 ซึ่งครอบคลุมในรอบ 44 ปีร่วมกับข้อมูลทุนตรวจวัดคลื่นเพื่อประเมินแหล่งพลังงานคลื่นตามแนวชายฝั่งทะเลที่เป็นอันตรายของประเทศสเปนจากแหลมฟินิสเตอร์เรถึงเกาะซีซาร์กา พบว่ากำลังคลื่นรายปีในพื้นที่ตามแนวชายฝั่งทะเลมีค่าเท่ากับ 50 กิโลวัตต์ต่อเมตร และพลังงานคลื่นรายปีมีค่าเท่ากับ 400 กิโลวัตต์ต่อเมตร ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดพลังงานที่ใหญ่มากและสมบูรณ์แบบทั้งด้านทิศทางของคลื่นความสูงของคลื่นและคาบของคลื่นระดับความลึกทะเลของชายฝั่งนั้นแสดงถึงศักยภาพของคลื่นบริเวณนั้นๆ พลังงานคลื่นเป็นพลังงานที่น่าสนใจโดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงฤดูหนาวและช่วงลมมรสุม

อีเกลเซียส, คาร์บาโล และโรเจอร์ส (Iglesias, Carballo and Rogers 2011 : 1964) ได้นำเสนอกำลังคลื่นซึ่งเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่น่าสนใจไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม Galicia เป็นส่วนหนึ่งของมหาสมุทรแอตแลนติกอยู่ทางด้านตะวันตกเฉียงเหนือของคาบสมุทรไอบีเรียศักยภาพการทำงานของการผลิตพลังงานซึ่งทำการประเมินจากข้อมูลราย 3 ชั่วโมง ของเครื่องผลิตไฟฟ้าจากพลังงานคลื่นมหาสมุทรโดยครอบคลุมข้อมูลในช่วงปี ค.ศ. 1996-2005 ผลการประเมินได้มีการพิจารณาตำแหน่งที่ตั้งท่าเรือเส้นทางเดินเรือการทำประมงและสถานที่ทำเกษตรชายฝั่งทำการเลือกพื้นที่ที่สามารถใช้ประโยชน์จากพลังงานคลื่นได้คลื่นนอกชายฝั่งสามารถคำนวณได้จากคลื่นใกล้ชายฝั่งเพื่อเลือกพื้นที่ตั้งฟาร์มไฟฟ้าพลังงานคลื่นมี 2 บริเวณที่ให้ค่าศักยภาพพลังงานสูงเหมาะแก่การตั้งฟาร์มไฟฟ้าพลังงานคลื่น

ดันเน็ต และวอลเลซ (Dunnett and Wallace, 2009 : 65) ศึกษาสมรรถนะของเครื่องเปลี่ยนพลังงานคลื่น 3 ชนิดแตกต่างกันทำการประเมินในแต่ละพื้นที่ภายในประเทศแคนาดาโดยใช้ข้อมูลจากศูนย์บริการข้อมูลสิ่งแวดล้อมทางทะเลของประเทศแคนาดาโดยทำการศึกษาบริเวณมหาสมุทรแอตแลนติก 2 ตำแหน่งและมหาสมุทรแปซิฟิก 3 ตำแหน่ง พบว่าประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้ามากกว่าร้อยละ 20 นอกจากนี้ยังพบว่าประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานคลื่นขึ้นอยู่กับตำแหน่งที่ตั้งและอุปกรณ์ของเครื่องด้วย

ฮิวจ์ส และเวอเนอร์ (Hughes and Warner, 2011 : 112) ได้ประเมินแหล่งพลังงานคลื่นในประเทศออสเตรเลียบริเวณชายฝั่ง 0-300 เมตร กำลังและพลังงานคลื่นได้รับอิทธิพลจากคาบของคลื่นระดับความสูงของคลื่นทะเลเฉลี่ยและทิศทางของคลื่น โดยอาศัยแบบจำลอง WAM สำหรับวิเคราะห์ข้อมูลในช่วง 1 มี.ค. 1997 – 29 ก.พ. 2008 การกระจายเชิงพื้นที่ของกำลังและพลังงานคลื่น

ได้ใช้ กริดขนาด 1° ซึ่งปกคลุมพื้นที่ลองจิจูด $110-156^\circ$ และละติจูด $7-46^\circ$ พลังงานคลื่นทั้งหมดในประเทศออสเตรเลียเฉลี่ยได้เท่ากับ 3.47 PJ กำลังคลื่นมีค่ามากในทางภาคใต้ของออสเตรเลียซึ่งมีศักยภาพมากพอสำหรับผลิตไฟฟ้าจากพลังงานคลื่นในทางภาคเหนือของออสเตรเลียกำลังคลื่นเฉลี่ยมีค่าน้อยกว่า 10 กิโลวัตต์ต่อเมตร เป็นผลมาจากกำลังของคลื่นมีการเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล

ชูลเลอร์ และวอร์เนอร์ (Schuler and Warner. 2004 : 1284) ศึกษาโดยใช้ข้อมูลจากดาวเทียม JPL และดาวเทียม AIRSAR บริเวณพื้นที่ชายฝั่งของแคลิฟอร์เนียโดยใช้ในช่วงคลื่น L-band และ P-band เพื่อศึกษาความลาดเอียงของคลื่นและขนาดของคลื่นด้วยเทคนิค Polarimetric จากข้อมูลภาพระบบเรดาร์ซึ่งเครื่องมือในการตรวจลักษณะทางด้านกายภาพของคลื่นออกเป็นแต่ละลูกคลื่นลักษณะการฟุ้งกระจายของคลื่น เพื่อพัฒนาโมเดลในการประมาณค่าความลาดเทของคลื่นและขนาดของคลื่นการวัดทำโดยใช้ Modulation Transfer Function (MTF) ซึ่งมีค่าความสัมพันธ์กับคุณสมบัติทางด้านกายภาพของคลื่น

แม็ควิลเลียมส์, บลาส และ โดง (McWilliams, Blaas and Dong. 2007 : 832) ศึกษาขั้นตอนวิธีสำหรับการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ใช่ hydrostatic ในระบบแบบจำลองมหาสมุทรท้องถิ่น (ROMS) จะขึ้นอยู่กับกลศาสตร์ของเทคนิคสำหรับความดัน hydrostatic และไม่มี hydrostatic ขั้นตอนวิธีมีของรูปแบบความดัน แก้ไขด้วยการแยกระยะของชั้นเวลาสำหรับรูปแบบตามแนวตั้งและความหนาแน่นน้ำคงที่ของพื้นผิวอิสระ ซึ่งต้องใช้การแก้สมการปัวซองสำหรับความดันที่ไม่ใช่ hydrostatic ที่มีเมตริกซ์ที่ไม่สมมาตร จะมีประสิทธิภาพของชั้นที่แตกต่างกันและถูกนำมาทดสอบตามขั้นตอนวิธีหลายตัวอย่างที่มี ซึ่งรวมถึงแรงโน้มถ่วงคลื่นอยู่ภายนอก การสร้างของคลื่นทั้งภายในและการเปลี่ยนแปลงความไม่แน่นอนตามแรงเฉือนแบบแบ่งชั้น และไม่เชิงเส้นภายในการสร้างแบบจำลองจากน้ำขึ้นน้ำลง มากกว่าแนวการเปลี่ยนแปลงที่สอดคล้องกันในโครงสร้างพื้นฐานด้านการประมวลผลก่อนและหลังการประมวลผลอยู่ในรหัสที่มีอยู่ในสมการอุทกสถิต

พาวเวล และ โฟลีย์ (Powell and Foley. 2008 : 25) ศึกษาการสร้างแบบจำลองมหาสมุทรโดยนำเสนอการพัฒนาและการเตรียมสถานะที่ทันสมัย 4D (4DVAR) ระบบการการดูซึมข้อมูลในระบบการสร้างแบบจำลองมหาสมุทรท้องถิ่น ด้วยโปรแกรมประยุกต์ภายในภูมิภาคทะเลทวีปอเมริกา (IAS) โปรแกรมนี้เริ่มต้นด้วยรูปแบบหยาบจะแสดงให้เห็นประสิทธิภาพของการ 4DVAR วิธีการสำหรับการใช้งานในสภาพแวดล้อมที่ซับซ้อนของมหาสมุทร และทำหน้าที่เตรียมความพร้อมสำหรับการปรับใช้งานระบบการดูซึมตามเวลาจริงบนเรือ Royal Caribbean Cruise Lines เรือของ Explorer การปรับความสูงของน้ำทะเลและการสังเกตอุณหภูมิจะผ่านดาวเทียมพื้นผิวที่มี

แหล่งกำเนิดข้อมูลได้จากเรือในรอบ 14 วันกว่า 2 ปีนับจากมกราคม 2005 ถึงมีนาคม 2007 ซึ่งจะช่วยลดความไม่เหมาะสมแบบจำลองมากกว่าร้อยละ 75 โดยใช้มาตรการของพลศาสตร์

พาวเวล และ โลเรนโซ (Powell and Lorenzo. 2009 : 160) ได้มีการศึกษาความเหมาะสม ต้นแบบที่ใกล้เคียงกับการดูซึมตามเวลาจริง (real-time) และการทำนายภายในมหาสมุทรทวีปอเมริกา ซึ่งทำงานตาม autonomously บนเรือ จากการใช้ (ROMS) ทำนายสภาพทะเลขึ้นอยู่กับแบบจำลองเชิงตัวเลขที่ประกอบด้วยความไม่แน่นอนอยู่ในแบบจำลองทางฟิสิกส์ เงื่อนไขเริ่มต้น และสถานะแบบจำลอง ซึ่งการดูซึมสัมพัทธ์ที่แตกต่างกัน การพยากรณ์และเทคนิคที่ใช้สำหรับของความไม่แน่นอน ของทุกๆ 3 วัน และข้อมูลก่อน 7 วัน ระยะที่รวบรวมการประมาณของไหลเวียนจากการคาดการณ์ 2 สัปดาห์ที่ผ่านมาของสภาพในมหาสมุทร ซึ่งระบบที่มีอิสระเครื่องแบบสแตนด์โลนบนเรือจะขึ้นอยู่กับตัวเลขการพยากรณ์อากาศ แม้ว่าจะมีถูกลดลงเมื่อเทียบกับข้อมูลแบบสังเกตที่ใกล้เคียงเวลาจริง (real-time) ในการดูซึมการพยากรณ์พื้นผิวที่มีทักษะของการแก้ปัญหาหลอมรวม มากกว่าการแก้ปัญหาที่ไม่ใช่หลอมรวมเนื่องจากวิธีการแปรผันข้อจำกัดการดูซึมที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบจำลองการดูซึมของเขตข้อมูลพื้นผิว ช่วยลดความไม่แน่นอนแบบไดนามิกที่อยู่ในเขตข้อมูลใต้พื้นผิว

เชฟเพทกิน, โมลเมกเกอร์ และมาสัน (Shchepetkin, Molemaker and Mason. 2010 : 1) ศึกษาวิธีการซ้อนกันในตารางแบบปิดในแบบจำลองมหาสมุทรท้องถิ่น (ROMS) โดยใช้แบบ One-way offline ของพื้นฐานสมการในแบบจำลองเชิงตัวเลขของมหาสมุทรท้องถิ่น (ROMS) เป็นการตรวจสอบขอบเขตที่ความสนใจ โดยสร้างแบบจำลองที่ปรับเปลี่ยนเงื่อนไขขอบเขตแบบเปิดที่ช่วยลดการสะท้อนของคลื่น และมีการเพิ่มประสิทธิภาพความถี่ให้สูงสำหรับการปรับปรุงขอบเขต วิธีคำนวณข้อมูลขอบเขตต้องดูจากลักษณะภูมิประเทศที่สอดคล้องกับตารางภายนอก สำหรับบริเวณที่พื้นเคบการเปลี่ยนแปลงจะถูกนำไปใช้กับความเร็วความหนาแน่นน้ำเปลี่ยนแปลงตามความลึก และความหนาแน่นน้ำคงที่ เมื่อการเปิดขอบเขตของภายในเพื่อให้แน่ใจว่าปริมาณการอนุรักษ์ พร้อมกับการแก้ไขละเอียดจากข้อมูลภายนอกต่างๆ เช่น กระแสน้ำชายฝั่ง และการสะท้อนของคลื่นในขอบเขตเงื่อนไขขอบเขตแบบเปิดของความหนาแน่นน้ำคงที่ ช่วยลดการสะท้อนของคลื่นที่รอยต่อแบบเปิด โดยใช้ One-way-ROMS to ROMS เทคนิคการซ้อนกันแบบออฟไลน์ จะถูกใช้ในกระบวนการสร้างส่วนประกอบหลักจากขอบเขต

มัวร์, เฮร์นัน, อาร์รังโก และคอร์นูเอลล์ (Moore, Hernan, Arango and Cornuelle. 2004 : 227) ศึกษาแบบที่ครอบคลุมการคาดการณ์และการวิเคราะห์มหาสมุทร ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าแทนเจนต์เชิงเส้นและการ adjoint ของแบบจำลองมหาสมุทรท้องถิ่น จะอธิบายถึงค่าสัมพัทธ์เชิงเส้น

และเมตริกซ์ผูกพัน (ADM) ของ ROMS จากเครื่องมือซึ่งมีให้กับผู้ใช้ ROMS โดยเฉพาะอย่างยิ่ง จะพิจารณาวิธีลักษณะเฉพาะเวลาจำกัดเมตริกซ์ผูกพัน (ADM) จำกัด วิธีลักษณะเฉพาะเวลาจากค่า แทนเจนต์เชิงเส้น เวกเตอร์เป็นเอกพจน์ของการแพร่กระจายและการบังคับของเอกพจน์เวกเตอร์ที่เหมาะสมและสุ่มเมตริกซ์สัมพัทธ์เชิงเส้น ตัวอย่างของชนิดของการคำนวณถูกนำเสนอเป็นครั้งที่สองการพัฒนาการไหลเวียนในมหาสมุทรรูปสี่เหลี่ยมมุมมน้ำ

มัวร์, มานูเอเล, เฮอร์นัน และบรูซ (Moore, Emanuele, Hernan and Bruce. 2007 : 160) ศึกษาเกี่ยวกับการพัฒนาโปรแกรมและข้อมูลเบื้องต้นของระบบการสร้างแบบจำลองผกผันของมหาสมุทรท้องถิ่น (ROMS) ทั้งสี่มิติ variational (4DVAR) ระบบการดูดซึมข้อมูลสำหรับความละเอียดสูงของกลุ่มน้ำและชายฝั่งมหาสมุทร ซึ่งROMS ผกผันทำให้การใช้ถูกรบกวนด้วยค่าสัมพัทธ์เชิงเส้น (TL) สัมพัทธ์เชิงเส้นรีพริสเซนเทอร์ (RP) และโมเดล (AD) เมตริกซ์ผูกพัน ที่จะใช้ทางอ้อมตามระบบการสร้างแบบจำลองทั่วไปผกผันการสร้างแบบจำลองกรอบเป็น โมดูลาร์ TL RP และแบบจำลอง AD จะถูกใช้เป็นแบบ stand-alone รุน้อยภายในมหาสมุทรผกผันการสร้างแบบจำลองระบบ (IOM) ช่วยการดูดซึมขั้นตอนวิธีแบบวนซ้ำไป นำมาแก้ปัญหาการดูดซึมแบบไม่เชิงเส้น การดูดซึมจะดำเนินการภายใต้สมมติฐานแบบจำลองที่สมบูรณ์แบบ (ข้อจำกัดที่แข็งแกร่ง) หรือในพลศาสตร์แบบจำลอง (ข้อจำกัดที่อ่อนแอ) กรณีข้อจำกัดที่อ่อนแอรูปแบบ TL และ RP จะปรับเปลี่ยนให้มีข้อเพิ่มเติมเกี่ยวกับการบังคับทางด้านขวามือของสมการแบบจำลอง ข้อกำหนดที่จำเป็นในข้อผิดพลาดทางพลศาสตร์ของแบบจำลอง ROMS มีการทดสอบในแบบ 3 มิติที่ความหนาแน่นน้ำเปลี่ยนตามความลึก ของระบบสภาพภูมิประเทศที่ซับซ้อนด้านล่าง ลักษณะความแปรปรวนที่แข็งแกร่ง เมโซสเกล จะดูดซึมข้อมูลในมหาสมุทรบน (0-450 เมตร) ที่อุณหภูมิและกระแสน้ำในช่วงเวลา 10 วัน มาวิเคราะห์โดยใช้ความละเอียดและอาร์เรย์แบบสุ่มตัวอย่าง ในระหว่างระยะเวลาการดูดซึมเขตข้อมูลการไหลผ่านการเปลี่ยนแปลงสถานะเริ่มต้น ช่วยให้การแก้ปัญหาผกผันกับดึงข้อมูลที่ใช้งานแบบไดนามิก จากการสังเกตการสังเคราะห์และปรับปรุงเส้นทางการเคลื่อนที่ของสถานะแบบจำลอง ทั้งสองการทดลองข้อจำกัดที่แข็งและอ่อน การดูดซึมแสดงให้เห็นการคาดการณ์มากขึ้น ภูมิอากาศในช่วง 10-20 วันหลังจากที่สังเกต

มัวร์, เฮอร์นัน และอาร์ังโก (Moore, Hernan and Arango. 2011a : 34) ศึกษาประสิทธิภาพและการประยุกต์ใช้ระบบการสร้างแบบจำลองมหาสมุทรท้องถิ่น (ROMS) 4 มิติ Variational (4D-Var) ซึ่งครอบคลุมพื้นที่ 134°W ถึง 116°W และ 31°N ถึง 48°N ได้วิเคราะห์สภาพแวดล้อมไหลเวียนของในแคลิฟอร์เนีย ใ้สามวิธี คือ วิธีที่ 1 แนวทางข้อจำกัดแข็งที่เพิ่มขึ้น วิธีที่ 2 ระบบการวิเคราะห์พื้นที่กายภาพเชิงสถิติ และวิธีที่ 3 การกำหนดวิธีการทางอ้อม การพิจารณาการไหลเวียนเดียวกัน ซึ่งพบว่าอัตราของการลู่เข้าของการกำหนดแบบ dual จะคือยกว่า

การกำหนดแบบวิธีที่ 1 ลักษณะของประสิทธิภาพการทำงาน 4D-Var ที่เกี่ยวข้องกับการใช้ของอุปกรณ์นอกและข้อจำกัดที่อ่อน เป็นระบบการประเมินผลจากผลกระทบของส่วนประกอบต่างๆ ของเวกเตอร์ที่ควบคุม 4D-Var จะแก้ไขสำหรับความไม่แน่นอนในเงื่อนไขเริ่มต้นของรูปแบบการออกแรงผลกระทบ ความสามารถของแบบจำลองที่เหมาะสมกับข้อสังเกตได้วิเคราะห์ 4D-Var และตรวจสอบรวมถึงการประมาณการข้อผิดพลาดภายหลังเนื้อหาข้อมูลของอาร์เรย์ ข้อสังเกตและสอดคล้องการตรวจสอบเกี่ยวกับข้อผิดพลาดสมมติฐาน พบว่ากว่าร้อยละ 90 จากข้อสังเกตรูปแบบข้อมูลที่ซ้ำซ้อนเป็นร้อยละของข้อมูลที่ได้จากดาวเทียม

มัวร์, เฮอร์นัน และอาร์ังโก (Moore, Hernan and Arango. 2011b : 50) ศึกษาแบบจำลองเชิงตัวเลขของมหาสมุทรท้องถิ่น (ROMS) 4 มิติ ข้อมูลแปรผัน (4D-Var) ความสามารถได้ถูกพัฒนา ROMS 4D-Var เป็นเอกลักษณ์ของ 4D-Var ได้รับการสนับสนุนจากสูตรที่ 1 ของข้อจำกัดที่แข็งแกร่งเพิ่มขึ้น 4D-Var (I4D-Var) สูตรที่ 2 อยู่บนพื้นฐานพื้นที่ทางกายภาพทางสถิติ ระบบการวิเคราะห์ (4D-PSAS) จะกำหนดตัวแปรแบบ Dual-Based Representer จาก 4D-Var (R4D-Var) ในแต่ละกรณีของ ROMS ถูกนำมาใช้ร่วมกับการสังเกตที่มีการระบุการไหลเวียนน้ำในมหาสมุทร ซึ่งจะกำหนดสมมติฐานเกี่ยวกับข้อผิดพลาด priori อยู่ในเงื่อนไขเริ่มต้น ของขอบเขตพื้นผิวบังคับให้ข้อผิดพลาดในแบบจำลองกรณีของ 4D-PSAS และ R4D-Var การกำหนด I4D-Var สำหรับประมาณการไหลเวียนที่ดีที่สุดจะดำเนินการในพื้นที่ทั้งหมดของเวกเตอร์ควบคุม ในขณะที่สูตรที่สองของ 4D-PSAS และ R4D-Var จะใช้เฉพาะพื้นที่ย่อยของเส้นตรง การทำงานของเวกเตอร์สถานะรูปแบบถูกวัดโดยการสังเกต (นั่นคือพื้นที่ที่สอง) ในการใช้งานสมุทรศาสตร์ ซึ่งตัวเลขของการสังเกตการณ์มักจะน้อยกว่าขนาดของเวกเตอร์ควบคุมแบบจำลอง จึงมีข้อได้เปรียบที่ชัดเจนในการข้อจำกัดของพื้นที่ที่อยู่การสังเกตในกรณีของ 4D-PSAS และ R4D-Var สมมติฐานข้อจำกัดที่แข็งแกร่งนำไปสู่การกำหนดข้อจำกัดที่อ่อน

มัวร์, เฮอร์นัน และอาร์ังโก (Moore, Hernan and Arango. 2011c : 74) ศึกษาข้อสังเกตในระหว่างการดูดกลืนข้อมูลมีการสำรวจด้วยแบบจำลองมหาสมุทรท้องถิ่น (ROMS) 4 มิติ Variational (4D-Var) ของระบบการดูดกลืนข้อมูล นำไปใช้ตามลำดับการไหลเวียนของมหาสมุทรในแคลิฟอร์เนีย แสดง Adjoint จากเมตริกซ์ที่ได้รับ 4D-Var ถูกนำมาใช้หาจำนวนผลกระทบต่อการสังเกตของแต่ละแบบและแพลตฟอร์ม การสังเกตในแง่มุมที่แตกต่างของการไหลเวียน 4D-Var การประมาณในช่วงการวิเคราะห์เกี่ยวกับการส่ง Alongshore ระหว่างชายฝั่งที่เกี่ยวข้องกับมหาสมุทรในแคลิฟอร์เนีย การเคลื่อนที่มวลน้ำขึ้นด้านบนชายฝั่งทะเลตามแนวชายฝั่งทางภาคกลางของแคลิฟอร์เนีย ส่วนใหญ่ข้อสังเกตที่มีอยู่ในระหว่างรอบการวิเคราะห์ใดๆ ที่กำหนดมาจากแพลตฟอร์มผ่านดาวเทียมในรูปแบบของ SST และ SSH และโดยเฉลี่ยจากข้อมูลที่มีผลต่อการ

ควบคุม ได้เพิ่มการวิเคราะห์และทักษะการคาดการณ์ในชายฝั่งทะเล ส่วนน้ำใต้ดินจากข้อสังเกตที่
ลอยตัว Argo CTDs XBTs ทางทะเลที่ติด ที่มีผลกระทบมากในการวิเคราะห์และการคาดการณ์ตาม
ชายฝั่งทะเล