

การศึกษาระบบทำน้ำจืดจากน้ำทะเลโดยใช้พลังงานคลื่นสมุทร  
A STUDY ON SEAWATER DESALINATION SYSTEM  
USING OCEAN WAVE POWER

นราวิชญ์ นนทโคตร  
ปุณณภา จำงนิจ  
วรกันต์ ทองฮะสุน

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)  
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2558

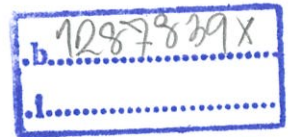
การศึกษาระบบทำน้ำจืดจากน้ำทะเลโดยใช้พลังงานคลื่นสมุทร  
A STUDY ON SEAWATER DESALINATION SYSTEM  
USING OCEAN WAVE POWER



T148968

นราวิชญ์ นนทโคตร  
ปุณณภา จำนงนิจ  
วรกันต์ ทองชะสุน

เลขหมู่.....148968  
เลขทะเบียน.....  
วัน,เดือน,ปี.....18 S.ค. 2560



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)  
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2558

A STUDY ON SEAWATER DESALINATION SYSTEM  
USING OCEAN WAVE POWER

NARAWIT NONTAKHOT  
PUNNAPA CHAMNONGNIT  
VORAGUN THONGHASOON





A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENT FOR  
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (APPLIED PHYSICS)  
DEPARTMENT OF PHYSICS, FACULTY OF SCIENCE  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2015

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาระบบทำน้ำจืดจากน้ำทะเลโดยใช้พลังงานคลื่นสมุทร  
A Study On Seawater Desalination System Using Ocean Wave Power

ชื่อนักศึกษา นายณราวิชญ์ นนทโคตร รหัสนักศึกษา 55051526  
นางสาวปุณณภา จำนงค์นิจ รหัสนักศึกษา 55051554  
นายวรกันต์ ทองฮะสุน รหัสนักศึกษา 55051602

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)  
ภาควิชา ฟิสิกส์  
ปีการศึกษา 2558  
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.อนุพงศ์ สรวงประภา

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้  
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)  
ประจำปีการศึกษา 2558

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
อ.ธรรมรัตน์ แต่งตั้ง ประธานกรรมการ	
อ.ภูมินทร์ จินดาจิธาวัฒน์ กรรมการ	
ดร.ภาณุพล โขลอนกระโทก กรรมการ	
รศ.อนุพงศ์ สรวงประภา อาจารย์ที่ปรึกษาและกรรมการ	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การศึกษาระบบทำน้ำจืดจากน้ำทะเลโดยใช้พลังงานคลื่นสมุทร
ชื่อนักศึกษา	นายนราวิชญ์ นนทโคตร รหัสนักศึกษา 55051526 นางสาวปุณณภา จำนงค์นิจ รหัสนักศึกษา 55051554 นายวรกันต์ ทองฮะสุน รหัสนักศึกษา 55051602
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา	2558
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.อนุพงศ์ สรงประภา

### บทคัดย่อ

โครงการวิจัยฉบับนี้เป็นการพัฒนาระบบรีเวอร์สออสโมซิสผลิตน้ำจืดจากน้ำทะเลด้วยพลังงานคลื่นสมุทรต่อยอดจากระบบต้นแบบเดิมของห้องปฏิบัติการวิจัยเครื่องมือทางการแพทย์และสิ่งแวดล้อม ซึ่งมีข้อจำกัดในส่วนที่โครงสร้างหลักของชุดกรองและกระบอกสูบนั้นยึดอยู่กับพื้นทะเล ชายฝั่งสามารถทำงานได้เฉพาะช่วงที่น้ำขึ้นเท่านั้น จึงได้ปรับเปลี่ยนไปเป็นแบบติดตั้งบนเรือ และทำการออกแบบส่วนปลายของคานทอดแรงสัดส่วน 1 : 3 ที่ยื่นออกไปโยงกับทุ่นลอยพลาสติกกลวง ปริมาตร  $1 \times 1 \times 0.6$  ลูกบาศก์เมตร เพื่อช่วยเพิ่มความดันในกลไกกระบอกสูบได้สูงเพียงพอในการแยกน้ำบริสุทธิ์ให้ผ่านไส้กรอง สำหรับตัวเลขความสูงคลื่นเฉลี่ยที่ 20 เซนติเมตร ความถี่ 17 ลูกคลื่น ต่อนาที ต่อเนื่อง 4 ชั่วโมงใน 1 วัน ระบบควรจะสามารถผลิตน้ำดื่มได้ 40 ลิตร

คำสำคัญ: รีเวอร์สออสโมซิส, ผลิตน้ำทะเลจากน้ำจืด, พลังงานคลื่นสมุทร

<b>Title</b>	A Study On Seawater Desalination System Using Ocean Wave Power	
<b>Students</b>	Mr.Narawit Nonthakhot	Student ID 55051526
	Ms.Punnapa Chamnongnit	Student ID 55051554
	Mr.Voragun Thonghasoon	Student ID 55051602
<b>Degree</b>	Bachelor of Science (Applied Physics)	
<b>Department</b>	Physics	
<b>Faculty</b>	Science	
<b>University</b>	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)	
<b>Academic Year</b>	2015	
<b>Advisor</b>	Assoc.Prof.Anupong Songprapa	

### Abstract

To remedy the only high tide working time limitation of the sea wave powered desalination system constructed by Medical and Environmental Equipment Research Lab ( MERL ) , a new prototype has been developed. The main body that consists filter and piston units is installed on a boat instead of fixing to the seashore ground. The rear protruding end of 1 : 3 force transfer ratio lever structure has been connected to a 1 x 1 x 0.6 m<sup>3</sup> hard air-filled plastic buoy to enhance enough pressure applied for separation pure water through the filter. The design aim for pure water production rate per day corresponds to typical guest wave condition of 0.2 meters height at 17 pulses per minute , available totally for 4 hours , is 40 liters

**Keywords:** reverse osmosis, desalination, sea wave power

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเรื่องนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีเนื่องมาจากได้รับการช่วยเหลือและสนับสนุนโดยรองศาสตราจารย์อนุพงศ์ สรวงประภา เป็นผู้ให้โอกาสแก่นักศึกษาได้เริ่มจัดทำโครงการพิเศษนี้เพื่อให้ผู้จัดทำได้ค้นหาศักยภาพของตนเอง ให้คำแนะนำปรึกษาทางด้านวิชาการและแนวทางการแก้ไขปัญหาให้คณะผู้จัดทำได้มาประยุกต์ใช้กับโครงการพิเศษนี้ ทำให้สามารถดำเนินงานได้อย่างราบรื่นและประสบผลสำเร็จ

ขอขอบคุณ นาวาเอก อนุสรณ์ ยังคุ้มญาติ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการศึกษาที่ค่ายพระมหาเจษฎาราชเจ้า และให้การสนับสนุนโครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ อาจารย์ประจำตึกซ่อมสร้าง คณะวิทยาศาสตร์ ทุกท่านที่ให้การสนับสนุนในส่วนของสถานที่ปฏิบัติงานและเครื่องมือในการทำโครงการพิเศษ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการทำให้โครงการพิเศษนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ นายนฤชา อมรดิษฐ์ ช่วยให้คำแนะนำและช่วยเหลือในโครงการพิเศษนี้

ขอขอบคุณ เพื่อนในห้องโปรเจกต์ที่คอยให้ความช่วยเหลือโครงการพิเศษ ในส่วนนอกสถานที่ทำให้งานสำเร็จได้อย่างราบรื่น

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ ทุกท่านที่เมตตาตั้งแต่การศึกษาระดับมัธยมศึกษาจนถึงปัจจุบันตลอดจนกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่คอยให้คำปรึกษาและแรงผลักดันให้คณะผู้จัดทำมีกำลังใจในการทำโครงการพิเศษซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญที่สุดในการศึกษาและการทำโครงการพิเศษนี้

นราวิชัย นนทโคตร  
ปุณณภา จำนงค์นิจ  
วรกันต์ ทองฮะสุน

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ระยะเวลาและขั้นตอนการดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
<b>บทที่ 2 ทฤษฎี</b>	<b>4</b>
2.1 ทฤษฎีพื้นฐานของ Reverse Osmosis	4
2.1.1 ประวัติความเป็นมา	4
2.1.2 ปฏิกิริยาการออสโมซิสและรีเวอร์สออสโมซิส	5
2.1.3 ระบบกรองรีเวอร์สออสโมซิสพื้นฐาน	5
2.1.4 ระบบรีเวอร์สออสโมซิสที่สมบูรณ์	6
2.1.5 การนำรีเวอร์สออสโมซิสมาใช้ในการบำบัดน้ำ	7
2.2 กระจกสูบไฮดรอลิก	7
2.2.1 ชนิดของกระจกสูบ	7
2.2.2 กระจกสูบชนิดช่วงชักสั้น	9
2.2.3 ความสามารถในการทำงานของกระจกสูบ	11
2.2.4 การคำนวณหาแรงของกระจกสูบ	11
2.3 โม่เมนต์และคาน	14
2.3.1 โม่เมนต์	14
2.3.2 กฎของโม่เมนต์	15
2.3.3 คาน	15
2.3.4 หลักการ ขั้นตอนการคำนวณเรื่องคานและโม่เมนต์	16
2.4 แรงลอยตัว	17
2.4.1 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับแรงพยุง	19
2.5 หลักการของคลื่นมหาสมุทร	20
2.5.1 ส่วนประกอบของคลื่น	21
2.5.2 ขนาดของคลื่น	22
2.5.3 ชนิดและการเกิดของคลื่นเนื่องมาจากลม	23

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.4 การเปลี่ยนแปลงเมื่อคลื่นเข้าหาฝั่ง	26
2.5.5 การสะท้อนกลับของคลื่น	28
2.5.6 การเบนของคลื่น	28
2.5.7 การหักเหของคลื่น	28
2.5.8 คลื่นน้ำลึก	30
2.5.9 คลื่นน้ำตื้น	32
2.5.10 คลื่นอยู่กับที่	33
2.5.11 คลื่นใต้น้ำ	35
2.5.12 คลื่นชนิดอื่น	36
2.5.13 หลักการของพลังงานคลื่นมหาสมุทร	37
2.6 วิธีการตรวจสอบคุณภาพน้ำ	38
2.6.1 การวัดค่าความสะอาดของน้ำ	38
2.6.2 การวัดค่าความเค็มของน้ำ	38
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย</b>	<b>39</b>
3.1 ออกแบบและทดลองประสิทธิภาพของเยื่อกรองรีเวอร์สออสโมซิส	39
3.1.1 อุปกรณ์	39
3.1.2 ขั้นตอนและลักษณะการทำงานของระบบทำน้ำจืดจากน้ำทะเลโดยใช้ปั๊มลม	44
3.2 ออกแบบและทดลองการทำงานของระบบทำน้ำจืดจากน้ำทะเลโดยใช้พลังงานคลื่นสมุทร	45
3.2.1 การออกแบบอุปกรณ์	45
3.2.2 ประกอบระบบทำน้ำจืดจากน้ำทะเลโดยใช้พลังงานคลื่นสมุทร	57
3.2.3 ทดลองการทำงานของระบบทำน้ำจืดจากน้ำทะเลโดยใช้พลังงานคลื่นสมุทร	57
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล</b>	<b>58</b>
4.1 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของเยื่อกรองรีเวอร์สออสโมซิส	58
4.2 ผลการวัดความดันของระบบทำน้ำจืดจากน้ำทะเลโดยใช้พลังงานคลื่นสมุทร	62
<b>บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ</b>	<b>64</b>
5.1 สรุป	64
5.2 ปัญหาและอุปสรรคในการดำเนินโครงการงานนี้	64
5.3 ข้อเสนอแนะ	64
เอกสารอ้างอิง	65
ภาคผนวก	67

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 1.1 ระยะเวลาและขั้นตอนการดำเนินงาน	2
ตารางที่ 2.1 ขนาดของสารละลายต่าง ๆ ที่ปนอยู่ในน้ำ	7
ตารางที่ 2.2 กระบอกสูบชนิดต่าง ๆ	8
ตารางที่ 2.3 แรงของกระบอกสูบชนิดช่วงชักสั้น	9
ตารางที่ 2.4 ขนาดช่วงชักของกระบอกสูบที่มีช่วงชักสั้น	10
ตารางที่ 2.5 การหาค่าแรงของกระบอกสูบที่คิดค่าแรงต้านเนื่องจากความเสียดทาน 10 เพอร์เซ็นต์ของแรงทฤษฎี	13
ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงค่า Conductivity ของน้ำ (อัตราการไหลของน้ำที่เฉลี่ย 8.9 ml/s)	59
ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงค่า Conductivity ของน้ำ (อัตราการไหลของน้ำที่เฉลี่ย 11.5 ml/s)	60

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ต้นแบบระบบทำน้ำจืดจากน้ำทะเลโดยใช้พลังงานคลื่น	1
2.1 รายละเอียดของไส้กรอง R.O. Membrane	4
2.2 แสดงการเปรียบเทียบของหลักการทำงานของระบบออสโมซิสและรีเวอร์สออสโมซิส	5
2.3 แสดงหลักการทำงานพื้นฐานของระบบกรอง R.O.	6
2.4 โมเมนต์ตามเข็มนาฬิกา	14
2.5 โมเมนต์ทวนเข็มนาฬิกา	14
2.6 แสดงทิศทางของโมเมนต์	14
2.7 แสดงลักษณะของคาน	15
2.8 แสดงคานอันดับ 1	16
2.9 แสดงคานอันดับ 2	16
2.10 แสดงคานอันดับ 3	17
2.11 แรงที่กระทำในการลอยตัว	18
2.12 วัตถุลอย	18
2.13 วัตถุลอยปริ่ม	19
2.14 วัตถุจม	19
2.15 แสดงส่วนต่าง ๆ ของคลื่น	21
2.16 แสดงความสูงของคลื่นสัมพันธ์กับระยะเวลาที่ลมพัดต่อเนื่อง และระยะทางที่ลมพัดผ่าน เมื่อลมมีความเร็ว 54 กม./ชม.	23
2.17 แสดง surf ในแบบต่าง ๆ รูปเล็กทางขวามือเป็นรูปขยาย ให้เห็นภาพชัดเจนขึ้น	26
2.18 แสดงกระแสน้ำริมฝั่ง และการไหลกลับทะเล	26
2.19 แสดงการเปลี่ยนแปลงของคลื่นเมื่อเคลื่อนที่เข้าหาฝั่ง คลื่นแตกเมื่อยอดคลื่น มีมุนน้อยกว่า 120 องศา (3) หรือความชัน (H/L) มากกว่า 1/7	28
2.20 แสดงการเลี้ยวเบนของคลื่นเมื่อผ่านช่องแคบ	29
2.21 แสดงการเบนของคลื่นเมื่อเข้าใกล้ฝั่ง คลื่นจะเบนเข้าหาที่ตื้นหรือเบนออกเมื่อถึงที่ลึก ทำให้เรามองเห็นคลื่นขนานกับฝั่ง	29
2.22 แสดงการเบนของคลื่นเมื่อความลึกของน้ำเปลี่ยน	30
2.23 แสดงการหมุนเวียนอนุภาคน้ำในคลื่นน้ำลึก	32
2.24 แสดงขั้นตอนของลมที่ทำให้โมเลกุลของน้ำในคลื่นหมุน	33
2.25 แสดงการหมุนเวียนของอนุภาคน้ำในคลื่นน้ำตื้น	34
2.26 แสดงคลื่นอยู่กับที่ในแหล่งน้ำปิด	35
2.27 แสดงคลื่นอยู่กับที่ในแหล่งน้ำเปิด	35
2.28 คลื่นขนาดใหญ่ ความเร็วเพิ่มขึ้น ตามความยาวคลื่น ในขณะที่คลื่นขนาดจิ๋ว ความเร็วคลื่นเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวคลื่นลดลง	37
3.1 ถึงใส่ตัวอย่างน้ำทะเล	39

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.2 เยื่อกรอง Carbon In Filter และ Micro Filtration	40
3.3 เครื่องปั้มน้ำแรงดันสูง	40
3.4 ท่อกรองแรงดันสูง	41
3.5 เยื่อกรองน้ำทะเล รุ่น SW4040	41
3.6 สายไฮโดรลิก	42
3.7 เกจวัดความดัน	42
3.8 วาล์วระบายความดัน	43
3.9 เครื่องวัดค่า Conductivity	44
3.10 ระบบการทดสอบประสิทธิภาพของเยื่อกรองรีเวอร์สออสโมซิส	44
3.11 ไดอะแกรมอธิบายขั้นตอนการทำงานของระบบทดสอบประสิทธิภาพเยื่อกรองรีเวอร์สออสโมซิส	44
3.12 ภาพฉายรายละเอียดของฝากระบอกลูกสูบไฮโดรลิก	45
3.13 ภาพถ่ายของฝากระบอกลูกสูบไฮโดรลิก (ด้านข้าง)	46
3.14 ภาพถ่ายของฝากระบอกลูกสูบไฮโดรลิก (ด้านบน)	46
3.15 ภาพถ่ายของฝากระบอกลูกสูบไฮโดรลิก (ด้านล่าง)	46
3.16 ภาพฉายรายละเอียดของเสื่อกระบอกลูกสูบไฮโดรลิก	47
3.17 ภาพถ่ายของเสื่อกระบอกลูกสูบไฮโดรลิก (ด้านข้าง)	48
3.18 ภาพถ่ายของเสื่อกระบอกลูกสูบไฮโดรลิก (ด้านบน)	49
3.19 ภาพถ่ายของเสื่อกระบอกลูกสูบไฮโดรลิก (ด้านล่าง)	49
3.20 โครงสร้างหลัก	50
3.21 ภาพฉายรายละเอียดโครงสร้างหลักระบบทำน้ำจืดจากน้ำทะเลโดยใช้พลังงานคลื่น	50
3.22 โครงสร้างรอง	51
3.23 ภาพฉายรายละเอียดโครงสร้างรองของระบบทำน้ำจืดจากน้ำทะเลโดยใช้พลังงานคลื่น	51
3.24 ภาพถ่ายโครงสร้างหลักระบบทำน้ำจืดจากน้ำทะเลโดยใช้พลังงานคลื่น (ด้านข้าง)	52
3.25 ภาพถ่ายโครงสร้างหลักระบบทำน้ำจืดจากน้ำทะเลโดยใช้พลังงานคลื่น (ด้านหน้า)	52
3.26 ภาพถ่ายโครงสร้างหลักระบบทำน้ำจืดจากน้ำทะเลโดยใช้พลังงานคลื่น (ด้านหลัง)	52
3.27 โครงสร้างของฟูลอย	53
3.28 ภาพฉายโครงสร้างของฟูลอย	54
3.29 ภาพถ่ายโครงสร้างของฟูลอย (ด้านข้าง)	54
3.30 ภาพถ่ายโครงสร้างของฟูลอย (ด้านบน)	55
3.31 ภาพถ่ายโครงสร้างของฟูลอย (ด้านล่าง)	55
3.32 คาน	56
3.33 ภาพฉายแบบคาน	56
3.34 ภาพถ่ายแบบคาน	56

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.35 ไดอะแกรมอธิบายขั้นตอนการทำงานของระบบทำน้ำจืดจากน้ำทะเล โดยใช้พลังงานคลื่นสมุทร	57
3.36 รวมทั้งระบบทำน้ำจืดจากน้ำทะเลโดยใช้พลังงานคลื่นสมุทร	57
3.37 ภาพถ่ายรวมทั้งระบบทำน้ำจืดจากน้ำทะเลโดยใช้พลังงานคลื่นสมุทรในภาคสนาม	58
4.1 ระบบการทดสอบประสิทธิภาพของเยื่อกรองรีเวอร์สออสโมซิส	58
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดัน (บาร์) และค่า Conductivity ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	59
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดัน (บาร์) และ ค่า Salinity (ppt)	60
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดัน (บาร์) และค่า Conductivity ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	61
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดัน (บาร์) และ ค่า Salinity (ppt)	62
4.6 การทำงานของกระบอกสูบ	63

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การผลิตน้ำประปาเพื่อการอุปโภคบริโภคโดยทั่วไปจะเลือกผลิตจากแหล่งน้ำจืด ได้แก่ แม่น้ำ คลอง บึง น้ำบาดาลธรรมชาติเนื่องจากมีต้นทุนที่ถูกและใช้เทคโนโลยีการผลิตที่ง่ายไม่ซับซ้อนแต่สำหรับในบางพื้นที่ที่สภาพภูมิประเทศไม่มีแหล่งน้ำหรือมีแต่ไม่เพียงพอเนื่องจากมีผู้คนอาศัยอยู่มาก จึงจำเป็นต้องจัดหาซื้อจากนอกพื้นที่ สำหรับประชาชนที่พักอาศัยอยู่ตามชายฝั่งทะเลหรือชุมชนเกาะ ก็ยังมีทางเลือกอีกทาง คือการทำน้ำจืดจากน้ำทะเลด้วยเทคโนโลยี

ปัจจุบันกรรมวิธีในการทำน้ำทะเลให้กลายเป็นน้ำจืดโดยการแยกเกลือและสารเจือปนอื่น ๆ ออกไปนั้นมีหลายแนวทาง เช่น กระบวนการเปลี่ยนแปลงสถานะ (Phase-change process), การกรองด้วยเยื่อเลือกผ่าน (Membrane technology), กระบวนการแยกเกลือออกจากน้ำด้วยพลังงานทดแทน, การพัฒนาระบบอัลตราโซนิกในการผลิตน้ำทะเลเป็นน้ำจืด เป็นต้น ในส่วนของโครงการพิเศษนี้จะศึกษาการกรองโดยระบบรีเวอร์สออสโมซิสที่ไม่ใช้พลังงานไฟฟ้า ซึ่งได้ทำการพัฒนามาจากต้นแบบเดิม ของห้องปฏิบัติการวิจัยเครื่องมือทางการแพทย์และสิ่งแวดล้อม (Medical and Environmental Equipment Research Lab, MERL) ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 1.1 ซึ่งมีข้อจำกัดที่โครงสร้างหลักในการรับแรงไปอัดกระบอกสูบ ถูกยึดไว้กับพื้นทะเลชายฝั่งทำให้สามารถทำงานได้เฉพาะช่วงเวลาที่น้ำขึ้นเท่านั้น



รูปที่ 1.1 ต้นแบบระบบทำน้ำจืดจากน้ำทะเลโดยใช้พลังงานคลื่น

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. เพื่อศึกษาการทำงานของระบบทำน้ำจืดจากน้ำทะเลโดยใช้หลักการรีเวอร์สออสโมซิสปกติ ใช้ปั๊มน้ำแรงดันสูงพลังงานไฟฟ้า
2. เพื่อศึกษาพลังงานเชิงกลจากคลื่นเพื่อนำมาใช้ในระบบแทนการใช้ปั๊มน้ำแรงดันสูงต่อยอดจากระบบเดิมที่พัฒนาโดยห้องปฏิบัติการวิจัยเครื่องมือทางการแพทย์และสิ่งแวดล้อม

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาและทดสอบสมบัติของระบบรีเวอร์สออสโมซิสที่ใช้ปั๊มแรงดันสูงพลังงานไฟฟ้าในการอัดน้ำทะเลผ่านเยื่อกรองให้เป็นน้ำจืดและนำน้ำจืดที่ได้สู่ครัวเรือน โดยอาศัยพลังงานจากคลื่นสมุทรแทนที่จะใช้ไฟฟ้า
2. ทำการออกแบบและสร้างระบบเรือและหุ่นลอยเพื่อการนำพลังงานคลื่นสมุทรสร้างแรงอัดต่อระบบกรองรีเวอร์สออสโมซิส
3. ทำการทดสอบระบบในภาคสนาม

## 1.4 ระยะเวลาและขั้นตอนในการทำงาน

ตารางที่ 1.1 ระยะเวลาและขั้นตอนการดำเนินงาน

แผนการดำเนินการ	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
1. ศึกษาและรวบรวมข้อมูลกรรมวิธีต่างๆในการทำน้ำจืดจากน้ำทะเล	→										
2. ศึกษาหลักการและจัดซื้อส่วนประกอบระบบรีเวอร์สออสโมซิส			→								
3. ประกอบระบบรีเวอร์สออสโมซิสชนิดใส่กรองน้ำทะเล				→							
4. ทดสอบระบบรีเวอร์สออสโมซิสชนิดใส่กรองน้ำทะเล						→					

(ต่อ) ตารางที่ 1.1 ระยะเวลาและขั้นตอนการดำเนินงาน

5. ออกแบบ จัดซื้อวัสดุและ ประกอบ ระบบโครงสร้าง หลักยึดกับเรือ และทุ่นลอย											
6. ทดสอบการ ทำงานของระบบ โดยรวมใน ภาคสนาม ชายฝั่งทะเล											
7. วิเคราะห์ผล											
8. สรุป ผลการวิจัย											

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้ความเข้าใจในหลักการรีเวอร์สออสโมซิส
2. สามารถนำความรู้ที่ได้ไปประยุกต์ใช้พลังงานคลื่นนำมาใช้แทนพลังงานไฟฟ้า
3. สามารถนำไปต่อยอดเชิงพาณิชย์

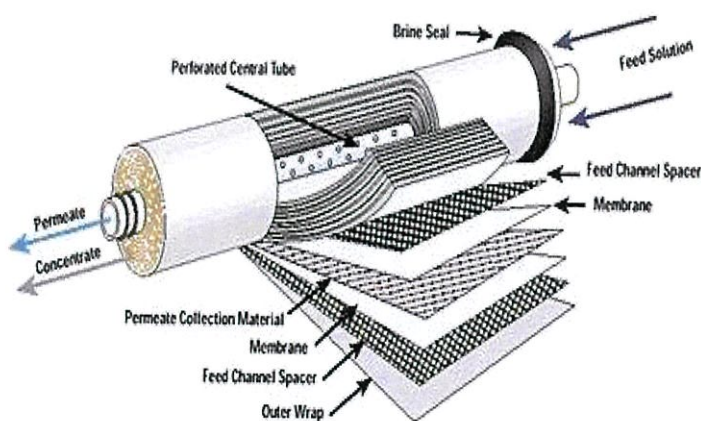
## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

กรรมวิธีหลักในการทำน้ำทะเลให้กลายเป็นน้ำจืดโดยใช้เทคนิคการกรองโดยใช้เยื่อเลือกผ่าน (Membrane) ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงการผลิตน้ำประปาเพื่อการอุปโภคบริโภคจากน้ำทะเลโดยระบบรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis : R.O.) ซึ่งเป็นหลักการย้อนกลับของปรากฏการณ์ออสโมซิสที่ให้แรงอัดสูง ทำให้เกิดความดันกับสารละลายที่มีความเข้มข้นเคลื่อนผ่านเมมเบรน (R.O. Membrane) ซึ่งมีรูพรุนขนาดเล็ก ทำหน้าที่เป็นตัวกรองที่ยอมให้โมเลกุลที่เล็กกว่ารูพรุนนั้นผ่านไปได้ ซึ่งเหมาะกับการแยกน้ำจากสารละลายต่าง ๆ อย่างมีประสิทธิภาพ โดยทั่วไปแล้วจะใช้พลังงานไฟฟ้าในการขับเคลื่อนระบบทำให้มีต้นทุนในการผลิตสูง จึงประยุกต์ใช้พลังงานเชิงกล เคลื่อนในทะเลซึ่งจะทำการยกหุ่นลอยให้ลอยขึ้นลงตามการเคลื่อนที่ของคลื่นซึ่งต้องคำนึงถึงแรงลอยตัว กลไกของชุดคานเหล็กจะทำให้เกิดแรงอัดที่กระบอกสูบ นำน้ำทะเลส่วนที่อยู่ในกระบอกสูบผ่านระบบวาล์วควบคุม ซึ่งเป็นวาล์วน้ำทางเดียว (Unilateral check valve) เข้าสู่ท่อสายน้ำความดันสูงที่ต่อกับชุดกระบอกกรองที่บรรจุ R.O. Membrane และได้น้ำบริสุทธิ์ซึมทะลุแผ่นเมมเบรนออกมาทางท่อน้ำขาออกของชุดกระบอกกรอง เมื่อหุ่นเคลื่อนที่ลงกระบอกสูบจะขยายตัวทำให้มีการสูบน้ำผ่านวาล์วทางเดียว เข้ามาจากท่อน้ำเข้า ซึ่งน้ำที่ผ่านเข้ามาเป็นน้ำที่ได้จากระบบกรองน้ำทะเลแล้วส่งผ่านระบบท่อน้ำ เพื่อนำไปใช้เป็นน้ำจืดต่อไป

### 2.1 ทฤษฎีพื้นฐานของรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis : R.O.)

#### 2.1.1 ประวัติความเป็นมา

ต้นกำเนิดของระบบกรองน้ำรีเวอร์สออสโมซิสได้ถูกคิดค้นมาเพื่อใช้ในกองทัพเรือสหรัฐ เพื่อนำน้ำทะเลผ่านการบำบัดและการกรองให้เป็นน้ำจืด เพื่อใช้ในเรือที่อยู่กลางทะเลซึ่งไม่สามารถหาน้ำจืดใช้ได้



รูปที่ 2.1 รายละเอียดของไส้กรอง R.O. Membrane

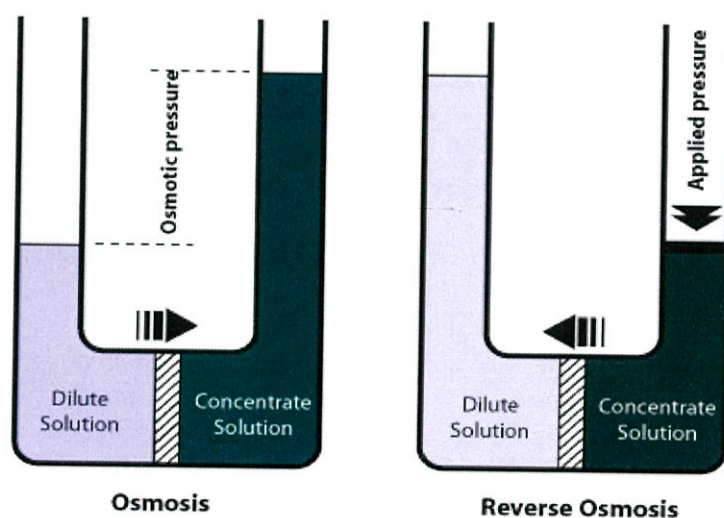
(ที่มา : <http://www.aqua29shop.com/article/-reverse-osmosis-r-o>)

รีเวอร์สออสโมซิส คือ ระบบการกรองโดยการเพิ่มแรงดันให้กับน้ำ เพื่อให้น้ำไหลผ่านกรอง R.O. Membrane โดยที่กรองนั้นจะมีรูที่ผิวของเยื่อละเอียดถึง 0.00001 ไมครอน จึงทำให้โมเลกุลของน้ำ ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าสามารถไหลผ่านเยื่อกรองนี้ได้ แต่สารละลายที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่าเยื่อกรอง R.O. Membrane จะถูกขับออกทางท่อน้ำทิ้งของระบบรีเวอร์สออสโมซิสออกไป

น้ำที่ผ่านกระบวนการผลิตด้วยระบบ R.O. นี้ได้รับรองจาก EPA (Environmental Protection Agency - USA) ว่าเป็นระบบการผลิตน้ำบริสุทธิ์ที่ดีที่สุดระบบหนึ่งของโลก ซึ่งสามารถพิสูจน์ได้ด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์ เคมี พิษวิทยาและจุลชีววิทยา ดังนั้นจะพบว่าน้ำที่ผ่านการกรอง เมื่อนำน้ำไปดื่มจะไม่เกิดคราบตะกอน จึงเป็นระบบผลิตน้ำที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายกันในปัจจุบัน และได้มีการนำเทคโนโลยีดังกล่าวมาใช้ในการอุปโภค บริโภค และใช้งานอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น ผลิตน้ำดื่มเพื่อการบริโภคและใช้ในการแพทย์ เป็นต้น

### 2.1.2 ปฏิกิริยาออสโมซิสและรีเวอร์สออสโมซิส

สถานการณ์ดังในรูปที่ 2.2 (ซ้าย) แสดงปรากฏการณ์ออสโมซิส (Osmosis) น้ำจะแพร่ผ่านเยื่อเลือกผ่านซึ่งกันอยู่ตรงกลางโดยแพร่จากด้านที่สารละลายมีความเข้มข้นต่ำไปด้านที่มีสารละลายความเข้มข้นสูง ส่วนต่างระดับที่เกิดขึ้นเรียกว่า “แรงดันออสโมติก” (Osmotic) สำหรับสถานการณ์ดังรูปที่ 2.2 (ขวา) ถ้าใส่แรงดันทางฝั่งสารละลายความเข้มข้นสูงให้มากกว่าแรงดันออสโมติก น้ำจะแพร่ผ่านเยื่อเลือกผ่านกลับไปยังสารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำจึงเรียกว่า “ปรากฏการณ์รีเวอร์สออสโมซิส” (Reverse Osmosis)

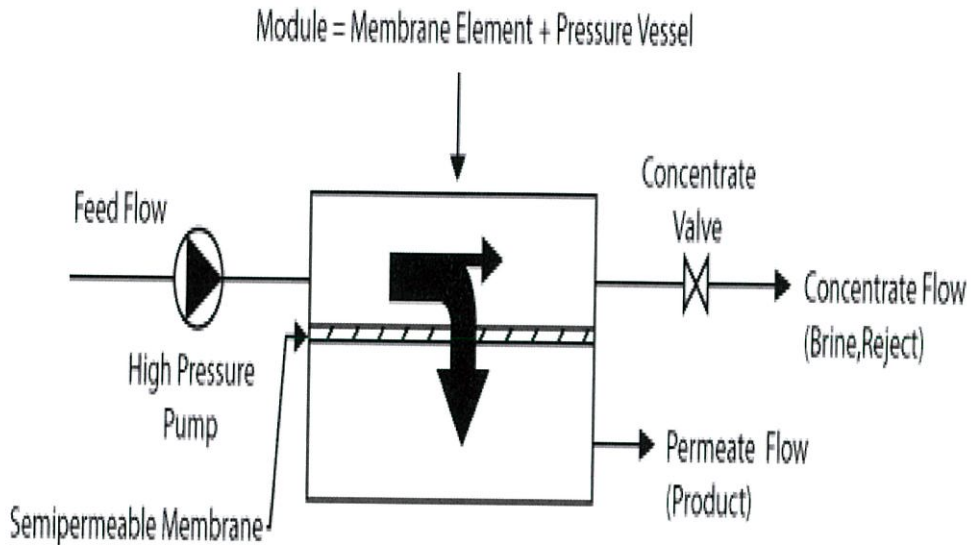


รูปที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบของหลักการการทำงานของระบบออสโมซิสและรีเวอร์สออสโมซิส  
(ที่มา : <http://www.reefthailand.com/archives/reviews/ro-di-ginkosea>)

### 2.1.3 ระบบกรองรีเวอร์สออสโมซิสพื้นฐาน

โดยทั่วไปการกรองน้ำทะเลโดยวิธี R.O. มีการทำงานหลักตามแผนผังระบบต้องทำการอัดน้ำทะเลที่มีแรงดันสูงมากกว่า 50 บาร์ (bar) ก่อนที่จะผ่านระบบกรอง R.O. เมื่อน้ำผ่าน Membrane จะแยกออกเป็นสองส่วน คือส่วนที่มีเกลือต่ำหรือก็คือน้ำ R.O. ในทางเทคนิคเรียกว่า “Permeate”

ส่วนน้ำที่ไหลผ่าน Membrane ออกไปทาง Concentrate Valve คือน้ำทิ้งที่มีเกลือสูง เรียกน้ำส่วนนี้ว่า Concentrate หรือ Reject ซึ่งสาเหตุที่ต้องมีส่วนน้ำทิ้งก็เพราะป้องกันเกลือแร่ที่ไม่สามารถผ่าน Membrane ไปได้นั้นสะสมตัวจนความเข้มข้นถึงจุดตกผลึก ทำให้ Membrane สูญเสียพื้นที่การทำงานบางส่วนหรือทั้งหมด



รูปที่ 2.3 แสดงหลักการทำงานพื้นฐานของระบบกรอง R.O.  
(ที่มา : <http://www.reefthailand.com/archives/reviews/ro-di-ginkosea>)

#### 2.1.4 ระบบรีเวอร์สออสโมซิสที่สมบูรณ์

กระบวนการกรองที่สมบูรณ์มี 4 ขั้นตอน ดังนี้

1. Sediment Filter เป็นการกรองตะกอนหยาบขั้นต้น โดยตะกอนสิ่งสกปรกที่ปะปนมากับน้ำทุกชนิด เช่น ทรายละเอียด สนิมเหล็ก เศษผง จุลินทรีย์ และสามารถกรองสิ่งเล็กกว่าเส้นผมได้ถึง 5 เท่า โดยเยื่อกรองเป็น Polypropylene Filter ขนาด 5 ไมครอน เป็นการปรับสภาพน้ำระดับหนึ่งเพื่อยืดอายุการใช้งานของเยื่อกรอง R.O. Membrane

2. Pre-Carbon Filter สารกรองจะเป็นถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) ซึ่งจะลดปริมาณคลอรีนในน้ำที่จะทำลาย Membrane นอกจากนี้ยังปรับปรุงสี กลิ่นและรสชาติของน้ำ

3. R.O. Membrane จะสามารถขจัดสิ่งปนเปื้อนในน้ำ เป็นกระบวนการที่ใช้แรงดันน้ำผ่านเยื่อกรอง ซึ่งเป็นเยื่อกรองที่สามารถให้น้ำซึมผ่านได้ มีรูขนาด 0.0001 ไมครอน มีสัดส่วนในการแยกสารละลาย (Salt Rejection) สามารถแยกสารเคมีโลหะหนัก เช่น ตะกั่ว ปรอท แคดเมียม และเชื้อโรคต่าง ๆ

4. Post-carbon Filter สารกรองจะเป็นถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) เป็นขั้นตอนสุดท้ายของระบบการกรองขจัดกลิ่น หรือก๊าซที่ยังคงเหลือในน้ำและปรับรสชาติของน้ำให้เป็นธรรมชาติ อายุการใช้งานของเยื่อกรอง Membrane ขึ้นอยู่กับระบบการกรองเบื้องต้น (R.O.-Pretreatment) หากมีการออกแบบให้น้ำก่อนเข้าเยื่อกรอง Membrane (R.O. Feed Water)

มีคุณภาพดีต้องตามข้อกำหนด (R.O. Membrane Specification) ของเยื่อ Membrane ก็จะสามารถยืดอายุการใช้งานของเยื่อ Membrane ออกไปได้อย่างนาน

### 2.1.5 การนำรีเวอร์สออสโมซิสมาใช้ในการบำบัดน้ำ

จากหลักการดังกล่าว R.O. ถูกนำมาใช้ในการบำบัดน้ำอย่างแพร่หลาย เนื่องจากน้ำเป็นตัวทำละลายที่ดีและมีขนาดโมเลกุลเล็กมาก (0.0001 ไมครอน) เมื่อเทียบกับขนาดโมเลกุลแปลกปลอมอื่นๆ ที่ปะปนกันอยู่ (ดังตารางที่ 2.1) จึงสามารถแพร่กระจายผ่าน Membrane ได้ง่ายแต่ข้อจำกัดของการบำบัดน้ำแบบ R.O. จะให้ผลผลิตน้ำมีอัตราการไหลต่ำ ดังนั้น จึงต้องการพื้นที่ผิวของ Membrane สูง เพื่อให้ได้น้ำปริมาณมากภายในเวลาที่เหมาะสม นอกจากนี้การบำบัดน้ำแบบ R.O. เกิดการอุดตันและการเสียหายของ Membrane ซึ่งเกิดขึ้นได้ง่าย หากน้ำที่นำมาบำบัดมีการปนเปื้อนสูง ดังนั้นน้ำที่นำมาบำบัดจะต้องนำไปผ่าน Pre filter เพื่อขจัดสารแขวนลอยที่มีโมเลกุลใหญ่และขจัดสารประกอบคลอไรด์ ที่จะทำให้ Membrane เสียหาย และหากต้องการนำน้ำจากการบำบัดแบบ R.O. ไปใช้ในการอุปโภคบริโภค ต้องนำน้ำที่ผ่าน Membrane มาแล้วไปผ่าน Post filter อีกครั้งหนึ่ง เพื่อเป็นการขจัดกลิ่นที่ไม่พึงประสงค์ออกไป

ตารางที่ 2.1 ขนาดของสารละลายต่าง ๆ ที่ปนอยู่ในน้ำ

ขนาดของสารละลายต่าง ๆ ที่ปนอยู่ในน้ำ มีขนาดโมเลกุลโดยประมาณ	
1. สารตะกั่ว	ขนาด 0.00031 ไมครอน
2. พรอท	ขนาด 0.00029 ไมครอน
3. แคลเซียม	ขนาด 0.00028 ไมครอน
4. สารหนู	ขนาด 0.00024 ไมครอน
5. เหล็ก	ขนาด 0.00023 ไมครอน
6. แคลเซียม	ขนาด 0.00040 ไมครอน
7. โครเมียม	ขนาด 0.00023 ไมครอน
8. แร่เงิน	ขนาด 0.00040 ไมครอน
9. อลูมิเนียม	ขนาด 0.00027 ไมครอน
10. แบเรียม	ขนาด 0.00042 ไมครอน
11. แบคทีเรีย	ขนาด 0.4-1.0 ไมครอน
12. ไวรัส	ขนาด 0.02-0.4 ไมครอน

## 2.2 กระบอกลูกสูบ

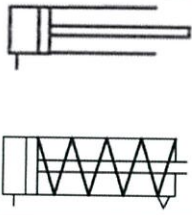
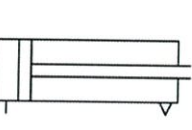
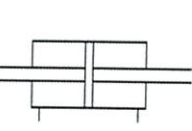
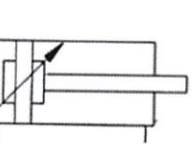
การใช้งานกระบอกลูกสูบทั่วไปทั้งแบบนิวเมตริก (pneumatic) และไฮดรอลิก (hydraulic) ต่างเป็นการส่งทอดแรงเชิงกลผ่านการเพิ่มความดันในเนื้อของไหล (fluid) เปลี่ยนให้เป็นพลังงานกล และมีการทำงานในแนวเส้นตรงนั่นก็คือ กระบอกลูกสูบ จะประกอบไปด้วย ลูกสูบ ก้านสูบ ฝาครอบหัวท้าย บูชก้านสูบ

### 2.2.1 ชนิดของกระบอกลูกสูบ

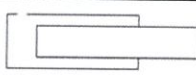
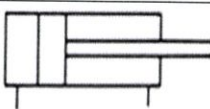
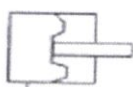
กระบอกลูกสูบมีหลายชนิด ตามแต่ลักษณะการใช้งานและวัตถุประสงค์ กระบอกลูกสูบหลายชนิดถูกพัฒนาขึ้นตามความก้าวหน้าของการใช้ เพื่อส่งเสริมการควบคุมมลพิษและการประหยัดพลังงาน กระบอกลูกสูบเคลื่อนที่ในลักษณะเส้นตรง แต่สามารถทำงานลักษณะหมุนได้เหมือนการทำงานของมอเตอร์ ลูกสูบและก้านสูบในกระบอกลูกสูบทำงานได้โดยป้อนของไหลความดันสูงอัดเข้าไปด้านหนึ่งของกระบอกลูกสูบ ดันให้ลูกสูบและก้านสูบเคลื่อนที่ออก ถ้าต้องการให้ก้านสูบและลูกสูบเคลื่อนที่กลับให้ป้อนของไหลความดันทางด้านก้านสูบ นอกจากกระบอกลูกสูบที่มีใช้งานกันทั่วไปแล้วยังมีกระบอกลูกสูบอีกหลายชนิดลักษณะต่าง ๆ ที่แบ่งตามวิธีใช้งานดังแสดงในตารางที่ 2.2

กระบอกลูกสูบยังเป็นตัวทำงานด้านเครื่องกลที่อยู่ในแนวเส้นตรง ซึ่งสามารถถ่ายกำลังในแนวเส้นตรงได้ เช่น ใช้ในการจับยึดผลัดเปลี่ยนชิ้นงานส่งต่อไปยังอีกที่หนึ่ง ซึ่งมีประโยชน์มากมายในการใช้งานและกระบวนการผลิตแบบอัตโนมัติได้

ตารางที่ 2.2 กระบอกลูกสูบชนิดต่าง ๆ

ชนิด	สัญลักษณ์	การใช้งานและลักษณะพิเศษ
กระบอกลูกสูบทำงานชนิดทางเดียว (single acting) ชนิดที่มีสปริงและไม่สปริง		ป้อนความดันของไหลเข้ากระบอกลูกสูบเพียงทางเดียวและลูกสูบเคลื่อนที่กลับที่เดิมด้วยแรงภายนอก แรงที่อยู่ภายในจะทำให้แรงของกระบอกลูกสูบลดลง
กระบอกลูกสูบชนิดทำงานสองทาง (single acting) ชนิดที่มีก้านสูบข้างเดียว		ป้อนความดันลมเข้าทั้งสองข้างของลูกสูบโดยทั่วไปลูกสูบที่มีการสูบเพียงข้างเดียวเคลื่อนที่ไป - กลับด้วยความดันอัดโดยของไหล
กระบอกลูกสูบชนิดทำงานสองทาง (double acting) ชนิดที่มีก้านสูบทั้งสองข้าง		ป้อนความดันของไหลเข้าได้ทั้งสองข้างของกระบอกลูกสูบ พื้นที่รับของทั้งสองข้างเท่ากัน เพราะว่ามีก้านสูบอยู่ทั้งสองข้าง
กระบอกลูกสูบชนิดมีตัวกันกระแทก (cylinder with cushion) ชนิดมีตัวกันกระแทกข้างเดียวและมีตัวกันกระแทกทั้งสองข้าง		ระบุสัญลักษณ์โดยใส่เพิ่มส่วนกันกระแทกไว้ด้านที่ลูกสูบหยุด โดยมีการกันกระแทก เครื่องหมายลูกศรแสดงว่าปรับการกันกระแทกได้จากภายนอก

## (ต่อ) ตารางที่ 2.2 กระบอกลูกสูบชนิดต่าง ๆ

ชนิด	สัญลักษณ์	การใช้งานและลักษณะพิเศษ
กระบอกลูกสูบชนิดแรม (ram cylinder)		ป้องกันความดันของไหลเข้ากระบอกลูกสูบเพียงทางเดียว ลูกสูบเคลื่อนที่กลับตำแหน่งเดิมด้วยแรงภายนอก
กระบอกลูกสูบชนิดมีผลต่างความดันของลูกสูบ (differential cylinder)		อัตราส่วนระหว่างกระบอกลูกสูบ และ ก้านสูบกับพื้นที่กระบอกลูกสูบเป็นองค์ประกอบสำคัญในการทำงานของกระบอกลูกสูบ กระบอกลูกสูบชนิดนี้เป็นการทำงานสองทางโดยมีการรักษาความดันต่ำไว้ด้านก้านสูบเสมอ ความดันที่สูงกว่าจะถูกป้องกันหรือระบายออกจากด้านลูกสูบเพื่อให้ลูกสูบทำงาน
กระบอกลูกสูบชนิดแผ่นไดอะแฟรม		ใช้แผ่นไดอะแฟรมส่วนรับความดัน ระยะช่วงชักไม่ยาว แต่มีลักษณะสมบัติกันของไหลรั่วได้ดี และมีความเสียดทางต่ำ

## 2.2.2 กระบอกลูกสูบชนิดช่วงชักสั้น

ตัวอย่าง ค่าแรงดันที่ได้จากกระบอกลูกสูบชนิด นิวเมตริกสำหรับขนาดกระบอกลูกสูบและความดันลมค่าต่าง ๆ เป็นดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 แรงของกระบอกลูกสูบชนิดนิวเมตริกช่วงชักสั้น

กระบอกลูกสูบสองทิศทาง				
ขนาดกระบอกลูกสูบ (มิลลิเมตร)	ทิศทาง ของก้านสูบ	ความดันใช้งาน (บาร์)		
		3	5	7
12	เข้า	5.20	2.40	9.50
	ออก	3.30	6.50	90.7
16	เข้า	5.40	5.70	50.10
	ออก	6.00	10.00	00.14
20	เข้า	7.00	7.110	40.16
	ออก	4.90	7.150	90.21
25	เข้า	3.110	8.180	40.26
	ออก	7.140	5.240	30.34
32	เข้า	18.00	30.00	00.42
	ออก	24.00	40.00	00.56
40	เข้า	31.00	52.00	00.73
	ออก	37.00	62.00	00.87

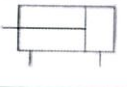
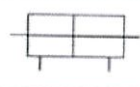
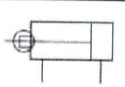
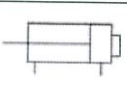
(ต่อ) ตารางที่ 2.3 แรงของกระบอกสูบชนิดช่วงชักสั้น

50	เข้า	49.00	82.00	00.115
	ออก	58.00	98.00	00.137
63	เข้า	84	140	196
	ออก	93	155	218

การหาค่าตามตาราง เช่น กระบอกสูบชนิดสองทิศทางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร ความดันใช้งาน 5 บาร์จะได้รับแรงของกระบอกสูบ ในจังหวะดันออกเท่ากับ 15.70 กิโลกรัมแรง และแรงในจังหวะหดกลับเท่ากับ 11.70 กิโลกรัมแรง เป็นต้น

สำหรับตัวอย่าง ค่าระยะช่วงชักมาตรฐานของกระบอกสูบนิวเมตริก ขนาดลูกสูบต่าง ๆ เป็นดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ขนาดช่วงชักของกระบอกสูบที่มีช่วงชักสั้น

ขนาด กระบอกสูบ (มิลลิเมตร)	กระบอกสูบสองทิศทาง (กิโลกรัมแรง)			
	ชนิดก้านสูบ เดี่ยว	ชนิดก้านสูบ สองข้าง	ชนิดก้านสูบหมุน ไม่ได้	ชนิดยึดท้าย
				
ช่วงชักมาตรฐาน(มิลลิเมตร)				
12	5, 10, 15, 20,	5, 10, 15, 20,	5, 10, 15, 20,	5, 10, 15,
16	25, 30	25, 30	25, 30	20, 25, 30
20	5, 10, 20, 25,	5, 10, 15, 20,	5, 10, 15, 20,	5, 10, 15,
25	30, 35, 40, 45, 50	25, 30, 35, 40, 45, 50	25, 30, 35, 40, 45, 50	20, 25, 30, 35, 40, 45, 50
32	5, 10, 15, 20,	5, 10, 15, 20,	5, 10, 15, 20,	5, 10, 15,
40	25, 30, 35, 40, 45, 50, 75, 100	25, 30, 35, 40, 45, 50	30, 35, 40, 45, 50, 75, 100	20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 75, 100
50	10, 15, 20, 25,	5, 10, 15, 20,	5, 10, 15, 20,	10, 15, 20,
63	30, 35, 40, 45, 50, 75, 100	25, 30, 35, 40, 45, 50, 75, 100	25, 30, 35, 40, 45, 50, 75, 100	25, 30, 35, 40, 45, 50, 75, 100
80			-	
100				

### 2.2.3 ความสามารถในการทำงานของกระบอกสูบ

#### 1. แรงของกระบอกสูบ

แรงของกระบอกสูบสามารถคำนวณได้จากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกสูบ เส้นผ่านศูนย์กลางของก้านสูบและความดันลมอัด ดังนี้

$$F_1 = \frac{\pi}{4} D^2 \times P \times \mu_1 \quad (2.1)$$

$$F_2 = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \times P \times \mu_2 \quad (2.2)$$

- เมื่อ
- $F_1$  = แรงของกระบอกสูบในจังหวะดัน (กิโลกรัมแรง)
  - $F_2$  = แรงของกระบอกสูบในจังหวะดึง (กิโลกรัมแรง)
  - $P$  = ความดันลมอัด (กิโลกรัมแรง/ตารางเซนติเมตร)
  - $D$  = เส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกสูบ (เซนติเมตร)
  - $d$  = เส้นผ่านศูนย์กลางของก้านสูบ (เซนติเมตร)
  - $\mu_1$  = สัมประสิทธิ์ความเสียดทานในจังหวะดัน
  - $\mu_2$  = สัมประสิทธิ์ความเสียดทานในจังหวะดึง

สัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะแปรผันตรงกับค่าตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกสูบ ความต้านทานการเคลื่อนที่ของซีล และความต้านทานการเคลื่อนที่ของก้านสูบโดยปกติสำหรับนิวเมตริกจะตั้งไว้ที่ 0.5 – 0.7

#### 2. ปริมาณลมที่ใช้ (อัตราการไหล)

อัตราการไหลที่ต้องใช้ทำให้กระบอกสูบทำงาน สามารถคำนวณได้จากความยาวช่วงชัก ปริมาตรของกระบอกสูบทั้ง 2 ด้านของแป้นลูกสูบซึ่งแตกต่างกัน ความดันลมและอัตราการเคลื่อนที่ของลูกสูบสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$V_a = \frac{(A_1 + A_2) \times L \times (P + 1.033) \times n}{1000} \quad (2.3)$$

- เมื่อ
- $V_a$  = ปริมาณลมที่ใช้ (ลิตรต่อนาที คิดเทียบที่ความดันบรรยากาศ)
  - $L$  = ช่วงชักของกระบอกสูบ (เซนติเมตร)
  - $A_1$  = พื้นที่ลูกสูบด้านลูกสูบ (ตารางเซนติเมตร)
  - $A_2$  = พื้นที่ลูกสูบด้านก้านสูบ (ตารางเซนติเมตร)
  - $P$  = ความดันลม (กิโลกรัมแรง/ตารางเซนติเมตร)
  - $n$  = จำนวนครั้งที่ลูกสูบเคลื่อนที่ไป – กลับต่อนาที

$$A_1 = \frac{\pi}{4} D^2 \quad (2.4)$$

$$A_2 = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \quad (2.5)$$

เมื่อ  $D$  = เส้นผ่านศูนย์กลางของกระบอกสูบ (เซนติเมตร)  
 $d$  = เส้นผ่านศูนย์กลางของก้านสูบ (เซนติเมตร)

#### 2.2.4 รายละเอียดการคำนวณหาแรงของกระบอกสูบ

สำหรับกรณีกระบอกสูบนิวเมตริก แรงของกระบอกสูบคำนวณได้จากความดันลม ขนาดพื้นที่หน้าตัดของกระบอกสูบและแรงเสียดทานของกระบอกสูบโดยมีแรงของกระบอกสูบทางทฤษฎีมีค่าเป็น

$$F_{th} = A \times P \quad (2.6)$$

โดย  $F_{th}$  = แรงดันที่คำนวณได้จากทฤษฎี (นิวตัน)  
 $A$  = พื้นที่หน้าตัดของกระบอกสูบ (ตารางเซนติเมตร)  
 $P$  = ความดันลมอัด (บาร์)

ในทางปฏิบัติแรงที่เกิดขึ้นจริงจะมีค่าน้อยกว่าแรงที่คำนวณทางทฤษฎี เพราะสูญเสียไปเนื่องจากแรงเสียดทานซึ่งจากการทดสอบพบว่าที่ความดัน 4 – 8 บาร์ แรงเสียดทานจะมีค่าเป็น 3 – 20 เปอร์เซ็นต์ของแรงที่คำนวณได้ทางทฤษฎี และจะต้องนำค่านี้ไปคำนวณด้วย ดังนั้น

ถ้าเป็นกระบอกสูบทางเดียว  
 สามารถคำนวณหาค่าแรงที่เกิดขึ้นจริง

$$F_n = A \times P - (F_R - F_F) \quad (2.7)$$

ถ้ากระบอกสูบทำงานสองทาง  
 สามารถคำนวณหาค่าแรงที่เกิดขึ้นจริงในขณะที่ลูกสูบเคลื่อนที่ออกมีค่าเท่ากับ

$$F_n = A \times P - F_R \quad (2.8)$$

และแรงที่เกิดขึ้นจริงในขณะที่ลูกสูบเคลื่อนที่กลับมีค่าเท่ากับ

$$F_n = A' \times P - F_R \quad (2.9)$$

หรือ

$$F_n = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2) \times P - F_R \quad (2.10)$$

A (พื้นที่วงแหวน) = พื้นที่หน้าตัดของลูกสูบ - พื้นที่หน้าตัดของก้านสูบ

$$A' = A^2 - a^2 \quad (2.11)$$

$$A' = \frac{\pi}{4}D^2 - \frac{\pi}{4}d^2 \quad (2.12)$$

$$A' = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2) \quad (2.13)$$

- โดย  $F_{th}$  = แรงดันที่คำนวณได้จากทฤษฎี (นิวตัน)  
 $F_n$  = แรงที่เกิดขึ้นจริง (ตารางเมตร)  
 $A$  = พื้นที่หน้าตัดของลูกสูบ (ตารางเซนติเมตร)  
 $a$  = พื้นที่หน้าตัดของก้านสูบ (ตารางเซนติเมตร)  
 $A'$  = พื้นที่หน้าตัดของวงแหวน (ตารางเซนติเมตร)  
 $P$  = ความดันใช้งาน (บาร์ หรือ นิวตัน)  
 $F_R$  = แรงเสียดทาน (นิวตัน) (มีค่า 3 - 20 % ของแรงที่คำนวณทางทฤษฎี)  
 $F_F$  = แรงต้านเนื่องจากสปริง (นิวตัน)  
 $D$  = เส้นผ่านศูนย์กลางลูกสูบ (มิลลิเมตร หรือ เมตร)  
 $d$  = เส้นผ่านศูนย์กลางก้านสูบ (มิลลิเมตร หรือ เมตร)

สามารถที่จะนำสูตรไปใช้เพื่อหาค่าของแรงของกระบอกสูบได้จากตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 การหาค่าแรงของกระบอกสูบที่คิดค่าแรงต้านเนื่องจากความเสียดทาน 10 เปอร์เซ็นต์ของแรงทฤษฎี

เส้นผ่าน ศูนย์กลาง	ความดันใช้งาน (บาร์), แรง (กิโลกรัมแรง)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2
12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
16	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
25	4	9	13	17	21	24	30	34	38	42
35	8	17	26	35	43	52	61	70	78	86
40	12	24	36	48	60	72	84	96	108	120
50	17	35	53	71	88	106	124	142	159	176
70	34	69	104	139	173	208	243	278	310	346

(ต่อ) ตารางที่ 2.5 การหาค่าแรงของกระบอกสูบที่คิดค่าแรงต้านเนื่องจากความเสียดทาน 10 เปอร์เซ็นต์ของแรงทฤษฎี

100	70	141	212	283	353	424	495	566	636	706
140	138	277	416	555	693	832	971	1,110	1,248	1,386
200	283	566	850	1,133	1,416	1,700	1,983	2,266	2,550	2,830
250	433	866	1,300	1,733	2,166	2,600	3,033	3,466	3,800	4,332

## 2.3 โมเมนต์และคาน

### 2.3.1 โมเมนต์

โมเมนต์ (Moment) หมายถึงผลของแรงที่กระทำ ต่อวัตถุหมุนไปรอบจุดคงที่ซึ่งเรียกว่าจุดพิลครัม (Fulcrum)

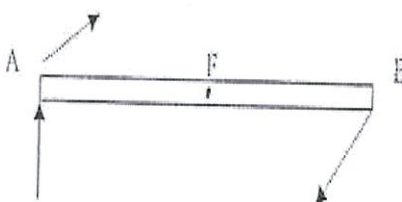
ค่าของโมเมนต์หาได้จากผลคูณของแรงที่มากระทำกับระยะที่วัดจากจุดพิลครัมมาตั้งฉากกับแนวแรงดังสูตร

$$\text{โมเมนต์ (นิวตัน/เมตร)} = \text{แรง (นิวตัน)} \times \text{ระยะตั้งฉากจากแนวแรงถึงจุดหมุน (เมตร)}$$

ทิศทางของโมเมนต์มี 2 ทิศทาง คือ

- โมเมนต์ตามเข็มนาฬิกา

เช่น กรณีคาน(Lever) A B มีจุดหมุนที่ F มีแรงมากระทำ ที่ปลายคาน A หรือ B ทิศทางลักษณะดังรูปที่ 2.4 จะเกิดโมเมนต์ตามเข็มนาฬิกา

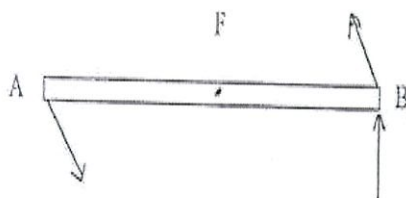


รูปที่ 2.4 โมเมนต์ตามเข็มนาฬิกา

(ที่มา : [http://202.143.165.163/sci\\_t1/chap11/chap11\\_2.pdf](http://202.143.165.163/sci_t1/chap11/chap11_2.pdf))

- โมเมนต์ทวนเข็มนาฬิกา

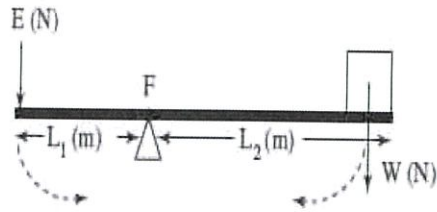
เช่น กรณีคาน AB มีจุดหมุนที่ F มีแรงมากระทำ ที่ปลายคาน A หรือ B ทิศทางลักษณะดังรูปที่ 2.5 จะเกิดโมเมนต์ทวนเข็มนาฬิกา



รูปที่ 2.5 โมเมนต์ทวนเข็มนาฬิกา

(ที่มา : [http://202.143.165.163/sci\\_t1/chap11/chap11\\_2.pdf](http://202.143.165.163/sci_t1/chap11/chap11_2.pdf))

จากรูปที่ 2.6  $F$  เป็นจุดหมุน เอววัตถุ  $W$  วางไว้ที่ปลายคานข้างหนึ่ง ออกแรงกดที่ปลายคานอีกข้างหนึ่ง เพื่อให้ไม้อยู่ในแนวระดับพอดี



รูปที่ 2.6 แสดงทิศทางของโมเมนต์

(ที่มา : [http://202.143.165.163/sci\\_t1/chap11/chap11\\_2.pdf](http://202.143.165.163/sci_t1/chap11/chap11_2.pdf))

โมเมนต์ตามเข็มนาฬิกา =  $W \times L_2$  (นิวตัน/เมตร)

โมเมนต์ทวนเข็มนาฬิกา =  $E \times L_1$  (นิวตัน/เมตร)

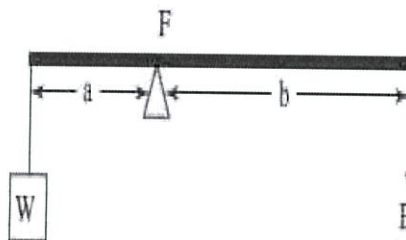
### 2.3.2 กฎของโมเมนต์

เมื่อวัตถุหนึ่งถูกกระทำด้วยแรงหลายแรงแล้วทำให้วัตถุนั้นอยู่ในสภาวะสมดุล (ไม่เคลื่อนที่และไม่หมุน) จะได้ว่า

ผลรวมของโมเมนต์ทวนเข็มนาฬิกา = ผลรวมของโมเมนต์ตามเข็มนาฬิกา

### 2.3.3 คาน

หลักการของโมเมนต์ นำมาใช้กับอุปกรณ์ที่เรียกว่า คาน (Lever) คานเป็นเครื่องกลชนิดหนึ่งที่ใช้ติดตั้งวัตถุให้เคลื่อนที่รอบจุดหมุน (fulcrum) หลักการทำงานของคานใช้หลักของโมเมนต์



รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะของคาน

(ที่มา : [http://202.143.165.163/sci\\_t1/chap11/chap11\\_2.pdf](http://202.143.165.163/sci_t1/chap11/chap11_2.pdf))

ถ้าโจทย์ไม่กำหนดน้ำหนักคานมาให้แสดงว่าคานไม่มีน้ำหนัก จากรูปกำหนดให้

$W$  = แรงความต้านทาน หรือน้ำหนักของวัตถุ

$E$  = แรงความพยายาม หรือแรงที่กระทำต่อคาน

$a$  = ระยะตั้งฉากจากจุดหมุนถึงแรงต้านทาน

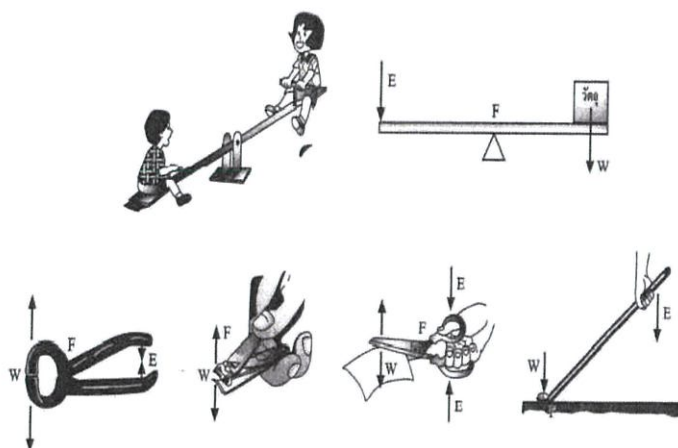
$b$  = ระยะทางตั้งฉากจากจุดหมุนถึงแรงพยายาม

โดยมี F (Fulcrum) เป็นจุดหมุนหรือจุดพิลครัม  
 เมื่อคานอยู่ในภาวะสมดุล โมเมนต์ตามเข็มนาฬิกา = โมเมนต์ทวนเข็มนาฬิกา

$$W \times a = E \times b \quad (2.14)$$

โดยทั่วไปลักษณะรูปแบบของคาน มีการจำแนกได้ 3 ประเภทหรือ 3 อันดับดังนี้

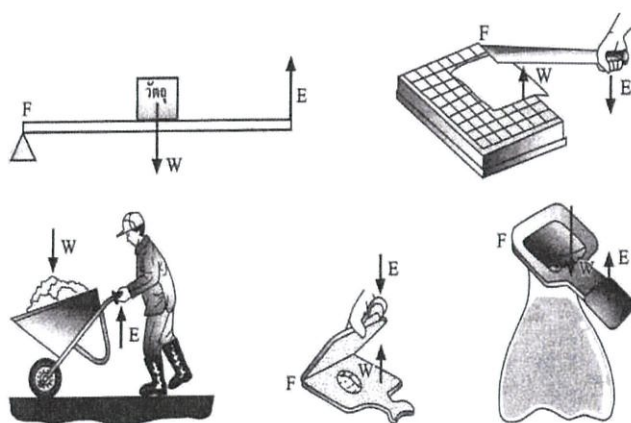
- คานอันดับที่ 1 เป็นคานที่มีจุดหมุน (F) อยู่ระหว่างจุดกระทำแรงความพยายาม (E) และจุดกระทำของแรงความต้านทาน (W) เช่น กรรไกรตัดผ้า กรรไกรตัดเล็บ คีมตัดลวด เรือแจว และไม้กระดก เป็นต้น



รูปที่ 2.8 แสดงคานอันดับ 1

(ที่มา : [http://202.143.165.163/sci\\_t1/chap11/chap11\\_2.pdf](http://202.143.165.163/sci_t1/chap11/chap11_2.pdf))

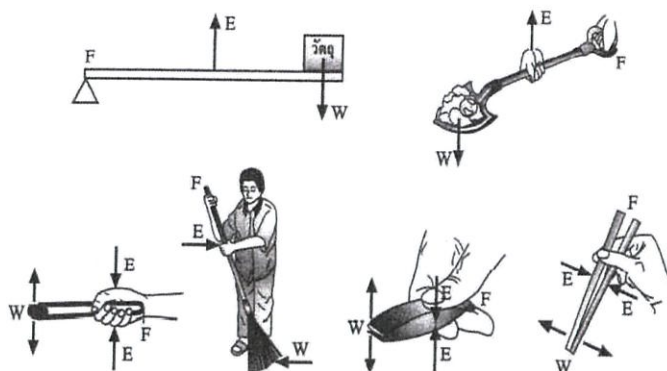
- คานอันดับ 2 เป็นคานที่มีจุดกระทำของแรงความต้านทาน (W) อยู่ระหว่างจุดกระทำของแรงความพยายาม (E) และจุดหมุน (F) เช่น ที่เปิดขวดน้ำอัดลม รถเข็นทราย ที่ตัดกระดาษ เป็นต้น



รูปที่ 2.9 แสดงคานอันดับ 2

(ที่มา : [http://202.143.165.163/sci\\_t1/chap11/chap11\\_2.pdf](http://202.143.165.163/sci_t1/chap11/chap11_2.pdf))

- คานอันดับที่ 3 เป็นคานที่มีจุดกระทำของแรงความพยายาม (E) อยู่ระหว่างจุดกระทำของแรงความต้านทาน (W) และจุดหมุน (F) เช่น ตะเกียบ คีมคีบถ่าน แหนบ เป็นต้น



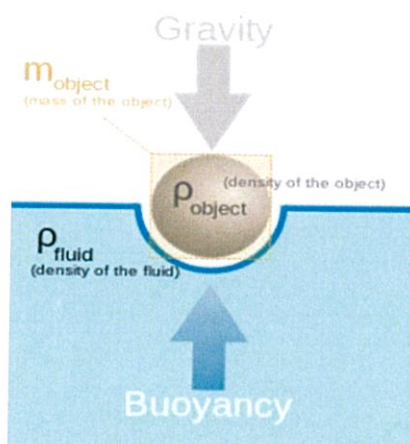
รูปที่ 2.10 แสดงคานอันดับ 3

(ที่มา : [http://202.143.165.163/sci\\_t1/chap11/chap11\\_2.pdf](http://202.143.165.163/sci_t1/chap11/chap11_2.pdf))

การผ่อนแรงของคาน จะมีค่ามากหรือน้อยโดยดูจากระยะ E ถึง F และ W ว่าถ้าระยะ EF ยาวหรือสั้นกว่าระยะ WF ถ้าในกรณีที่ยาวกว่าก็จะช่วยผ่อนแรง ถ้าสั้นกว่าก็จะไม่ผ่อนแรง

## 2.4 แรงลอยตัว (Buoyancy)

แรงลอยตัว คือ แรงที่ช่วยพยุงวัตถุที่ไม่ให้จมลงไปใต้อกของเหลวเกิดจากผลของความดันของของเหลว ณ บริเวณผิวสัมผัสกับวัตถุ โดยมีขนาดขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของของเหลวนั้น และปริมาตรของวัตถุส่วนที่จมลงไปใต้อกของเหลว วัตถุที่มีความหนาแน่นมากกว่าของเหลวจะมีแนวโน้มที่จะจมลงไป ถ้าวัตถุมีความหนาแน่นน้อยกว่าของเหลว หรือมีรูปร่างที่เหมาะสมจนทำให้แรงพยุงที่เกิดจากส่วนซึ่งแทนที่ของเหลวพอดีกับน้ำหนักวัตถุ แรงนั้นจะสามารถทำให้วัตถุลอยตัวอยู่นิ่งได้ ดังรูปที่ 2.11

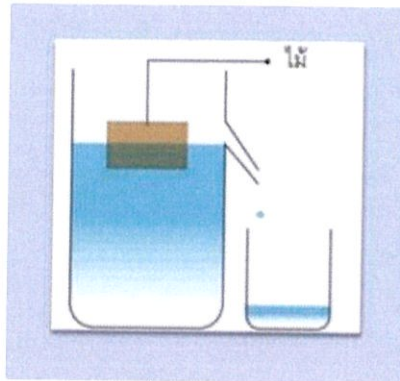


รูปที่ 2.11 แรงที่กระทำในการลอยตัว

(ที่มา : <https://th.wikipedia.org/wiki/แรงลอยตัว>)

สถานะการลอยตัวของวัตถุในของเหลวมี 3 แบบ คือ วัตถุลอย (มีส่วนพื้นผิวของเหลว), วัตถุลอยปริ่ม และ วัตถุจมในของเหลว

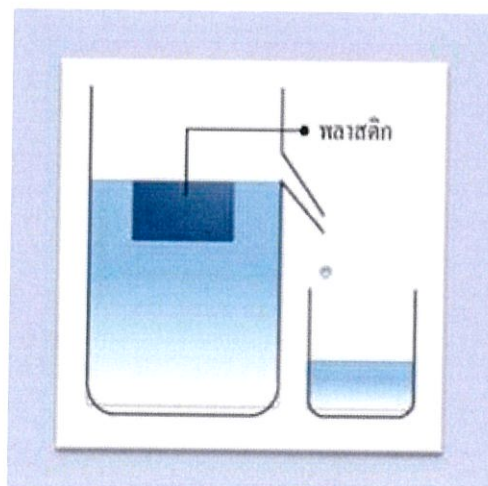
- วัตถุลอย เนื่องจากวัตถุนั้นมีความหนาแน่นน้อยกว่าความหนาแน่นของของเหลว และแรงพยุงของของเหลวจะทำให้วัตถุลอยขึ้นไปยังผิวน้ำ ปริมาตรของของเหลวที่ถูกแทนที่เท่ากับปริมาตรของวัตถุส่วนที่จมในของเหลว เป็นจริงได้จากการทดลองดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 วัตถุลอย

(ที่มา : <http://www.slideshare.net/SupalukJuntap1/3-2-5-43308687>)

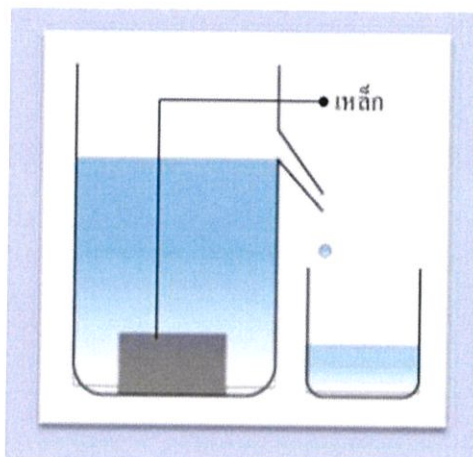
- วัตถุลอยปริ่ม เนื่องจากวัตถุนั้นมีความหนาแน่นเท่ากับความหนาแน่นของของเหลว และแรงพยุงของของเหลวเท่ากับความหนาแน่นของวัตถุพอดีทำให้วัตถุลอยปริ่มในของเหลวนั้น ๆ ปริมาตรของของเหลวที่ถูกแทนที่เท่ากับปริมาตรของวัตถุทั้งก้อนในของเหลว เป็นจริงได้จากการทดลองดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 วัตถุลอยปริ่ม

(ที่มา : <http://www.slideshare.net/SupalukJuntap1/3-2-5-43308687>)

- วัตถุที่จมในของเหลวนั้น ๆ เนื่องจากวัตถุนั้นมีความหนาแน่นมากกว่าความหนาแน่นของของเหลวนั้น และแรงพยุงของของเหลวไม่มากพอที่จะพยุงน้ำหนักของวัตถุไว้ ปริมาตรของของเหลวที่ถูกแทนที่เท่ากับปริมาตรของวัตถุทั้งก้อนที่จมในของเหลว เป็นจริงได้จากการทดลองดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 วัตถุจม

(ที่มา : <http://www.slideshare.net/SupalukJuntap1/3-2-5-43308687>)

อาร์คิมิดีส (Archimedes principle) กล่าวว่าไว้ว่า เมื่อหย่อนวัตถุลงในน้ำที่บรรจุปริมาณหนึ่ง ปริมาตรของน้ำส่วนที่ล้นออกมา จะเท่ากับปริมาตรของก้อนวัตถุนั้นที่เข้าไปแทนที่น้ำ

สรุปหลักอาร์คิมิดีส ดังนี้

- ปริมาตรของเหลวที่ถูกแทนที่ จะเท่ากับปริมาตรของวัตถุส่วนที่จมลงในของเหลว
- น้ำหนักของวัตถุที่ชั่งในของเหลว จะมีค่าน้อยกว่าน้ำหนักของวัตถุที่ชั่งในอากาศ เนื่องจากแรงพยุงของของเหลวมีมากกว่าแรงพยุงของอากาศ
- น้ำหนักของวัตถุที่หายไปของเหลวจะเท่ากับน้ำหนักของของเหลวที่ถูกวัตถุแทนที่ คำนวณได้จากผลต่างของน้ำหนักของวัตถุที่ชั่งในอากาศกับน้ำหนักของวัตถุที่ชั่งในของเหลว
- น้ำหนักของของเหลวที่ถูกแทนที่จะเท่ากับน้ำหนักของของเหลวที่มีปริมาตรเท่ากับวัตถุส่วนที่จม

#### 2.4.1 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับแรงพยุง

- ชนิดของวัตถุ วัตถุแต่ละชนิดจะมีความหนาแน่นแตกต่างกัน เช่น เหล็ก ไม้ พลาสติก ที่มีมวลเท่ากัน เหล็กจะมีความหนาแน่นมากกว่าไม้ และไม้มีความหนาแน่นมากกว่าพลาสติก ซึ่งวัตถุที่มีความหนาแน่นมากจะจมลงไปในของเหลวมาก

- ชนิดของเหลว ของเหลวแต่ละชนิดมีความหนาแน่นแตกต่างกัน เช่น น้ำบริสุทธิ์มีความหนาแน่นมากกว่าเอทิลแอลกอฮอล์ และน้ำมันเบนซิน เป็นต้น ซึ่งของเหลวที่มีความหนาแน่นมาก จะมีแรงพยุงมาก

- ขนาดของวัตถุมีผลต่อปริมาตรที่จมลงไปในของเหลวซึ่งถ้าวัตถุมีขนาดใหญ่ จะมีปริมาตรที่จมลงไปในของเหลวมาก ทำให้แรงพยุงมีค่ามาก

สูตรการคำนวณหาแรงพยุง

$$F_b = \rho Vg \quad (2.15)$$

- โดย  $\rho$  คือ ความหนาแน่นของของเหลว (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)  
 $V$  คือ ปริมาตรของของเหลวที่ถูกแทนที่ (ลูกบาศก์เมตร)  
 $g$  คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (เมตรต่อวินาทีกำลังสอง)  
 $F_b$  คือ ขนาดของแรงพยุง (นิวตัน)

## 2.5 หลักการของคลื่นมหาสมุทร (Ocean Waves)

จากหลักฐานการศึกษาในอดีตปรากฏว่า Leonardo da Vinci เป็นคนแรกที่เริ่มศึกษาในปี ค.ศ. 1480 ปัจจุบันก็ยังคงศึกษากันอยู่ เพราะมนุษย์ซึ่งส่วนใหญ่มีถิ่นฐานอยู่ใกล้ทะเล ได้อาศัยมหาสมุทรเป็นเส้นทางการคมนาคมและแหล่งอาหารตลอดมา คลื่นมีความสำคัญอย่างมากต่อระบบนิเวศน์ชายฝั่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งทางด้านธรณีวิทยาชายฝั่งและลักษณะชายฝั่งที่ปรากฏให้เราเห็นในธรรมชาติ

คลื่นมหาสมุทรมีหลายรูปแบบ แล้วแต่หลักเกณฑ์ที่ใช้เป็นข้อกำหนด เช่น

- คลื่นที่เคลื่อนที่ไปข้างหน้า (progressive waves) และอยู่กับที่ (standing waves)
- มองเห็นด้วยตา(wind waves) และมองไม่เห็น (เช่น Internal waves, tides)
- คลื่นสั้น (short waves) และคลื่นยาว (long waves)
- คลื่นน้ำตื้น (shallow-water waves) และคลื่นน้ำลึก (deep - water waves)
- คลื่นอิสระ (free waves) และคลื่นในควบคุม (forced waves)

สาเหตุของการเกิดคลื่น คลื่นอาจเกิดขึ้นได้จากสาเหตุดังต่อไปนี้

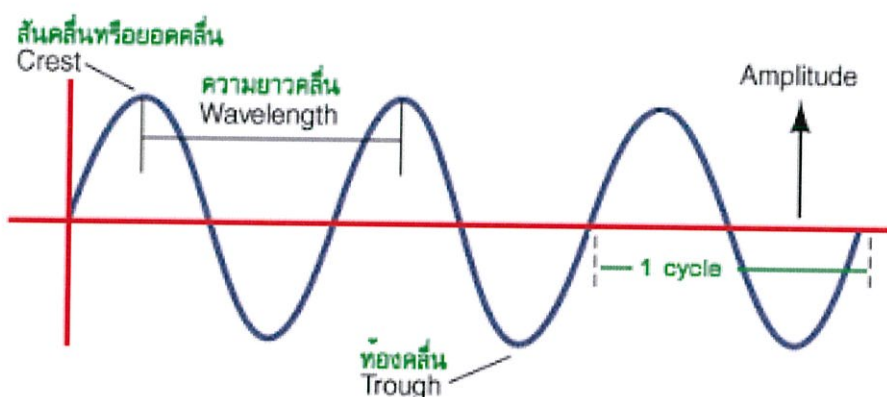
- ลม
- แผ่นดินไหว ภูเขาไฟระเบิด แผ่นดินใต้น้ำถล่ม
- แรงดึงดูดจากดวงอาทิตย์ และดวงจันทร์
- การเปลี่ยนแปลงความกดดันอากาศ
- ข้อแตกต่างของความหนาแน่นระหว่างมวลน้ำชั้นบน และล่าง
- เมื่อกระแสน้ำไหลผ่านพื้นที่ช่องทะเลซึ่งไม่เรียบ

คลื่นที่ปรากฏเป็นประจำทุกวัน เป็นคลื่นที่เกิดจากลมเป็นส่วนใหญ่ (wind waves) ส่วนคลื่นที่เกิดจากสาเหตุอื่นมักจะมองไม่เห็น เพราะเกิดขึ้นในระหว่างชั้นของน้ำ (internal waves) หรือเป็นคลื่นที่มียอดคลื่นเตี้ยมากและมีคาบของคลื่นยาวนานมาก (tides, tsunami) ในที่นี้จะได้กล่าวถึงคลื่นที่เกิดจากลมเป็นหลัก น้ำขึ้นน้ำลงเป็นคลื่นชนิดหนึ่ง มีความยาวคลื่นมากที่สุดประมาณ 20,000 กิโลเมตร (ประมาณครึ่งหนึ่งของเส้นรอบวงโลก) และมีคาบของคลื่นนานมากประมาณ 12 วัน 25 นาที (ประมาณครึ่งหนึ่งของเวลาที่ดวงจันทร์โคจรรอบโลก) เนื่องจากเกิดจากแรงดึงดูดของดวงอาทิตย์และดวงจันทร์ ซึ่งมีต่อเนื่องกันตลอดเวลา คลื่นน้ำขึ้น - น้ำลงจึงไม่อิสระในการเคลื่อนที่ ต้องคล้อยตามแรงดึงดูดหรือคล้อยตามระบบการหมุนของโลก ดวงอาทิตย์และดวงจันทร์ เรียกว่า “คลื่นในควบคุม” (forced waves) ส่วนคลื่นที่เกิดจากแรงระเบิด แผ่นดินไหว แผ่นดินใต้น้ำถล่ม และภูเขา

ไพบีเปิด เป็นคลื่นอิสระ (free wave) คือเมื่อมีแรงมากระทำให้เกิดคลื่น คลื่นจะเคลื่อนที่ไปได้ตลอด ไม่ต้องมีแรงมากระทำหรือคอยผลักดันอีก คลื่นพวกนี้มีความเร็วสูงมากและยอดคลื่นเตี้ยมากเมื่อเทียบกับความยาวคลื่น แรงดึงดูดของโลกจึงไม่ค่อยมีผลในการฉุดลากหรือทำลาย ส่วนแรงจุดที่เกิดจากแรงตึงผิว ก็มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับความเร็วคลื่น คลื่นเหล่านี้เป็นคลื่นขนาดใหญ่ โดยธรรมชาติถือว่าเป็นการถ่ายทอด (propagate) ทั้งพลังงานและมวลน้ำ จึงมีแรงเสมือนเข้ามาเกี่ยวข้อง ส่วนคลื่นที่เกิดจากลมอาจเป็นทั้งคลื่นอิสระและคลื่นในควมคุม

### 2.5.1 ส่วนประกอบของคลื่น

ลักษณะของคลื่นในอุดมแสดงได้ดังในรูปที่ 2.16 มีส่วนประกอบดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.15 แสดงส่วนต่าง ๆ ของคลื่น

(ที่มา : <http://www.marine.tmd.go.th/thai/oceanwave-thai.html>)

- ส่วนที่สูงที่สุดของคลื่น (crest) เรียกว่า ยอดคลื่น
- ส่วนที่ต่ำที่สุดของคลื่น (trough) เรียกว่า ท้องคลื่น
- ระยะทางในแนวตั้งระหว่างยอดคลื่นกับท้องคลื่นเป็นความสูงของคลื่น (wave height = H)
- ระยะทางในแนวราบระหว่างยอดคลื่นแรกกับยอดถัดไป หรือระหว่างท้องคลื่นแรกกับท้องถัดไปเรียกว่า ความยาวคลื่น (wave length = L)
- เวลาที่ยอดคลื่นหรือท้องคลื่นเคลื่อนที่ไปได้ระยะทาง 1 ความยาวคลื่น เรียกว่า คาบของคลื่น (wave period = T)
- จากค่าจำกัดความของความยาวคลื่น เราสามารถหาอัตราเร็วคลื่น (wave speed = C) ได้

$$C = \frac{L}{T} \quad (2.16)$$

เมื่อ  $C$  = ความเร็วคลื่น (เมตร/วินาที)  
 $L$  = ความยาวคลื่น (เมตร)  
 $T$  = คาบของคลื่น (วินาที)

- ขนาดของยอดคลื่นวัดจากระดับน้ำทะเลเฉลี่ย (amplitude = a)

$$H = 2a \quad (2.17)$$

- ความถี่เชิงมุมของคลื่น (radial =  $\omega$ )

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (2.18)$$

- อนุภาคน้ำ (particle) จะเคลื่อนที่หมุนเป็นวงกลมตามผิวหน้าของคลื่นด้วยอัตราเร็ว

$$V = \frac{2\pi\omega}{T} = \frac{\pi H}{T} \quad (2.19)$$

### 2.5.2 ขนาดของคลื่น

คลื่นที่ปรากฏในธรรมชาติมีรูปร่าง และขนาดแตกต่างกัน แล้วแต่มหาสมุทร เขตทางภูมิศาสตร์ และฤดูกาล โดยหลักเกณฑ์เบื้องต้น ขนาดของคลื่นขึ้นอยู่กับ

1. ความเร็วลม (Wind speed = W)
2. ระยะทางที่ลมพัดผ่าน (Fetch = F)
3. ช่วงเวลาที่ลมพัดต่อเนื่องกันในทิศทางคงที่ (Duration = D)

ถ้าใช้คาบของคลื่น (T) และความสูงของคลื่น (H) เป็นเครื่องวัดขนาดของคลื่น เราอาจเขียนได้ดังนี้

$$T, H = f(W, F, D) \quad (2.20)$$

ในช่วงการเปลี่ยนแปลงฤดูกาล อากาศเหนือแผ่นดิน และแผ่นน้ำมีลักษณะแตกต่างกัน มักทำให้เกิดลมหรือพายุที่มีความเร็วสูง ทะเลจะมีคลื่นขนาดใหญ่กว่าในเวลาปกติ คลื่นในทะเลเปิด (open sea) ที่ซึ่งมีระยะทางที่ลมพัดผ่านยาว (Fetch) ย่อมมีขนาดใหญ่กว่าคลื่นในทะเลปิด (lakes, bays และ marginal sea)

สูตรความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของคลื่นกับปัจจัยของลมทั้ง 3 ดังกล่าว พบว่า

$$H_{\max} = \frac{0.26}{g} w^2 \quad (2.21)$$

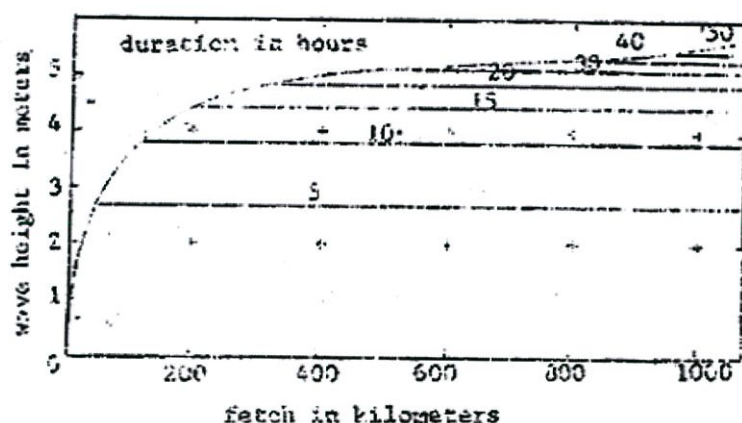
$$H = \frac{1}{3} \sqrt{F} \quad (2.22)$$

เมื่อ H = ความสูงคลื่น (เมตร)

W = ความเร็วลมเป็น (เมตร/วินาที)  
 F = ระยะทางที่ลมพัดผ่าน (กิโลเมตร)

ความชันของคลื่นเป็นอัตราส่วนระหว่างความสูงของคลื่นกับความยาวคลื่น

$$\text{Steepness} = \frac{H}{L} \quad (2.23)$$



รูปที่ 2.16 แสดงความสูงของคลื่นสัมพันธ์กับระยะเวลาที่ลมพัดต่อเนื่อง และระยะทางที่ลมพัดผ่าน เมื่อลมมีความเร็ว 54 กม./ชม.

(ที่มา : <http://www.marine.tmd.go.th/thai/oceanwave-thai.html>)

### 2.5.3 ชนิด และการเกิดของคลื่นเนื่องมาจากลม

ลมเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้มีคลื่นในน้ำ น้ำทะเลซึ่งมีความหนืด (viscosity) เมื่อถูกลมพัดผ่าน น้ำผิวน้ำจะยืดออกตามแรงลม แล้วจะหดตัวกลับ เพื่อรักษาสมดุลด้วยแรงตึงผิว (surface tension) น้ำจะมีลักษณะคล้ายวัตถุยืดหยุ่นอ่อน ๆ (elastic membrane) โดยการยืดและหดจากแรงดังกล่าว ทำให้น้ำผิวน้ำโค้งขึ้นและโค้งลง (undulate) เกิดคลื่นขนาดเล็กขึ้นในที่สุด (ripples or wavelets) คลื่นขนาดเล็ก ๆ เหล่านี้จะปรากฏให้เห็นเมื่อมีลมพัดเท่านั้น ถ้าลมหยุดพัดคลื่นเหล่านี้จะสลายตัวเกือบทันที พุดอีกแห่งหนึ่งว่าเป็นคลื่นที่มีอายุสั้น เมื่อมีลมพัดต่อเนื่องกันเป็นเวลานานพอสมควร คลื่นเหล่านี้จะค่อย ๆ ขยายโตขึ้น เพราะผิวน้ำที่ขรุขระ เนื่องจากมีคลื่นขนาดเล็ก ๆ ทำให้เกิดพื้นที่ผิวในส่วนที่จะรับลมเพิ่มขึ้น คลื่นที่ขยายโตขึ้นมีชื่อใหม่ว่า Sea หมายถึงคลื่นที่ยังอยู่ในบริเวณที่มีลมพัด มีความยาวคลื่นสั้นและยอดคลื่นผสม ผิวน้ำในตอนนี้อยู่เปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ในระยะไกลมักเห็นผิวน้ำ มีลักษณะเป็นหลุม เนิน เหลี่ยม เพราะถูกลมพัดด้วยความเร็วและทิศทางที่ไม่แน่นอน ในช่วงเวลาหนึ่งความเร็วและทิศทางอาจเปลี่ยนแปลงหลายครั้ง นอกจากนี้ในบางครั้งลมยังคงเคลื่อนที่ในลักษณะหมุน เวียนซ้ายขวา แล้วแต่กรณี คลื่นขนาดเล็กอาจซ่อนอยู่ในคลื่นขนาดใหญ่กว่า คลื่นที่มีความเร็วกว่า จะเคลื่อนที่ทับคลื่นที่ช้ากว่า คลื่นชนกันสลายตัวบางส่วน ทำให้ส่วนที่เหลือมีรูปร่างไม่สมประกอบ ต่อมา Sea ซึ่งมีหลายขนาดและมีความเร็วต่างกันจะค่อย ๆ ปรากฏรูปร่างให้เห็นชัดขึ้น กล่าวคือ คลื่นที่มีความเร็วมักกว่าจะวิ่งล้ำหน้าคลื่นที่เคลื่อนที่ช้ากว่า นับว่าเป็นการแยกคลื่นหลาย

ชนิดซึ่งเกิดพร้อมกันออกจากกัน คลื่นที่แยกออกจากกันแล้วจะมียอดคลื่น (crest) และท้องคลื่น (trough) ที่สั้นกว่าเดิม เรียกว่า คลื่นไถ่น้ำ (swell) หมายถึงคลื่นที่เกิดขึ้นนอกเขตลมพัด ยอดคลื่นเตี้ยมนกลมกว่าเดิมเล็กน้อย โดยธรรมชาติของคลื่น คลื่นที่ค่อย ๆ โตขึ้นในขณะที่มีลมพัดจะได้รับพลังงานจากลมเพิ่มขึ้น คลื่นจึงค่อย ๆ มีความเร็วเพิ่มขึ้น ในตอนแรกคลื่นเคลื่อนที่ช้ากว่าลม ต่อมาจะเท่ากับลม และในที่สุดจะเร็วกว่าลม ด้วยเหตุนี้คลื่นจึงเคลื่อนที่ออกนอกเขตที่มีลมพัดได้ ในธรรมชาติจึงเห็นคลื่นเคลื่อนที่นำหน้าลม หรือเคลื่อนที่เข้าหาฝั่งได้อย่างอิสระ โดยไม่มีลมพัดเลย จึงอาจเรียกคลื่นไถ่น้ำว่าเป็น free waves ในบริเวณที่มีคลื่นไถ่น้ำ เริ่มมองเห็นคลื่นเคลื่อนที่อย่างเป็นระบบ มีหลายขนาดและด้วยความเร็วต่าง ๆ กันจะเคลื่อนที่ตามหลังกันเป็นขบวน (wave train) หรือเป็นกลุ่มมีลักษณะเฉพาะ (system) คลื่นที่นำหน้าอาจรวมตัวเมื่อเข้าเขตที่มีความตื้น เช่น เกาะไถ่น้ำ สันทรายไถ่น้ำ ฯลฯ ในขณะที่คลื่นอายุย่อยจากแถวหลังจะวิ่งติดตามคลื่นที่หายไป โดยลักษณะนี้เราจะเห็นคลื่นตลอดเวลา

ในขณะที่คลื่นไถ่น้ำเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง จะมีแรงหนึ่งคอยทำให้คลื่นเปลี่ยนแปลง ความสูงของคลื่นจะค่อย ๆ ลดต่ำลง ยอดคลื่นจะมนกลมขึ้นเรื่อย ๆ คลื่นที่มีอายุสั้น ยอดคลื่นจะชันกว่าคลื่นที่มีอายุมาก (ห่างเขตลมพัด) แรงที่ว่า ได้แก่ แรงตึงผิว (surface tension) และแรงดึงดูดของโลก (gravity) โดยหลักการแรงทั้งสองนี้จะพยายามทำให้ผิวน้ำคืนสู่สภาพปกติ คลื่นขนาดเล็กที่มีความยาวคลื่นมากกว่า 1.7 เซนติเมตร หรือเป็นคลื่นที่มีคาบนานตั้งแต่ 1 วินาที ถึง 4 นาที แรงดึงดูดของโลกจะเข้ามาเกี่ยวข้องจึงอาจเรียก คลื่นไถ่น้ำ ว่าเป็น gravity waves ได้ คลื่นที่เราเห็นในมหาสมุทร ส่วนใหญ่เป็นคลื่นแบบนี้ ยังมีเหตุผลที่ทำให้คลื่นไถ่น้ำ มียอดคลื่นมนกลมขึ้นเมื่อคลื่นเปลี่ยนสภาพจาก Sea เป็น คลื่นไถ่น้ำ หมายความว่า ผิวน้ำมีความเรียบ คลื่นที่เคลื่อนที่อยู่ในบริเวณหลัง จะแผ่กระจายออก เนื่องจากมีเนื้อที่กว้างขึ้น ความยาวคลื่นขยายออก ความสูงลดลง เปรียบเหมือนวัตถุยืดหยุ่นถูกผลักดันให้เคลื่อนผ่านช่องแคบ ในช่องนี้วัตถุยืดหยุ่นจะต้องทำตัวสลับโดยการบีบตัวสูงขึ้น ต่อเมื่อผ่านช่องแคบไปแล้วจะพองออกอย่างเดิม ความสูงจึงลดลงตามที่ว่า ในสภาพน้ำที่มีความลึกเพียงพอคือ ลึกกว่า  $L/2$  และไม่มีสิ่งกีดขวางใด ๆ คลื่นเหล่านี้จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วค่อนข้างมาก เรียกว่า คลื่นน้ำลึก (deep-water waves )

$$C = 1.25\sqrt{L} \quad (2.24)$$

เมื่อ  $L$  = ความยาวคลื่น (เมตร)  
 $C$  = ความเร็วคลื่น (เมตร/วินาที)

คลื่นในกลุ่มของ คลื่นไถ่น้ำ (swell) มีความยาวคลื่นมากน้อยต่างกัน โดยสูตรข้างบนจะได้ว่า คลื่นที่ยาวกว่าจะเคลื่อนที่ได้เร็วกว่า นับเป็นการจัดขบวนของคลื่นตามความเร็ว ขบวนของคลื่นเหล่านี้สามารถเดินทางได้ไกลมาก

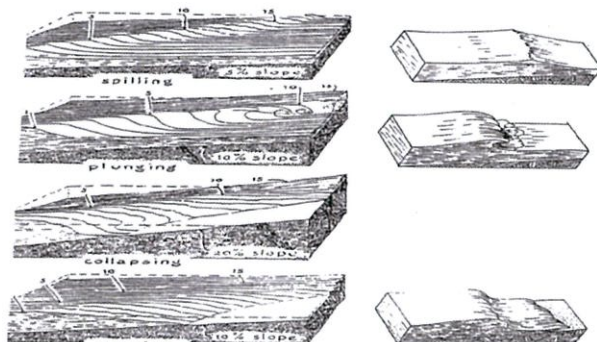
การที่คลื่นไถ่น้ำเคลื่อนที่ได้ไกลมากก็เพราะ

1. มีความเร็วพอตัวดังกล่าวแล้ว
2. ยอดคลื่นเตี้ย และมนกลมทรงตัวได้ดีไม่แตกกระจายง่ายระหว่างทาง
3. เนื่องจากข้อสอง คลื่นจึงสูญเสียพลังงานน้อย

4. แรงตึงผิวซึ่งมีค่าน้อยมาก และแรงดึงดูดของโลก มีอำนาจในการ “ดูดลาก” น้อยเพราะคลื่นเตี้ย

เมื่อคลื่นใต้น้ำเคลื่อนที่เข้าหาฝั่ง คือเปลี่ยนจากน้ำลึกเป็นบริเวณน้ำตื้น คลื่นใต้น้ำจะถูกสิ่งกีดขวางรบกวน เคลื่อนที่ผ่านบริเวณที่มีลมพัดใหม่ ในตำแหน่งใหม่นี้ คลื่นใต้น้ำ อาจถูกทำลายโดยลมที่พัดสวนทาง ที่พื้นที่ท้องทะเลที่มีความลึกหนึ่ง คลื่นใต้น้ำจะแตกกระจายกลายเป็นคลื่นชนิดใหญ่ที่เรียกว่า Surf ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ของมวลน้ำพร้อม ๆ กับการเคลื่อนที่ของพลังงาน (translation) การเคลื่อนที่ของมวลน้ำในรูป Surf มีหลายลักษณะขึ้นอยู่กับรูปร่างของพื้นที่ท้องทะเล ที่รู้จักกันโดยทั่วไปได้แก่ (รูปที่ 2.18)

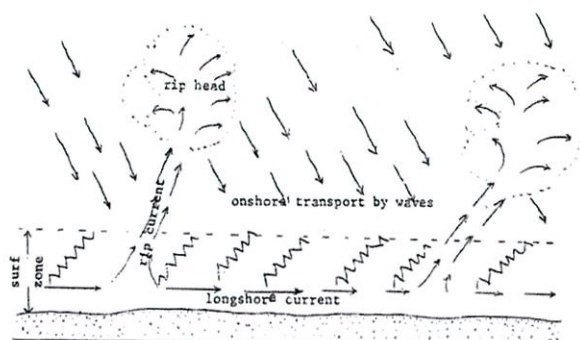
1. Spilling type
2. Plunging type
3. Surging type
4. Collapsing type



รูปที่ 2.17 แสดง surf ในแบบต่าง ๆ รูปเล็กทางขวามือเป็นรูปขยายให้เห็นภาพชัดเพิ่มขึ้น

ปกติ surf ประกอบด้วยคลื่นที่แตก (breaker) หลายชนิดรวมกัน ความสูงของ surf ขึ้นอยู่กับความสูงและความชันของคลื่นที่วิ่งเข้าหาฝั่ง และยังขึ้นอยู่กับลักษณะพื้นที่ท้องทะเลนอกฝั่งที่คลื่นเคลื่อนที่ผ่าน ดังนั้น surf จึงมีหลายขนาดตั้งแต่ขนาดเล็ก ๆ (4-5 ซม.) บนหาดที่เป็นอ่าวปิด จนถึงหลายสิบลเมตร (30-50 เมตร) บนหาดที่เป็นที่โล่ง (exposed beach)

หลังจากที่คลื่นแตก น้ำจะเคลื่อนที่เข้าใกล้ฝั่งและถูกสะสมอยู่บนฝั่งในรูปขอบ surf ชนิดต่าง ๆ ส่วนหนึ่งอาจจะไหลกลับทะเลในระดับล่าง (เหนือพื้น) แต่ส่วนใหญ่จะถูกผลักดันให้ไหลไปตามชายฝั่ง เกิดกระแสน้ำริมฝั่ง (Longshore current) รูปที่ 2.18 ขนาดของกระแสน้ำนี้ขึ้นอยู่กับความสูงเล็กของ surf และมุมที่คลื่นเคลื่อนที่เข้าหาฝั่ง มุมยิ่งเล็กยิ่งเกิดได้มาก เมื่อกระแสน้ำริมฝั่งไหลไปได้สักระยะหนึ่ง น้ำบางส่วนจะไหลกลับทะเลในรูปของ rip current ในหรือใกล้ ๆ เขต surf zone น้ำที่ประกอบขึ้นเป็น rip current จะไหลกลับทะเลตั้งแต่ผิวจนถึงพื้น ส่วนในบริเวณนอก ๆ เขต surf zone และที่ลึกกว่า rip current จะไหลกลับทะเลในระดับเหนือพื้นตลอดได้ผิวน้ำ อาจเป็นร่องลึก ถ้ามองจากด้านบน จะเห็นเป็นสีน้ำเงินเข้ม อาจยาวถึง 300 เมตร จากฝั่ง ตำแหน่งที่ rip current ขอบเกิด ได้แก่ ปลายทางของ Longshore current และใกล้ ๆ บริเวณที่คลื่นเบนเข้าหากัน (Convergence) เช่น บริเวณน้ำตื้นเหนือ ridge ส่วนบริเวณน้ำลึกที่เป็นร่อง เช่น Canyon, Valleys หรือ trough ที่ซึ่งคลื่นเบนออก (divergence) จะไม่เกิด rip current



รูปที่ 2.18 แสดงกระแสน้ำริมฝั่ง และการไหลกลับทะเล (Long shore and rip current)  
(ที่มา : <http://www.marine.tmd.go.th/thai/oceanwave-thai.html>)

#### 2.5.4 การเปลี่ยนแปลงเมื่อคลื่นเข้าหาฝั่ง

ก่อนที่คลื่นในกลุ่ม คลื่นใต้น้ำกลายเป็นคลื่นที่เรียกว่า surf ได้มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง ทิศทาง และอื่น ๆ มากมาย จุดที่การเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น เริ่มที่ความลึกของน้ำประมาณครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น คลื่นใต้น้ำที่เคลื่อนที่เข้าหาฝั่งตั้งแต่จุดนี้จนถึงจุดที่คลื่นแตก (surf) เรียกว่า คลื่นน้ำตื้น (shallow-water waves) ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเป็นการเปลี่ยนแปลงของคลื่นน้ำลึกไปเป็นคลื่นน้ำตื้นนั่นเอง ในภายหลังพื้นท้องทะเลเข้ามามีบทบาทอย่างมาก คลื่นจะมีการเปลี่ยนแปลงดังนี้

- ความเร็วคลื่นลดลง
- ความยาวคลื่นลดลง
- ความสูงคลื่นเพิ่มขึ้น
- คาบของคลื่นยังคงเดิม
- คลื่นสะท้อนกลับ (reflection)
- คลื่นเลี้ยวเบน (diffraction)
- คลื่นเบน (refraction)

เมื่อคลื่นเคลื่อนที่ถึงที่ตื้น มวลน้ำชั้นล่าง (ของคลื่น) จะเสียดสีกับพื้นท้องทะเล แรงเสียดทานจะทำให้คลื่นมีความเร็วลดลง เป็นลำดับตามความตื้น ดังสูตรข้างล่าง

$$C = 3.1\sqrt{d} \quad (2.25)$$

โดยที่  $d$  = ความลึก (เมตร)

โดยหลักการนี้ คลื่นซึ่งประกอบด้วยยอดคลื่นสองยอด ยอดแรกจะช้ากว่ายอดที่สอง ทำให้ระยะทางระหว่างยอดคลื่นทั้งสองย่อเข้า นั่นคือความยาวคลื่นสั้นลง คลื่นน้ำลึกซึ่งเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง ย่อมมีพลังงานมาก เมื่อปะทะกับความตื้นแนลสูงชันทำให้ยอดคลื่นแหลมขึ้นตามขนาดของโมเมนตัม หรืออาจกล่าวได้ว่า การที่ความยาวคลื่นสั้นลงเนื่องจากยอดคลื่นที่สองเคลื่อนที่เร็วกว่าทำให้พลังงานต่อพื้นที่ส่วนที่หดหายไปถูกปล่อยออกมา เมื่อพลังงานส่วนนี้ไปข้างหน้าไม่ได้และหนี

ออกนอกคลื่นก็ยังไม่ได้ เนื่องจากคลื่นยังไม่แตก จึงพุ่งขึ้นในแนวตั้ง คลื่นน้ำตื้นเหล่านี้จะมียอดคลื่นสูงได้ไม่ถึง  $1/7$  ของความยาวคลื่น หรือยอดคลื่นมีมุมได้ไม่น้อยกว่า 120 องศา ถ้าสัดส่วนดังกล่าวของคลื่นมากหรือน้อยกว่านี้ ตามลำดับ คลื่นน้ำตื้นจะแตกกระจาย ตามหลักเกณฑ์นี้ คลื่นขนาดต่าง ๆ เมื่อปะทะความตื้นจะมียอดคลื่นสูง ต่างกัน เช่น สมมติว่ามีคลื่นอยู่ 2 ขนาด

ตัวอย่าง : ขนาดใหญ่ ความยาวคลื่น 70 เมตร

คลื่นจะแตกเมื่อสูง  $1/7 \times 70 = 10$  เมตร

ตัวอย่าง : ขนาดเล็ก ความยาวคลื่น 7 เมตร

คลื่นจะแตกเมื่อสูง  $1/7 \times 7 = 1$  เมตร

ตัวเลขนี้ชี้ให้เห็นว่า คลื่นน้ำตื้นที่มีขนาดต่างกัน เมื่อวิ่งเข้าหาฝั่ง พวกคลื่นสั้นจะสลายตัวได้เร็วกว่าพวกคลื่นยาว หรือแตกตั้ง รูปที่ 2.19

ดังนั้น surf ทั้ง 4 แบบที่ได้กล่าวมาแล้ว ส่วนใหญ่มาจากคลื่นน้ำตื้นชนิดที่มีความยาวคลื่นมาก คลื่นน้ำตื้น แม้จะเปลี่ยนมาจากคลื่นน้ำลึก ซึ่งมีความลึกของน้ำมากกว่า จะยังคงมีคาบของคลื่นเท่าเดิม เพราะว่าเมื่อถึงที่ตื้นทั้งความยาวและความเร็วคลื่นลดลง ดูได้จากสูตรข้างล่าง

$$C = \frac{L}{T} \quad (26)$$

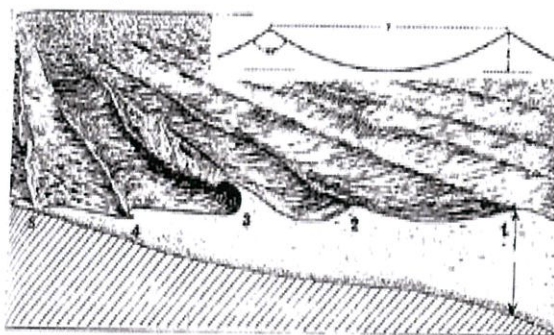
เมื่อ  $T$  = คาบของคลื่น (วินาที)

$L$  = ความยาวคลื่น (เมตร)

$C$  = ความเร็วคลื่น (เมตร/วินาที)

ลักษณะการแปรเปลี่ยนรูปร่างของคลื่นแสดงไว้ดังรูปที่ 2.19

คาบของคลื่นวัดได้ไม่ยาก โดยการยืนจับเวลาของยอดคลื่น (wave front) ที่เคลื่อนที่เข้าหาฝั่ง



รูปที่ 2.19 แสดงการเปลี่ยนแปลงของคลื่นเมื่อเคลื่อนที่เข้าหาฝั่ง คลื่นแตกเมื่อยอดคลื่น มีมุมน้อยกว่า

120 องศา (3) หรือความชัน (H/L) มากกว่า  $1/7$

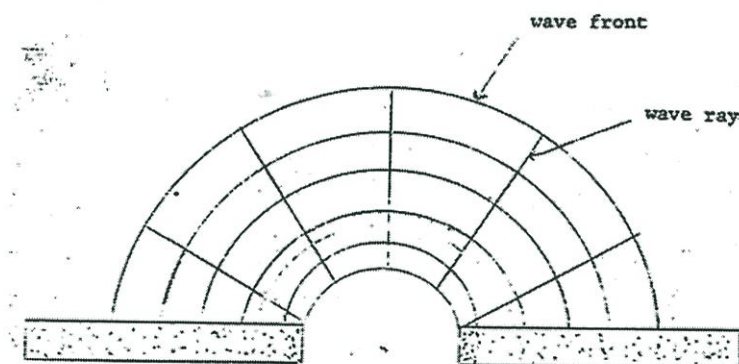
(ที่มา : <http://www.marine.tmd.go.th/thai/oceanwave-thai.html>)

### 2.5.5 การสะท้อนกลับของคลื่น(Reflection)

อาจเกิดขึ้นเมื่อแนวการเคลื่อนที่ของคลื่นวิ่งเข้าหาฝั่งปะทะกับพื้นท้องทะเลที่ชันมากเกือบตั้งตรงแนวทิศคลื่นจะสะท้อนกลับตามกฎการสะท้อนของคลื่นแสง ( Law of Reflection ) พลังงานจะถูกถ่ายเทให้คลื่นที่ตามหลังมา อาจทดลองการสะท้อนกลับของคลื่นได้ง่าย ๆ โดยวิธีสร้างคลื่นขึ้นในอ่างน้ำ เมื่อคลื่น วิ่งปะทะกับอ่างน้ำ คลื่นจะสะท้อนกลับ สำหรับในธรรมชาติการสะท้อนกลับที่สมบูรณ์คงจะเกิดขึ้นได้ยาก เพราะชายฝั่งที่ชันตั้งตรงไม่ค่อยจะมี

### 2.5.6 การเลี้ยวเบนของคลื่น (Diffraction)

สำหรับการเลี้ยวเบนเกิดขึ้นได้ยากเช่นเดียวกัน เพราะกำหนดแสดงพฤติกรรมด้วยขนาดของสิ่งขีดขวาง ซึ่งต้องใกล้เคียงกับความยาวคลื่น ซึ่งก็อาจพบเห็นได้บริเวณใกล้ ๆ ฝั่งซึ่งมีสิ่งก่อสร้างที่มีลักษณะเปิดเป็นช่องแคบๆไว้สำหรับเรือเข้าเทียบท่า เมื่อคลื่นผ่านช่องเหล่านี้ คลื่นจะเลี้ยวเบนออกเป็นรูปครึ่งวงกลม มีลักษณะคล้ายพัด ดังรูปที่ 2.20

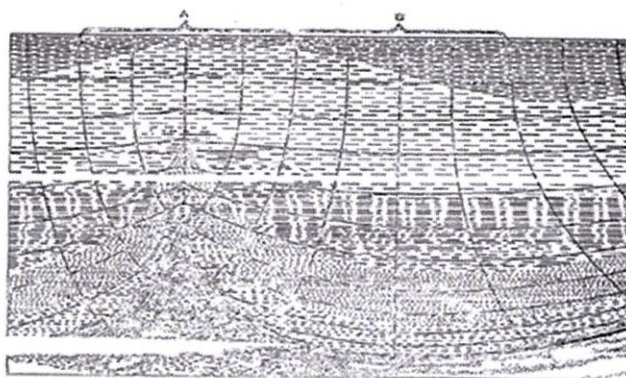


รูปที่ 2.20 แสดงการเลี้ยวเบนของคลื่นเมื่อผ่านช่องแคบ

(ที่มา : <http://www.marine.tmd.go.th/thai/oceanwave-thai.html>)

### 2.5.7 การหักเหของคลื่น(Refraction)

พื้นท้องทะเลจะทำให้คลื่นหักเห (refract) ไปตามลักษณะความลึก (contour) ต่อมาเมื่อคลื่นเคลื่อนที่ถึงบริเวณที่ตื้นระดับหนึ่งคลื่นจะแตกกระจาย ซึ่งได้กล่าวมาแล้ว การหักเห ของคลื่นสังเกตเห็นได้ง่าย จะสังเกตเห็นหน้าคลื่น เกือบจะขนานกับฝั่งในระยะใกล้ตัว แต่ถ้ามองออกไปไกล ๆ จะเห็นคลื่นที่เข้ามาทำมุมกับฝั่ง การหักเห ของคลื่นมีความสำคัญทางธรณีอย่างยิ่ง เพราะพลังงานที่มากับคลื่นจะถูกจัดสรรในลักษณะที่จะทำให้ฝั่งมีความมั่นคงสมดุล บริเวณใกล้ ๆ แหลมที่ยื่นออกไป ส่วนหนึ่งของหน้าคลื่นซึ่งเดินทางถึงที่ตื้นก่อนจะเคลื่อนที่ช้าลง ในขณะที่หน้าคลื่นส่วนอื่นซึ่งเคลื่อนที่ในน้ำลึกกว่าจะยังคงเคลื่อนที่ได้เร็วกว่า ดังนั้นคลื่นจากด้านอื่น ๆ จึงหักเห เข้าหาแหลม พลังงานจากคลื่นจึงพุ่งเข้าหาหัวแหลมมากที่สุด ผลที่เกิดตามมาคือคลื่นจะสูงขึ้น จึงมักเห็นคลื่นแตกมากกว่าที่หัวแหลม ดังรูปที่ 2.21 ในบริเวณที่เว้า คลื่นยังเคลื่อนที่ด้วยความเร็วปกติหรือช้าลงเล็กน้อย แล้วแต่ความลึกของอ่าว แต่เมื่อเปรียบเทียบกับหน้าคลื่นที่พุ่งเข้าแหลม คลื่นที่อ่าวจะมีความยาวคลื่นมากกว่า ความสูงจึงยังคงต่ำ เราจึงมักเห็นอ่าวสงบใช้เป็นที่หลบหรือจอดเรือ หากภายในอ่าวมีที่ตื้นหรือแหลมเล็ก ๆ ส่วนเหล่านี้จะถูกคลื่นซัดกัดกร่อนให้หมดไป เพราะคลื่นในอ่าวถึงแม้จะสงบ แต่ยังคงเก็บพลังงานไว้มาก

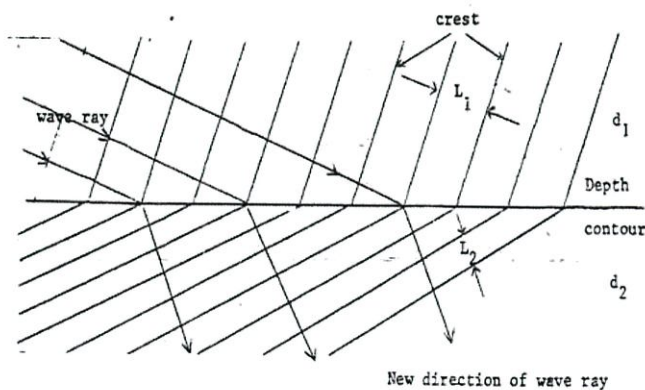


รูปที่ 2.21 แสดงการเบนของคลื่นเมื่อเข้าใกล้ฝั่ง คลื่นจะเบนเข้าหาที่ตื้นหรือเบนออกเมื่อถึงที่ลึก ทำให้เรามองเห็นคลื่นขนานกับฝั่ง

(ที่มา : <http://www.marine.tmd.go.th/thai/oceanwave-thai.html>)

สมมติว่าคลื่นเคลื่อนที่เข้าหาฝั่ง ทำมุมเฉียงดังรูปที่ 2.22 ในบริเวณที่มีน้ำลึกกว่า ( $d_1$ ) คลื่นเคลื่อนที่ด้วยความเร็วมากกว่า เขียนแทนด้วยเส้นซึ่งเทียบได้กับยอดของคลื่น (crest) จะเห็นว่าในบริเวณน้ำลึก เส้นเหล่านี้จะล้าไปข้างหน้าได้มากกว่าเมื่อเทียบกับเขตน้ำตื้น wave ray เป็นทิศทางของคลื่นลากตั้งฉากกับเส้นแสดงยอดคลื่น ในบริเวณตื้น ( $d_2$ ) จะเห็นว่าเส้นนี้เบนไปจากทิศทางเดิม ด้วยหลักการนี้ เราจะเห็นว่าคลื่นที่เคลื่อนที่เข้าหาฝั่ง เฉียงทำมุมกับตำแหน่งที่เรายืนดู แต่พอถึงบริเวณน้ำตื้นเรากลับเห็นว่าคลื่นเคลื่อนที่เข้าหาฝั่งตรงกว่า นั่นคืออาจกล่าวได้ว่ายอดคลื่นพยายามเรียงตัวให้ขนานกับฝั่งหรือโค้งตามชายหาด

$d_1, d_2$  = ความลึกของน้ำ  
 เมื่อ  $d_1$  มากกว่า  $d_2$   
 $L_1, L_2$  = ความยาวคลื่น  
 $C_1, C_2$  = อัตราเร็วคลื่น



รูปที่ 2.22 แสดงการหักเหของคลื่นเมื่อความลึกของน้ำเปลี่ยน (ที่มา : <http://www.marine.tmd.go.th/thai/oceanwave-thai.html>)

พิจารณาในบริเวณ d1

$$C_1 = \frac{L_1}{T_1} = \sqrt{gd_1} \quad (2.27)$$

$$T = \frac{L_1}{C_1} = \frac{L_1}{\sqrt{gd_1}} \quad (2.28)$$

พิจารณาในบริเวณ d2

$$C_2 = \frac{L_2}{T} = \sqrt{gd_2} \quad (2.29)$$

$$T = \frac{L_2}{C_2} = \frac{L_2}{\sqrt{gd_2}} \quad (2.30)$$

เมื่อ T คงที่

$$\frac{L_1}{C_1} = \frac{L_2}{C_2} = \frac{L_1}{\sqrt{gd_1}} = \frac{L_2}{\sqrt{gd_2}} \quad (2.31)$$

จับคู่แล้วคูณไขว้

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{C_1}{C_2} = \frac{\sqrt{gd_1}}{\sqrt{gd_2}} \quad (2.32)$$

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{C_1}{C_2} = \frac{\sqrt{d_1}}{\sqrt{d_2}} \quad (2.33)$$

สูตรข้างบนอาจคำนวณหาค่าความเร็วคลื่นและความลึกของน้ำได้ หรือสามารถทำแผนที่ลักษณะพื้นที่ท้องทะเลได้

### 2.5.8 คลื่นน้ำลึก (Deep-water waves)

สำหรับคลื่นทะเลบริเวณน้ำลึก (ลึกกว่า  $L/2$ ) ส่วนของน้ำ ส่วนพื้นทะเลจะไม่มามีอิทธิพลต่อพฤติกรรมของคลื่น บางครั้งจึงมักเรียกว่าคลื่นสั้น (short wave) เพราะความยาวคลื่นน้อยมาก เมื่อเทียบกับความลึกของน้ำ หรือคลื่นผิวหน้า (surface wave) ซึ่งจะเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ มีแต่แรงดึงดูดของโลกเท่านั้นที่เข้ามาเกี่ยวข้อง จึงอาจคำนวณอัตราเร็วได้จากสูตร

$$C = \frac{gT}{2\pi} = 1.56T \quad (2.34)$$

$$C = \frac{\frac{L}{C}}{2\pi} = \frac{Lg}{2\pi\pi} \quad (2.35)$$

เมื่อ  $T = L/C$   
หรือ

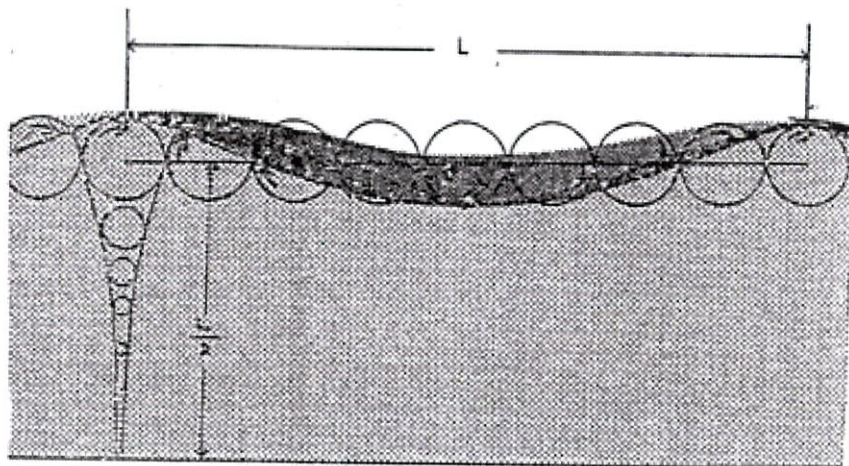
$$C = \sqrt{\frac{gL}{2\pi}} = 1.25\sqrt{L} \quad (2.36)$$

เมื่อ  $T =$  คาบของคลื่น (วินาที)  
 $L =$  ความยาวคลื่น (เมตร)  
 $G =$  ความเร่งจากแรงดึงดูด

สูตรแรกใช้ได้สะดวกกว่า เพราะเราหาค่า  $T$  ได้ง่ายกว่า โดยการนับเวลาที่หาดทราย (เวลาที่ยอดคลื่นลูกแรกกับยอดคลื่นลูกถัดไป ผ่านจุด ๆ หนึ่ง) จากสูตรทั้งสองจะเห็นว่า คลื่นที่มีความยาวคลื่นมากหรือคาบของคลื่นนาน จะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วมากกว่า

ทั้งนี้เพราะน้ำแต่ละอนุภาคที่ประกอบขึ้นเป็นตัวคลื่นเคลื่อน หมุนเวียนเป็นวงในทิศเดียวกับลม หรือทิศเดียวกับคลื่น ส่วนอนุภาคน้ำในแนวตั้งตรงตำแหน่งท้องคลื่นหมุนในทิศตรงข้าม ขนาดของวงจะลดลงตามความลึกอย่างรวดเร็วดังนี้ (รูปที่ 2.23)

- วงแรก (ที่ผิวน้ำ) มีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ ความสูงของคลื่น ( $H$ )
- ที่ความลึกประมาณ  $L/9$  เมตร จะมีเส้นผ่าศูนย์กลาง  $H/2$  เมื่อ  $L =$  ความยาวคลื่น
- ที่ความลึก  $L/2$  เส้นผ่าศูนย์กลางจะลดเหลือประมาณ 4 % ของวงแรก



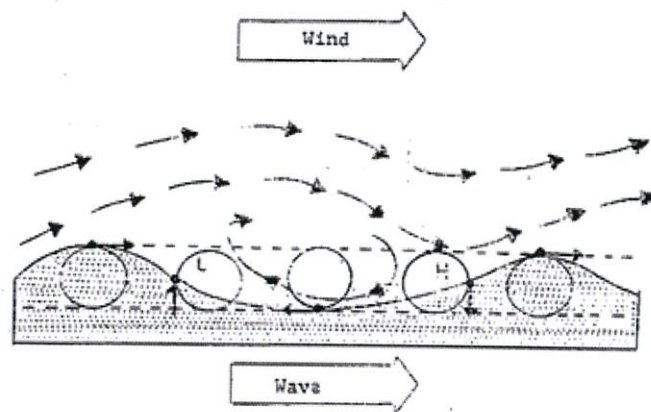
รูปที่ 2.23 แสดงการหมุนเวียนอนุภาคน้ำในคลื่นน้ำลึก  
(ที่มา : <http://www.marine.tmd.go.th/thai/oceanwave-thai.html>)

ดังนั้นที่ความลึกตั้งแต่  $L/2$  ลงไป มวลน้ำจะไม่มีการหมุนเวียน เป็นความลึกที่สงบ บริเวณยอดคลื่น อนุภาคของน้ำเคลื่อนที่ (หมุน) ในแนวนอนในทิศทางเดียวกับคลื่น (หรือลม) เมื่อลมปะทะกับยอดคลื่น ลมจะแฉลบขึ้นข้างบนเล็กน้อย ทำให้บริเวณหลังยอดคลื่น มีความกดดันอากาศต่ำเล็กน้อย ที่บริเวณนี้โมเลกุลของน้ำจะหมุนขึ้น เมื่อลมพัดไปถึงยอดคลื่นถัดไป หน้ายอดคลื่น ลมพัดต่ำ เกิดความกดดันสูงบริเวณหน้ายอดคลื่น โมเลกุลของน้ำ ที่บริเวณนี้จึงหมุนลง ความดันอากาศที่แตกต่างกันระหว่างสองบริเวณดังกล่าว ทำให้เกิดลมหมุนขนาดเล็ก (eddy) มีทิศทางตรงกันกับทิศทางลม ลมนี้จะผลักดันโมเลกุลของน้ำให้เคลื่อนที่ไปด้วย คือจากความดันอากาศสูงสู่ความดันอากาศต่ำ ดังรูปที่ 2.24

อัตราเร็วของอนุภาคน้ำในแต่ละวง อาจหาได้จากสูตร

$$V = \frac{\pi H}{T} \quad (2.37)$$

- เมื่อ  $V$  = ความเร็วอนุภาคน้ำ  
 $H$  = เส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลมแรก (เป็นความสูงของคลื่น)  
 $T$  = คาบของคลื่น



รูปที่ 2.24 แสดงขั้นตอนของลมที่ทำให้โมเลกุลของน้ำในคลื่นหมุน  
 (ที่มา : <http://www.marine.tmd.go.th/thai/oceanwave-thai.html>)

### 2.5.9 คลื่นน้ำตื้น (shallow-water wave)

บางครั้งเรียกว่า คลื่นยาว (Long wave) เพราะความยาวคลื่นมากเมื่อเทียบกับความลึก บริเวณที่ความลึกของน้ำน้อยกว่า  $L/20$  พื้นทะเลจะเข้ามาเกี่ยวข้องกับพฤติกรรมของการเคลื่อนที่ของคลื่นมาก อนุภาคของน้ำที่ประกอบขึ้นเป็นตัวคลื่น จะหมุนเป็นวงรีและจะเพิ่มความรีมากขึ้นตามความลึก จนกระทั่งแบนราบเมื่อใกล้พื้นท้องทะเล รูปที่ 2.25 การหมุนเป็นวงรีของอนุภาคน้ำเท่ากับเป็นการทำให้การเคลื่อนที่ในแนวราบ (ไป - มา) ได้ระยะทางมากกว่าการเคลื่อนที่ในแนวตั้ง (ขึ้น - ลง) บริเวณใกล้ ๆ พื้นมวลน้ำจึงเคลื่อนที่ไป - มา ในแนวราบแต่เพียงอย่างเดียว อัตราเร็วของคลื่นน้ำตื้นอาจหาได้จากสูตร

$$C = \sqrt{gd} \quad (2.38)$$

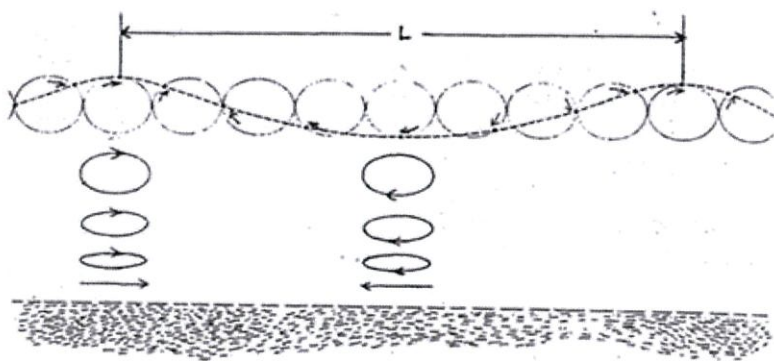
$$C = 3.1\sqrt{d} \quad (2.39)$$

เมื่อ  $d$  = ความลึกของน้ำ (เมตร)

ส่วนอัตราเร็วของอนุภาคน้ำที่ผิว จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามความสูงของคลื่น ตามสูตร

$$V = \frac{\pi H}{T} \quad (2.40)$$

เราทราบแล้วว่าความสูงของคลื่นเพิ่มขึ้นตามความลาดชันของชายฝั่ง เมื่อถึงจุดหนึ่งที่คลื่นใกล้จะแตก น้ำจะหมุนเร็วมากทำให้อุดคลื่นเสียการทรงตัว มวลน้ำที่ยอดคลื่น จะพังทลายลงสู่ท้องคลื่นในที่สุด เรียกว่าคลื่นแตก น้ำจะไม่หมุนเป็นวงรีอีกต่อไป แต่ละเคลื่อนที่ในแนวราบเป็นหลัก (คลื่นซัดฝั่ง)



รูปที่ 2.25 แสดงการหมุนเวียนของอนุภาคน้ำในคลื่นน้ำตื้น  
(ที่มา : <http://www.marine.tmd.go.th/thai/oceanwave-thai.html>)

### 2.5.10 คลื่นอยู่กับที่ (Standing waves)

คลื่นอยู่กับที่ เป็นคลื่นที่เกิดขึ้นในแหล่งน้ำปิด (enclosed water) หรือเกือบปิด (semi-enclosed water) ได้แก่ ทะเลสาบและอ่าวแคบ ๆ บางครั้ง เรียกว่า stationary waves หรือ seiches เมื่อมีลมพัดหรือ ถูกรบกวน น้ำในบริเวณดังกล่าวจะเคลื่อนไหวทั้งในแนวตั้ง (ขึ้น - ลง) และในแนวนอน (ไป - กลับ) การเคลื่อนที่ขึ้น - ลงและเคลื่อนที่ไป - กลับของน้ำของแต่ละจุดมีลักษณะตรงข้าม การขึ้น - ลงจะเพิ่มขึ้นเป็นลำดับเมื่อเข้าใกล้ฝั่ง จนกระทั่งถึงขอบอ่าวที่ซึ่งน้ำขึ้น - ลงได้มากที่สุด และไม่มีการเคลื่อนที่ในแนวนอนเลย (antinodes) การเคลื่อนที่ไป - กลับจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อเข้าหาศูนย์กลาง จนกระทั่งถึงจุด ๆ หนึ่งที่มีการเคลื่อนที่ไป - กลับมากที่สุด และไม่มีการเคลื่อนที่ขึ้น - ลงเลย (nodes) เนื่องจากอ่าวหรือทะเลสาบมีความลึกน้อยมากเมื่อเทียบกับความยาวคลื่นที่เกิดขึ้นจึงจัดไว้ในประเภทคลื่นยาว (Long waves) หรือคลื่นน้ำตื้น ความลึกของน้ำน้อยกว่า  $L/20$  สำหรับทะเลสาบที่ไม่มีทางติดต่อกับน้ำภายนอก การเคลื่อนไหวของน้ำอนุโลมว่ามีลักษณะคล้ายการ

เคลื่อนไหวของน้ำในภาชนะสี่เหลี่ยม ความยาวคลื่นจึงมีค่าเป็นสองเท่าของความยาวทะเลสาบ (รูปที่ 2.26) คาบของคลื่น (period) อาจหาได้จากสูตรข้างล่างให้  $L = 2l$

เมื่อ  $L =$  ความยาวคลื่น

$l =$  ความยาวทะเลสาบ

$$C = \sqrt{gh} \quad (2.41)$$

$$\frac{L}{T} = \sqrt{gh} \quad (2.42)$$

$$\frac{2l}{T} = \sqrt{gh} \quad (2.43)$$

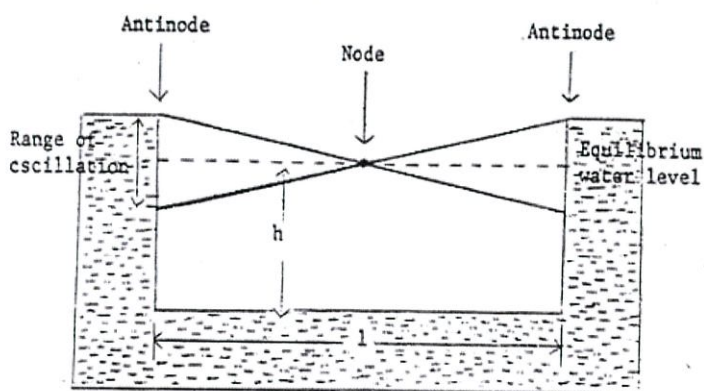
$$T_1 = \frac{2l}{\sqrt{gh}} \quad (2.44)$$

$$T_2 = \frac{2l}{n\sqrt{gh}} \quad (2.45)$$

เมื่อเป็นคลื่นน้ำตื้น

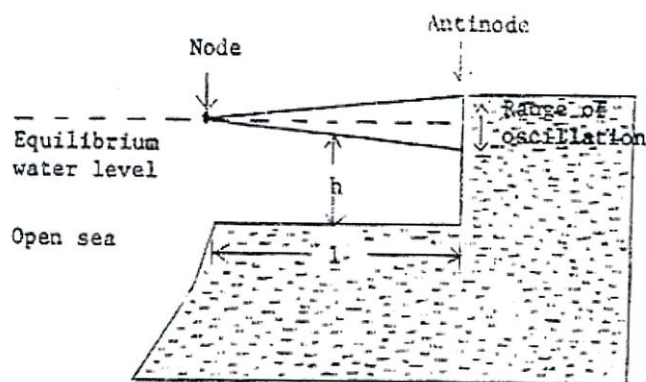
เมื่อ  $T_1 =$  คาบคลื่นเมื่อมี node เดียว

$T_2 =$  คาบคลื่นเมื่อมีหลาย node โดย  $n$  เป็นจำนวน node



รูปที่ 2.26 แสดงคลื่นอยู่กับที่ในแหล่งน้ำปิด

(ที่มา : <http://www.marine.tmd.go.th/thai/oceanwave-thai.html>)



รูปที่ 2.27 แสดงคลื่นอยู่กับที่ในแหล่งน้ำเปิด  
(ที่มา : <http://www.marine.tmd.go.th/thai/oceanwave-thai.html>)

สำหรับอ่าวที่มีลักษณะเปิดมาก มีการถ่ายเทระหว่างภายใน และภายนอก (มีทั้งไหลเข้าและไหลออก) บริเวณปากอ่าวถือว่าเป็นบริเวณที่น้ำขึ้นลงได้น้อยที่สุด (node) บริเวณที่น้ำขึ้นลงได้มากที่สุด (antinode) จึงมีด้านเดียวคือด้านใน ในกรณีนี้ความยาวของอ่าวจะมีค่าหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่น (รูปที่ 2.27) อาจคำนวณคาบของคลื่นได้จากสูตร

$$T = \frac{4l}{n\sqrt{gh}} \quad (2.46)$$

เช่นเดียวกับคลื่นที่เคลื่อนที่ไปข้างหน้า คลื่นอยู่กับที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงคล้ายตามรูปร่างของอ่าวหรือทะเลสาบ มีการสะท้อนกลับเมื่อขอบอ่าวชันมาก ส่วนหนึ่งอาจสลายตัวตามความลาดของพื้นอ่าว และจะเบน (refract) เมื่ออยู่ในเขตน้ำตื้นน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น ในทะเลสาบขนาดใหญ่ เช่น Great lakes

### 2.5.11 คลื่นใต้น้ำ (tsunami waves)

คลื่นสึนามิ มาจากคำเป็นภาษาญี่ปุ่น มีความหมายว่าคลื่นขนาดใหญ่ (big waves) สึนามิเป็นคลื่นที่มักเกิดจากการเคลื่อนตัวของมวลเปลือกโลกใต้ทะเลเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลัน เช่น การเกิดแผ่นดินไหว เกี่ยวข้องกับคลื่นที่เกิดจากน้ำขึ้น - น้ำลง ซึ่งมีผลจากแรงดึงดูดของดวงจันทร์และดวงอาทิตย์ และเป็นคลื่นอยู่ในควบคุม (forced wave) ในรายละเอียดคลื่นทั้งสองชนิดนี้จึงแตกต่างกันมาก โดยหลักเกณฑ์กว้าง ๆ ถือว่าคลื่นที่มีคาบมากกว่า 4 วินาที เป็นคลื่นน้ำตื้น ดังนั้นคลื่นสึนามิและคลื่นน้ำขึ้น - น้ำลง ต่างก็เป็นคลื่นน้ำตื้น

$$L/d \text{ มากกว่า } 150/4 \quad (2.47)$$

มีการศึกษาคลื่นสึนามิกันอย่างจริงจังตั้งแต่ปี 1964 เป็นต้นมา เครื่องมือทันสมัย (SSWWS = Seismic Sea - Wave Warning System) ที่ติดตั้งไว้ตามจุดต่าง ๆ ทำให้ทราบว่คลื่นสึนามิมี

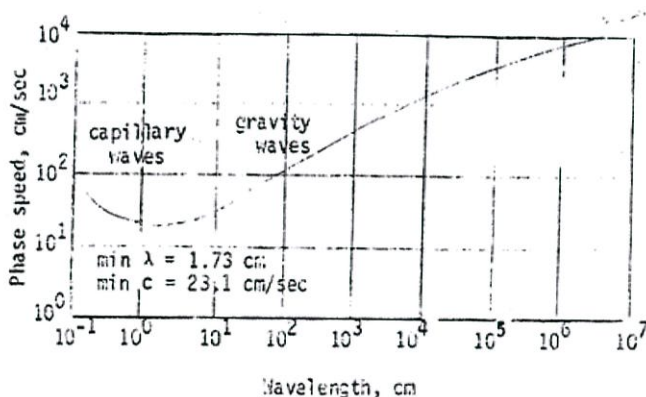
ความเร็วโดยเฉลี่ยประมาณ 750 กม./ชม. ความยาวคลื่นประมาณ 150 กม. และคาบของคลื่นนานถึง 15 นาที ในขณะที่ความสูงของคลื่นวัดได้ 30-40 ซม. เท่านั้น ความสูงของคลื่นขนาดนี้ไม่ทำให้เรือที่กำลังแล่นอยู่นอกฝั่งมีความรู้สึกผิดปกติ ด้วยเหตุนี้เราจึงอาจเรียกคลื่นสึนามิว่า “คลื่นใต้น้ำ” เนื่องจากมีความเร็วสูงเมื่อปะทะฝั่ง คลื่นสึนามิจะมียอดคลื่นสูงหลายฟุต (20 ถึง 135 ฟุต)

### 2.5.12 คลื่นชนิดอื่น (Other types of waves)

มีคลื่นอีกหลายชนิดที่ยังมิได้กล่าวถึง เช่น คลื่นขนาดจิ๋ว (capillary waves) และคลื่นระหว่างชั้น (Internal waves) คลื่นชนิดแรกเป็นคลื่นขนาดเล็กมาก (เล็กกว่า ripples) ความยาวคลื่นน้อยกว่า 1.7 ซม. ยอดคลื่นมนกลม ท้องคลื่นเป็นรูป V-shaped มีแต่แรงตึงผิว (surface tension) เข้ามาเกี่ยวข้อง แรงแผ่นลมทำให้ผิวน้ำแบนราบสู้กับแรงผลักของลม (wind stress) ในบางครั้งจึงอาจเรียกว่า surface tension waves ต่างกับคลื่นอื่น ๆ ที่กล่าวมาแล้ว ทั้งนี้

- ความยาวคลื่นยิ่งสั้น ยิ่งเคลื่อนที่ได้เร็ว (แสดงดังรูปที่ 2.28)
- ความเร็วกลุ่ม (group velocity) เร็วกว่าความเร็วเฟส (phase velocity ,  $C = L/T$ )
- เกิดคลื่นใหม่อยู่ตลอดเวลา คลื่นเก่าสลายตัว

คลื่นชนิดนี้มีบทบาทสำคัญ ในการเกิดคลื่นขนาดใหญ่กว่านี้ ในบางโอกาสและบางท้องที่ จะมองเห็นผิวน้ำเรียบมากผิดกว่าตำแหน่งอื่นชัดเจน ที่เรียกว่า surface slicks หมายความว่าตำแหน่งนั้นไม่มี capillary waves เป็นเพราะมีลมไม่มากพอที่จะทำให้เกิดหรืออาจเป็นเพราะบริเวณนั้นมีน้ำมันหรือวัสดุอื่นที่ลดความตึงผิวของน้ำ นั่นคือไม่มีแรงตึงผิวเพียงพอที่จะทำให้เกิดคลื่น บริเวณชายฝั่งหรือแม่น้ำต้นออกฝั่งออกไปไกล ๆ มักเห็นน้ำมันหรือวัตถุเบา ๆ ลอยเป็นแนวเช่นกัน (oil slick) แนวเหล่านี้เป็นแนวน้ำจวม (convergence) เกิดจากกระแสน้ำไหลมาปะทะกัน แล้วม้วนตัวลง



รูปที่ 2.28 คลื่นขนาดใหญ่ (gravity waves) อัตราเร็วเพิ่มขึ้น ตามความยาวคลื่น ในขณะที่คลื่นขนาดเล็ก (capillary waves) อัตราเร็วคลื่นเพิ่มขึ้นเมื่อความยาวคลื่นลดลง  
(ที่มา : <http://www.marine.tmd.go.th/thai/oceanwave-thai.html>)

โดยธรรมชาติน้ำในมหาสมุทรแบ่งเป็นชั้น ๆ ที่ความลึกหนึ่งน้ำอาจมีสองชั้นหรือมากกว่า โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณที่น้ำนิ่ง ในระหว่างชั้นน้ำเหล่านี้ จะมีคลื่นที่เรียกว่า Internal waves คลื่นนี้เคลื่อนที่ (propagate) คล้ายกับคลื่นผิวน้ำ แต่มีความยาวคลื่นมากกว่าคาบของคลื่นนานกว่า อาจ

เป็นชั่วโมง แทนที่จะนับเป็นวินาทีเหมือนอย่างของคลื่นผิวหน้า ความเร็วคลื่นก็ช้ากว่ามาก ประมาณ 2-3 % ของความเร็วคลื่นผิวหน้าเท่านั้น ในที่ลึกมาก ที่ซึ่งความลึกของน้ำ (d) มาก เมื่อเทียบกับความยาวคลื่น (L) อัตราเร็วอาจหาได้จากสูตร

$$C = \sqrt{gh\{(p_2 - p_1)/p_2\}} \quad (2.48)$$

เมื่อ  $p_1$  = ความหนาแน่นของน้ำชั้นบน  
 $p_2$  = ความหนาแน่นของน้ำชั้นล่าง  
 $h$  = ความหนาของน้ำผิวหน้า (ชั้นบน)

แต่ถ้าความยาวคลื่นมากเมื่อเทียบกับความลึกของน้ำ

$$C = \sqrt{gh\{(d - h)/d\}(p_2 - p_1)/p_2} \quad (2.49)$$

เมื่อ  $d$  = ความลึกน้ำทั้งหมด  
 จากสูตรทั้งสองจะเห็นว่าคลื่นระหว่างชั้นคล้ายคลื่นน้ำตื้นมาก

### 2.5.13 หลักการของพลังงานคลื่นมหาสมุทร

ในปัจจุบันมีการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นตามการขยายตัวทางเศรษฐกิจของทุก ๆ ประเทศทั่วโลกซึ่งแหล่งพลังงานหลักในปัจจุบันคือพลังงานไฟฟ้า ที่ได้มาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล ได้แก่ น้ำมัน ก๊าซ และถ่านหิน ซึ่งแหล่งพลังงานดังกล่าวมีน้อยลงและไม่สามารถสร้างขึ้นมาทดแทนได้ในเวลาอันสั้น รวมทั้งกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงฟอสซิลยังก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมตามมา ไม่ว่าจะเป็นมลพิษทางอากาศ ฝนกรด สภาวะเรือนกระจกและผลกระทบอื่น ๆ ที่จะทำลายความสมดุลของระบบนิเวศ และความเป็นอยู่ของมนุษย์ ดังนั้นเพื่อเป็นการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมโดยลดการใช้พลังงานจากฟอสซิลและหาแหล่งพลังงานใหม่เพื่อตอบสนองต่อความต้องการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้น จึงได้มีการศึกษาค้นคว้าและวิจัยเกี่ยวกับพลังงานหมุนเวียน (Renewable energy) ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่สะอาด ไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม และสามารถผลิตขึ้นทดแทนได้ในระยะเวลาอันสั้น

พลังงานคลื่นสามารถนำมาใช้ผลิตกระแสไฟฟ้าโดยชุดผลิตพลังงานไฟฟ้าจากพลังงานคลื่น พลังงานคลื่นยังไม่มีการผลิตใช้ในเชิงพาณิชย์อยู่ในขั้นตอนของการศึกษาทดลอง อย่างไรก็ตามการนำพลังงานดังกล่าวมาใช้ประโยชน์อาจจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของแต่ละพื้นที่ สำหรับประเทศไทยที่มีพื้นที่ติดชายฝั่งทะเลค่อนข้างมาก โดยเฉพาะบริเวณภาคใต้ เช่น ชุมพร สุราษฎร์ธานี และนครศรีธรรมราช นอกจากสามารถใช้พลังงานแสงอาทิตย์และพลังงานลมแล้ว ยังสามารถนำพลังงานคลื่นจากทะเลมาใช้ประโยชน์ได้อีกด้วย ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในทะเลที่สามารถนำมาแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ปรากฏการณ์ คือ ปรากฏการณ์น้ำขึ้นน้ำลงเนื่องจากแรงดึงดูดของดวงอาทิตย์และดวงจันทร์ ปรากฏการณ์ความแตกต่างของอุณหภูมิน้ำที่ผิวทะเล (อุณหภูมิสูง) กับบริเวณใต้ทะเล (อุณหภูมิต่ำ) และปรากฏการณ์คลื่นที่เกิดขึ้นในทะเลเนื่องจากกระแสลม สำหรับประเทศไทยที่มีภูมิประเทศบริเวณแนวชายฝั่งทะเลที่ค่อนข้างตื้นส่งผลให้ความ

แตกต่างของอุณหภูมิน้ำที่ผิวทะเลกับใต้ทะเลไม่แตกต่างกันมากนัก รวมทั้งระดับความแตกต่างของน้ำขึ้นและน้ำลงสูงสุดไม่แตกต่างกันมาก ดังนั้นพลังงานจากทะเลที่น้ำจะสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้คือ พลังงานคลื่น โดยพลังงานคลื่นคือ พลังงานที่เกิดจากคลื่น

## 2.6 วิธีการตรวจสอบวัดคุณภาพน้ำ

### 2.6.1 การวัดค่าความสะอาดของน้ำ

วิธีการวัดค่าความสะอาดของน้ำวิธีหนึ่งคือ ใช้เครื่อง Conductivity เป็นวิธีวัดค่าความนำไฟฟ้าของน้ำ โดยการส่งผ่านกระแสไฟฟ้าซึ่งเกิดจากมีอยู่ของสารประกอบอนินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำ เช่น แอนไอออนของคลอไรด์ไนเตรตซัลเฟต และฟอสเฟต (แอนไอออนคือไอออนที่มีประจุลบ) หรือแคทไอออนของโซเดียมแมกนีเซียม เหล็ก และอะลูมิเนียม (แคทไอออนคือไอออนที่มีประจุบวก) โดยหน่วยวัดค่าการนำไฟฟ้าเป็นไมโครโมห์ต่อเซนติเมตร ( $\mu\text{mhos/cm}$ ) หรือ ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ( $\mu\text{s/cm}$ )

### 2.6.2 การวัดค่าความเค็มของน้ำ (Salinity)

การตรวจวัดความเค็ม เป็นการตรวจวัดปริมาณเกลือที่ละลายน้ำที่พบในน้ำเค็มหรือน้ำกร่อย โดยมีหน่วยเป็นส่วนในหนึ่งพันส่วน (ppt ย่อมาจาก part per thousand) ความเค็มของน้ำทะเลของโลกรวมมีค่าเฉลี่ย 35 ppt น้ำจืดมีค่าไม่เกิน 0.5 ppt น้ำกร่อยมีค่า 0.5 – 25 ppt ค่าความเค็มจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับปริมาณหยาดน้ำฟ้า น้ำจากหิมะละลาย หรือบริเวณรอยต่อระหว่างน้ำเค็มกับน้ำจืด เช่น บริเวณปากแม่น้ำ ปริมาณของเกลือในน้ำเป็นตัวการสำคัญอย่างหนึ่งที่ใช้ชี้บ่งว่าจะพบสิ่งมีชีวิตชนิดใดในบริเวณเหล่านั้น ดังนั้นชนิดสิ่งมีชีวิตที่อาศัยในน้ำจืดและที่อาศัยในน้ำเค็มจึงแตกต่างกันมาก พืชหรือสัตว์ที่อาศัยในน้ำจืดจะมีเกลือในเซลล์มากกว่าในแหล่งน้ำที่อาศัยอยู่ สิ่งมีชีวิตเหล่านี้จะกำจัดเกลือออกมาเป็นของเสีย ส่วนพืชหรือสัตว์ที่อาศัยในน้ำทะเลมีปริมาณของเกลือเท่ากับหรือน้อยกว่าสิ่งแวดล้อมที่อาศัยอยู่และมีกลไกของร่างกายที่จะยังคงสภาพสมดุลของเกลือ นอกจากนี้สิ่งมีชีวิตเหล่านี้ ยังสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงความเค็มในแหล่งน้ำที่อาศัยอยู่ได้

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้จะเป็นการทดสอบประสิทธิภาพของเยื่อกรองรีเวอร์สออสโมซิส ออกแบบอุปกรณ์และระบบทำน้ำจืดจากน้ำทะเลโดยใช้พลังงานคลื่นสมุทรเพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับระบบคาน ฟุ่นลอย และกระบอกสูบน้ำไฮดรอลิก

#### 3.1 ออกแบบ ประกอบ และทดลองประสิทธิภาพของเยื่อกรองรีเวอร์สออสโมซิส สำหรับน้ำทะเล

##### 3.1.1 อุปกรณ์

- ถังใส่ตัวอย่างน้ำทะเล ใช้ถังพลาสติกบรรจุน้ำดื่มทั่วไป ที่จะนำน้ำทะเลไปผ่านกระบวนการกรองโดยระบบรีเวอร์สออสโมซิส



รูปที่ 3.1 ถังใส่ตัวอย่างน้ำทะเล

- ชุดกรอง Carbon In Filter และ Micro Filtration ยี่ห้อ Colandas รุ่น C115 เครื่องกรองน้ำใช้ระบบการกรอง 2 ขั้นตอน ขนาด 10 นิ้ว
  - ขั้นตอนที่ 1 ใส้กรอง MF Micro Filtration สามารถกรองน้ำได้ละเอียดต่ำกว่า 0.3 ไมครอน จึงกรองอนุภาคคอลลอยด์รวมทั้งจุลชีพ และสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กมาก ๆ ได้เกือบทั้งหมด
  - ขั้นตอนที่ 2 ใส้กรองคาร์บอน CIF Carbon in Filter ด้วยระบบการกรองแบบ 3 ชั้น ไว้ในกระบอกเดี่ยว
    - ชั้นแรก ใส้กรอง Sediment ขนาด 5 ไมครอน
    - ชั้นกลาง คาร์บอนเกรด
    - ชั้นในสุด มีใส้กรองตะกอน ขนาด 1 ไมครอน
- อัตราการกรอง 90 ลิตร/ชม.ที่แรงดัน 20 psi
- ขนาดของเครื่องกรอง

ความกว้างของเครื่องกรอง	10 เซนติเมตร
ความยาวของเครื่องกรอง	24 เซนติเมตร



รูปที่ 3.2 เยื่อกรอง Carbon In Filter (ซ้าย) และ Micro Filtration (ขวา)

- เครื่องปั้มน้ำแรงดันสูง ยี่ห้อ ETOP รุ่น S1

ความดันในการทำงาน	80	บาร์
ความดันสูงสุด	105	บาร์
พลังงานไฟฟ้า	1,500	วัตต์
อัตราการไหลของน้ำ	7	ลิตรต่อนาที



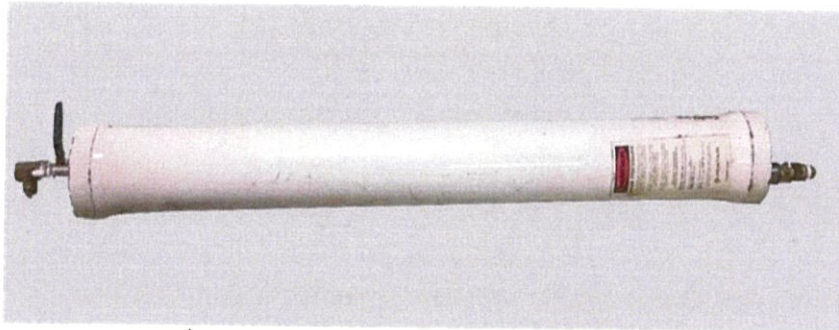
รูปที่ 3.3 เครื่องปั้มน้ำแรงดันสูง

- ภาชนะใส่ไส้กรองทนแรงดันสูง (Pressure Vessel) ยี่ห้อ Code line รุ่น 40E100

ขนาดท่อกรองแรงดันสูง (Pressure Vessel)

ความยาวของท่อกรองแรงดันสูง	138	เซนติเมตร
----------------------------	-----	-----------

เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อกรองแรงดันสูง	13.3	เซนติเมตร
ความดันสูงสุดของท่อกรองแรงดันสูง	68	บาร์



รูปที่ 3.4 ภาชนะใส่ไส้กรองแรงดันสูง(Pressure Vessel)

ภายในท่อกรองแรงดันสูงประกอบด้วยเยื่อกรองน้ำทะเล รุ่น SW4040

#### Operating Limits

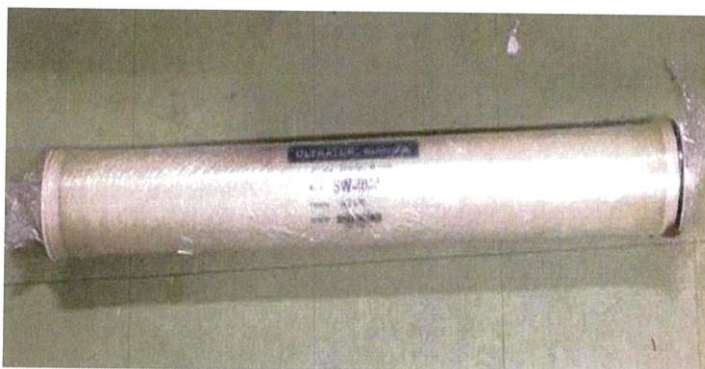
Membrane Type : Thin-Film Composite  
 Maximum Operating Pressure : 1000 PSI  
 Maximum Operating Temperature : 113°F(45°C)  
 Maximum Feed Turbidity : 1 NTU  
 Free Chlorine Tolerance : 0 PPM

#### pH RangeContinuous

Operation : 4-11  
 Short-term (30 min.), cleaning : 2.5-11  
 Maximum Feed Flow : 6-30 GPM  
 Maximum Feed Silt Density Index : SDI 5  
 Membrane Outer Wrap : Fiberglass

#### Element Test Conditions:

32,000 PPM NaCl  
 800 PSI  
 77°F(25°C)  
 pH 8.0



รูปที่ 3.5 เยื่อกรองน้ำทะเล รุ่น SW4040

## - สายไฮดรอลิก

ความยาวของสายไฮดรอลิก	130	เซนติเมตร
เส้นผ่านศูนย์กลางของสายไฮดรอลิก	2	เซนติเมตร
ความดันสูงสุด	160	บาร์



รูปที่ 3.6 สายไฮดรอลิก

## - เกจวัดความดัน (Pressure Gauge)

- ภายในตัวเกจเติม Glycerin 99.5 %
- วัดความดันได้ตั้งแต่ 0-100 บาร์
- ขนาดหน้าปัดได้ทั้งขนาด 63 mm (2 1/2 in)
- ขนาดเกลียว 1/2 BSP
- เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน +/-1.6 % F.S.
- มี Scales ให้เลือกทั้งหน่วย บาร์, psi

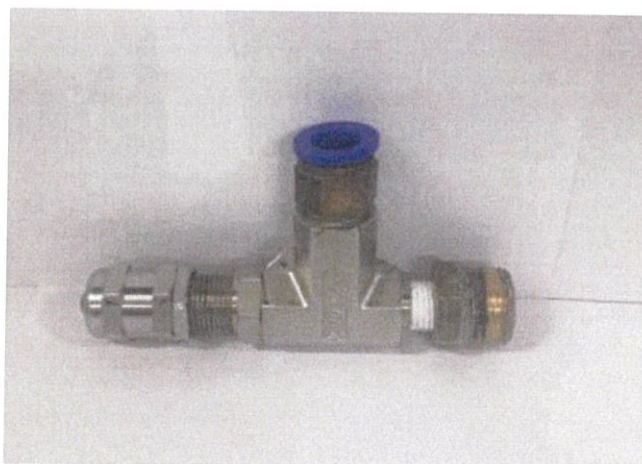


รูปที่ 3.7 เกจวัดความดัน

- วาล์วระบายความดัน (Pressure Safety Value) ยี่ห้อ Hylink รุ่น R Series

ขนาดของวาล์วระบายความดัน (Pressure Safety Value)

ความกว้างของวาล์วระบายความดัน	2	เซนติเมตร
ความยาวของวาล์วระบายความดัน	8.6	เซนติเมตร
ความสูงของวาล์วระบายความดัน	6.2	เซนติเมตร
เส้นผ่านศูนย์กลางของวาล์วระบายความดัน	1.2	เซนติเมตร
ความดันสูงสุดของวาล์วระบายความดัน	413	บาร์



รูปที่ 3.8 วาล์วระบายความดัน (Pressure Safety Value)

- เครื่องวัดค่า Conductivity Milwaukee รุ่น SM301 EC meter

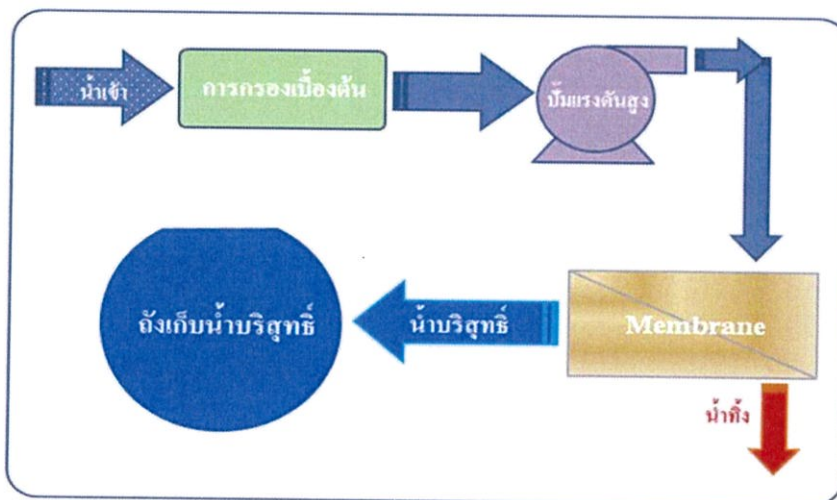
Range 0 – 1990  $\mu\text{S}/\text{cm}$



รูปที่ 3.9 เครื่องวัดค่า Conductivity

### 3.1.2 ขั้นตอนและลักษณะการทำงานของระบบทำน้ำจืดจากน้ำทะเลโดยใช้ปั้มน้ำแรงดันสูง พลังไฟฟ้า

เพื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพของเยื่อกรองรีเวอร์สออสโมซิส โดยทำการต่อระบบตามแผนผัง ดังรูปที่ 3.10 เป็นชุดทดลองดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.10 ไดอะแกรมอธิบายขั้นตอนการทำงานของระบบทดสอบประสิทธิภาพเยื่อกรองรีเวอร์สออสโมซิส

โดยที่

หมายเลข 1 ถังใส่ตัวอย่างน้ำทะเล

หมายเลข 2 กรอง Carbon In Filter และ Micro Filtration

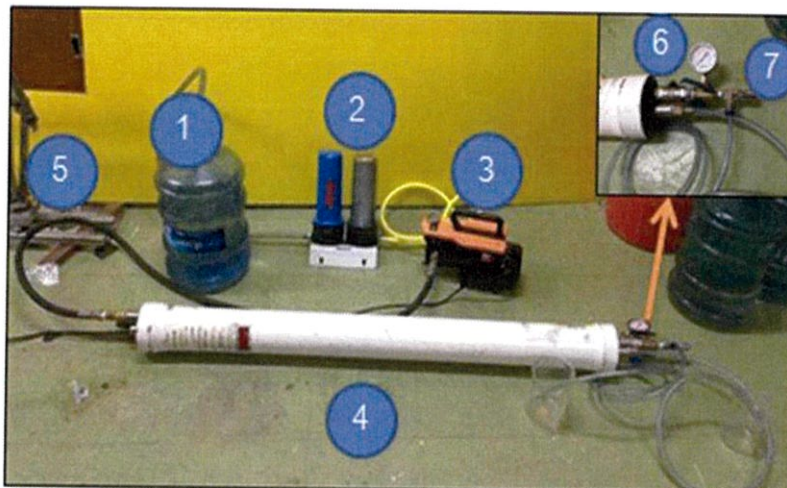
หมายเลข 3 เครื่องปั้มน้ำแรงดันสูง

หมายเลข 4 ท่อรีเวอร์สออสโมซิส

หมายเลข 5 สายไฮดรอลิก

หมายเลข 6 เกจวัดความดัน

หมายเลข 7 วาล์วระบายความดัน



รูปที่ 3.11 ระบบการทดสอบประสิทธิภาพของเยื่อกรองรีเวอร์สออสโมซิส

ปั้มน้ำจะดูดน้ำทะเลมา จากนั้นน้ำทะเลจะผ่านเยื่อกรอง Carbon In Filter และ Micro Filtration ก่อนและเข้าเครื่องปั้มน้ำเพื่อนำน้ำทะเลเข้าสู่ท่อ R.O. โดยจะมีวาล์วระบายความดันเพื่อควบคุมความดันภายในและระบายความดันส่วนเกินออก และจะสามารถอ่านค่าความดันได้จากเกจวัดความดัน ซึ่งจะปรับระดับความดันจนได้น้ำที่ผ่านระบบกรองออกมาและทำการนำน้ำที่ได้มาวัดค่า conductivity โดยจะเปลี่ยนค่าความดันไปเรื่อยๆ เพื่อหาค่าความดันที่เหมาะสมและทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของเยื่อกรองรีเวอร์สออสโมซิสสูงสุด

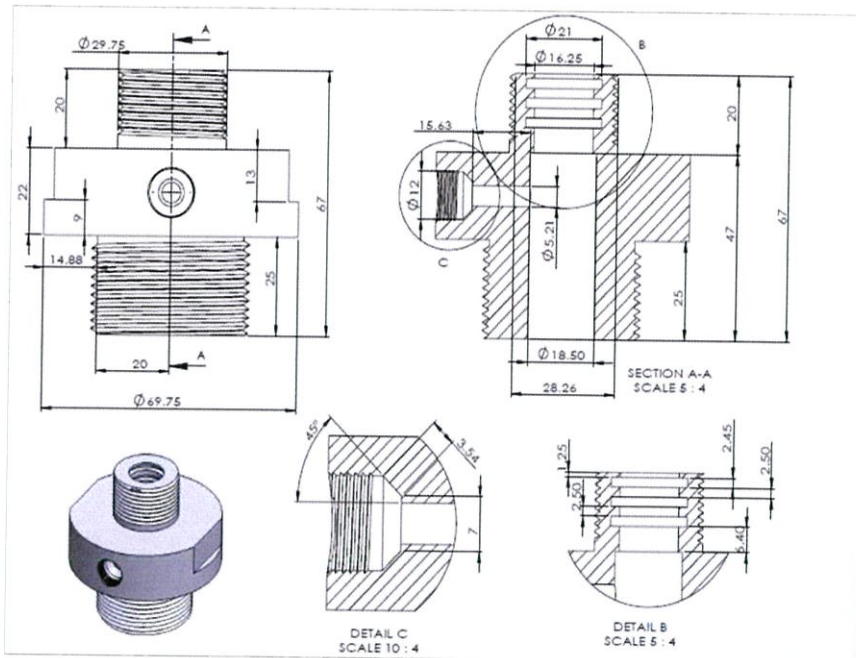
### 3.2 ออกแบบและทดลองการทำงานระบบทำน้ำจืดจากน้ำทะเลโดยใช้พลังงานคลื่นสมุทร

#### 3.2.1 การออกแบบอุปกรณ์

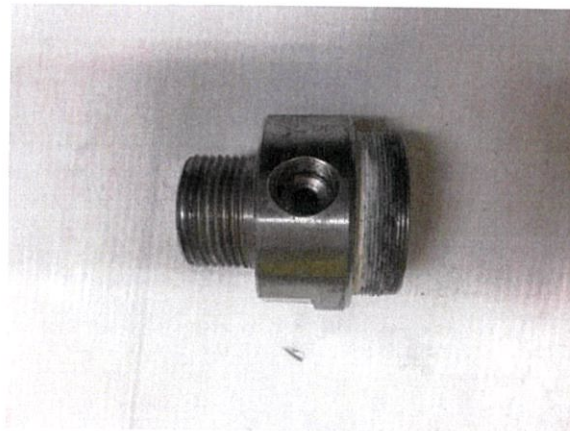
##### 3.2.1.1 แบบฝากระบอกสูบไฮดรอลิก

วัสดุที่ใช้ คือ สแตนเลส ออกแบบดังรูปที่ 3.12 และสร้างขึ้นมีลักษณะเป็นดังรูปที่ 3.13, 3.14 และ 3.15

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านบน	29.75 มิลลิเมตร
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูด้านบน	16.25 มิลลิเมตร
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านล่าง	40 มิลลิเมตร
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูด้านล่าง	18.50 มิลลิเมตร
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูระบายความดัน	12 มิลลิเมตร



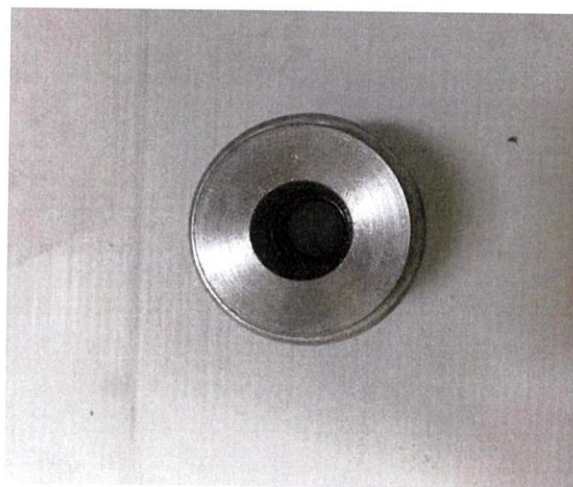
รูปที่ 3.12 ภาพฉายรายละเอียดของฝากระบอกสูบไฮดรอลิก



รูปที่ 3.13 ภาพถ่ายของฝากระบอกสูบไฮดรอลิก (ด้านข้าง)



รูปที่ 3.14 ภาพถ่ายของฝาระบอกลูกสูบไฮโดรลิก (ด้านบน)

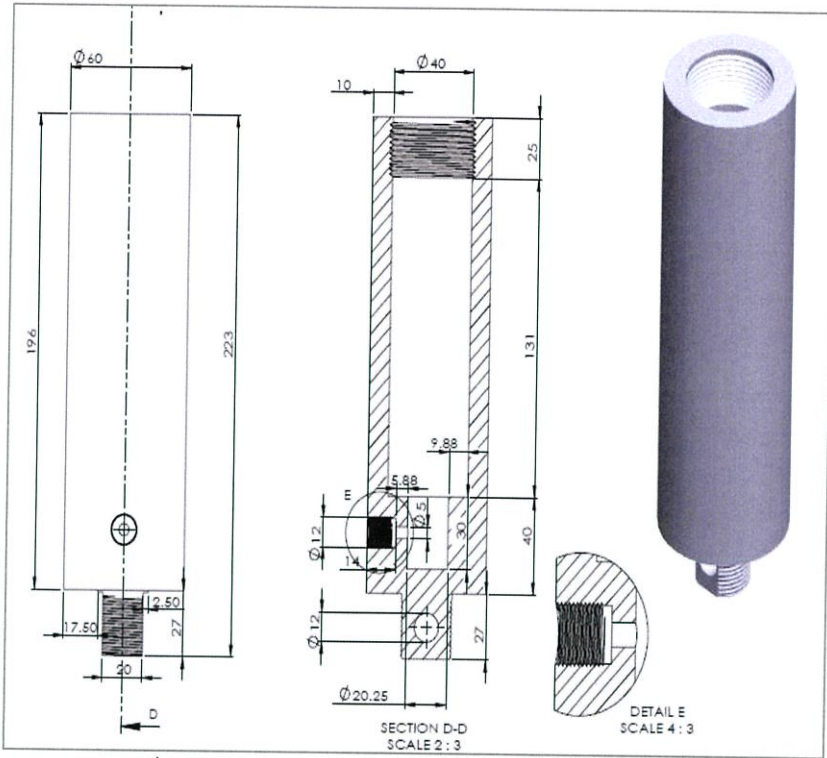


รูปที่ 3.15 ภาพถ่ายของฝาระบอกลูกสูบไฮโดรลิก (ด้านล่าง)

### 3.2.1.2 แบบเล็กระบอกลูกสูบไฮโดรลิก

วัสดุที่ใช้ คือ อลูมิเนียม มีแบบดังรูปที่ 3.16 และจัดซื้อมีลักษณะดังรูปที่ 3.17, 3.18 และ 3.19

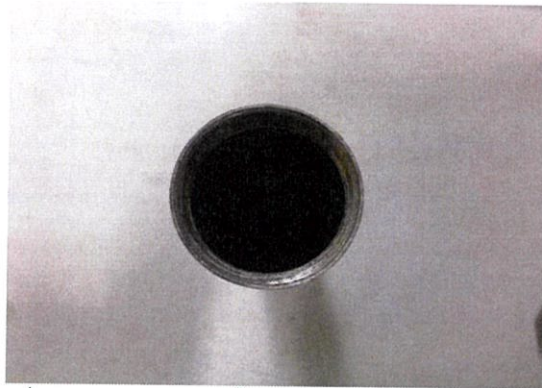
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้านบน	60 มิลลิเมตร
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูด้านบน	40 มิลลิเมตร
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูระบายความดัน	12 มิลลิเมตร
ความสูง	223 มิลลิเมตร



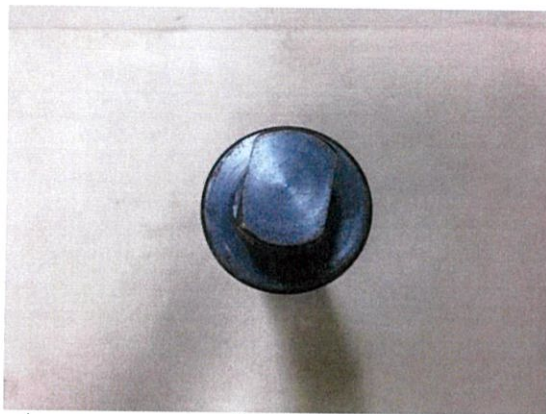
รูปที่ 3.16 ภาพฉายรายละเอียดของเสื่อกระบอกลูกสูบไฮดรอลิก



รูปที่ 3.17 ภาพถ่ายของเสื่อกระบอกลูกสูบไฮดรอลิก (ด้านข้าง)



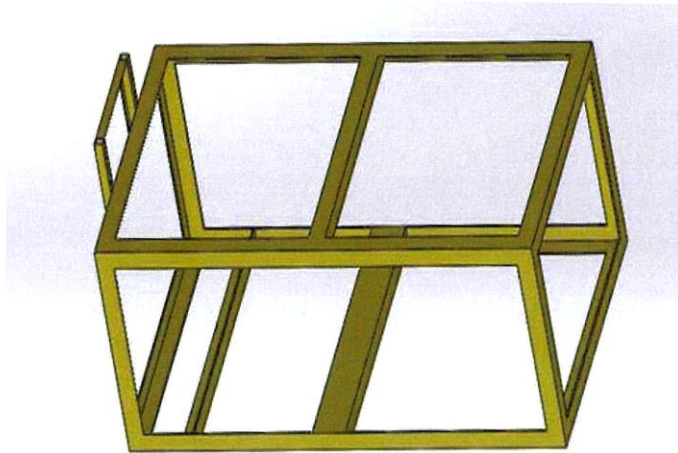
รูปที่ 3.18 ภาพถ่ายของเสื่อกระบอกลูกสูบไฮดรอลิค (ด้านบน)



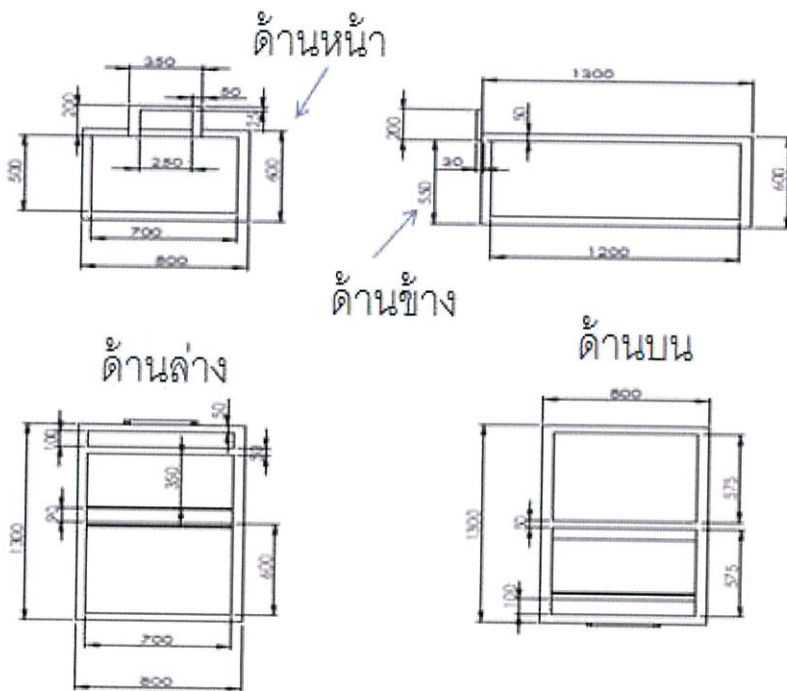
รูปที่ 3.19 ภาพถ่ายของเสื่อกระบอกลูกสูบไฮดรอลิค (ด้านล่าง)

3.2.1.3 แบบโครงสร้างหลักระบบทำน้ำจืดจากน้ำทะเลโดยใช้พลังงานคลื่น  
วัสดุที่ใช้ คือ เหล็ก ออกแบบตามรูปที่ 3.20 และ 3.21 ทำการจัดสร้างขึ้นมีลักษณะเป็นส่วนประกอบ  
ดังรูปที่ 3.24, 3.25 และ 3.26

ขนาดความกว้าง	800 มิลลิเมตร
ขนาดความยาว	1200 มิลลิเมตร
ขนาดความสูง	600 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.20 โครงสร้างหลัก

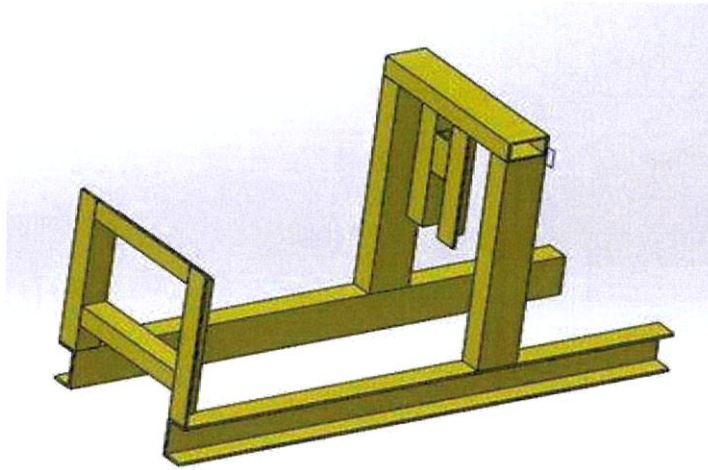


รูปที่ 3.21 ภาพฉายรายละเอียดโครงสร้างหลักระบบทำน้ำจืดจากน้ำทะเลโดยใช้พลังงานคลื่น

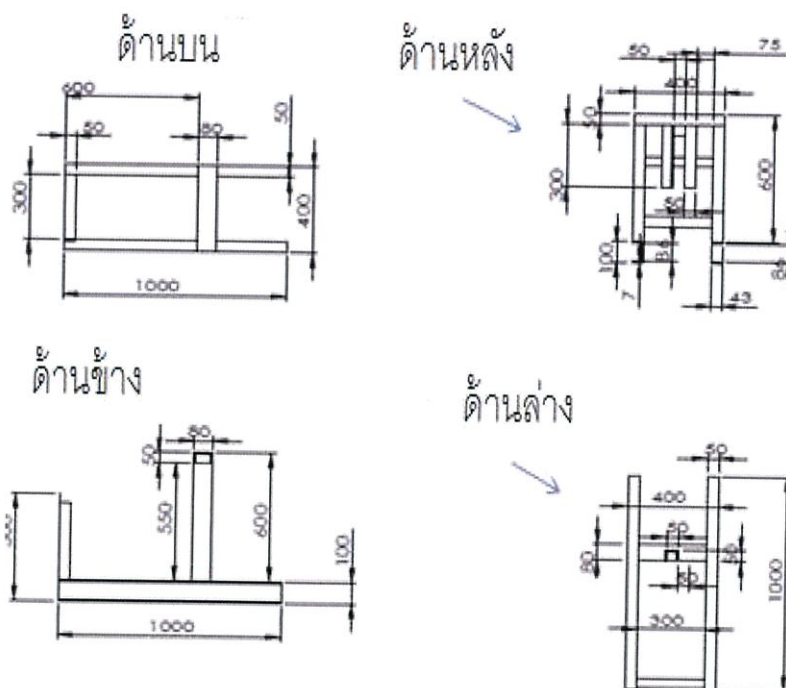
3.2.1.4 แบบโครงสร้างรองของระบบทำน้ำจืดจากน้ำทะเลโดยใช้พลังงานคลื่น  
วัสดุที่ใช้ คือ เหล็ก ออกแบบตามรูปที่ 3.22 และ 3.23 ทำการจัดสร้างขึ้นมีลักษณะเป็นส่วนประกอบ  
ดังรูปที่ 3.24, 3.25 และ 3.26

ขนาดความกว้าง	400 มิลลิเมตร
ขนาดความยาว	1000 มิลลิเมตร
ขนาดความสูงด้านหน้า	400 มิลลิเมตร

ขนาดความสูงด้านหลัง 600 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.22 โครงสร้างรอง



รูปที่ 3.23 ภาพฉายรายละเอียดโครงสร้างรองของระบบทำน้ำจืดจากน้ำทะเลโดยใช้พลังงานคลื่น



รูปที่ 3.24 ภาพถ่ายโครงสร้างหลักระบบทำน้ำจืดจากน้ำทะเลโดยใช้พลังงานคลื่น (ด้านข้าง)



รูปที่ 3.25 ภาพถ่ายโครงสร้างหลักระบบทำน้ำจืดจากน้ำทะเลโดยใช้พลังงานคลื่น (ด้านหน้า)

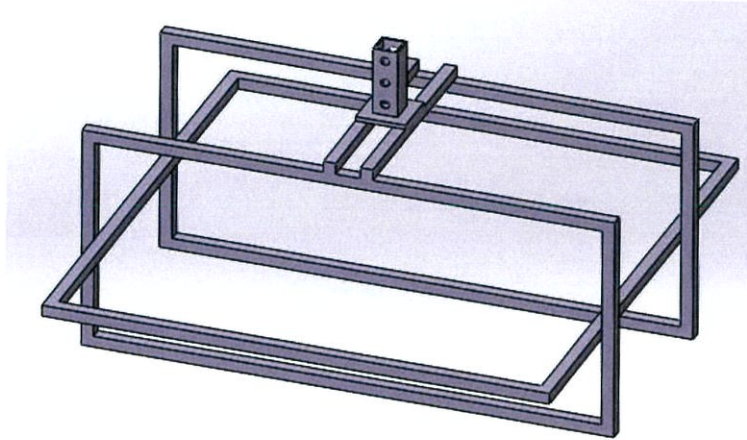


รูปที่ 3.26 ภาพถ่ายโครงสร้างหลักระบบทำน้ำจืดจากน้ำทะเลโดยใช้พลังงานคลื่น (ด้านหลัง)

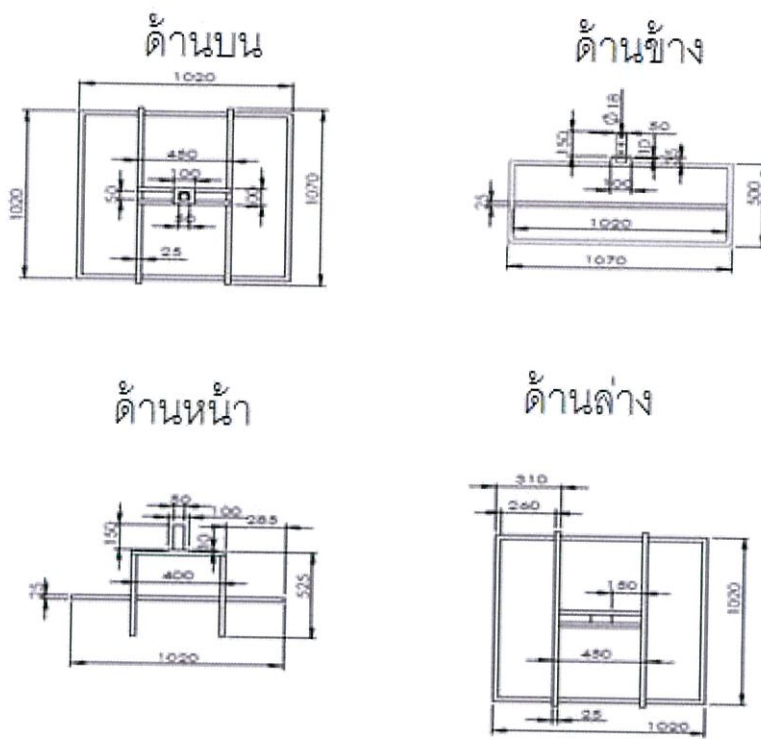
### 3.2.1.5 แบบโครงสร้างของฟุ่นลอย

ประกอบด้วยตัวโครง ซึ่งวัสดุที่ใช้ คือ สแตนเลส ออกแบบตามรูปที่ 3.27 และ 3.28 ทำการสร้างขึ้นมีลักษณะเป็นส่วนประกอบดังรูปที่ 3.29, 3.30 และ 3.31 ยึดกับ 4 ฟุ่นลอยพลาสติก รุ่น ฟุ่นจิ๊กซอว์ ขนาด 500 x 500 x 450 mm<sup>3</sup>

ขนาดความกว้าง	1000 มิลลิเมตร
ขนาดความยาว	1000 มิลลิเมตร
ขนาดความสูง	500 มิลลิเมตร



รูปที่ 3.27 โครงสร้างของฟุ่นลอย



รูปที่ 3.28 ภาพฉายโครงสร้างของหุ่นลอย



รูปที่ 3.29 ภาพถ่ายโครงสร้างของหุ่นลอย (ด้านข้าง)



รูปที่ 3.30 ภาพถ่ายโครงสร้างของฟูลอย (ด้านบน)

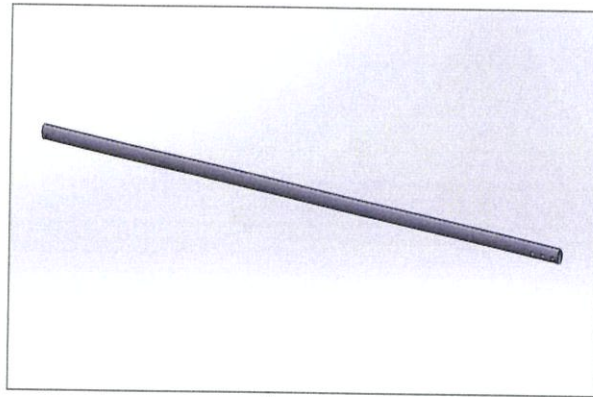


รูปที่ 3.31 ภาพถ่ายโครงสร้างของฟูลอย (ด้านล่าง)

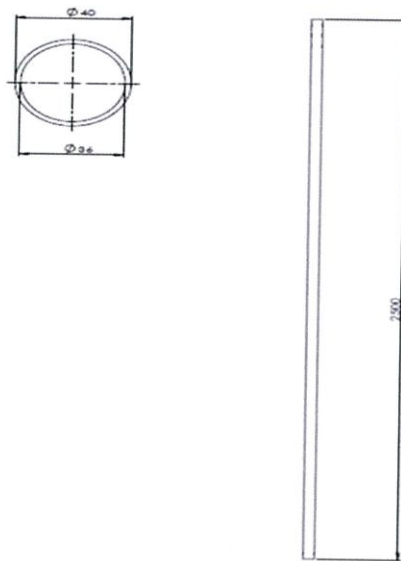
#### 3.2.1.6 แบบคานทอดแรง

วัสดุที่ใช้ คือ สแตนเลส ออกแบบตามรูปที่ 3.32 และ 3.33 ทำการสร้างขึ้นเป็นส่วนประกอบดังรูปที่ 3.34

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง	40	มิลลิเมตร
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรู	36	มิลลิเมตร
ขนาดความยาว	2000	มิลลิเมตร



รูปที่ 3.32 คาน



รูปที่ 3.33 ภาพฉายแบบคาน



รูปที่ 3.34 ภาพถ่ายแบบคาน

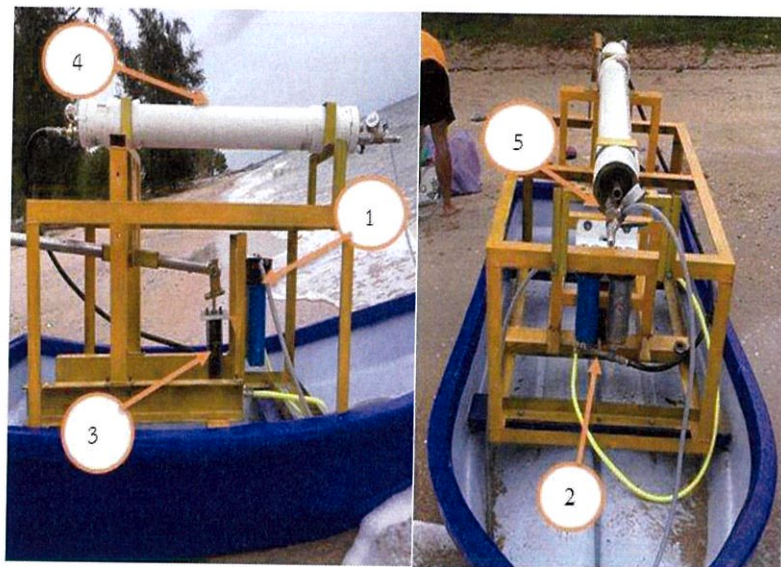
### 3.2.2 ประกอบระบบทำน้ำจืดจากน้ำทะเลโดยใช้พลังงานคลื่นสมุทร

การศึกษาระบบทำน้ำจืดจากน้ำทะเลโดยใช้พลังงานคลื่นสมุทร ซึ่งมีแผนผังดังรูปที่ 3.35 สามารถแบ่งส่วนประกอบหลักของระบบ ได้แก่ องค์ประกอบหลักอย่าง กรองน้ำ(1) ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกรองน้ำทะเลในขั้นต้นก่อนผ่าน เซ็ควาล์วสวิง(2) ทำให้น้ำทะเลไหลเป็นทางเดียวเข้าไปภายใน กระบอกสูบน้ำเมติก(3) โดยเมื่อ ลูกสูบชักออกจะทำการดูดน้ำเข้าภายในกระบอกสูบ และเมื่อลูกสูบชักเข้าจะทำการอัดน้ำเข้าภายในท่อกรองแรงดันสูง(4) ซึ่งจะมีเกจวัดความดัน(5) บอกระดับความดันภายในท่อกรองแรงดันสูง(4) และมีวาล์วระบายความดัน(6) ระบายความดันภายในท่อกรองแรงดันสูง(4) เมื่อมีค่าความดันสูงเกินค่าที่กำหนด เมื่อความดันมีค่าสูงพอจะดันน้ำผ่านไส้กรองรีเวอร์สออสโมซิสออกมาได้เป็นน้ำจืดที่สะอาด



รูปที่ 3.35 ไดอะแกรมอธิบายขั้นตอนการทำงานของระบบทำน้ำจืดจากน้ำทะเลโดยใช้พลังงานคลื่นสมุทร

ทำการประกอบระบบทำน้ำจืดจากน้ำทะเลโดยใช้พลังงานคลื่นสมุทรและมีลักษณะการยึดเป็นดังรูปที่ 3.36 ยึดกับตัวเรือพลาสติกขนาดเล็ก ซึ่งเป็นรุ่นมาตรฐาน ในท้องตลาดตามแผนผัง



รูปที่ 3.36 รวมทั้งระบบทำน้ำจืดจากน้ำทะเลโดยใช้พลังงานคลื่นสมุทร

### 3.2.3 ทดลองการทำงานระบบทำน้ำจืดจากน้ำทะเลโดยใช้พลังงานคลื่นสมุทรในภาคสนาม

ในการทดลองได้เคลื่อนย้ายระบบไปทำการทดลองภาคสนามที่ค่ายพระมหาเจษฎาราชเจ้า อำเภอสัตหีบ จังหวัดชลบุรี โดยจะทำการวัดค่าความดันที่ระบบกลไกสามารถอัดจากกระสูบเข้าสู่ระบบกรองรีเวอร์สออสโมซิส และวัดค่า conductivity ของน้ำหลังจากผ่านระบบทำน้ำจืดจากน้ำทะเลโดยใช้พลังงานคลื่นสมุทร



รูปที่ 3.37 ภาพถ่ายรวมทั้งระบบทำน้ำจืดจากน้ำทะเลโดยใช้พลังงานคลื่นสมุทรในสถานที่ทดสอบภาคสนาม

## บทที่ 4

### ผลการวิจัย และการอภิปรายผล

ในบทนี้จะอธิบายถึงผลที่ได้จากการทดลอง และการวิเคราะห์ผลของการศึกษาความเป็นไปได้ของการออกแบบระบบการเปลี่ยนน้ำทะเลให้เป็นน้ำจืดโดยใช้คลื่นทะเล โดยแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน

#### 4.1 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของเยื่อกรองรีเวอร์สออสโมซิส

ทำการวัดค่าความแตกต่างของ Conductivity และ Salinity ของระบบการทำน้ำจืดจากน้ำทะเล โดยใช้เครื่องปั้มน้ำแรงดันสูงพลังงานไฟฟ้าแทนคลื่นทะเล ทำการอัดแรงดันให้น้ำทะเลผ่านเข้าไปในท่อร์เวอรัสออสโมซิส เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของเยื่อกรองรีเวอร์สออสโมซิส ซึ่งในการทดลองจะมีการปรับเพิ่มแรงดันที่ 24 – 40 บาร์ และกำหนดอัตราการไหลของน้ำที่ 8.9 m/s ดังที่แสดงในตารางที่ 4.1

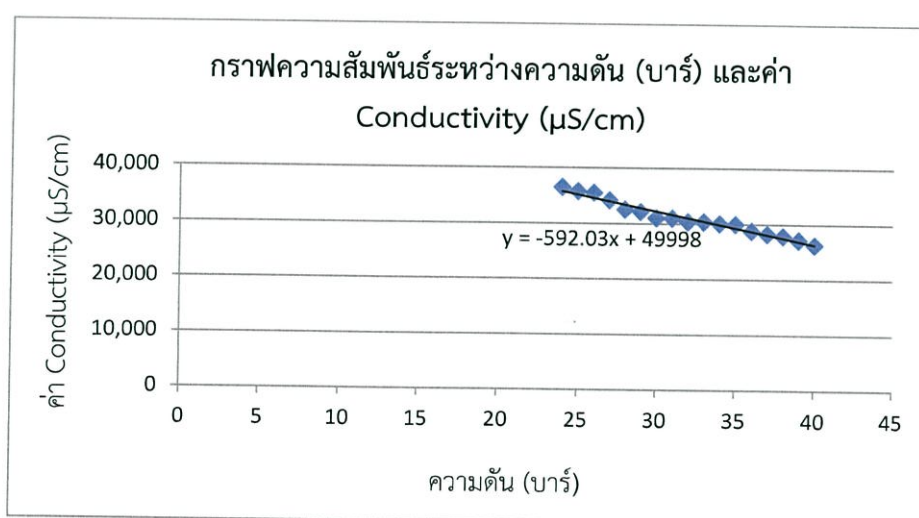


รูปที่ 4.1 ระบบการทดสอบประสิทธิภาพของเยื่อกรองรีเวอร์สออสโมซิส

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงค่า Conductivity ของน้ำ  
 ค่า Conductivity ของน้ำตัวอย่าง 57,500  $\mu\text{S}/\text{cm}$   
 อัตราการไหลของน้ำที่เฉลี่ย 8.9 ml/s

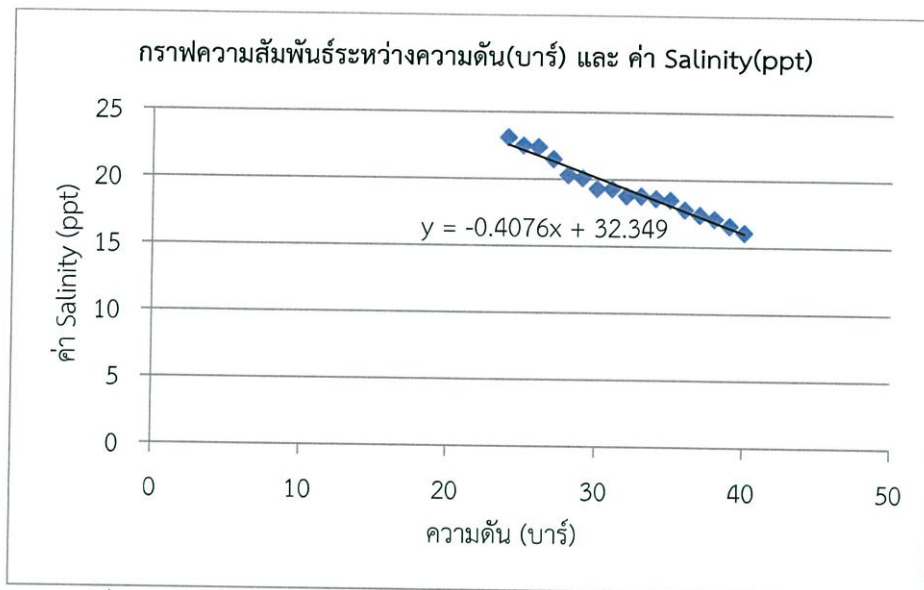
ความดัน (บาร์)	Conductivity ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Salinity (ppt)
24	36,500	23.1
25	35,750	22.5
26	35,500	22.4
27	34,200	21.5
28	32,550	20.3
29	32,150	20.1
30	31,050	19.3
31	31,000	19.3
32	30,400	18.8
33	30,400	18.8
34	30,100	18.6
35	29,950	18.5
36	28,800	17.8
37	28,250	17.4
38	27,850	17.1
39	27,150	16.6
40	26,300	16.1

เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดัน (บาร์) และค่า Conductivity ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) แสดงได้ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดัน (บาร์) และค่า Conductivity ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )

เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดัน (บาร์) และ ค่า Salinity (ppt) แสดงดังได้รูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดัน (บาร์) และ ค่า Salinity (ppt)

สำหรับการทดลองปรับเพิ่มแรงดันที่ 24 – 40 บาร์ กำหนดอัตราการไหลที่ 11.5 ml/s มีผลดังตารางที่ 4.2

ตาราง 4.2 ตารางแสดงค่า Conductivity ของน้ำ

ค่า Conductivity ของน้ำตัวอย่าง 57,500  $\mu\text{s}/\text{cm}$

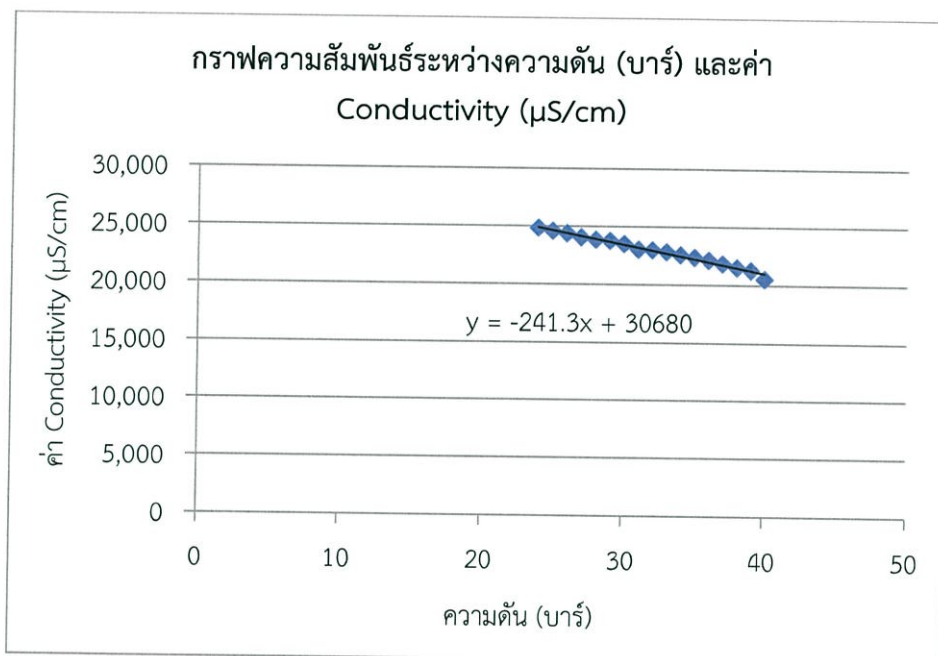
อัตราการไหลของน้ำที่เฉลี่ย 11.5 ml/s

ความดัน (Bar)	Conductivity ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )	Salinity (ppt)
24	24,850	15.1
25	24,600	14.9
26	24,400	14.8
27	24,050	14.6
28	23,850	14.4
29	23,750	14.4
30	23,500	14.2
31	23,050	13.9
32	23,000	13.9
33	22,850	13.8
34	22,600	13.6

(ต่อ) ตาราง 4.2 ตารางแสดงค่า Conductivity ของน้ำ

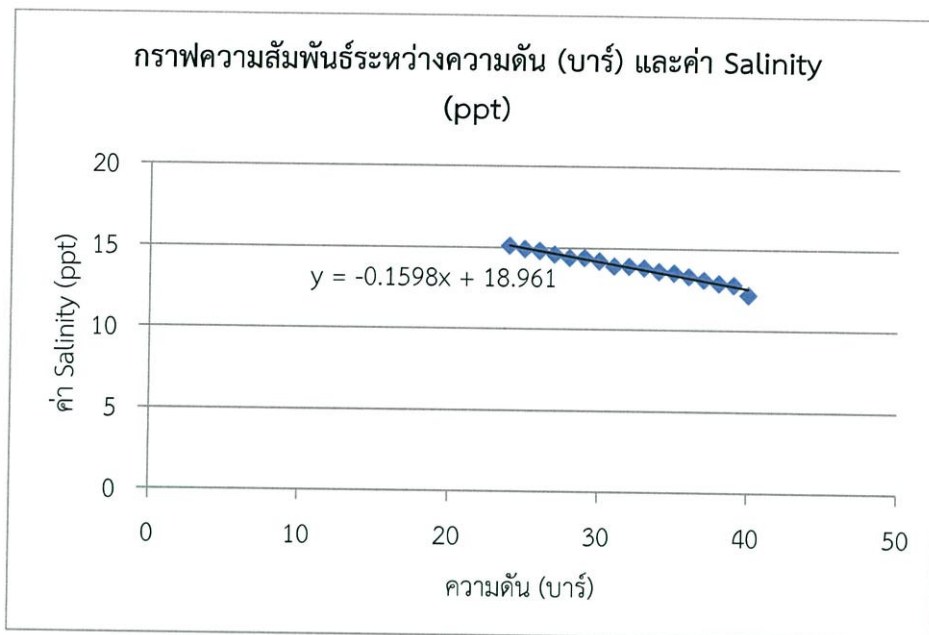
35	22,400	13.5
36	22,150	13.3
37	21,850	13.1
38	21,550	12.9
39	21,300	12.8
40	20,550	12.2

เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดัน(บาร์) และค่า Conductivity ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) แสดงได้ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดัน (บาร์) และค่า Conductivity ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )

เขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดัน (บาร์) และ ค่า Salinity (ppt) แสดงได้ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดัน (บาร์) และ ค่า Salinity (ppt)

#### 4.2 ผลการทดลองของระบบทำน้ำจืดจากน้ำทะเลโดยใช้พลังงานคลื่นสมุทรในภาคสนาม

จากการไปทำการทดลองที่โรงเรียนชุมพลทหารเรือ กรมยุทธศึกษาทหารเรือ อำเภอสัตหีบ จังหวัดชลบุรี พบว่าบริเวณนั้นเป็นอ่าวปิดทำให้มีระดับความสูงของคลื่นที่ต่ำ จึงไม่เหมาะแก่การทดลองระบบทำน้ำจืดจากน้ำทะเลโดยใช้พลังงานคลื่นสมุทร และได้ทำการย้ายไปทำการทดลองที่ค่ายพระมหาเจษฎาราชเจ้า อำเภอสัตหีบ จังหวัดชลบุรี เพราะมีบริเวณสภาพแวดล้อมที่เป็นอ่าวเปิด โดยในช่วงเวลาการเก็บข้อมูลสัปดาห์ละ 1 วัน เป็นเวลา 4 สัปดาห์ พบว่ามากกว่า 4 ชั่วโมงในช่วงเวลาเย็น ซึ่งคลื่นทะเลที่บริเวณค่ายมีความสูง 0.5 – 1.0 เมตร ต่อเนื่องที่อัตราความถี่ 17 ลูกคลื่นต่อนาที ส่วนการใช้คลื่นทะเลมาทำการปั้มน้ำในระบบนั้นถือว่าค่อนข้างทำงานได้ดี เพราะคลื่นสูงพอที่จะทำให้คนไปกดกระบอกสูบให้ระบบทำงานได้ แต่ประสบปัญหาคือ เกิดการรั่วของกระบอกสูบซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ทำให้เกิดความดัน เพื่อทำให้น้ำไหลเข้าไปในระบบ เนื่องจากกระบอกสูบไฮดรอลิกทำขึ้นมาเอง จึงไม่มีโอริงที่มีขนาดพอดีกับกระบอกสูบ เพราะรั่วออกไปหมด ทำให้ไม่มีความดันมากพอ ทำให้น้ำบริสุทธิ์ผ่านเยื่อ membrane



รูปที่ 4.6 การทำงานของกระบอกสูบ

## บทที่ 5

### สรุปและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุป

จากการทดลองงานน้ำทะเลเว็ลจี้ยนี้ได้ทำการออกแบบการทดลองเป็นสองส่วน ส่วนแรกคือการทดสอบประสิทธิภาพของเยื่อกรองรีเวอร์สออสโมซิสใช้ปั๊มพ์น้ำแรงดันสูงโดยการทดลองพบว่าค่าconductivity ของน้ำที่ได้ขึ้นอยู่กับค่าความดันและอัตราการไหลของน้ำ คือ ที่อัตราการไหลของน้ำเท่ากันเมื่อเพิ่มความดันให้สูงขึ้น ค่า conductivity ของน้ำที่ได้จะมีค่าลดลง และที่ความดันเท่ากันเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของน้ำให้สูงขึ้น ค่า conductivity ของน้ำที่ได้จะมีค่าลดลง กล่าวคือความดันและอัตราการไหลของน้ำที่สูงขึ้นจะทำให้ได้ค่า conductivity ของน้ำที่ได้มีค่าที่ลดลงหรือทำให้ได้น้ำที่สะอาดขึ้นนั่นเอง ส่วนที่สองคือการทดลองการทำงานระบบทำน้ำจืดจากน้ำทะเลโดยใช้พลังงานคลื่นสมุทร ได้เคลื่อนย้ายระบบไปทำการทดลองภาคสนามที่ค่ายพระมหาเจษฎาราชเจ้า อำเภอสัตหีบ จังหวัดชลบุรี ในการทดลองส่วนนี้ได้พบปัญหาในระบบการซีล O - Ring บริเวณกระบอกสูบไม่สามารถรับแรงลอยตัวซึ่งมีค่ามากได้ ทำให้เกิดการรั่วเสียหาย และในระบบกรองรีเวอร์สออสโมซิสที่เกิดการชำรุดในระหว่างการนำกลับมาเก็บผลการทดลองในส่วนแรก ซึ่งก็ได้ทำการแก้ไข ก็ไม่อยู่ในสภาพเดิมมากที่สุด และพร้อมกับปรับขนาดประเก็น O-Ring นำกลับไปทดสอบภาคสนามอีก แต่ด้วยช่วงเวลาที่ย่ำแย่ จึงไม่เห็นผลของการปรับปรุง ทำให้ในการทดลองภาคสนามไม่สามารถได้ผลการทดลองตามเป้าหมายที่ตั้งไว้

#### 5.2 ปัญหาและอุปสรรคในการดำเนินโครงการนี้

- 1) กระบอกสูบนิวเมติกที่ดัดแปลงมาใช้ไม่สามารถทนแรงดันที่มีค่ามากได้ จึงต้องสร้างโครงสร้างมาป้องกัน
- 2) ออกแบบระบบการซีล O - Ring บริเวณกระบอกสูบยังไม่เหมาะสมไม่สามารถรับแรงลอยตัวซึ่งมีค่ามากได้ ทำให้เกิดการรั่วเสียหาย
- 3) pressure vessel ที่ใช้เป็นของเดิม ซึ่งมีอายุการใช้งานนานอาจมีความเสื่อมสภาพ

#### 5.3 ข้อเสนอแนะ

การดำเนินการพัฒนาต่อๆไปควร ออกแบบหรือเลือกอุปกรณ์ที่ใช้จะต้องมีความแข็งแรงคงทน และทนต่อสภาพแวดล้อมบริเวณมหาสมุทร นอกจากนี้อุปกรณ์ที่ใช้ทำกระบอกสูบก็ต้องสามารถทนต่อแรงดันสูงโดยไม่มีรั่วรอย ใดๆทั้งนี้ กลไกเรือและทุ่นมีการโยกกระบอกสูบซึ่งทำงานได้ดีในโครงการพิเศษนี้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Akili D. Khawaji, Ibrahim K. Kutubkhanah, Jong-Mihn Wie, European Desalination Society and Center for Research and Technology Hellas (CERTH), Sani Resort 22 –25 April 2007, Halkidiki, Greece, “Advances in seawater desalination technologies” , Desalination, Volume 221, Issue 1, 2008, Pages 47-69.
- [2] Denver Cheddie, Aatma Maharajh, Aneil Ramkhalawan, Prakash Persad, “Transient modeling of wave powered reverse osmosis” , Desalination, Volume 260, Issues 1 , 30 September 2010, Pages 153-160.
- [3] Lourdes García-Rodríguez, “Seawater desalination driven by renewable energies : a review” , Desalination, Volume 143, Issue 2, 2002, Pages 103-113.
- [4] Matt Folley, Trevor Whittaker, “The cost of water from an autonomous wave-powered desalination plant” , Renewable Energy, Volume 34, Issue 1, January 2009, Pages 75-81.
- [5] Marcus Verhuelsdonk, Tony Attenborough, Oliver Lex, Thomas Altmann, “Design and optimization of seawater reverse osmosis desalination plants using special simulation software” , Desalination, Volume 250, Issue 2, 15 January 2010, Pages 729-733.
- [6] Sciroom Online by KroomTong, แรงลอยตัว [Online].  
Available : <https://sites.google.com/site/sciroom23101/page4-1>
- [7] การประปานครหลวง, Conductivity [Online].  
Available : [http://www.mwa.co.th/ewt\\_news.php?nid=13321](http://www.mwa.co.th/ewt_news.php?nid=13321)
- [8] ณรงค์ ต้นชีวะวงศ์, กรุงเทพฯ สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), นิเวศเมตริกส์และ ไฮโดรลิค  
Available : <http://library.tru.ac.th/images/academic/book/b65840/09chap3.pdf>
- [9] วารสารพลังไทยและวิชาการ ดอทคอม, พลังงานคลื่นทะเล [Online].  
Available : <http://www.vcharkarn.com/varticle/41602>
- [10] สถาบันส่งเสริมวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สาขาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อมโลก, Salinity [Online].  
Available : [http://globethailand.ipst.ac.th/?page\\_id=3950](http://globethailand.ipst.ac.th/?page_id=3950)

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

[11] ห้องปฏิบัติการวิจัยเครื่องมือทางการแพทย์และสิ่งแวดล้อม (MERL) ฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, ระบบทำน้ำจืดจากน้ำทะเลโดยใช้พลังงาน  
คลื่น, 1 ใน 13 ผลงานที่เข้าประกวดเทคโนโลยีพลังงานชุมชนและมหกรรมพลังงานทดแทน และ  
อนุรักษ์พลังงาน จัดโดย กระทรวงพลังงาน, 29 พฤศจิกายน 2556 [Online].

Available : <http://www.science.kmitl.ac.th/sciblog/?p=1024>

ภาคผนวก

ตารางที่ 3.1 การคำนวณแรงลอยตัวที่ใช้ในการปั๊มกระบอกสูบ [1]

ระยะที่หุ่นลอยจม (CM)	ปริมาตรที่จมน้ำ	แรงลอยตัว (N)
1	0.01	100.45
2	0.02	200.90
3	0.03	301.35
4	0.04	401.80
5	0.05	502.25
6	0.06	602.70
7	0.07	703.15
8	0.08	803.60
9	0.09	904.05
10	0.10	1004.50
11	0.11	1104.95
12	0.12	1205.40
13	0.13	1305.85
14	0.14	1406.30
15	0.15	1506.75
16	0.16	1607.20
17	0.17	1707.65
18	0.18	1808.10
19	0.19	1908.55
20	0.20	2009.00
21	0.21	2109.45
22	0.22	2209.90
23	0.23	2310.35
24	0.24	2410.80
25	0.25	2511.25
26	0.26	2611.70
27	0.27	2712.15
28	0.28	2812.60
29	0.29	2913.05
30	0.30	3013.50

(ต่อ)ตารางที่ 3.1 การคำนวณแรงลอยตัวที่ใช้ในการปั๊มกระบอกสูบ [1]

ระยะที่หุ่นลอยจม (CM)	ปริมาตรที่จมน้ำ	แรงลอยตัว (N)
31	0.31	3113.95
32	0.32	3214.40
33	0.33	3314.85
34	0.34	3415.30
35	0.35	3515.75
36	0.36	3616.20
37	0.37	3716.65
38	0.38	3817.10
39	0.39	3917.55
40	0.40	4018.00
41	0.41	4118.45
42	0.42	4218.90
43	0.43	4319.35
44	0.44	4419.80
45	0.45	4520.25
46	0.46	4620.70
47	0.47	4721.15
48	0.48	4821.60
49	0.49	4922.05
50	0.50	5022.50
51	0.51	5122.95
52	0.52	5223.40
53	0.53	5323.85
54	0.54	5424.30
55	0.55	5524.75
56	0.56	5625.20
57	0.57	5725.65
58	0.58	5826.10
59	0.59	5926.55
60	0.60	6027.00

ตารางที่ 3.2 การคำนวณแรงที่ใช้ปั๊มกระบอกสูบที่ความดันต่าง ๆ [2]

ความดัน (บาร์)	แรงที่ใช้ในการกดปั๊ม (นิวตัน)
1	126.00
2	252.00
3	378.00
4	504.00
5	630.00
6	756.00
7	882.00
8	1008.00
9	1134.00
10	1260.00
11	1386.00
12	1512.00
13	1638.00
14	1764.00
15	1890.00
16	2016.00
17	2142.00
18	2268.00
19	2394.00
20	2520.00
21	2646.00
22	2772.00
23	2898.00
24	3024.00
25	3150.00
26	3276.00
27	3402.00
28	3528.00
29	3654.00

(ต่อ)ตารางที่ 3.2 การคำนวณแรงที่ใช้ปั๊มกระบอกสูบที่ความดันต่าง ๆ [2]

ความดัน (บาร์)	แรงที่ใช้ในการกดปั๊ม (นิวตัน)
30	3780.00
31	3906.00
32	4032.00
33	4158.00
34	4284.00
35	4410.00
36	4536.00
37	4662.00
38	4788.00
39	4914.00
40	5040.00

ตารางที่ 3.3 จำนวนปริมาณน้ำที่ได้ในแต่ละครั้งที่เจอคลื่นอุทกคติ [3]

ระยะยกตัวของท่อนลอย (เซนติเมตร)	ระยะชัก (เซนติเมตร.)	ปริมาณน้ำที่ปั๊มได้ (มิลลิลิตร)
1	0.25	3.1425
2	0.50	6.2850
3	0.75	9.4275
4	1.00	12.5700
5	1.25	15.7125
6	1.50	18.8550
7	1.75	21.9975
8	2.00	25.1400
9	2.25	28.2825
10	2.50	31.4250
11	2.75	34.5675
12	3.00	37.7100
13	3.25	40.8525
14	3.50	43.9950
15	3.75	47.1375
16	4.00	50.2800
17	4.25	53.4225
18	4.50	56.5650
19	4.75	59.7075
20	5.00	62.8500
21	5.25	65.9925
22	5.50	69.1350
23	5.75	72.2775
24	6.00	75.4200
25	6.25	78.5625
26	6.50	81.7050
27	6.75	84.8475
28	7.00	87.9900
29	7.25	91.1325

(ต่อ)ตาราง 3.3 จำนวนปริมาณน้ำที่ได้ในแต่ละครั้งที่เจาะคลื่นอุทกมิติ [3]

ระยะยกตัวของท่อนลอย (เซนติเมตร)	ระยะชัก (เซนติเมตร)	ปริมาณน้ำที่ปั๊มได้ (มิลลิลิตร)
30	7.50	94.2750
31	7.75	97.4175
32	8.00	100.5600
33	8.25	103.7025
34	8.50	106.8450
35	8.75	109.9875
36	9.00	113.1300
37	9.25	116.2725
38	9.50	119.4150
39	9.75	122.5575
40	10.00	125.7000
41	10.25	128.8425
42	10.50	131.9850
43	10.75	135.1275
44	11.00	138.2700
45	11.25	141.4125
46	11.50	144.5550
47	11.75	147.6975
48	12.00	150.8400
49	12.25	153.9825
50	12.50	157.1250
51	12.75	160.2675
52	13.00	163.4100
53	13.25	166.5525
54	13.50	169.6950
55	13.75	172.8375
56	14.00	175.9800
57	14.25	179.1225
58	14.50	182.2650

(ต่อ)ตาราง 3.3 จำนวนปริมาณน้ำที่ได้ในแต่ละครั้งที่เจอคลื่นอุตมคติ [3]

ระยะยกตัวของหุ่นลอย (เซนติเมตร)	ระยะชัก (เซนติเมตร)	ปริมาณน้ำที่ปั๊มได้ (มิลลิลิตร)
59	14.75	185.4075
60	15.00	188.5500