บทที่ 4
การศึกษาโครงสร้างหัวหาดและเสถียรภาพชายฝั่ง

ในบทนี้จะกล่าวถึงการศึกษาโครงสร้างหัวหาด (headland) และเสถียรภาพชายฝั่งที่ผ่านมา เพื่อรวบรวมเงื่อนไขและลักษณะสมดุลย์ของชายฝั่งที่เว้าเป็นอ่าวที่เกิดขึ้นระหว่างหัวหาด พร้อมทั้งการประเมินการก่อตัวของผืนทรายหลังหัวหาด (tombolo) ซึ่งผลการศึกษายังไม่สามารถสรุปเงื่อนไขภายใต้สภาวะต่าง ๆ ได้ ในที่นี้ได้แบ่งการศึกษาออกเป็น ลักษณะอ่าวสมดุลย์ รูปแบบชายฝั่งจากแบบจำลองกายภาพ และรูปแบบชายฝั่งจากแบบจำลองคณิตศาสตร์

4.1 ลักษณะอ่าวสมดุลย์

ในปี 1960 Silvester[17] ได้ทำการทดลองถึงแนวโน้มของชายฝั่งที่เปลี่ยนแปลงเข้าสู่สภาพอ่าวสมดุลย์ (equilibrium bay) พบว่า มีลักษณะเป็นอ่าวรูปครึ่งหัวใจ (crenulate shaped bay) ในรูป 4-1 ได้แสดงการทดลองการเปลี่ยนแปลงแนวชายฝั่งภายใต้แรงกระทำของคลื่น ซึ่งจะเห็นได้ว่าการกัดเซาะ/ถดถอยของแนวชายฝั่งเกิดขึ้นระหว่างหัวหาดจนกระทั่งเกิดเป็นอ่าวขึ้น ซึ่งสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1) อ่าวสมดุลย์ มีลักษณะเป็นรูปครึ่งหัวใจ ประกอบด้วยส่วนของวงกลมที่ชายฝั่งด้านเหนือ และเส้นสัมผัสวงกลมที่ชายฝั่งด้านท้าย ลักษณะเช่นนี้นักภูมิศาสตร์เรียกว่า "Crenulate Shaped Bay" รูป 4-1 ได้จากการประมาณแนวหาดทรายที่ใช้ทดลอง ซึ่งในภูมิประเทศที่มีขนาดใหญ่จะมีสภาพของแนวชายฝั่งที่โค้งสม่ำเสมอกว่านี้ จากรูป 4-1(ก) จะเห็นว่า แนวชายฝั่งที่สมดุลย์บริเวณส่วนที่เป็นเส้นตรงมีลักษณะขนานตามแนวยอดคลื่นที่เคลื่อนเข้าใกล้ฝั่ง ส่วนบริเวณโค้งของชายฝั่งมีลักษณะโค้งตามยอดคลื่น ซึ่งเกิดจากการกระจายพลังงานที่เลาะไปตามหัวหาดและเกิดหักเหไปยังแนวชายฝั่ง
2) รูปร่างของอ่าวด้านท้าย (downcoast bay) ขึ้นอยู่กับตะกอนที่ผ่านมาจากอ่าวด้านเหนือ (upcoast bay) ในรูป 4-1(ก) จะเห็นว่า อ่าวด้านท้ายในการ

ทดลองที่ 1 ถูกกัดเซาะมากกว่าของการทดลองที่ 2 เป็นเพราะปริมาณตะกอนที่เคลื่อนที่มาจากอ่าวด้านเหนือมีน้อย

3) เส้นชั้นความลึกในรูป 4-1(ข) แสดงให้เห็นว่า การไหลวนของกระแสน้ำบริเวณอ่าวเป็นผลมาจากการไหลของกระแสน้ำชายฝั่ง ทำให้แนวหาดด้านปะทะคลื่นมีลักษณะไม่ขนานกับแนวยอดคลื่น ซึ่งในธรรมชาติแล้วลักษณะเช่นนี้มีแนวโน้มเกิดขึ้นน้อย

ในปี 1965 Yasso [18] ได้ศึกษาลักษณะอ่าวสมดุลย์ในธรรมชาติ อ่าวที่ใช้ศึกษาได้แก่ Sandy Hook ที่ New Jersey, Halfmoon Bay, Drakes Beach และ Limantour Spit ที่ California ดังแสดงในรูป 4-2 ถึง 4-4 ตามลำดับ พบว่าชายฝั่งระหว่างหัวหาดที่เกิดการถดถอยจนเข้าสู่สภาพสมดุลย์มักมีรูปเว้าเป็นเส้นโค้ง logarithmic spiral ซึ่งเป็นโค้งที่มีรัศมีเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามมุมที่กวาดออกไป ดังในรูป 4-5 การหาโค้งดังกล่าวสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$r = e^{\theta \cot \alpha}$$

โดยที่ r คือ รัศมีของเส้นโค้ง logarithmic spiral, θ คือ มุมของรัศมีที่กวาดออกจากทิศเหนือ, α คือ มุมที่เส้นสัมผัสโค้งทำกับรัศมี

ในปี 1969 Vichetpan [19] ได้ศึกษาลักษณะอ่าวสมดุลย์ด้วยแบบจำลอง สำหรับลักษณะของแบบจำลองได้แสดงในรูป 4-6 ในการทดลองได้ใช้คลื่นที่มีลักษณะดังตาราง 4-1 โดยกำหนดให้มุม β คือมุมที่สันคลื่นทำกับแนวชายฝั่ง (หรือแนวหัวหาด) มีค่าเท่ากับ 30°, 45° และ 60° ผลการทดลองได้แสดงไว้ในรูป ข-1 ถึง ข-9 ซึ่งพบว่าอ่าวสมดุลย์มีการเว้าเป็นรูปโค้ง logarithmic spiral ดังในรูป 4-7 การหาโค้งดังกล่าวสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\frac{R_2}{R_1} = e^{\theta \cot \alpha}$$

จากสมการข้างบน เมื่อกำหนดให้ θ มีค่า 10° จะสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{R_2}{R_1}$ กับ α ได้ ดังในรูป 4-8 ส่วนรูปร่างอ่าวสมดุลย์ที่ได้จากการทดลองขึ้นอยู่กับมุมที่คลื่นเคลื่อนเข้าหาแนวชายฝั่ง ดังแสดงในตาราง 4-2 ซึ่งสามารถนำไปเขียนกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่าง β กับ α ดังในรูป 4-9 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอ่าวสมดุลย์จะต้องมีค่าความสัมพันธ์ระหว่าง β กับ α อยู่บนเส้นนี้ จากการตรวจสอบเสถียรภาพชายฝั่งของ Halfmoon Bay (รูป 4-2) พบว่า β มีค่า 52° และ α ได้จาก Yasso [17] มีค่า 41.26° เมื่อกำหนดจุดลงในรูป 4-9 ปรากฏว่าจุดดังกล่าวอยู่ใต้เส้นอ่าวสมดุลย์เล็กน้อย แสดงให้เห็นว่าผลจากแบบจำลองกับสภาพในธรรมชาติมีความสอดคล้องกัน

ในปี 1970 Silvester [20] ได้ศึกษาลักษณะอ่าวสมดุลย์ที่เคยศึกษาโดย Yasso [18] ได้แก่ Sandy Hook Drakes Bay, Halfmoon Bay และอ่าวสมดุลย์บนชายฝั่งแอฟริกาใต้ ได้แก่ St.Francis Bay และ Algoa Bay ทั้งนี้เพื่อนำผลการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง β กับ α ของอ่าวสมดุลย์โดย Vichetpan มาตรวจสอบ/เปรียบเทียบกับอ่าวสมดุลย์ในธรรมชาติที่มีเงื่อนไขต่างกัน ผลการศึกษาแสดงในรูป 4-9 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่าง β กับ α ของ Sandy Hook และ Drakes Bay อยู่เหนือเส้นอ่าวสมดุลย์ เพราะอ่าวทั้งสองมีตะกอนไหลจากด้านเหนือน้ำมาชดเชย สำหรับ St.Francis Bay เข้าสู่สภาพสมดุลย์แล้ว เพราะไม่มีตะกอนไหลมาชดเชยชายฝั่งและชายฝั่งบริเวณนั้นได้รับคลื่นที่มีพลังงานสูง ส่วนความสัมพันธ์ระหว่าง β กับ α ของ Algoa Bay อยู่เหนือเส้นอ่าวสมดุลย์ เพราะได้รับตะกอนที่ไหลออกจากแม่น้ำถึง 3 สาย จากผลการศึกษาสรุปได้ว่า

1) ลักษณะอ่าวสมดุลย์รูปครึ่งหัวใจ มักเกิดขึ้นระหว่างหัวหาดที่ไม่มีการไหลของตะกอนตามแนวชายฝั่ง หรือมีการไหลของตะกอนตามแนวชายฝั่งด้วยปริมาณที่แน่นอน
2) คลื่นที่เคลื่อนเข้าสู่ฝั่งรอบอ่าวสมดุลย์จะแตกตัวพร้อม ๆ กันรอบชายฝั่ง
3) อ่าวรูปครึ่งหัวใจประกอบด้วยชายฝั่ง 3 ส่วน ส่วนแรกเป็นชายฝั่งด้านเหนือน้ำอยู่ภายใต้รมเงาเขื่อน มีลักษณะเป็นส่วนหนึ่งของวงกลม ส่วนที่สองเป็นชายฝั่งด้านท้ายน้ำมีสภาพเป็นเส้นตรงจากหัวหาดท้ายน้ำ ส่วนที่สามเป็นชายฝั่งที่มีสภาพโค้งเป็น logarithmic spiral เชื่อมระหว่างสองส่วนแรก ในสภาพธรรมชาติมักไม่พบชายฝั่งที่มีสภาพเช่นเดียวกับส่วนแรก หากหัวหาดมีความหนาที่เหมาะสมและมีแนวขนานกับแนวยอดคลื่น
4) ลักษณะอ่าวสมดุลย์ สามารถกำหนดได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง β กับ α และ α กับ $\frac{R_2}{R_1}$ ดังในรูป 4-9 และ 4-8 ตามลำดับ เมื่อทราบค่ามุมที่สันคลื่นทำกับแนวหัวหาด (β)

ในปี 1971 Ho [21] ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางจากชายฝั่งกับความลึกท้องน้ำ ลักษณะของอ่าวสมดุลย์ที่ใช้ศึกษาได้แก่ Port Eyre, D'Estree Bay, Anderson Bay ประเทศออสเตรเลีย และ St.Francis Bay ประเทศแอฟริกาใต้ โดยแบ่งชายฝั่งแต่ละแห่งออกเป็น 6 รูปตัดด้วยระยะทางที่เท่ากัน ผลของความสัมพันธ์แสดงไว้ในรูป 4-10

และ Ho ยังได้ศึกษาลักษณะอ่าวสมดุลย์จากแบบจำลอง โดยใช้ลักษณะคลื่นดังที่แสดงในตาราง 4-3 เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างมุมที่สันคลื่นทำกับแนวชายฝั่งเดิม (γ) กับมุมคงที่ของเส้นสัมผัสโค้ง logarithmic spiral (α) ซึ่งผลการทดลองแสดงไว้ในตาราง 4-4 และความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงในรูป 4-11 ส่วนความสัมพันธ์ระหว่าง β กับ α ได้แสดงในรูป 4-9 ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

1) ลักษณะอ่าวสมดุลย์ ไม่ขึ้นอยู่กับแนวชายฝั่งเดิม
2) อ่าวสมดุลย์บริเวณท้ายน้ำที่เป็นเส้นตรง มีแนวขนานกับแนวยอดคลื่นที่เคลื่อนเข้าสู่ฝั่ง
3) อ่าวสมดุลย์บริเวณเหนือน้ำเป็นรูปโค้ง ซึ่งเกิดจากการกระจายและการหักเหของคลื่น ขึ้นอยู่กับทิศทางของคลื่นที่กระทบกับปลายหัวหาด ส่วนบริเวณโค้งที่ได้จากแบบจำลองมีลักษณะเป็นส่วนของวงกลม ซึ่งเกิดจากการหมุนของกระแสน้ำที่รุนแรงและการกระจายของคลื่นที่ปลายหัวหาด ซึ่งในธรรมชาติจะไม่เกิดการเว้าที่มีรูปค่อนข้างกลม
4) ความชันคลื่น เป็นองค์ประกอบที่สำคัญในการถดถอยของชายฝั่งในแบบจำลอง

ในปี 1976 Silvester [22] ได้ศึกษาการเว้าของชายฝั่งระหว่างหัวหาด พบว่าชายฝั่งโดยทั่วไปในธรรมชาติ จะเกิดการเว้าระหว่างหัวหาดเป็นอ่าวรูปครึ่งหัวใจ การเว้าของชายฝั่งเป็นผลจากการกระจายและหักเหของคลื่นในบริเวณร่มเงาของเขื่อนด้านเหนือน้ำ ดังแสดงในรูป 4-12 โดย a คือระยะเว้าของชายฝั่งระหว่างหัวหาด ขึ้นอยู่กับระยะช่องว่างระหว่างหัวหาด (b) และมุม β ความสัมพันธ์ระหว่าง a, b และ β ได้แสดงในรูป 4-13 ซึ่งได้จากผลการทดลองด้วยแบบจำลองและได้จากการเว้าของอ่าวในธรรมชาติที่เข้าสู่สภาพสมดุลย์ จากรูป 4-13 เมื่อ β มีค่าลดลงทำให้ค่า a/b เข้าใกล้ศูนย์ ซึ่งหมายถึงการถดถอยชายฝั่งเกิดขึ้นน้อย เนื่องจากปริมาณตะกอนเคลื่อนตามแนวชายฝั่งสุทธิมีค่าน้อย ส่วนคลื่นที่มี β มากกว่า 50° การเว้าของชายฝั่งจะมีลักษณะเกือบเป็นรูปครึ่งวงกลม เพราะอิทธิพลของการกระจายของคลื่นเมื่อชายฝั่งเข้าสู่สภาพสมดุลย์ จะไม่เกิดการเคลื่อนที่ของตะกอนตามแนวชายฝั่งจากบริเวณนั้น เนื่องจากคลื่นเข้าสู่ฝั่งมีทิศทางตั้งฉากกับชายฝั่งตลอดแนว การประเมินรูปร่างชายฝั่งจากรูป 4-9 และ 4-13 สามารถบอกได้ว่าชายฝั่งใดยังมีโอกาสเกิดการถดถอยได้อีก ยกเว้นชายฝั่งที่มีอัตราการถดถอยเท่ากับอัตราการทับถมของตะกอน สำหรับการถดถอยของชายฝั่งชั่วคราว

เกิดขึ้นได้ภายหลังชายฝั่งเข้าสู่สภาพสมดุลย์ สาเหตุการถดถอยชั่วคราวเพราะเกิดจากการกระทำของคลื่นรุนแรง (strom wave) ทำให้ชายฝั่งสมดุลย์ถูกกัดเซาะ ดังในรูป 4-14 ได้แสดงการกระทำของคลื่นจากทิศทางต่าง ๆ กัน Silvester ได้ยกตัวอย่างสภาพชายฝั่งทะเลด้านใต้และตะวันตกของประเทศออสเตรเลีย ซึ่งได้ถูกกัดเซาะหดหายไปอย่างต่อเนื่องตลอดมา ชายฝั่งตัวอย่างได้แสดงในรูป 4-15 ซึ่งได้รับอิทธิพลจากคลื่นในทิศตะวันตกเฉียงใต้ ชายฝั่งนี้อยู่ระหว่างหินโสโครกทำหน้าที่เป็นหัวหาดป้องกันชายฝั่ง ลักษณะการเว้าของชายฝั่งเชื่อว่ายังไม่เข้าสู่สภาพสมดุลย์ รูปร่างอ่าวที่สมดุลย์ควรมีลักษณะดังในรูป 4-15(ข) ซึ่งมีโอกาสเว้าเป็นอ่าวขนาดใหญ่และขนาดย่อม (major bay and minor bay) และ Silvester ยังได้เสนอวิธีป้องกันชายฝั่งด้วยการสร้างหัวหาดที่จุด C และ D ดังในรูป 4-15(ค) เพื่อลดการถดถอยของชายฝั่งและทำให้ชายฝั่งเกิดเป็นอ่าวสมดุลย์ขนาดเล็กขึ้น ซึ่งสามารถประเมินลักษณะอ่าวได้จากรูป 4-13

ในปี 1978 Dean [3] ได้ศึกษาหาวิธีคำนวณรูปร่างของชายฝั่งระหว่างหัวหาดซึ่งเกิดจากอิทธิพลการกระจายของคลื่นที่มีทิศทางตั้งฉากกับชายฝั่ง จากการศึกษาพบว่า ความสัมพันธ์ของช่องว่างระหว่างหัวหาดและระยะถดถอยของชายฝั่งสามารถสรุปได้ดังในรูป 4-16 ซึ่งลากเส้นแทนความสัมพันธ์ดังกล่าวด้วยเส้นขอบเขตสูงสุด (upper limit) และเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\frac{a_2}{a_1} = 1+\frac{b}{2a_1}$$

เมื่อระยะระหว่างกึ่งกลางของหัวหาดมีค่ามากกว่า $2a_1$ tombolo ที่เกิดขึ้นจะชิดกับหัวหาด แต่เมื่อระยะระหว่างกึ่งกลางของหัวหาดมีค่ามากกว่า $2a_1$ tombolo ที่เกิดขึ้นจะไม่ยื่นชิดกับหัวหาด ดังแสดงในรูป 4-17 และ Dean ได้ศึกษาลักษณะอ่าวสมดุลย์ด้วยการคำนวณจากคลื่นที่มีทิศ 30° และ 60° อ่าวสมดุลย์ที่ได้คล้ายกับในแบบจำลองและในธรรมชาติ

ในปี 1980 Silvester, Tsuchiya และ Shibano [23] ได้ศึกษาลักษณะอ่าวสมดุลย์จากชายฝั่งประเทศญี่ปุ่น พบว่าอ่าวสมดุลย์บางแห่งเกิดโค้งสองด้าน ซึ่งมีสาเหตุจากชายฝั่งบริเวณท้ายน้ำเกิดการถดถอยและเกิดการกระจายของคลื่นดังในรูป 4-18(ก) ส่วนรูป 4-18(ข) แสดงอ่าวสมดุลย์ที่เกิดโค้งสองด้านในธรรมชาติ

ตาราง 4-1 คลื่นที่ใช้ทดลองเพื่อศึกษาลักษณะอ่าวสมดุลย์ โดย Vichetpan [19]

ลักษณะคลื่น	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	ชุดที่ 3
คาบเวลา, T(วินาที)	0.6	1.0	1.4
ความยาว, L(ซม.)	55.5	121.0	183.0
ความสูง, H(ซม.)	5.0	5.0	5.0
ความชัน, H/L	0.090	0.041	0.027

ตาราง 4-2 ความสัมพันธ์ของตัวแปรของ รูปร่างอ่าวสมดุลย์ โดย Vichetpan [19]

β	R_2/R_1	a	α
30°	1.16	0.85	49.7°
45°	1.19	0.995	45.2°
60°	1.27	1.32	37.2°

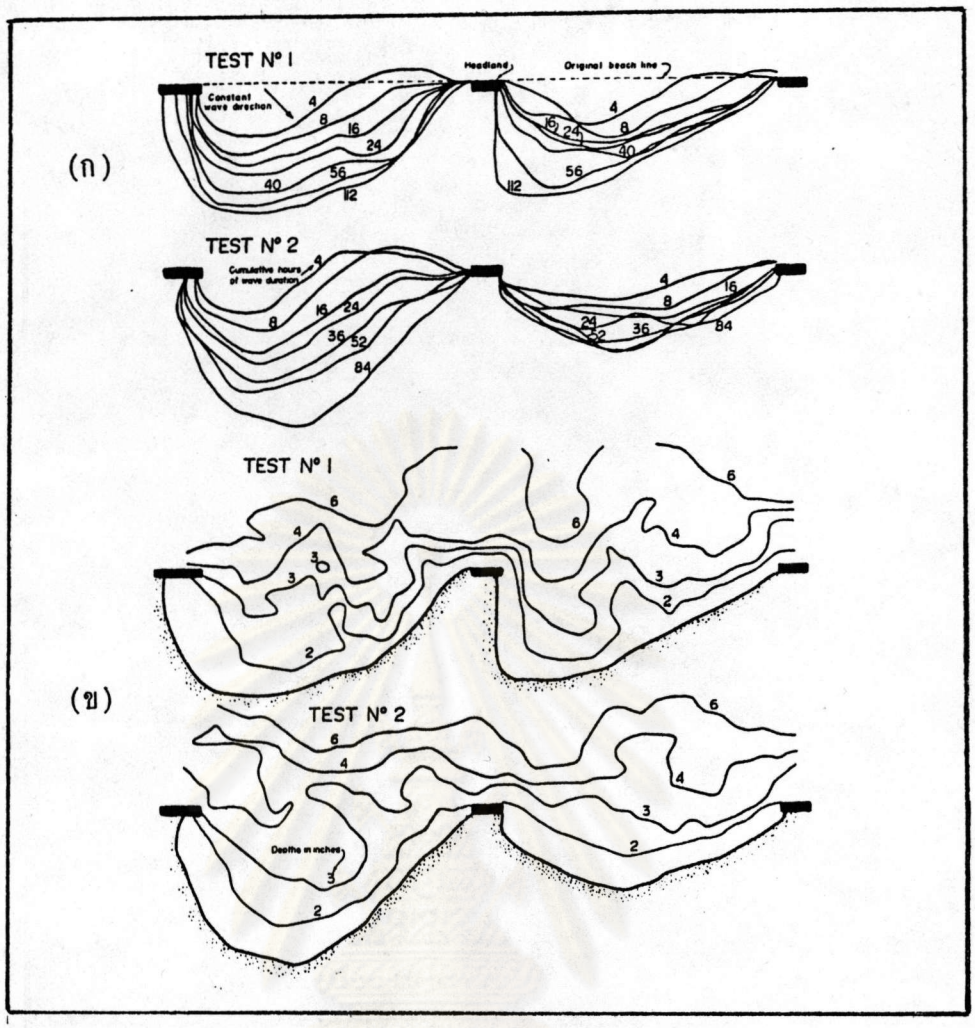
ตาราง 4-3 คลื่นที่ใช้ทดลองเพื่อศึกษาลักษณะอ่าวสมดุลย์ โดย Ho [21]

ลักษณะคลื่น	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	ชุดที่ 3
คาบเวลา, T(วินาที)	1.0	1.0	1.0
ความยาว, L(ซม.)	121	121	121
ความสูง, H(ซม.)	2.0	3.2	4.5
ความชัน, H/L	0.017	0.026	0.037

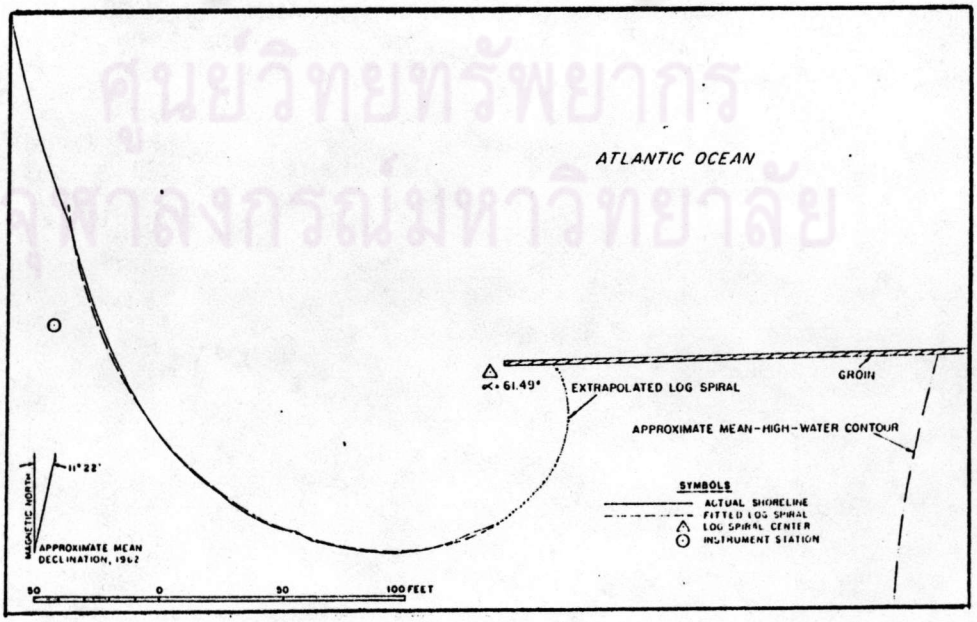
ตาราง 4-4 ความสัมพันธ์ของตัวแปรของรูปร่างอ่าวสมดุลย์ โดย Ho [21]

การทดลองที่	ความสูงคลื่น, H(ซม.)	γ	β	α
1	2.0	33.5	31.5	51.0
2	3.2	25.5	30.0	54.0
3	4.5	29.0	36.5	52.5
4	4.5	35.5	42.5	48.0
5	3.2	36.0	37.0	51.0
6	2.0	35.0	33.5	52.5
7	4.5	42.0	49.5	45.5
8	2.0	41.5	39.5	49.5
9	3.2	41.5	45.0	45.5
10	3.2	51.0	53.0	44.0
11	4.5	51.0	57.0	41.0
12	4.5	58.0	61.5	39.5
13	3.2	57.0	57.5	41.0
14	4.5	-	51.0	44.0

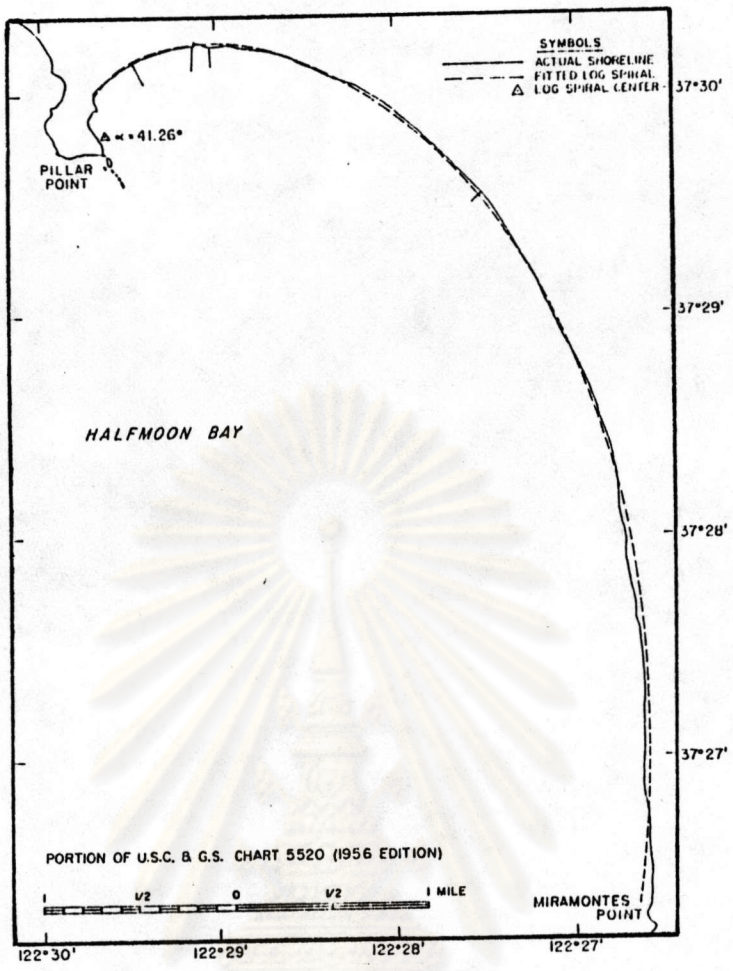
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



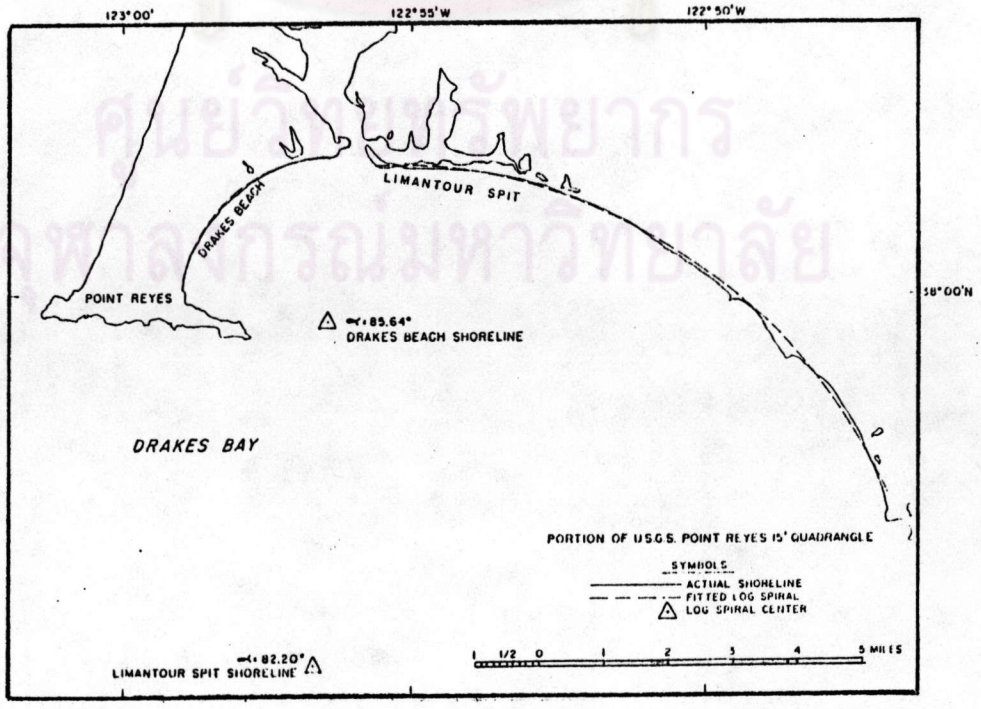
รูป 4-1 ลักษณะอ่าวระหว่างหัวหาดจากการทดลอง [17]



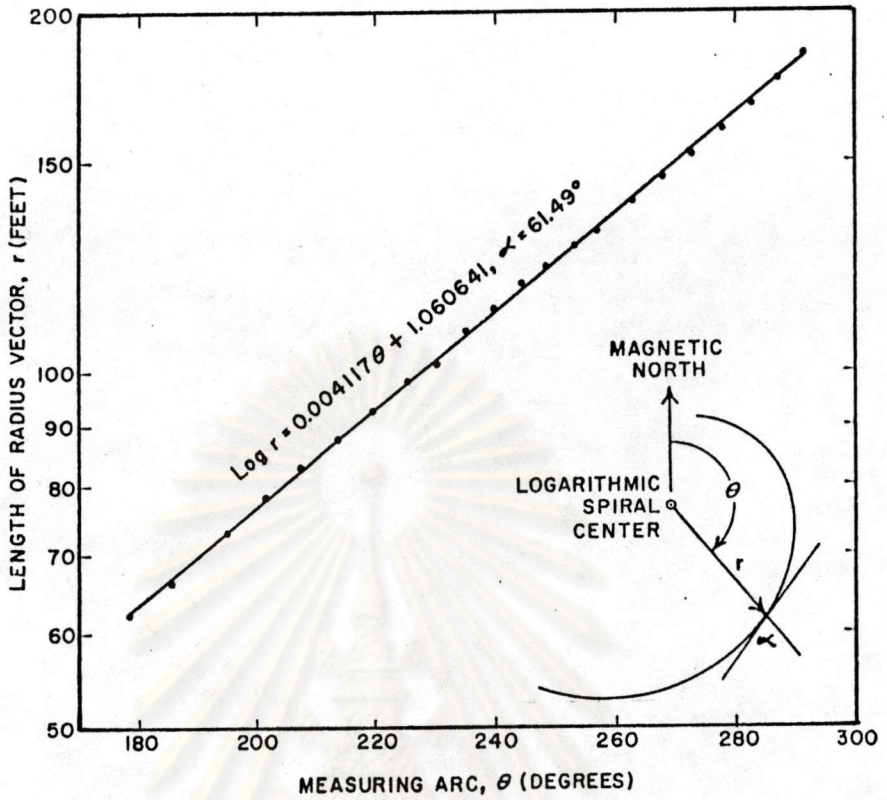
รูป 4-2 ลักษณะอ่าวสมดุลย์ ของ Sandy Hook ที่ New Jersey [18]



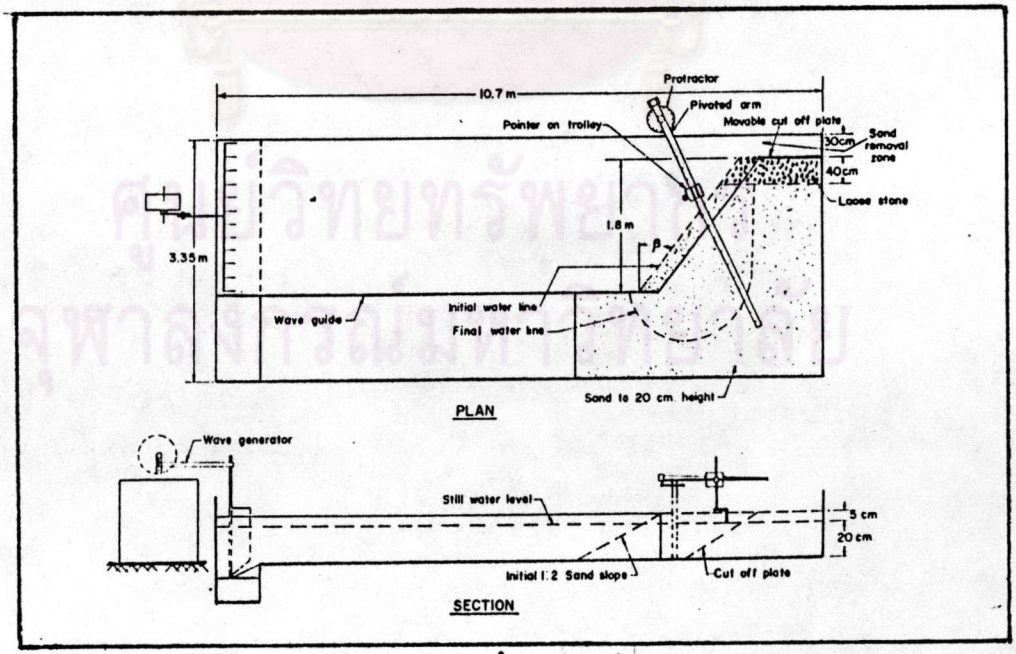
รูป 4-3 ลักษณะอาวสมดุลยของ Halfmoon Bay ที่ California [18]



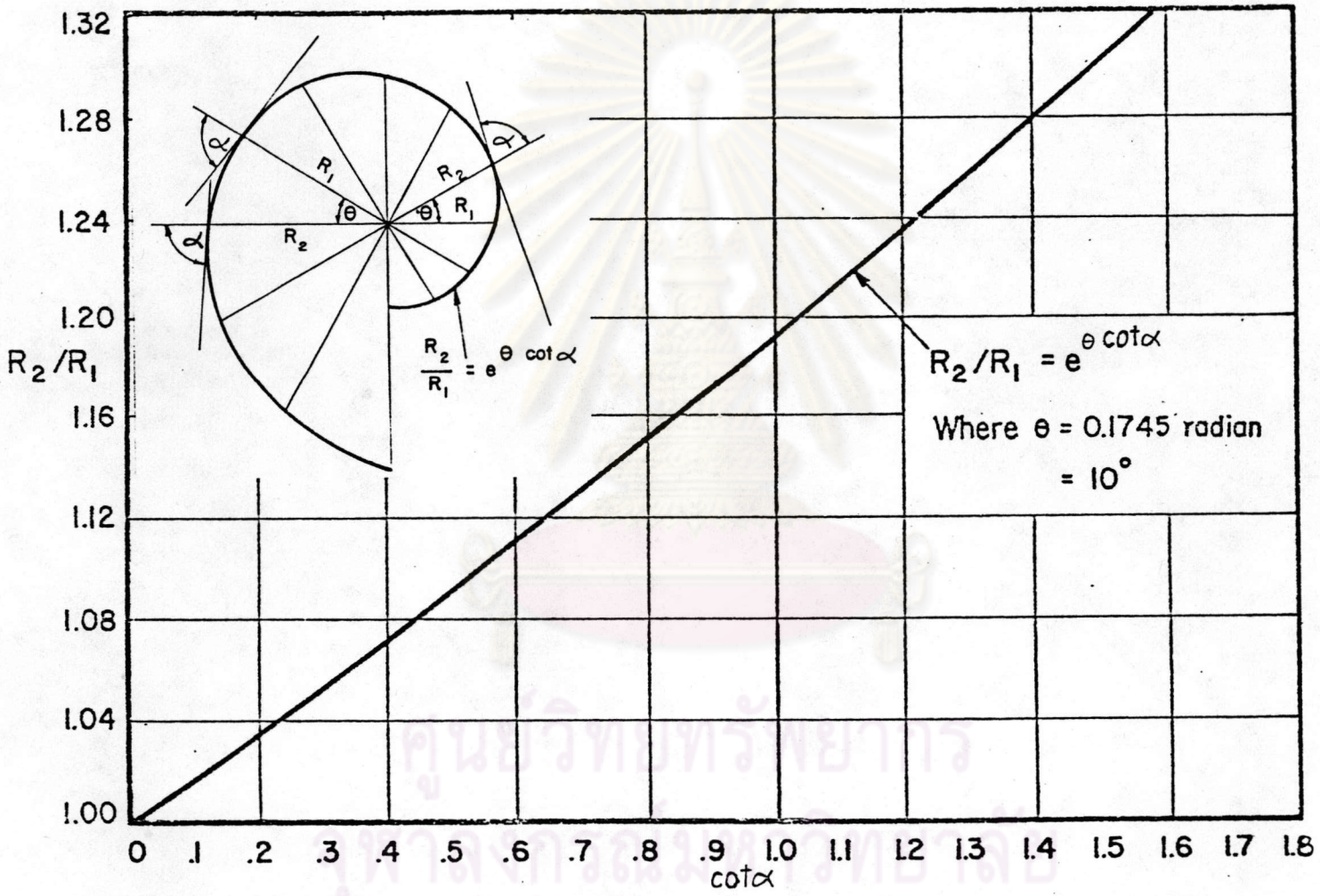
รูป 4-4 ลักษณะอาวสมดุลยของ Drakes Beach และ Limantour Spit ที่ California [18]



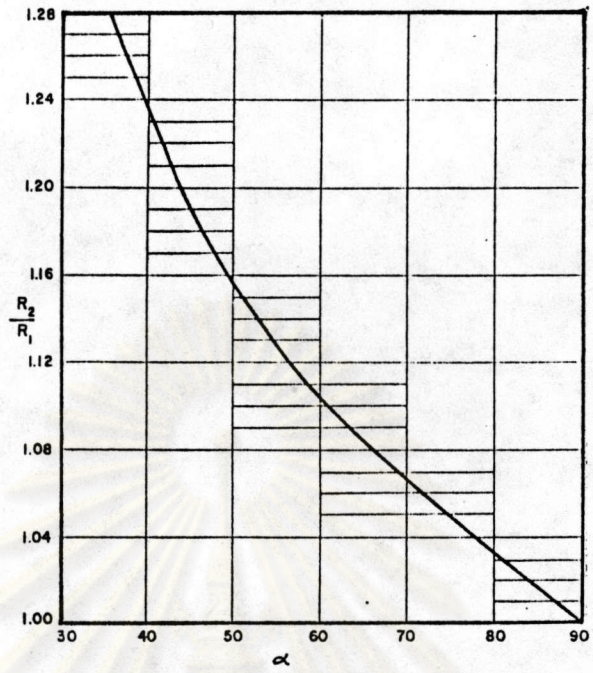
รูป 4-5 เส้นโค้ง logarithmic spiral [18]



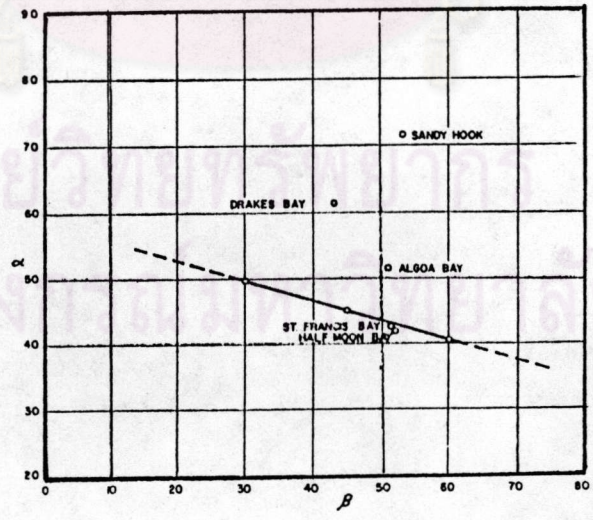
รูป 4-6 แบบจำลองใช้ศึกษาลักษณะอาวสมดุลย์ [19]



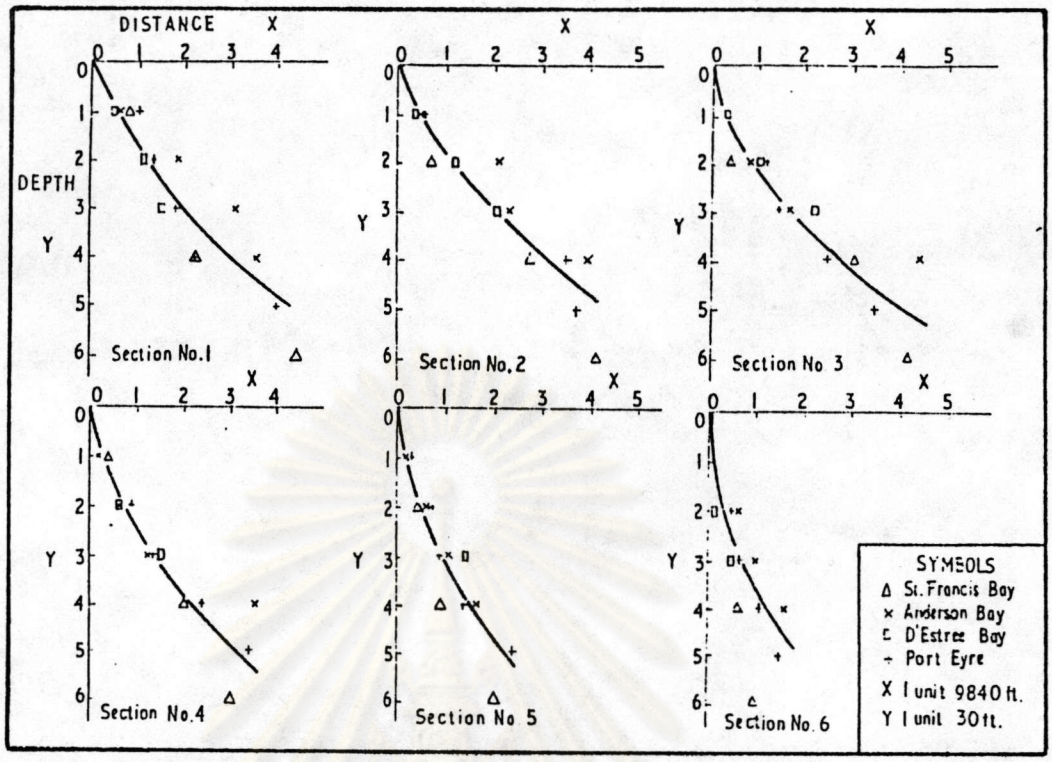
รูป 4-7 เส้นโค้ง logarithmic spiral และความสัมพันธ์ระหว่าง R_2/R_1 กับ cotα [19]



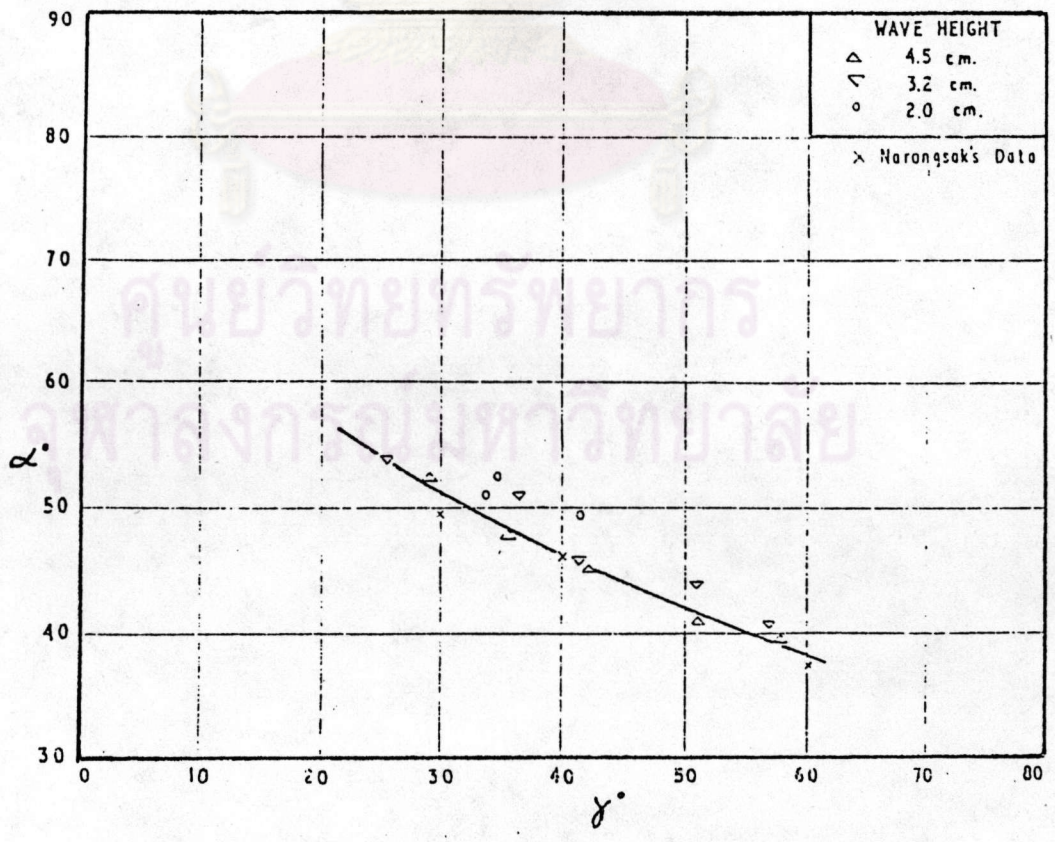
รูป 4-8 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{R_2}{R_1}$ กับ α [19]



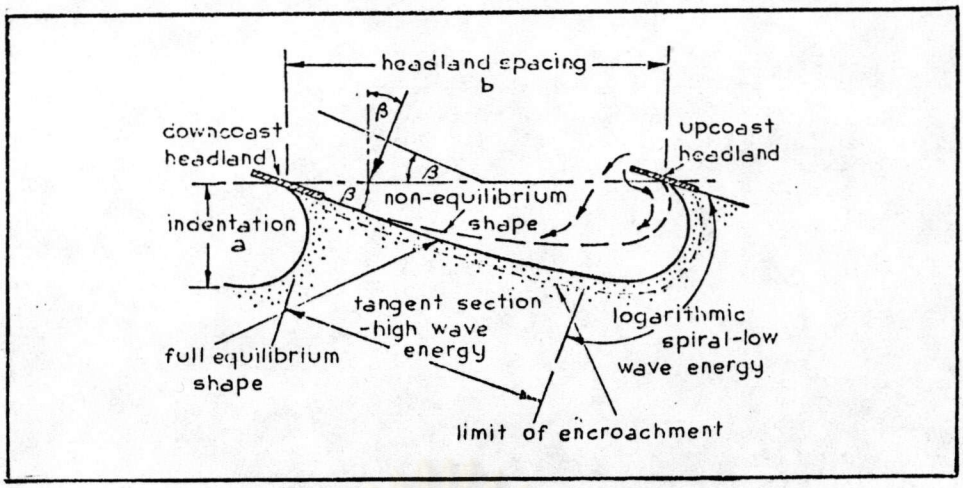
รูป 4-9 ความสัมพันธ์ระหว่าง α กับ β ของอาวสมดุลย์ [24]



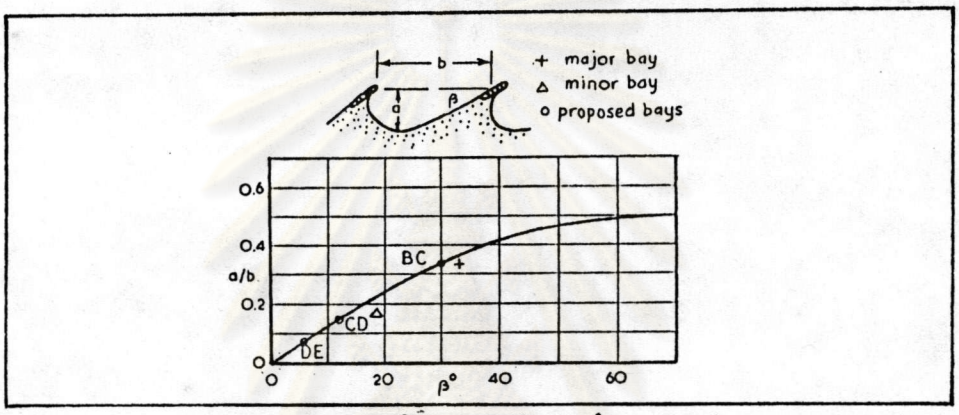
รูป 4-10 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางจากชายฝั่ง กับความลึกท้องน้ำของชายฝั่งในประเทศออสเตรเลีย [21]



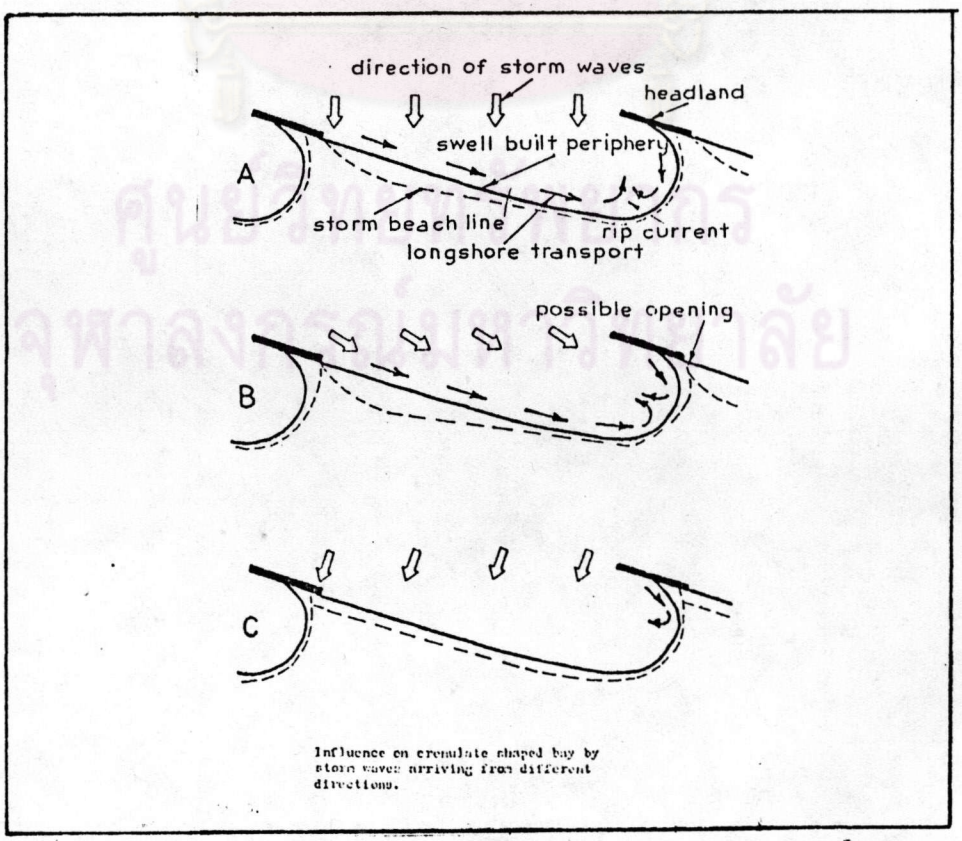
รูป 4-11 ความสัมพันธ์ระหว่าง α กับ γ ของอ่าวสมดุลย์ จากแบบจำลอง [21]



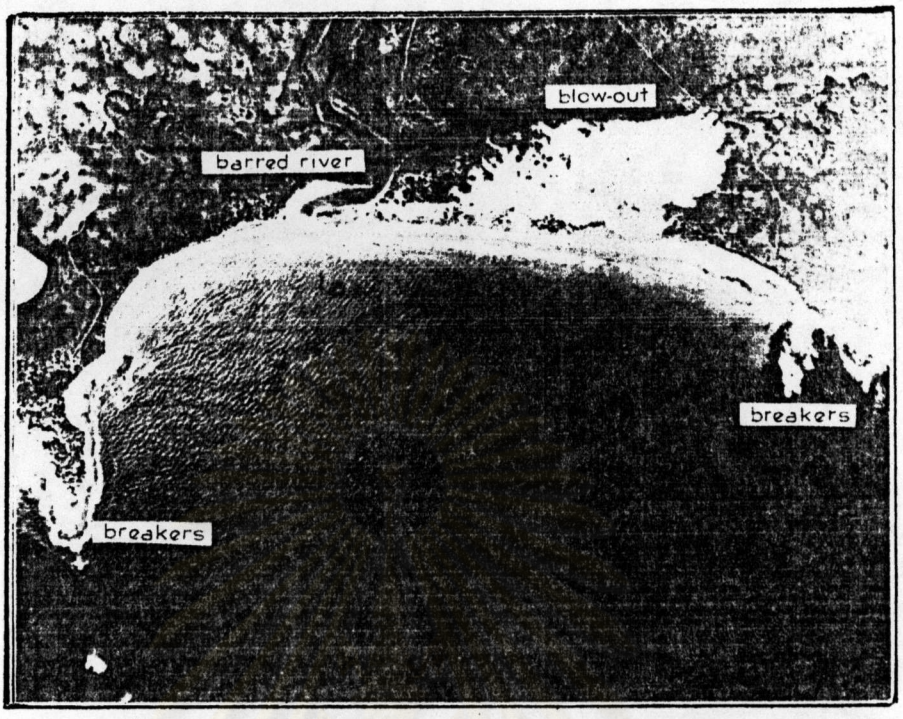
รูป 4-12 การเปลี่ยนแปลงชายฝั่งระหว่างหัวหาด [22]



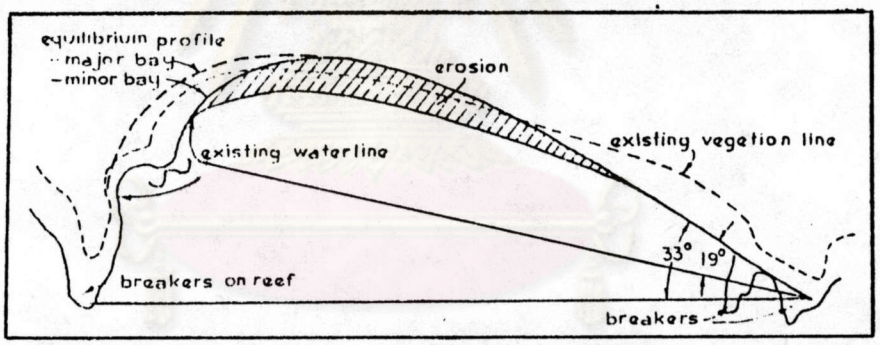
รูป 4-13 ความสัมพันธ์ระหว่างการเว้าของอาวสมดุลย์ (a/b) กับ β [22]



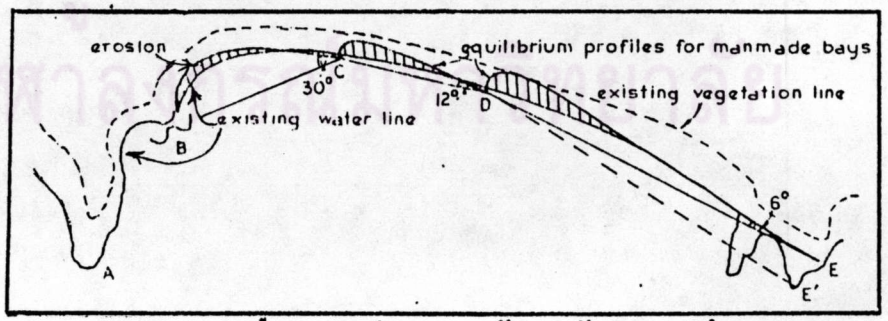
รูป 4-14 ลักษณะการถดถอยชั่วคราวของชายฝั่งระหว่างหัวหาด [22]



(ก) ภาพถ่ายแสดงสภาพอ่าวบริเวณชายฝั่งตะวันตกของประเทศออสเตรเลีย

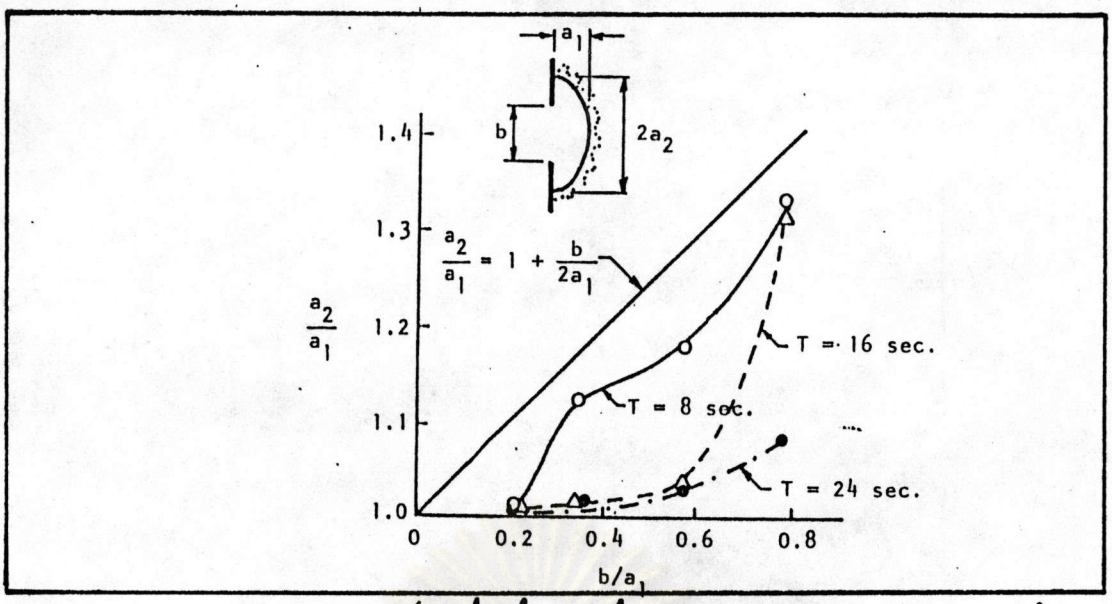


(ข) ทำนายการเปลี่ยนแปลงของอ่าวจนเข้าสู่สภาพสมดุลย์โดยธรรมชาติ

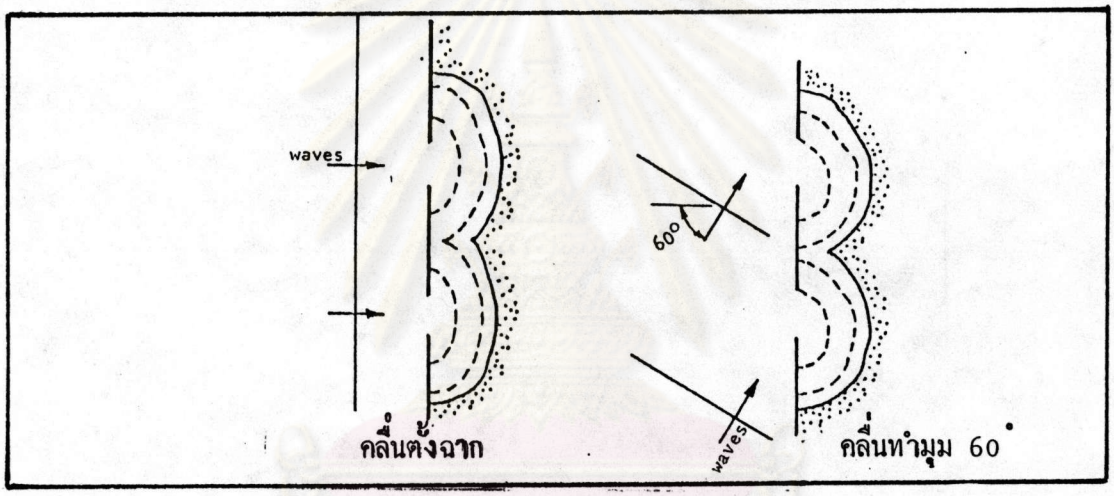


(ค) ทำนายลักษณะอ่าวสมดุลย์ จากการป้องกันด้วยหัวหาดที่จุด C และ D

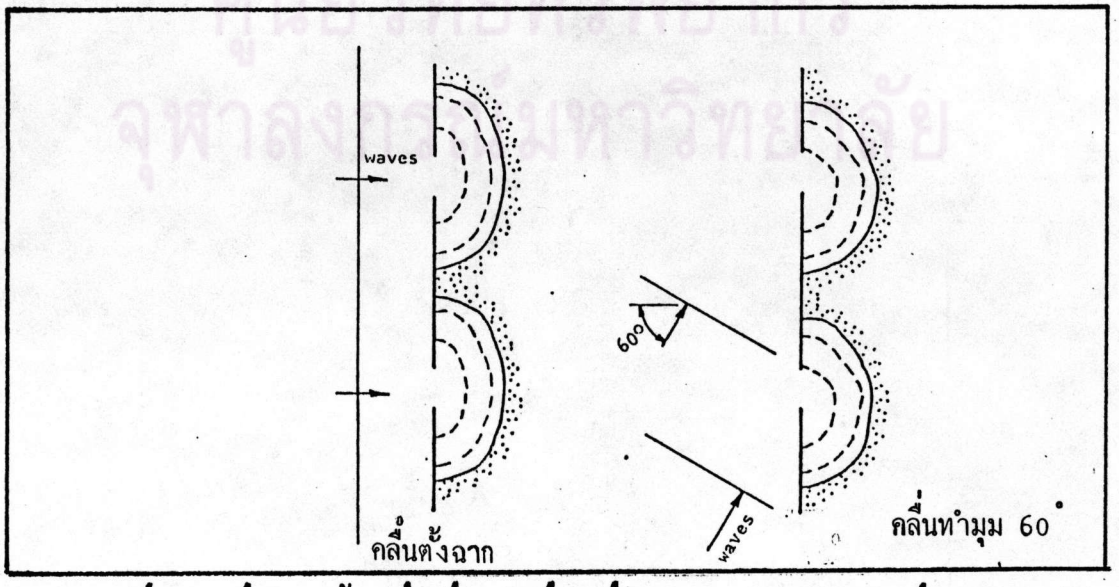
รูป 4-15 อ่าวในประเทศออสเตรเลีย ซึ่งยังไม่เข้าสู่สภาพสมดุลย์ [22]



รูป 4-16 ความสัมพันธ์ของช่องว่างระหว่างหัวหาดและระยะถดถอยของชายฝั่ง

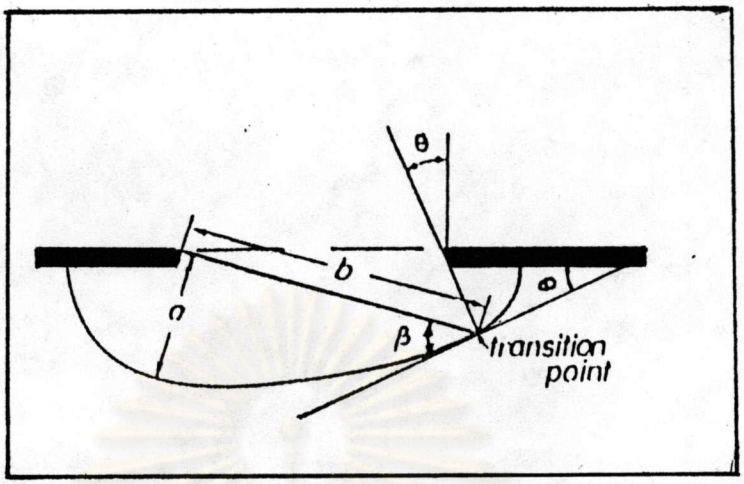


(ก) เขื่อนกันคลื่นขนาดยาว มีช่องว่างระหว่างเขื่อน 120 ฟุต คาบเวลาคลื่น 8 วินาที

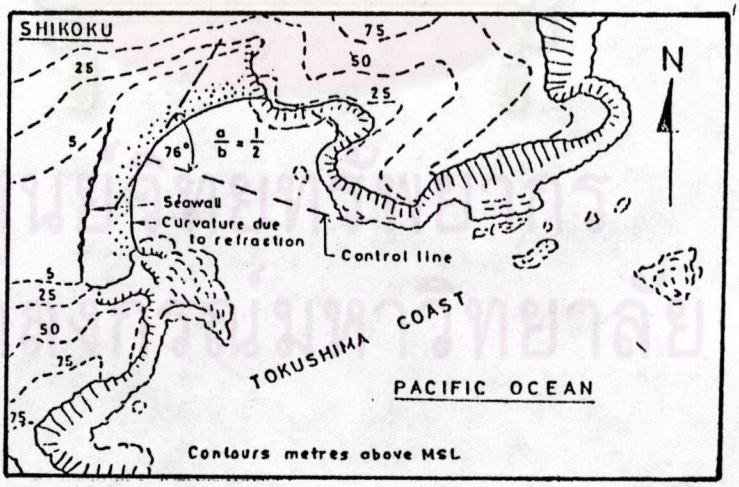


(ข) เขื่อนกันคลื่นขนาดสั้น มีช่องว่างระหว่างเขื่อน 120 ฟุต คาบเวลาคลื่น 8 วินาที

รูป 4-17 การเว้าของชายฝั่งหลังเขื่อนกันคลื่นที่มีความยาวต่างกัน [3]



(ก) แสดงรูปร่างการเว้าของชายฝั่งที่บริเวณหัวหาดทั้งสอง



(ข) อ่าวสมดุลย์ที่ชายฝั่ง Tokushima ในประเทศญี่ปุ่น ซึ่งเกิดการเว้าทั้งสองด้านของชายฝั่ง

รูป 4-18 ลักษณะอ่าวสมดุลย์ที่เกิดการเว้าทั้งสองด้านของชายฝั่ง [23]

4.2 รูปแบบชายฝั่งจากแบบจำลองกายภาพ

4.2.1 ชายฝั่งบริเวณหลังเขื่อนกันคลื่น

ในปี 1966 Shinohara และ Tsubaki [25] ได้ศึกษาการเปลี่ยนรูปชายฝั่งบริเวณหลังเขื่อนกันคลื่น ด้วยการแปรตำแหน่งเขื่อนกันคลื่นไว้ที่ต่าง ๆ กัน รูป tombolo ที่ได้ก็จะมีลักษณะต่างกัน องค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับรูป tombolo สามารถอธิบายได้ด้วยสมการดังนี้

$$\frac{Q}{x \cdot y} = f(\delta_o, \frac{x}{L_o}, \frac{y}{x}, \frac{h_b}{L_o}, \ldots)$$

โดยที่ $\frac{Q}{x \cdot y}$ หมายถึงปริมาณการเคลื่อนที่ของตะกอนทรายต่อหน่วยพื้นที่ในบริเวณหลังเขื่อน y คือ ระยะทางจากชายฝั่งถึงเขื่อน, h_b คือ ความลึกของน้ำ ณ ตำแหน่งคลื่นแตกตัว ในการทดลองได้ใช้ความยาวคลื่นในน้ำลึก (L_o) เท่ากับ 133 ซม. ความยาวเขื่อน (x) เท่ากับ 150 ซม. ความชันคลื่น (δ_o) มี 2 ค่า ได้แก่ 0.0192 และ 0.0461 ใช้แทนสภาพคลื่นปกติและสภาพคลื่นรุนแรง (strom wave) ตามลำดับ ระยะทางจากชายฝั่งถึงบริเวณคลื่นแตกตัวมีค่า 160 ซม. และอัตราส่วนระหว่าง $\frac{y}{x}$ มีค่า 0.5, 1.0, 1.75 และ 2.5 ผลการทดลองพอสรุปได้ดังนี้

1) ลักษณะการกระจายของคลื่นด้านหลังเขื่อน พบว่าบริเวณที่อยู่ใกล้กับเขื่อนมีสภาพคลื่นค่อนข้างสงบ ส่วนบริเวณที่อยู่ใกล้ฝั่งคลื่นที่กระจายก็จะเคลื่อนเข้ามาพบกันแล้วเคลื่อนเข้าสู่ฝั่ง ซึ่งจะส่งผลให้ชายฝั่งมีการเปลี่ยนรูปตามลักษณะการกระจายของคลื่น ดังแสดงในรูป 4-19 และ 4-20 สำหรับ δ_o เท่ากับ 0.0192 และ 0.0461 ตามลำดับ
2) การก่อรูป tombolo ชายฝั่งสมดุลย์ส่วนใหญ่เกิด tombolo ขึ้นเพียงยอดเดียว สำหรับชายฝั่งสมดุลย์ที่มี tombolo สองยอด เกิดขึ้นเฉพาะในกรณีที่ใช้ δ_o เท่ากับ 0.0192, $\frac{y}{x}$ เท่ากับ 0.5 และ δ_o เท่ากับ 0.0461, $\frac{y}{x}$ เท่ากับ 2.5 เนื่องจากเกิดคลื่นสงบบริเวณด้านหลังเขื่อน ตะกอนทรายจึงไม่เคลื่อนเข้าไปตกจมในบริเวณนั้น ทำให้เกิด tombolo สองยอดขึ้นบริเวณปลายเขื่อน ดังแสดงในรูป 4-21

3) การเคลื่อนที่และตกจมของทรายบริเวณด้านหลังเขื่อน ในกรณี δ_o เท่ากับ 0.0192 $\frac{y}{x}$ เท่ากับ 1.0, 1.75, 2.5 พบว่าการเคลื่อนที่และตกจมของทรายมักเกิดขึ้นใกล้แนวชายฝั่ง สำหรับ $\frac{y}{x}$ เท่ากับ 0.5 พบว่ามีการเคลื่อนที่และตกจมของทรายเป็นบริเวณกว้าง ดังในรูป 4-22 ส่วนในกรณี δ_o เท่ากับ 0.0461 พบว่าการเคลื่อนที่และตกจมของทรายเป็นบริเวณกว้างกว่าในกรณี δ_o เท่ากับ 0.0192 ลักษณะเส้นชั้นความลึกที่อยู่ใกล้ด้านหลังเขื่อนมักเป็นสันดอนสองยอด ดังในรูป 4-23

4) ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{Q}{x \cdot y}$ กับ $\frac{y}{x}$ และ $\frac{Q}{x}$ กับ $\frac{y}{x}$ พบว่าในกรณี δ_o เท่ากับ 0.0192 การเปลี่ยนตำแหน่งเขื่อนไม่ทำให้ปริมาณการทับถมของทรายมีค่าต่างกัน ส่วนในกรณี δ_o เท่ากับ 0.0461 ปริมาณการทับถมของทรายมีค่ามากที่สุดที่ตำแหน่ง $\frac{y}{x}$ เท่ากับ 1.0 และปริมาณการทับถมของทรายต่อหน่วยพื้นที่จะลดลงเมื่อเพิ่ม $\frac{y}{x}$ สำหรับ δ_o ที่ค่าเดียวกัน ดังแสดงในรูป 4-24 และ 4-25

ในปี 1982 Rosen [26] ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการก่อรูป tombolo กับตัวแปรต่าง ๆ ซึ่งได้แก่ ความยาวเขื่อน (x), ระยะทางจากชายฝั่งถึงเขื่อน (y), ระดับสันเขื่อนเหนือระดับน้ำทะเลกลาง, ความพรุนของเขื่อน (k), ความลึกของน้ำที่กึ่งกลางเขื่อน (d), ความลาดชันท้องน้ำที่ใต้เขื่อน ($\tan\alpha$), ความสูงคลื่นในน้ำลึก (H_o), คาบเวลาคลื่น (T) และมุมที่คลื่นเคลื่อนสู่ฝั่ง (β) ส่วนตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับลักษณะของตะกอนทรายบริเวณชายฝั่งได้แก่ ความหนาแน่นของตะกอนทราย (ρ_s), ขนาดเฉลี่ยของตะกอนทราย (d_{50}), repose angle (θ_r), skewness factor ของการกระจายขนาดตะกอนทราย (σ), shape factor ของขนาดตะกอนทราย (S.F.) และความเร็วตกจมของตะกอนทราย (V_f) ในการทดลองนี้ได้กำหนดใช้ความชันคลื่น (δ_o) 3 ขนาด ได้แก่ 0.015, 0.025 และ 0.040 และสรุปความสัมพันธ์ระหว่างการก่อรูป tombolo กับตัวแปรต่าง ๆ ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{z}{y} = f(\frac{x}{y}, \frac{y_{br}}{y}, \frac{H_o}{V_{fT}}, \frac{H_o}{L})$$

$$\frac{x-x_T}{2y} = f(\frac{x}{y}, \frac{H_o}{V_{fT}}, \frac{H_o}{L})$$

$$\frac{A_T}{y \cdot x} = f(\frac{x}{y}, \frac{H_o}{V_{fT}}, \frac{H_o}{L_o})$$

$$\frac{V_T}{xy^2 \tan\alpha} = f(\frac{x}{y}, \frac{H_o}{V_{fT}}, \frac{H_o}{L_o})$$

โดยที่ z คือ ระยะจากยอด tombolo ถึงชายฝั่ง, X_T คือ ความกว้างของ tombolo ที่ยื่นชิดเขื่อน, A_T คือพื้นที่ tombolo, V_T คือปริมาณการทับถมของตะกอนทราย ค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ได้จากผลการทดลองได้แสดงไว้ในตาราง 4-5 จากนั้น Rosen [26] ได้รวบรวมค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลองที่ผ่านมาและจากการป้องกันชายฝั่งไว้ในตาราง 4-6 และ 4-7 ตามลำดับ เมื่อนำผลจากตารางทั้งสามมารวบรวมหาความสัมพันธ์ของค่าตัวแปรต่าง ๆ กับอัตราส่วนระหว่างความยาวเขื่อนกับระยะทางจากชายฝั่ง ($\frac{x}{y}$) สามารถสรุปเป็นกราฟได้ 2 รูป ซึ่งแสดงถึงชายฝั่งสมดุลย์ที่ tombolo ไม่ยื่นชิดเขื่อนและที่ยื่นชิดเขื่อน ดังในรูป 4-26 และ 4-27 ตามลำดับ และจากการทดลองสังเกตชายฝั่งสมดุลย์ พบว่าแนวคลื่นที่เกิดการกระจายไม่ขนานกับเส้นชั้นความลึกและแนวชายฝั่ง

4.2.2 ชายฝั่งหลังแนวเขื่อนกันคลื่นแยก

ในปี 1979 Abeysinghe [27] ได้ศึกษารูปแบบชายฝั่งด้วยการทดลองจากแบบจำลอง ค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ได้แก่ ขนาดเฉลี่ยของตะกอนทราย (d_{50}) มีค่า 0.25 มม., ความลาดชายฝั่ง 1:15, มุมที่แนวยอดคลื่นกระทำต่อเขื่อน 10°, ความลึกของน้ำ 16 ซม. ระยะห่างระหว่างเขื่อน 225 ซม., ระยะทางจากชายฝั่งถึงเขื่อนประมาณ 225 ซม., ความยาวเขื่อน 150 และ 75 ซม. ลักษณะคลื่นที่ใช้ทดลองได้แสดงในตาราง 4-8 จากการทดลองพบว่าเขื่อนทำให้เกิดการไหลเวียนของกระแสน้ำ และทำให้ชายฝั่งเปลี่ยนแปลง ตัวอย่างดังแสดงในรูป 4-28 ผลการทดลองได้แสดงในรูป ค-1 ถึง ค-16 และพบว่าเขื่อนขนาดยาวทำให้เกิดกระแสน้ำที่มีความเร็วสูงกว่าเขื่อนขนาดสั้น ความเร็วกระแสน้ำที่เกิดจากเขื่อนขนาดยาวและ

เขื่อนขนาดสั้นมีค่าระหว่าง 1.0 ถึง 13.5 ซม./วินาที และ 0.8 ถึง 10.0 ซม./วินาที ตามลำดับ ส่วนการก่อรูป tombolo พบว่าเขื่อนยาวจะก่อให้ tombolo ขยายตัวในทิศทางตามแนวชายฝั่งซึ่งมีการทับถมของตะกอนบริเวณฐาน tombolo มากกว่าบริเวณยอด ฐาน tombolo ของเขื่อนขนาดยาวมีขนาดประมาณ 200 ถึง 270 ซม. และระยะยื่นของ tombolo มีขนาดประมาณ 37 ถึง 60 ซม. ระยะยื่น tombolo ของเขื่อนสั้นมีขนาดประมาณ 20 ถึง 33 ซม. ดังตัวอย่างในรูป 4-29 และ 4-30 จากรูป 4-31 ในแง่ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ทับถมกับพลังงานคลื่น พบว่าเมื่อพลังงานเพิ่มขึ้นพื้นที่ทับถมจะเพิ่มขึ้นด้วย แต่เมื่อพลังงานเกินกว่า 1.25 นิวตัน-ม./วินาที อัตราการทับถมจะเพิ่มขึ้นน้อยลง Abeysinghe [27] ได้สรุปผลการศึกษาไว้ดังนี้

1) องค์ประกอบที่สำคัญของการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งคือ การกระจายพลังงานคลื่นซึ่งทำให้ที่ปลายเขื่อนเกิด rip current เคลื่อนเลาะไปตามชายฝั่งบริเวณหลังเขื่อน เป็นผลให้เกิดการทับถมของตะกอนทรายบริเวณหลังเขื่อน
2) การล้าของคลื่น (crest lag of wave) เป็นผลจากการกระจายพลังงานคลื่นขึ้นอยู่กับความยาวเขื่อน การล้าของคลื่นเป็นองค์ประกอบที่ใช้พิจารณาถึงการก่อรูป tombolo การขยายเขื่อนให้ยาวขึ้นจะช่วยให้ tombolo ขยายใหญ่ขึ้น
3) การกัดเซาะที่เกิดขึ้นบริเวณช่องว่างระหว่างเขื่อน พบว่าส่วนใหญ่เกิดจากการขยายตัวจากบริเวณปลายเขื่อน อันเนื่องมาจากการหมุนวนของกระแสน้ำที่บริเวณปลายเขื่อน
4) การเคลื่อนที่ของทรายนอกชายฝั่ง (offshore sand movement) จะมีปริมาณสูงสำหรับกระแสน้ำที่มีความรุนแรง ซึ่งเป็นผลมาจากคลื่นที่มีความสูงมากและมีคาบเวลายาว ส่วนการทับถมของทรายด้านหลังเขื่อนขึ้นอยู่กับพลังงานคลื่น หากคลื่นมีพลังงานสูงก็จะสามารถพาทรายมาตกด้านหลังเขื่อนได้เป็นบริเวณกว้าง
5) ระลอกคลื่น (ripples) ที่เกิดจากการกระจายพลังงานคลื่น มีการเคลื่อนที่เข้าหาชายฝั่งในทิศทางที่เกือบตั้งฉากกับแนวชายฝั่ง

ในปี 1980 Devasiri [28] ได้ศึกษาการไหลเวียนของกระแสน้ำหลังแนวเขื่อนกันคลื่นแยก ค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองได้แก่ ขนาดเฉลี่ยของตะกอนทราย มีค่า 0.25

มม., ความลาดชายฝั่ง 1:15, มุมที่แนวยอดคลื่นกระทำต่อเขื่อน 10°, ความลึกของน้ำ 16 ซม., ระยะห่างระหว่างเขื่อน 225 ซม., ระยะทางจากชายฝั่งถึงเขื่อนประมาณ 225 ซม., ความยาวเขื่อน 100 และ 175 ซม. ลักษณะคลื่นที่ใช้ทดลองได้แสดงในตาราง 4-9 จากการทดลองพบว่า กระแสน้ำหลังเขื่อนมีทิศทางโค้งพุ่งสู่เขื่อนเนื่องจากเมื่อคลื่นเคลื่อนเข้ากระทบเขื่อน จะทำให้เกิดการกระจายของกระแสน้ำที่ปลายเขื่อนออกไปทุกทิศทาง พร้อมทั้งเกิดการหมุนของกระแสน้ำพุ่งเข้าหาบริเวณร่มเงาเขื่อน อันจะส่งผลให้บริเวณปลายเขื่อนเกิดการกัดเซาะและเกิดการทับถมบริเวณรอบนอกปลายเขื่อน ตัวอย่างการไหลเวียนของกระแสน้ำได้แสดงในรูป 4-32 ผลการทดลองได้แสดงในรูป ค-17 ถึง ค-27 ความเร็วของกระแสน้ำที่เกิดขึ้นจะแปรผันตามความสูงและคาบเวลาคลื่น แต่ไม่แปรผันตามความชันคลื่น ในกรณีของเขื่อนที่สามารถลดการสะท้อนของคลื่นได้ จะทำให้กระแสน้ำบริเวณหลังเขื่อนมีทิศพุ่งเข้าสู่กลางเขื่อน และจะทำให้กระแสน้ำในบริเวณปลายเขื่อนอ่อนแรงลง ส่วนกรณีที่ปล่อยทรายให้ไหลตามแนวชายฝั่ง พบว่าเมื่อพลังงานคลื่นในทิศขนานชายฝั่งมีค่าสูง ทำให้เกิดกระแสน้ำเคลื่อนขนานกับชายฝั่งและไหลผ่านบริเวณหลังเขื่อนได้อย่างสะดวก ซึ่งเป็นเพราะคลื่นที่เกิดการกระจายไม่แรงพอที่จะหยุดยั้งการไหลของกระแสน้ำบริเวณหลังเขื่อน ซึ่งกล่าวได้ว่าในกรณีเช่นนี้เขื่อนตั้งห่างจากชายฝั่งมากเกินไป จึงไม่เกิดรูป tombolo ที่ชัดเจน และจากการทดลอง Devasiri [28] ได้สรุปผลการศึกษาไว้ดังนี้

1) การกัดเซาะบริเวณชายฝั่งมีลักษณะขนานกับยอดคลื่น
2) คลื่นที่เกิดจากการกระจายพลังงาน ทำให้เกิดกระแสน้ำหลังเขื่อนกันคลื่นในทิศทางขวางแนวชายฝั่ง กระแสน้ำจากด้านข้างทั้งสองของเขื่อนกันคลื่นจะไหลเข้าหากัน ทำให้เกิดระลอกคลื่นเคลื่อนเข้าปะทะกับเขื่อน
3) การหมุนวนของกระแสน้ำ (vortex) ในบริเวณปลายเขื่อนทั้งสองข้างและบริเวณชายฝั่งที่มีการเปลี่ยนแปลง มีแนวโน้มว่ากระแสน้ำจะไหลเข้าหาบริเวณที่เกิดการหมุนวนของกระแสน้ำที่แรงกว่า ซึ่งโดยปกติ จะเกิดขึ้นที่บริเวณปลายเขื่อนด้านท้ายน้ำ
4) การหมุนวนของกระแสน้ำ ทำให้เกิดการกัดเซาะบริเวณปลายเขื่อน ส่วนการไหลของกระแสน้ำที่มีลักษณะแผ่กระจาย (radiating flow) ทำให้เกิดการตื้นเขินทั้งบริเวณด้านเหนือและท้ายน้ำ

5) ความสูงคลื่น เป็นองค์ประกอบที่สำคัญต่อรูปแบบการไหลของน้ำบริเวณหลังเขื่อน

6) การไหลของกระแสน้ำชายฝั่งบริเวณหลังเขื่อน อาจทำให้การใช้งานของเขื่อนไม่ได้ผลในแง่ที่ต้องการให้เกิดการยื่นของชายฝั่งออกสู่ทะเล หากเขื่อนตั้งอยู่ในตำแหน่งที่ห่างจากชายฝั่งมากเกินไป

ในปี 1980 Chowdhury [2] ได้ศึกษารูปแบบชายฝั่งหลังแนวเขื่อนกันคลื่น โดยใช้การทดลองเดียวกันกับ Devasiri [28] ผลการทดลองได้แสดงในรูป ค-28 ถึง ค-35 จากการทดลองพบว่า ความสูงคลื่นแตกตัวบริเวณร่มเงาเขื่อนมีค่าน้อยกว่าบริเวณระหว่างเขื่อน คลื่นบริเวณระหว่างเขื่อนจะเกิดการแตกตัวก่อน ซึ่งการสลายพลังงานคลื่นจะทำให้ตะกอนทรายเกิดลอยตัวและถูกพัดพาไปทับถมบริเวณร่มเงาเขื่อน tombolo ที่เข้าสู่สภาพสมดุลย์นั้น สังเกตได้จากคลื่น ซึ่งจะเกิดการแตกตัวรอบ tombolo พร้อมกันและ Chowdhury ได้สรุปผลการศึกษาไว้ดังนี้

1) ปริมาณตะกอนทรายทับถมบริเวณร่มเงาเขื่อนจะเพิ่มขึ้น หากความสูงคลื่นเพิ่มขึ้นสำหรับคาบเวลาคลื่นที่เท่ากัน

2) ขนาดและรูปร่าง tombolo แปรผันตามความยาวเขื่อน

ในปี 1982 Nakatani [29] ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงชายฝั่ง ค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองได้แก่ขนาดเฉลี่ยของตะกอนทรายมีค่า 0.25 มม., ความถ่วงจำเพาะของตะกอนทรายมีค่า 2.68, ความพรุนของตะกอนทรายเท่ากับ 48%, ความลาดชันชายฝั่งเท่ากับ 1:15, มุมที่แนวยอดคลื่นกระทำกับเขื่อนเท่ากับ 15° ส่วนระยะทางจากชายฝั่งถึงเขื่อน, ความยาวเขื่อนและลักษณะคลื่น ได้แสดงไว้ในตาราง 4-10 ตัวอย่างรูปแบบชายฝั่งที่ได้ ได้แสดงในรูป 4-33 และผลการทดลองได้แสดงในรูป ค-36 ถึง ค-42 จากการทดลองสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1) การเคลื่อนที่ของตะกอนเข้าออกฝั่ง (onshore-offshore transport) ซึ่งเกิดจากกระแสน้ำบริเวณด้านหลังเขื่อน มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งมากจากคลื่นที่มีความสูงมาก

2) การกระจายพลังงานคลื่นและการวางตำแหน่งเขื่อน เป็นองค์ประกอบสำคัญของการก่อรูป tombolo

ตาราง 4-5 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ จากการทดลองโดย Rosen [26]

H/L	Test No.	H (cm.)	T (sec)	L (m.)	y (m.)	x (m.)	z (m.)	br (m.)	x/y	z/y	xt (m.)	x-Xt/2x*y	H/Vf*T
0.015	1	1.5	0.8	1.0	3.0	0.5	0.16	1.36	0.167	0.053	0.86	0.57	0.65
	2				3.0	1.0	0.26	1.36	0.333	0.087			
	3				3.0	2.0	0.38	1.36	0.667	0.127			
	4				2.0	0.5	2.00	1.36	0.250	1.000			
0.025	5	3.9	1.0	1.56	1.0	0.5	0.24	1.36	0.500	0.240	0.86	0.57	1.34
	6				1.0	1.0	0.56	1.36	1.000	0.560			
	7				1.0	2.0	0.82	1.36	2.000	0.820			
	8				2.5	1.0	0.35	1.70	0.400	0.140			
	9				2.0	0.5	0.23	1.70	0.250	0.115			
	10				2.0	1.0	0.42	1.70	0.500	0.210			
	11				2.0	2.0	0.66	1.70	1.000	0.330			
	12				1.0	0.5	0.26	1.70	0.500	0.260			
	13				1.0	1.0	0.55	1.70	1.000	0.550			
	14				1.0	2.0	1.00	1.70	2.000	1.000			
	15				1.0	0.5	0.25	1.70	0.500	0.250			
0.040	16	8.0	1.15	2.06	2.0	0.5	0.05	1.00	0.250	0.025	0.86	0.57	2.40
	17				2.0	1.0	0.24	1.00	0.500	0.120			
	18				2.0	2.0	0.23	1.00	1.000	0.115			

ตาราง 4-6 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ จากแบบจำลองที่ผ่านมา [26]

Author	H/L	H (cm.)	T (sec)	L (m.)	y (m.)	x (m.)	z (m.)	Ybr (m.)	x/y	z/y
Shinohara and	0.0192	2.55	0.922	1.33	0.750	1.50	0.25		2.00	0.333
					1.500	1.50	0.30		1.00	0.200
					2.625	1.50	0.375		0.57	0.140
					3.750	1.50	0.250		0.40	0.067
Tsubaki (1966)	0.0461	6.12	0.922	1.33	0.750	1.50	0.52		2.00	0.693
					1.500	1.50	0.500		1.00	0.333
					2.625	1.50	0.425		0.57	0.160
					3.750	1.50	0.100		0.40	0.027
Horikawa and Koizumi (1974)	0.020	8.7 *	1.15	2.06	2.000	4.00	1.100		2.00	0.550
Sasaki (1976)	0.02 *	8.7 *	1.15	2.06	2.000	4.00	0.700		2.00	0.330
Perlin (1979)	0.0086*	86.0*	8.0	100.0	100.0	200.0	26		2	0.260
					100.0	300.0	48		3	0.480
					100.0	400.0	35		4	0.350
					100.0	600.0	28		6	0.280
					400.0	800.0	50		2	0.125
					200.0	400.0	96		2	0.240
					50.0	100.0	18		2	0.180
	0.0217	2170*	8.0	100.0	100.0	200.0	50		2	0.500
	0.0300	30*	8.0	100.0	100.0	200.0	11		2	0.110
Sauvage et al (1956)			0.8	1.00	1.00	0.80	1.0		0.80	1.00

ตาราง 4-7 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ จากการป้องกันชายฝั่ง [26]

Author	Location	Name of Structure	h (m.)	y (m.)	x (m.)	z (m.)	Xt (m.)	x/y	z/y	x-Xt/2+y	Remarks
Inman et al (1966)	Venice	Venice breakwater	5.0	300	180	300	36	0.60	1.0	0.24	Groyne not removed
Noble (1978)	St. Monica	St. Monica brwtr.	7.2	555	540	~250	–	0.97	0.45	–	
	Thum's Island	Island B	9.0	780	325	~ 0	–	0.42	0		
	—''—	—''— C	9.0	1,666	325	~ 10	–	0.20	0.006	–	
	—''—	—''— D	12.0	1,985	260	~ 0	–	0.13	0	–	
	Rincon Island	Rincon Island	12.5	1,650	160	~ 0	–	0.10	0	–	
Bruno et al (1979)	California	Channel Island	9.0	600	700	260	–	1.167	0.433	–	
Toyoshima (1974,1976)	Ishizaki		–	35	60	35	50	1.714	1.0	0.143	
	Kaike		5.0	110	150	110	25	1.364	1.0	0.568	
Nir (1976)	Maharia	Maharia brwtr.	–	80	180	80	20	2.25	1.0	1.0 *	Groynes in its neighbourhood
	Raifa	Haf Haramnel	–	200	207	200	35	1.035	1.0	0.43	
	Netanya'	North brwtr.	–	200	207	200	35	1.035	1.0	0.430	
		South brwr.	–	215	240	215	70	1.116	1.0	0.395	
	Tel Aviv	Tel Baruch	3.0	100	200	100	105	2.00	1.0	0.475	
		Sherator	4.0	200	310	200	75	1.55	1.0	0.588	
		Hilton	4.0	200	240	200	45	1.20	1.0	0.488	

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง 4-8 คลื่นที่ใช้ทดลองเพื่อศึกษารูปแบบชายฝั่งหลังแนวเขื่อนกันคลื่นแยก โดย Abeysinghe [27]

ลักษณะคลื่น	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	ชุดที่ 3	ชุดที่ 4
คาบเวลา, T(วินาที)	0.85	0.85	1.30	1.30
ความสูง, H(ซม.)	2.06	2.32	2.24	4.00
ความยาว, L(ซม.)	90.5	90.5	152.8	152.8
ความสูงในน้ำลึก, H_o(ซม.)	2.25	2.54	2.26	4.03
ความยาวในน้ำลึก, L_o(ซม.)	112.8	112.8	263.9	263.9
ความชัน, H_o/L_o	0.019	0.022	0.009	0.015
พลังงานตามแนวชายฝั่ง, E(นิวตัน-ม./วินาที)	0.95	1.20	1.24	3.94

ตาราง 4-9 คลื่นที่ใช้ทดลองเพื่อศึกษารูปแบบชายฝั่งหลังเขื่อนกันคลื่นแยก โดย Devasiri [28]

ลักษณะคลื่น	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	ชุดที่ 3	ชุดที่ 4
คาบเวลา, T(วินาที)	0.85	0.85	1.30	1.30
ความสูง, H(ซม.)	2.5	3.0	2.8	3.9
ความยาว, L(ซม.)	90.5	90.5	152.8	152.8
ความชัน, H/L	0.0277	0.0333	0.0186	0.0263

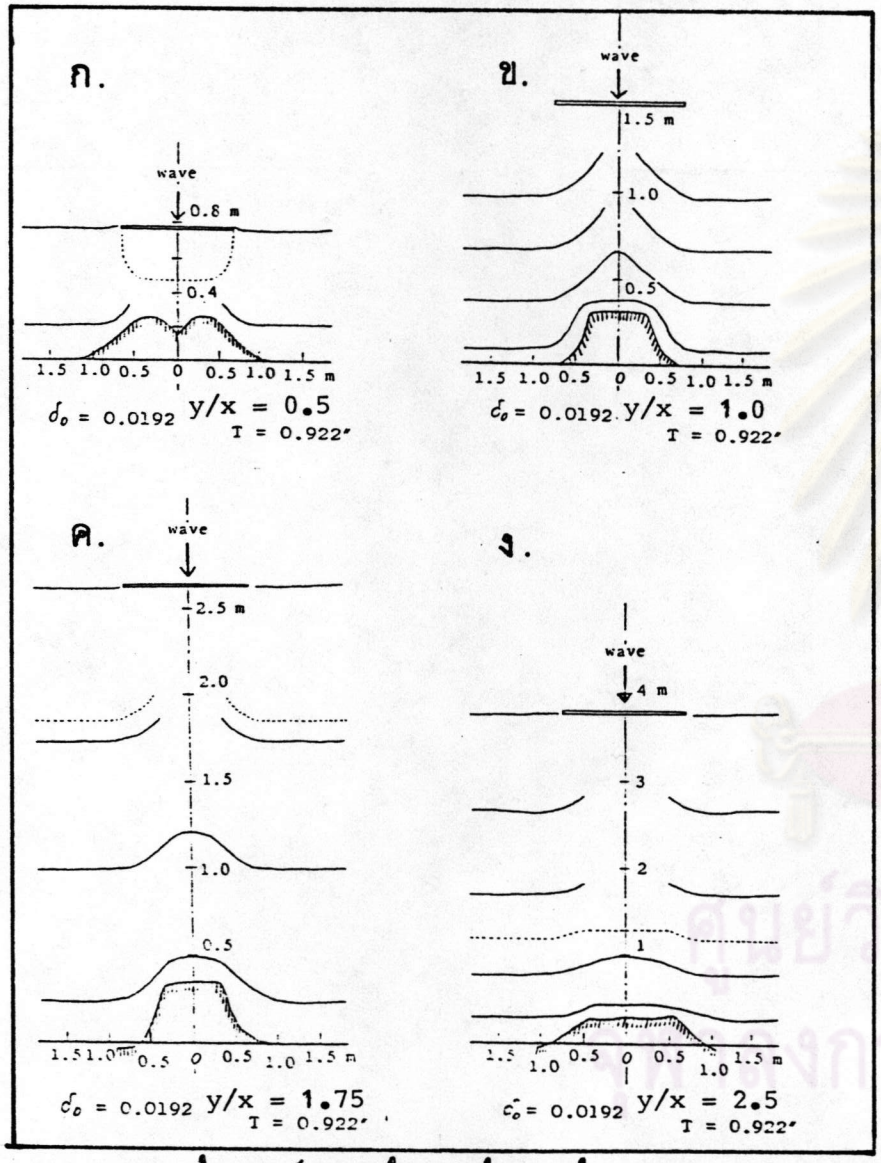
ตาราง 4-10 คลื่นและเขื่อนกันคลื่นที่ใช้ทดลองเพื่อศึกษารูปแบบชายฝั่งหลังแนวเขื่อนกันคลื่นแยก โดย Nakatani[29]

ลักษณะคลื่นและเขื่อนกันคลื่น	ชุดที่ 1	ชุดที่ 2	ชุดที่ 3	ชุดที่ 4	ชุดที่ 5	ชุดที่ 6
คาบเวลา, T(วินาที)	0.74	1.16	1.13	1.15	1.13	1.13
ความสูง, H(ซม.)	4.00	2.83	2.51	2.22	2.43	3.28
ความยาว, L(ซม.)	73.3	130.0	126.1	128.8	126.1	126.1
ความสูงในน้ำลึก, H_o(ซม.)	4.38	2.92	2.61	2.30	2.53	3.41
ความยาวในน้ำลึก, L_o(ซม.)	85.4	209.9	199.2	206.3	199.2	199.2
ความเร็วเฉลี่ยของกระแสน้ำตามแนวชายฝั่ง, (ซม./วินาที)	12.3	8.1	8.6	(1) (2) 6.0, 6.9	7.4	6.0
ความชัน, H_o/L_o	0.0512	0.0139	0.0131	0.0111	0.0127	0.0171
ความยาวเขื่อน	100.0	100.0	50.0	50.0	50.0	50.0
ระยะทางจากฝั่งถึงเขื่อน	35.0	43.0	46.0	87.0	133.0	208.0
อัตราส่วนระหว่างระยะจากฝั่งถึงเขื่อนกับความยาวเขื่อน	0.35	0.43	0.92	1.74	2.65	4.16

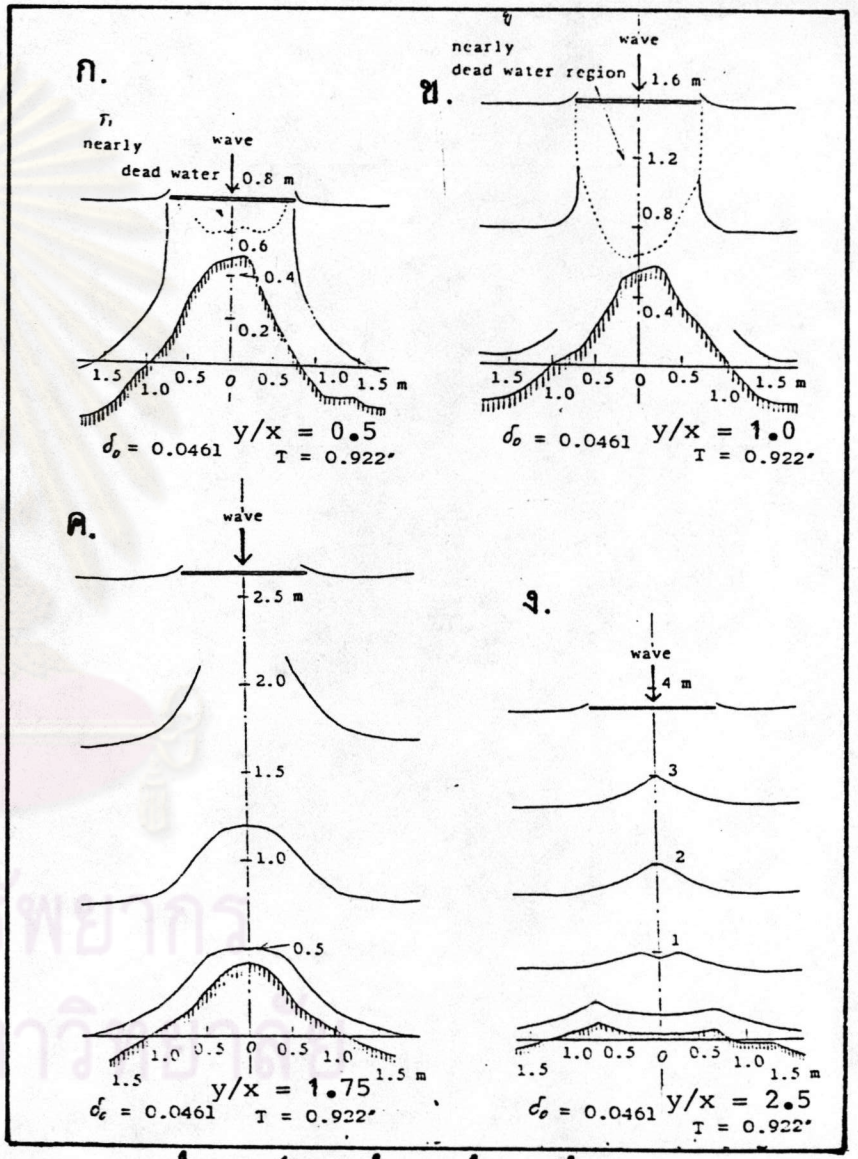
(1) ด้านเหนือน้ำ

(2) ด้านท้ายน้ำ

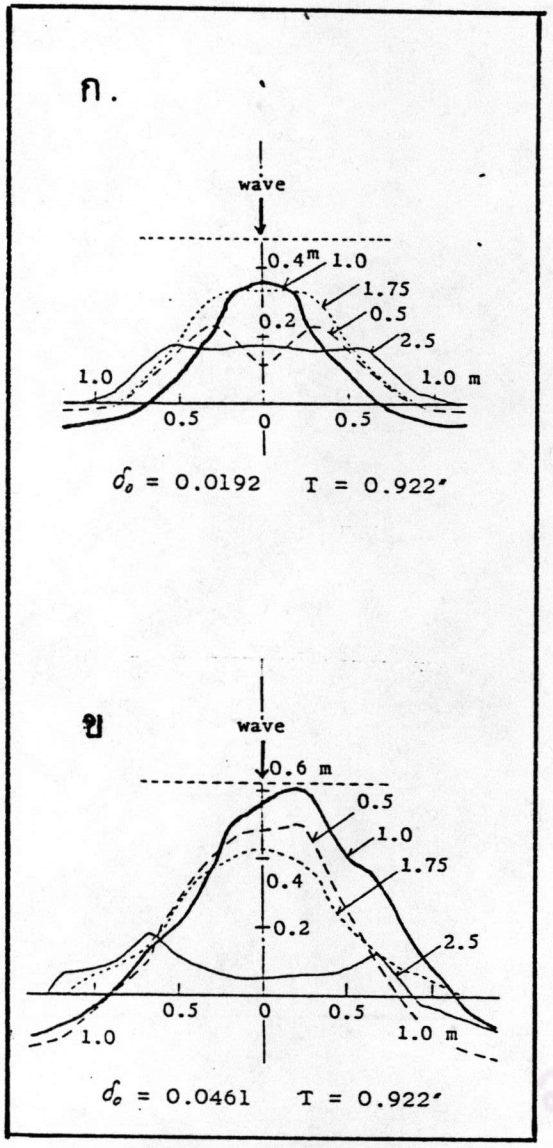
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



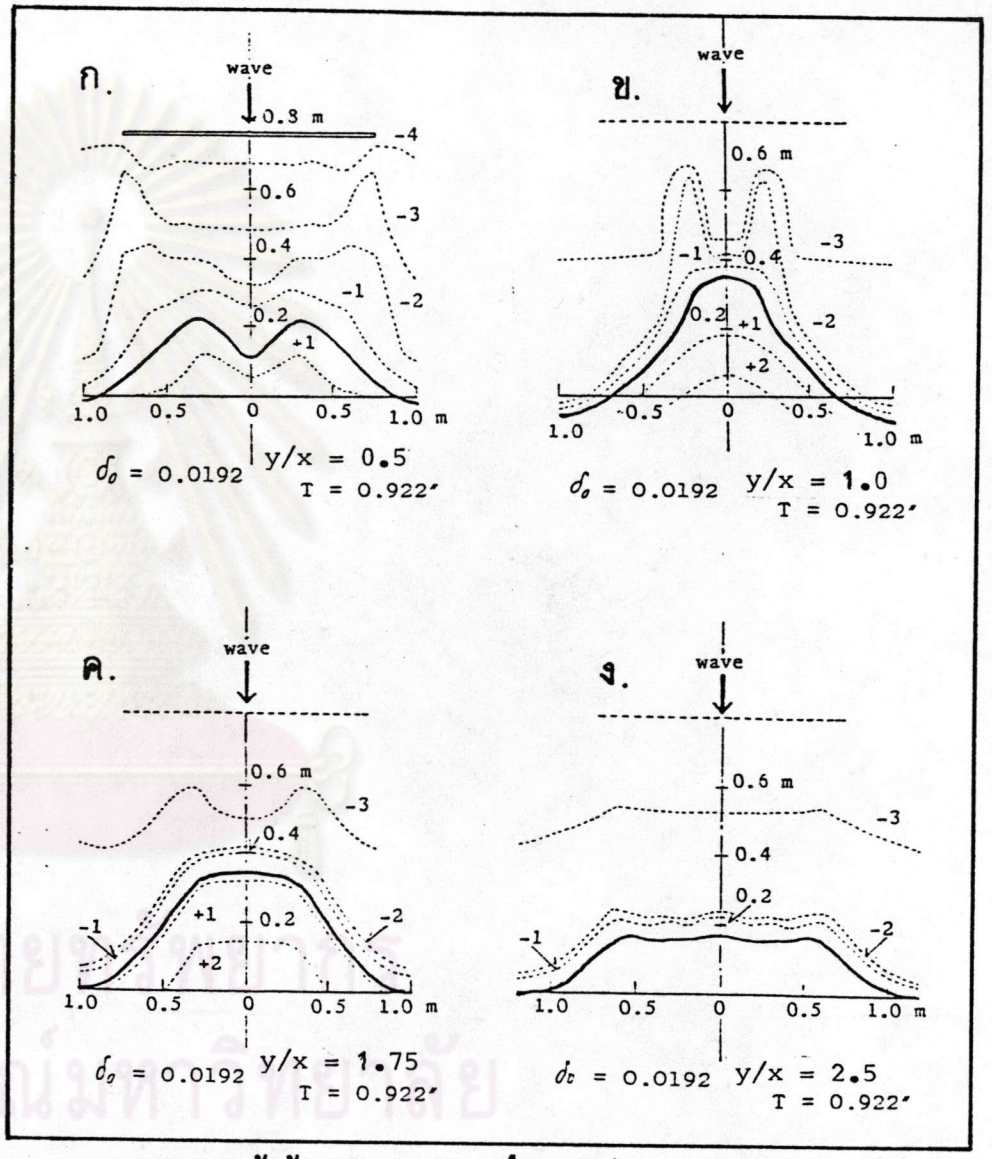
รูป 4-19 ชายฝั่งสมดุลย์บริเวณรมเงาเชื่อนกันคลื่น สำหรับ δ_o = 0.0192 [25]



รูป 4-20 ชายฝั่งสมดุลย์บริเวณรมเงาเชื่อนกันคลื่น สำหรับ δ_o = 0.0461 [25]

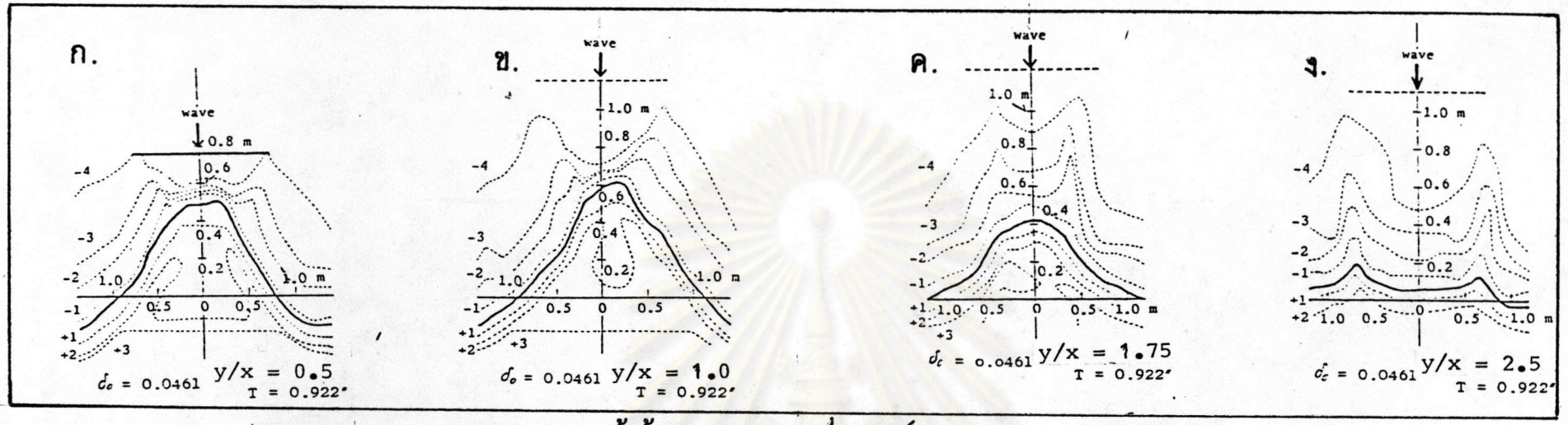


รูป 4-21 ชายฝั่งสมดุลย์ที่เกิดจาก $\frac{y}{x}$ มีค่าต่างกัน [25]

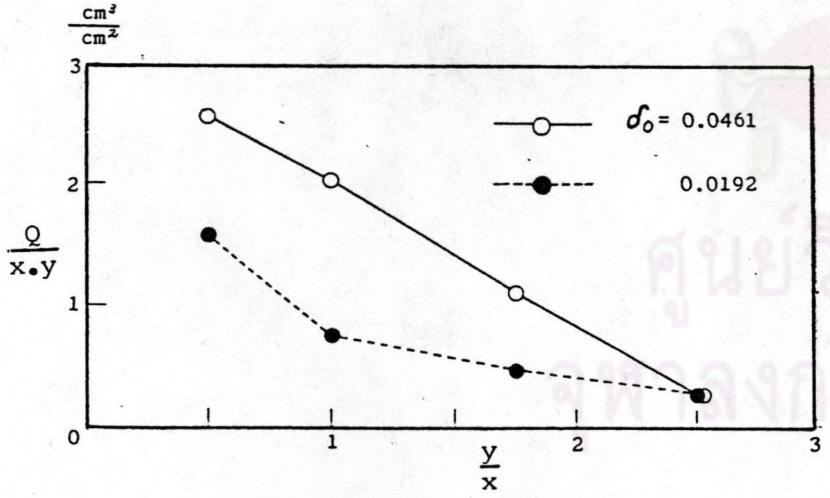


รูป 4-22 เส้นชั้นความลึกของชายฝั่งสมดุลย์ สำหรับ δ_o = 0.0192 [25]

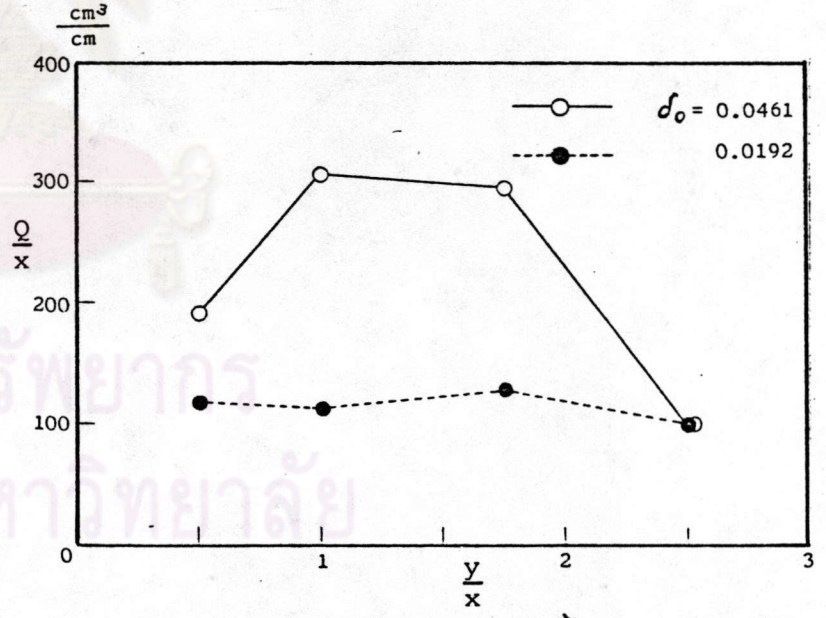
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูป 4-23 เส้นชั้นความลึกของชายฝั่งสมดุลย์ สำหรับ $\delta_o = 0.0461$ [25]

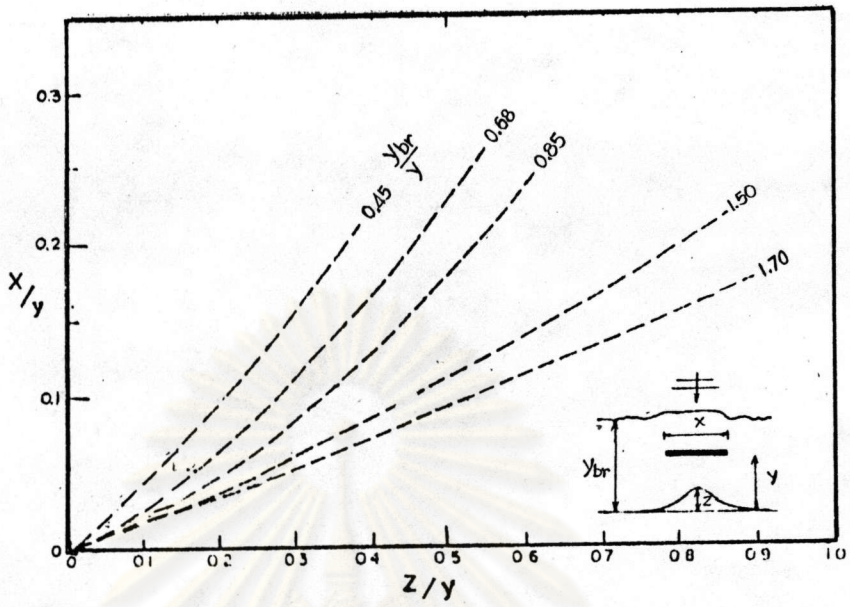


รูป 4-24 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{Q}{x \cdot y}$ กับ $\frac{y}{x}$ [25]

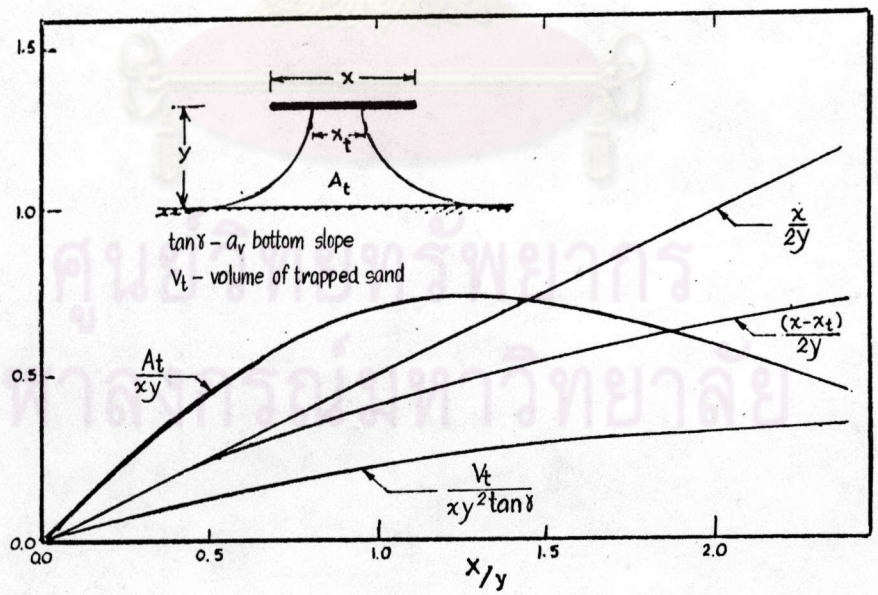


รูป 4-25 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{Q}{x}$ กับ $\frac{y}{x}$ [25]

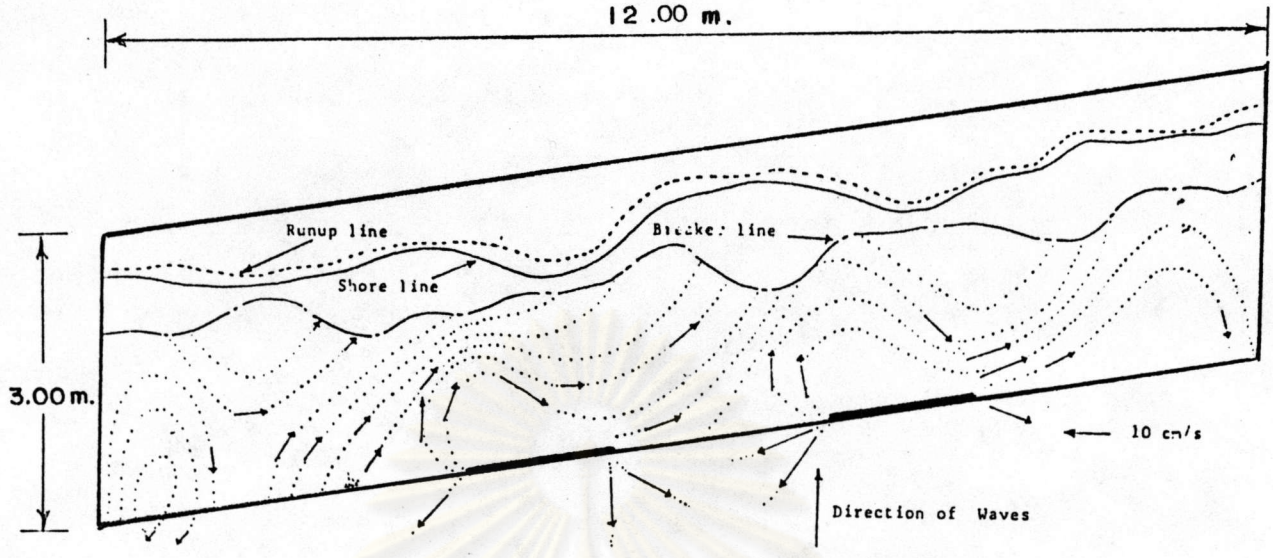
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



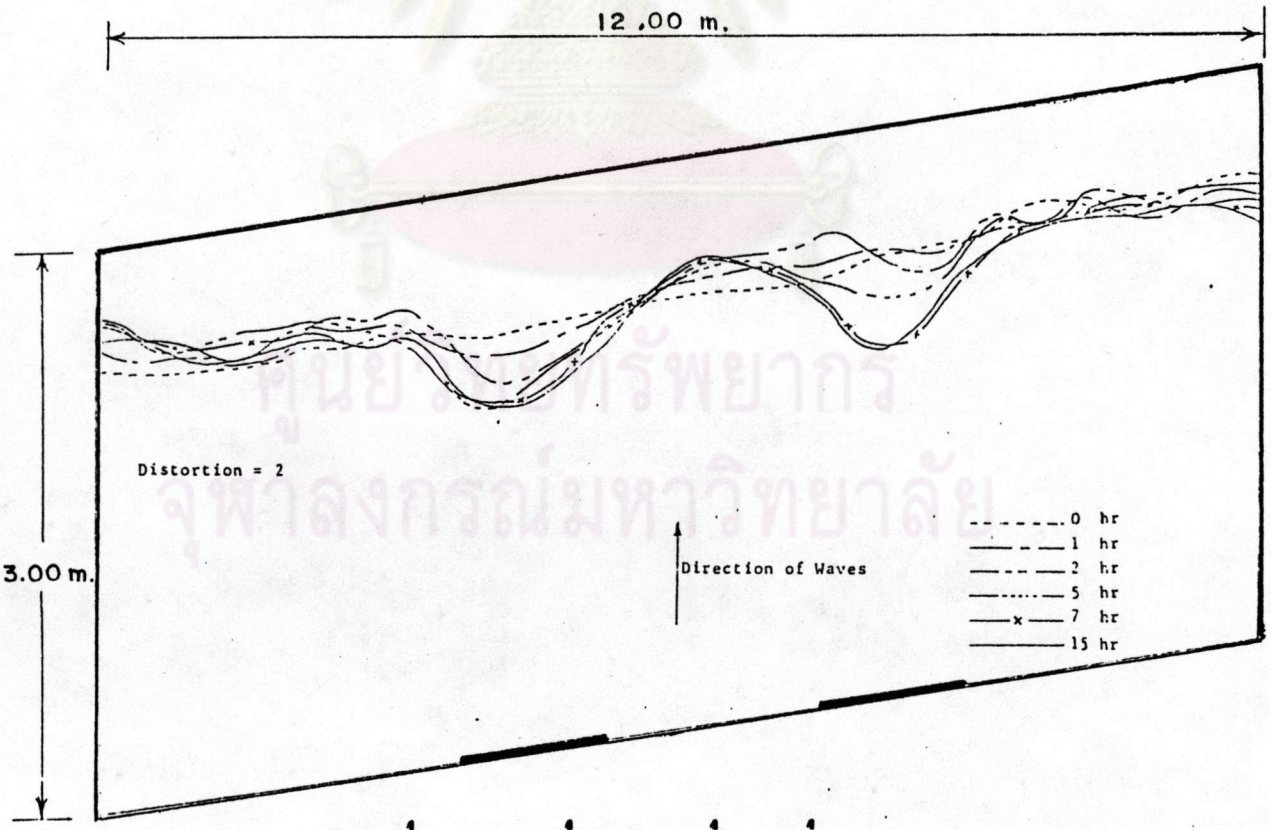
รูป 4-26 ความสัมพันธ์ระหว่าง x/y กับ z/y [26]



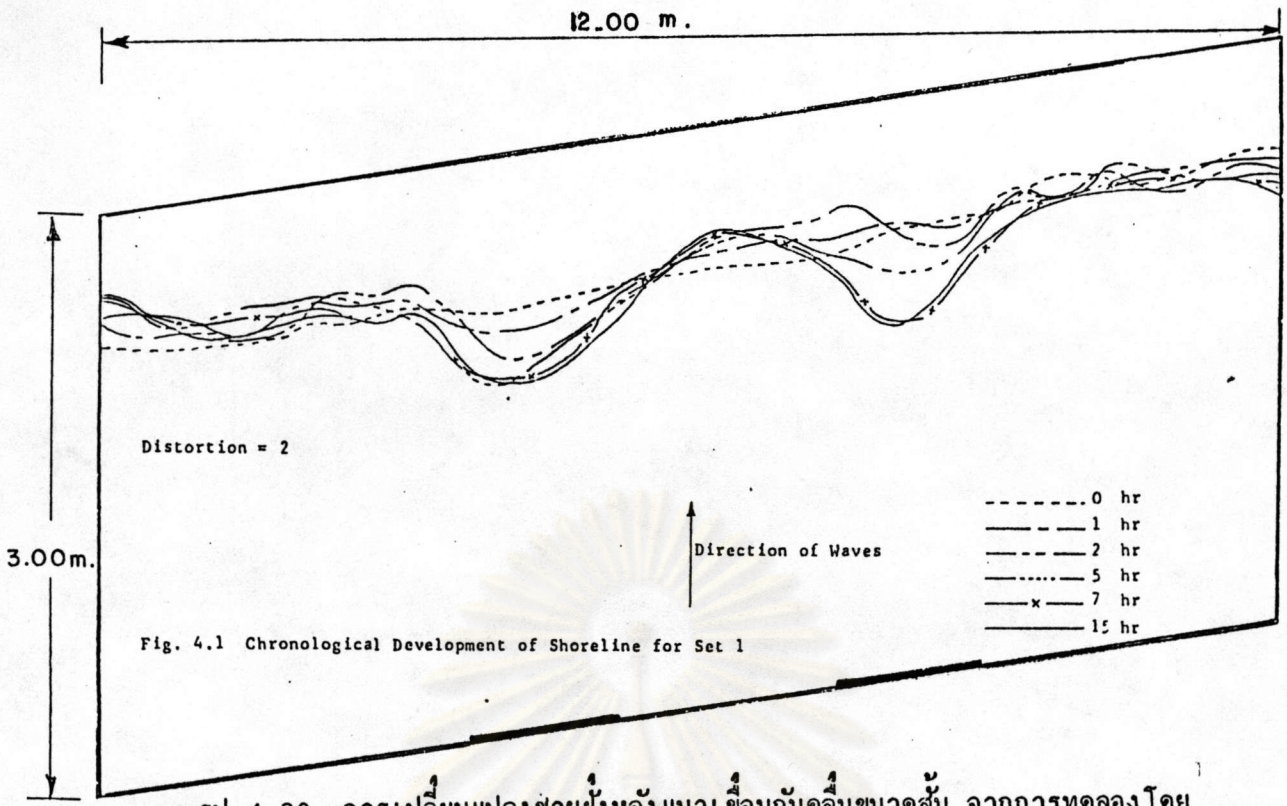
รูป 4-27 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ กับ x/y [26]



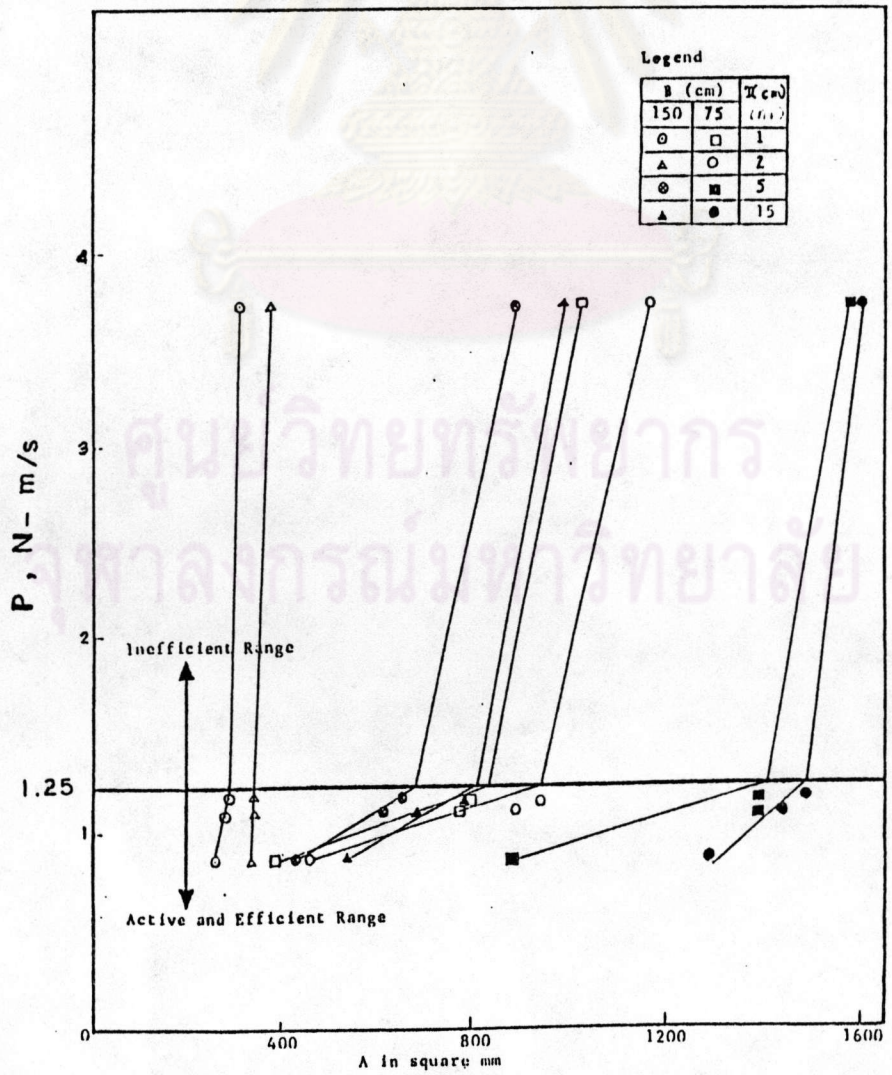
รูป 4-28 การไหลของกระแสน้ำหลังเขื่อนกันคลื่น จากการทดลองโดย Abeysinghe [27]



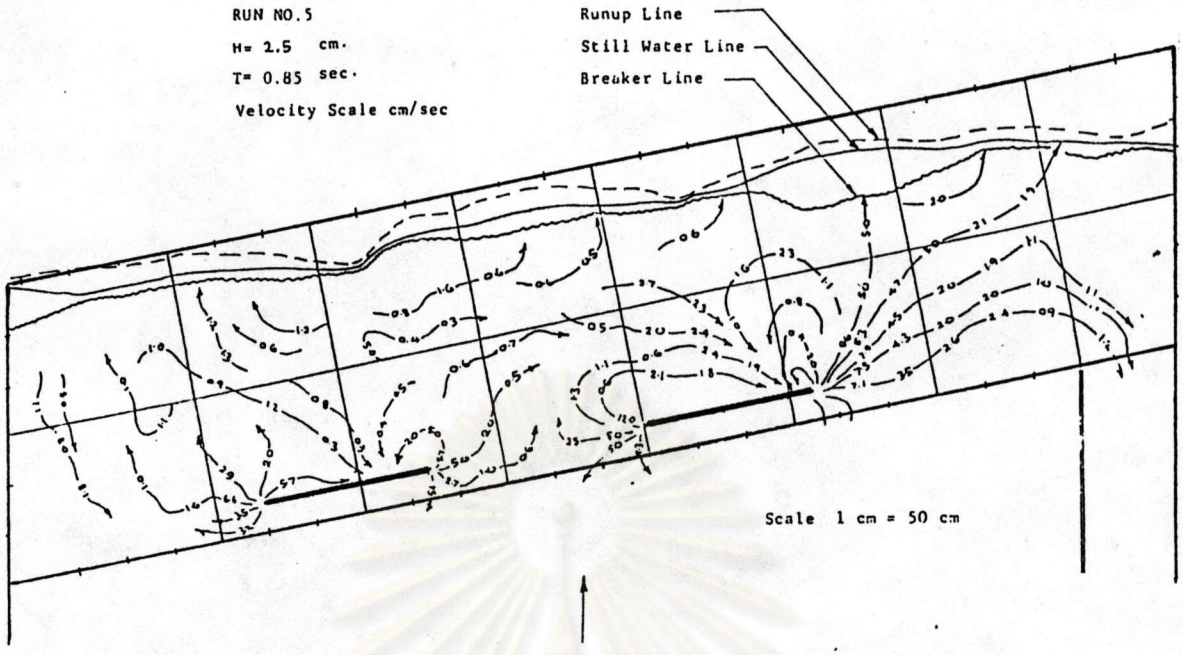
รูป 4-29 การเปลี่ยนแปลงชายฝั่งหลังแนวเขื่อนกันคลื่นขนาดยาว จากการทดลองโดย Abeysinghe [27]



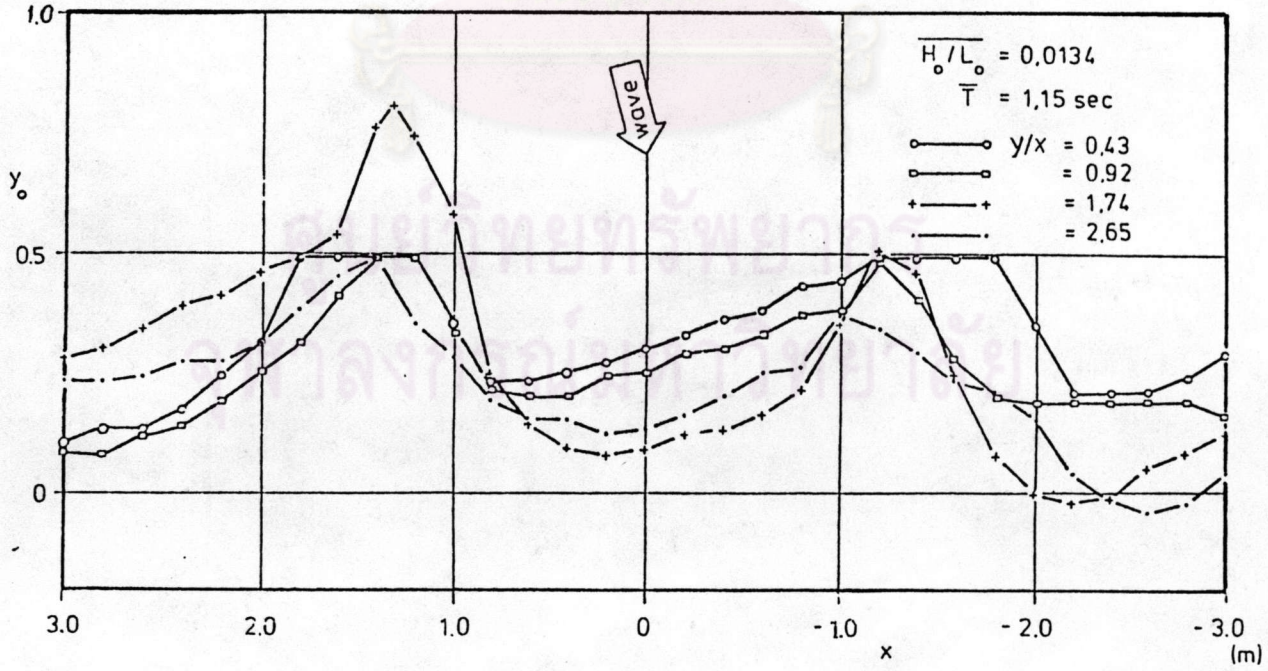
รูป 4-30 การเปลี่ยนแปลงชายฝั่งหลังแนวเขื่อนกันคลื่นขนาดสั้น จากการทดลองโดย Abeysinghe [27]



รูป 4-31 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ทับถมกับพลังงานคลื่น [27]



รูป 4-32 การไหลของกระแสน้ำหลังแนวเขื่อนกันคลื่น จากการทดลองครั้งที่ 1 โดย Devasiri [28]



รูป 4-33 ลักษณะ tombolo ที่เกิดการวางตำแหน่งไว้ที่ต่าง ๆ กัน จากการทดลองโดย Nakatani [29]

4.3 รูปแบบชายฝั่งจากแบบจำลองคณิตศาสตร์

4.3.1 ชายฝั่งบริเวณหลังเขื่อนกันคลื่น

ในปี 1979 Perlin [30] ได้ศึกษาวิธีการประเมินรูปร่างชายฝั่งบริเวณหลังเขื่อนกันคลื่นด้วยแบบจำลองคณิตศาสตร์ โดยอาศัยสมการอนุพันธ์ต่อเนื่อง (differential equation of sand continuity)

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{1}{h}\frac{\partial Q_x}{\partial x} = 0$$ โดยที่ h คือความลึกของน้ำ

และสมการอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนตามแนวชายฝั่ง (longshore sediment transport rate equation)

$$Q_x = C(H_b)^{5/2}\sin[2(\alpha-\beta)]$$

ค่าไร้หน่วย $C = \dfrac{K\rho g^{1/2}}{(\rho_s-\rho)(1-p)16(\delta_b)^{1/2}}$ $K = 0.77$ (ค่า K ได้จาก Komar and Inman [5]) p หมายถึงความพรุนของโครงสร้าง, δ_b หมายถึงความชันคลื่นแตกตัว

ผลของแบบจำลองคณิตศาสตร์ได้นำไปเปรียบเทียบกับแบบจำลองกายภาพ ดังแสดงในรูป 4-34 ถึง 4-37 จากรูป 4-34 เป็นการทดลองแบบจำลองกายภาพโดย Shinohara and Tsubaki [25] พบว่าผลของรูปชายฝั่งที่คล้ายกันได้แก่ ความยาว tombolo ที่ยื่นออกจากฝั่ง ส่วนที่ต่างกันได้แก่ ความกว้าง tombolo และลักษณะยอด tombolo จากรูป 4-35 และ 4-36 เป็นการทดลองแบบจำลองกายภาพโดย Sawaragi (1957) แบ่งออกเป็น 2 กรณี กรณีแรก (รูป 4-35) ได้วางเขื่อนขนานกับแนวชายฝั่ง พบว่ายอด tombolo ของแบบจำลองคณิตศาสตร์เลื่อนออกไปทางด้านซ้ายและมีขนาดใหญ่กว่า ซึ่งแสดงว่าปริมาณตะกอนเคลื่อนที่ตามแนวชายฝั่งที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์มีค่ามากเกินไป ส่วนกรณีที่สอง (รูป 4-36) ได้วางเขื่อนทำมุมกับชายฝั่ง 40° พบว่ายอด tombolo ของแบบจำลองคณิตศาสตร์เลื่อนออกไปทางซ้าย แต่มีขนาดเล็กกว่าและมีการถดถอยของชายฝั่งด้วย และจากรูป 4-37 เป็นการทดลองแบบจำลองกายภาพโดย Horikawa และ Koizuma (1974) พบว่า tombolo ที่ได้จากแบบจำลองคณิตศาสตร์มีขนาดเล็กกว่า

นอกจากนั้น Perlin [30] ได้พยายามศึกษาหาความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบต่าง ๆ ที่ก่อให้เกิด tombolo ด้วยการวิเคราะห์แบบไร้มิติ (Non-Dimensional Analysis) โดยให้ค่าที่ได้อยู่ในรูปไร้หน่วย ค่าระยะต่าง ๆ จะถูกทำให้ไร้หน่วยด้วยการใช้ค่าความยาวคลื่นในน้ำลึก L_o ไปหาร ตัวแปรที่ใช้ศึกษามีดังนี้

$\pi_1 = \frac{SBREAK}{L_o}$ คือ ค่าความสัมพันธ์ของความยาวเขื่อน

$\pi_2 = \frac{DOFF}{L_o}$ คือ ค่าความสัมพันธ์ของระยะทางจากชายฝั่งถึงเขื่อน

$\pi_3 = \frac{h}{L_o}$ คือ ค่าความสัมพันธ์ของความลึก

$\pi_4 = \frac{H_b}{L_o}$ คือ ค่าความชันคลื่นแตกตัว

$\pi_5 = \alpha$ คือ มุมที่แนวคลื่นกระทำต่อเขื่อน กำหนดให้เท่ากับ 0°

$\pi_6 =$ BSLOPE คือ ความลาดชายฝั่ง กำหนดให้เท่ากับ 1:15

$\pi_7 = \frac{t}{T}$ คือ ค่าความสัมพันธ์ของเวลา (จำนวนคลื่น)

$R = \frac{SBREAK}{DOFF}$ คือ อัตราส่วนระหว่าง ความยาวเขื่อนกับระยะทางจากชายฝั่งถึงเขื่อน

โดยที่ SBREAK คือ ความยาวเขื่อน, DOFF คือ ระยะทางจากชายฝั่งถึงเขื่อน

ผลการศึกษาสามารถสรุปได้ดังนี้

1) การเปรียบเทียบชายฝั่งเมื่อเปลี่ยนแปลงค่า R จากรูป 4-38 ถึง 4-41 ได้ใช้ค่า R เท่ากับ 2:1,3:1,4:1 และ 6:1 ตามลำดับ โดยใช้จำนวนคลื่น (π_7) เท่ากับ 108,000 คลื่น, $\frac{DOFF}{L_o}$ เท่ากับ 1 และ $\frac{H_b}{L_o}$ เท่ากับ 0.0152 ผลการศึกษาจากรูป 4-38 และ 4-39 พบว่าความกว้างและความยาว tombolo จะเพิ่มขึ้นเมื่อมีความยาวเขื่อนเพิ่มขึ้น เนื่องจากคลื่นที่เคลื่อนเข้ากระทบชายฝั่งด้านหลังเขื่อนมีพลังงานลดลง จากรูป 4-40 พบว่าชายฝั่งเริ่มต้นก่อรูปเป็น tombolo 2 ยอด แล้วปรับรูปเป็น tombolo ยอดเดียว ส่วนรูป 4-41 พบว่าชายฝั่งก่อรูปเป็น tombolo 2 ยอด และมีฐานกว้าง

2) การเปรียบเทียบชายฝั่งเมื่อมีค่า R เท่ากัน แต่ค่าความยาวเขื่อน (SBREAK) และระยะทางจากชายฝั่งถึงเขื่อนไม่เท่ากัน (DOFF) จากรูป 4-38, และ 4-42 ถึง 4-44 ได้ใช้ค่า R เท่ากับ $2L_o:1L_o$, $8L_o:4L_o$, $4L_o:2L_o$ และ $1L_o:0.5L_o$ ตามลำดับหรือ R เท่ากับ 2:1 ทั้งหมด, $\frac{H_b}{L_o}$ เท่ากับ 0.0152 ผลการศึกษาจากรูป 4-42 พบว่าชายฝั่งเกิดการทับถมน้อยมาก และจากรูป

4-38, 4-43 และ 4-44 จะมีปริมาณการทับถมเพิ่มขึ้น เนื่องจากระยะทางจากชายฝั่งถึงเขื่อนลดลง

3) การเปรียบเทียบชายฝั่งเมื่อมีค่า R เท่ากัน แต่เปลี่ยนค่าความชันคลื่น จากรูป 4-38, 4-45 และ 4-46 ได้ใช้ค่า $\frac{H_b}{L_o}$ เท่ากับ 0.0152, 0.0304 และ 0.0076 ตามลำดับ และใช้ R เท่ากับ $2L_o$:$1L_o$ พบว่าคลื่นที่มีความชันสูงจะทำให้ปริมาณการทับถมสูงและชายฝั่งเข้าสู่สภาพสมดุลย์เร็ว

4) ชายฝั่งด้านข้าง tombolo จะมีการถดถอยในช่วงแรก ๆ แต่เมื่อ tombolo เข้าใกล้สภาพสมดุลย์ ชายฝั่งด้านข้างจะเริ่มมีการทับถม และอัตราการทับถมนี้จะลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูป 4-47

ในปี 1982 Suppataratarn [31] ได้ศึกษาวิธีการประเมินรูปร่างชายฝั่งบริเวณร่มเงาเขื่อนกันคลื่นด้วยวิธีการแก้ปัญหาเชิงตัวเลข (Numerical Approach) โดยอาศัยสมการต่อเนื่อง (continuity equation)

$$y(i,n+1) = y(i,n) - \frac{\Delta t}{h_d}\left[\frac{Q(i+1,n) - Q(i-1,n)}{2\Delta x} - q_y(i)\right]$$

สมการอัตราการเคลื่อนที่ของตะกอนตามแนวชายฝั่ง (longshore transport equation)

$$Q(i,n) = KH^{2.5}(i)\sin[2\alpha_b(i,n)]$$

และมุมที่คลื่นทำกับชายฝั่ง ณ จุดที่คลื่นแตกตัว

$$\alpha_b(i,n) = \alpha_{bx}(i) - \tan^{-1}\left[\frac{y(i+1,n) - y(i-1,n)}{2\Delta x}\right]$$

โดยที่ x เป็นระยะทางตามแนวราบ, y เป็นระยะทางตามแนวดิ่ง (i,n) เป็นจำนวนของ Δx, Δt ตามลำดับ, h_d หมายถึง ความหนาของตะกอนที่ตกจม, q_y หมายถึง อัตรการเคลื่อนที่ของตะกอนตั้งฉากชายฝั่งต่อความยาวชายฝั่ง และจากการศึกษาสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1) รูปร่างชายฝั่งที่ประเมินได้ นำไปเปรียบเทียบกับผลจากแบบจำลองกายภาพของ Shinohara and Tsubaki [25] ซึ่งได้แสดงในรูป 4-48 ถึง 4-51 ปรากฏว่า รูปร่างชายฝั่งที่มีลักษณะคล้ายกัน เป็นผลจากการวางตำแหน่งเขื่อนที่ใกล้ฝั่ง หากวางไกลออกไปจะทำให้รูปร่างชายฝั่งแตกต่างกันมากขึ้น ผลจากแบบจำลองคณิตศาสตร์และกายภาพพบว่า เมื่อความชันคลื่นมีค่ามากขึ้นด้วยการเพิ่มความสูงคลื่นจะทำให้ชายฝั่งเปลี่ยนรูปได้เร็วแล้วเข้าสู่สภาพสมดุลย์ได้เร็ว

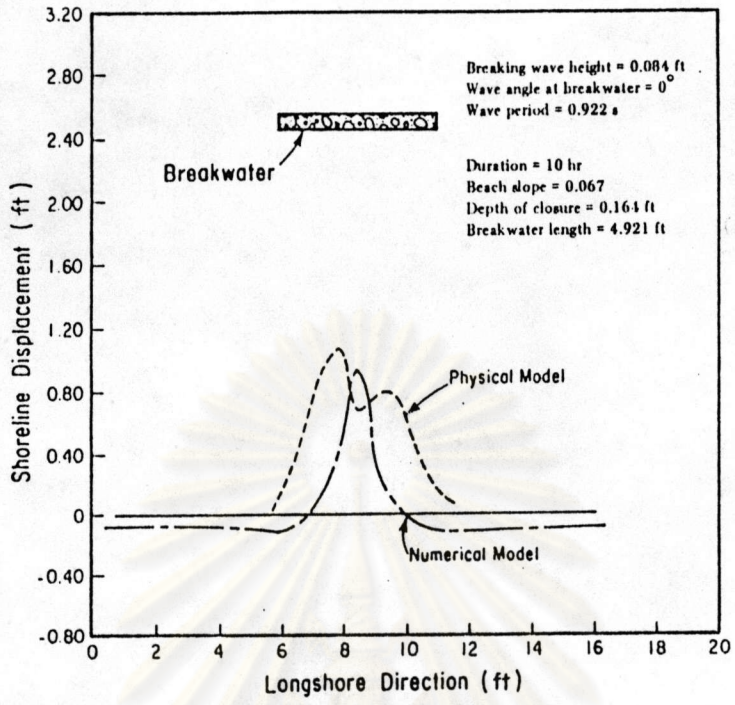
2) ความยาวของ tombolo ที่ยื่นไปหาเขื่อนเกิดขึ้นมากที่สุดเมื่ออัตราส่วนระหว่างความยาวเขื่อนกับระยะทางจากชายฝั่งถึงเขื่อนมีค่าเท่ากับ 1.0 เมื่อความยาวเขื่อนเพิ่มขึ้นอีก ลักษณะของ tombolo จะแบนราบและเริ่มปรากฏยอดสองยอด

4.3.2 ชายฝั่งหลังแนวเขื่อนกันคลื่นแยก

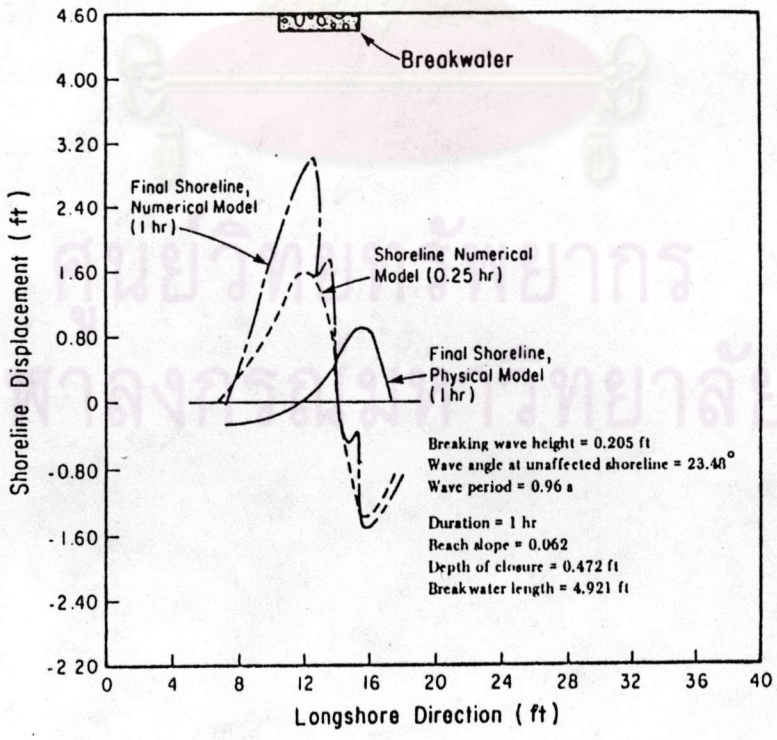
ในปี 1982 Suppataratarn [31] ได้ศึกษาการประเมินรูปร่างชายฝั่งหลังแนวเขื่อนกันคลื่นแยกด้วยวิธีการแก้ปัญหาเชิงตัวเลข (กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.3.1) การศึกษานี้ได้นำผลไปเปรียบเทียบกับผลจากแบบจำลองกายภาพของ Abeysinghe [27] และ Nakatani [29] ผลปรากฏว่า รูปร่างชายฝั่งจากวิธีการแก้ปัญหาเชิงตัวเลข มีปริมาณการทับถมน้อยกว่าและกัดเซาะมากกว่า ทั้งนี้เป็นเพราะไม่ได้รวมอิทธิพลดังต่อไปนี้

1) การสะท้อนของคลื่นจากเขื่อน ซึ่งส่งผลให้ความสูงและทิศทางคลื่นที่เคลื่อนเข้าสู่ฝั่งเปลี่ยนแปลงไป
2) ปริมาณตะกอนที่เคลื่อนเข้า/ออกจากฝั่ง
3) การเปลี่ยนแปลงลักษณะคลื่น เพราะชายฝั่งเปลี่ยนรูปไป

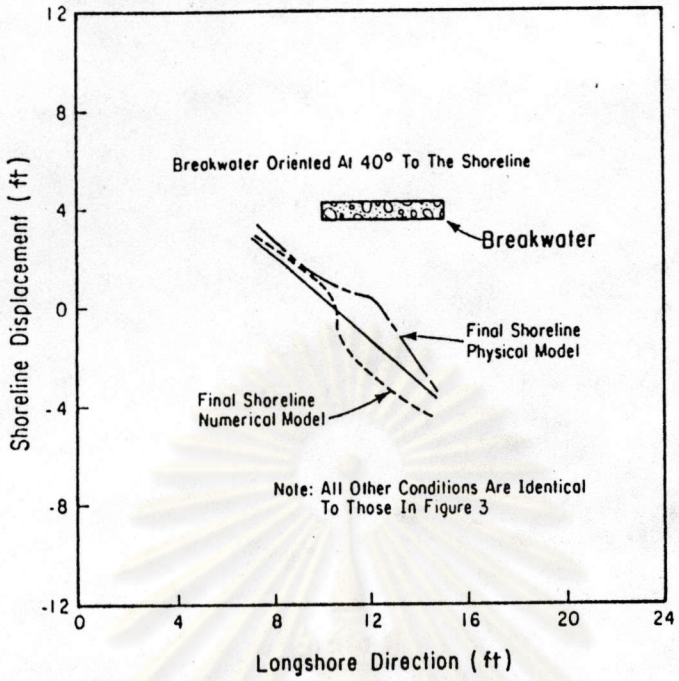
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



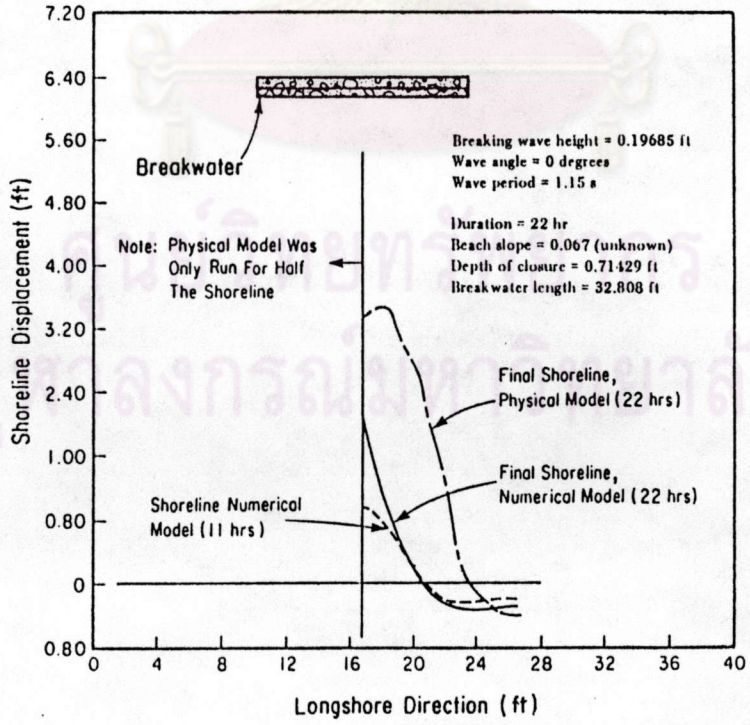
รูป 4-34 เปรียบเทียบกับผลจากแบบจำลองกายภาพของ Shinohara [30]



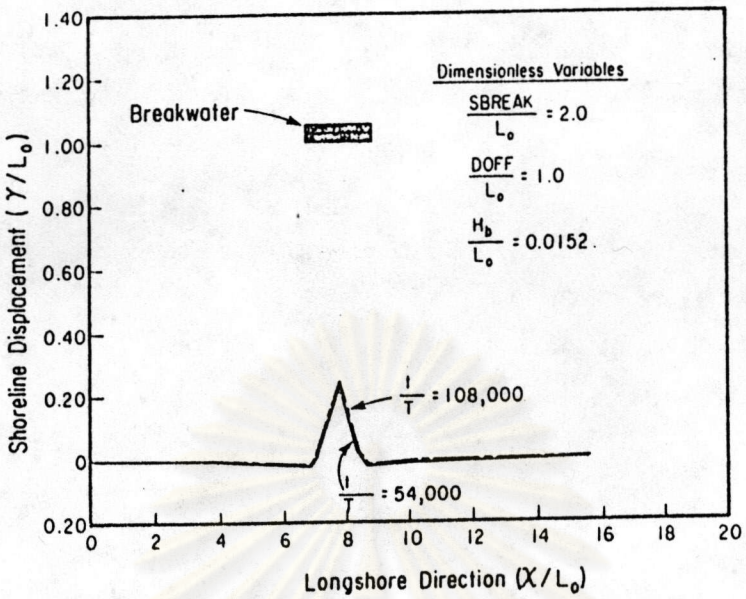
รูป 4-35 เปรียบเทียบกับผลจากแบบจำลองกายภาพของ Sawaragi [30]



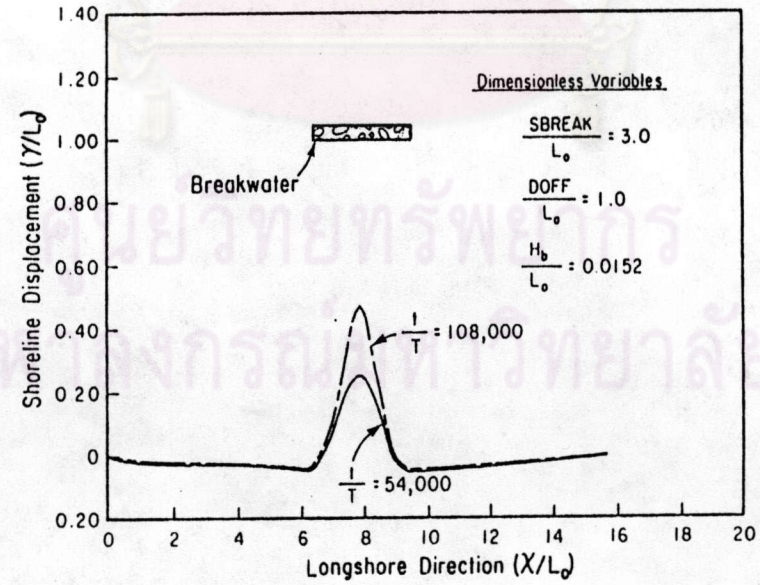
รูป 4-36 เปรียบเทียบกับผลจากแบบจำลองกายภาพของ Sawaragi [30]



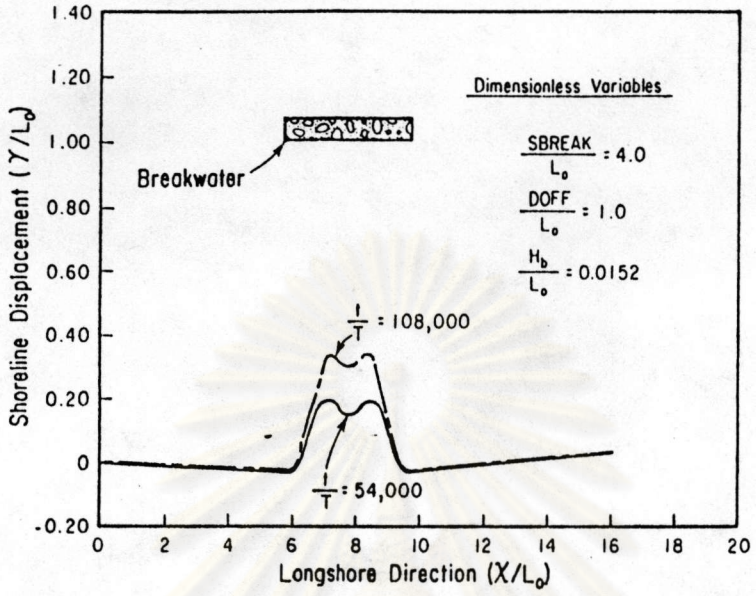
รูป 4-37 เปรียบเทียบกับผลจากแบบจำลองกายภาพของ Horikawa [30]



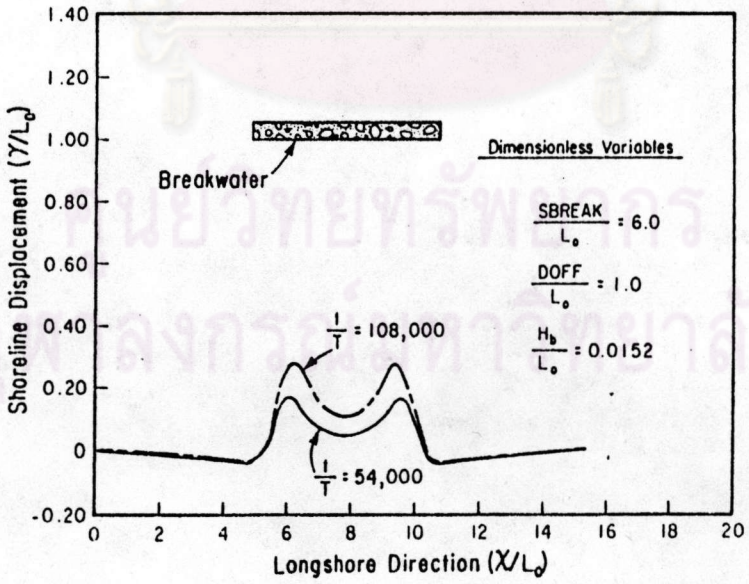
รูป 4-38 ลักษณะชายฝั่ง เมื่อ R = $2L_o$:$1L_o$ [30]



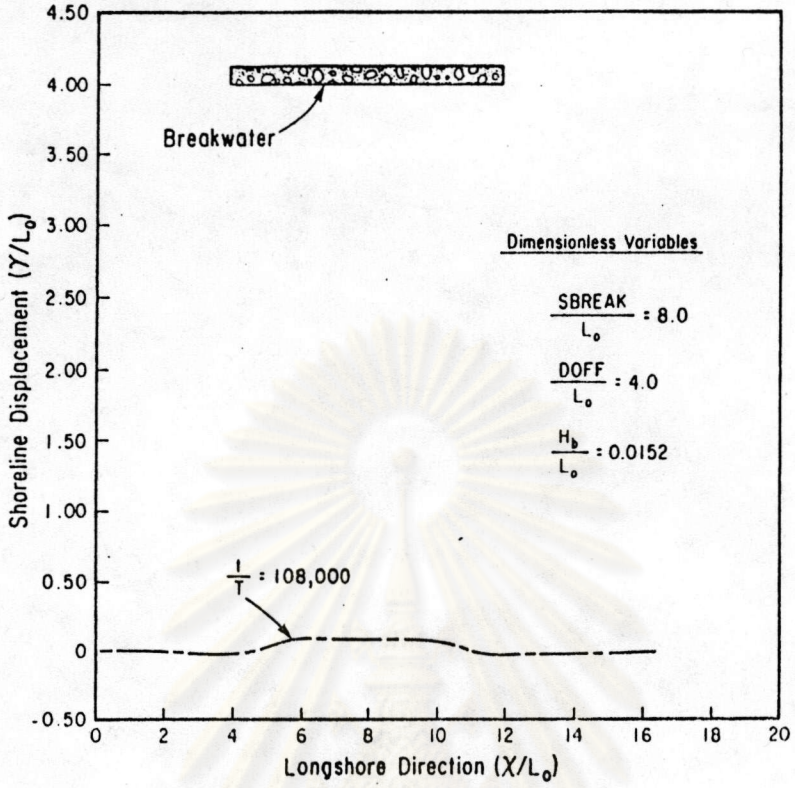
รูป 4-39 ลักษณะชายฝั่ง เมื่อ R = $3L_o$:$1L_o$ [30]



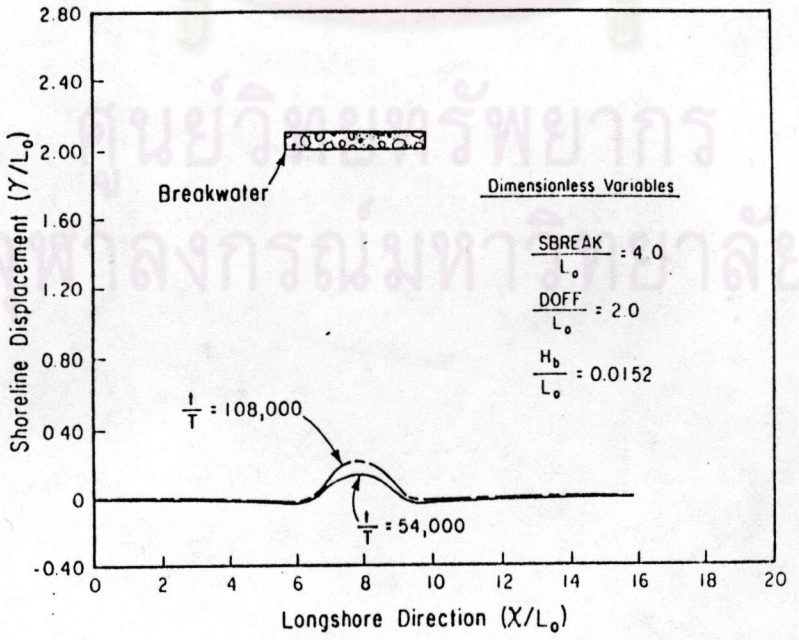
รูป 4-40 ลักษณะชายฝั่ง เมื่อ R = $4L_o$:$1L_o$ [30]



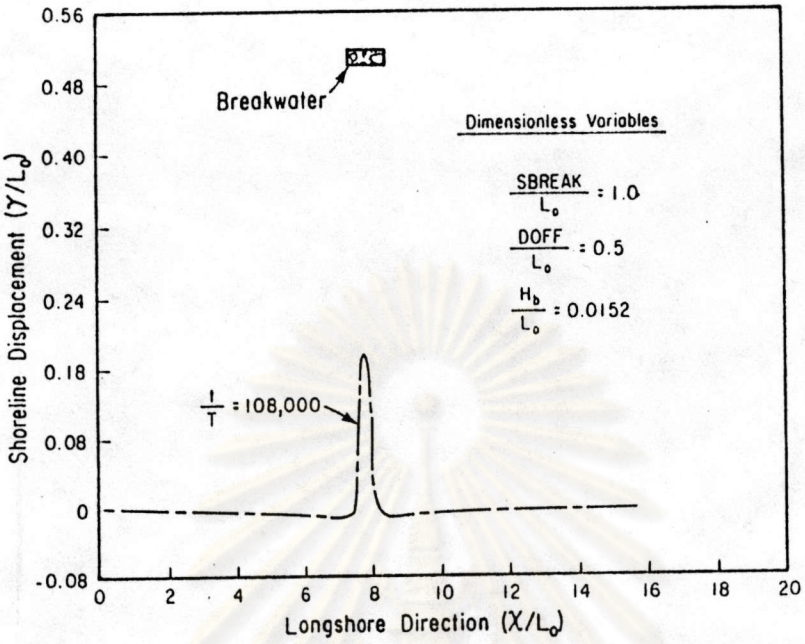
รูป 4-41 ลักษณะชายฝั่ง เมื่อ R = $6L_o$:$1L_o$ [30]



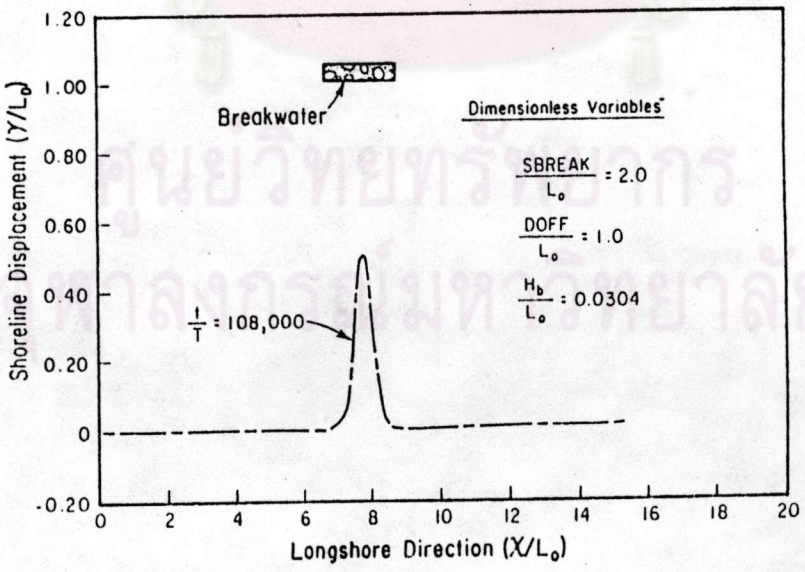
รูป 4-42 ลักษณะชายฝั่ง เมื่อ R = $8L_o$:$4L_o$ [30]



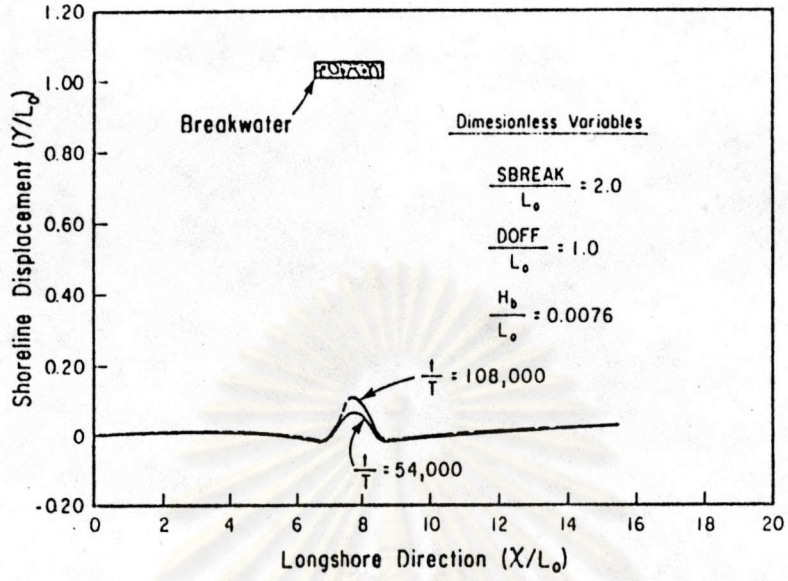
รูป 4-43 ลักษณะชายฝั่ง เมื่อ R = $4L_o$:$2L_o$ [30]



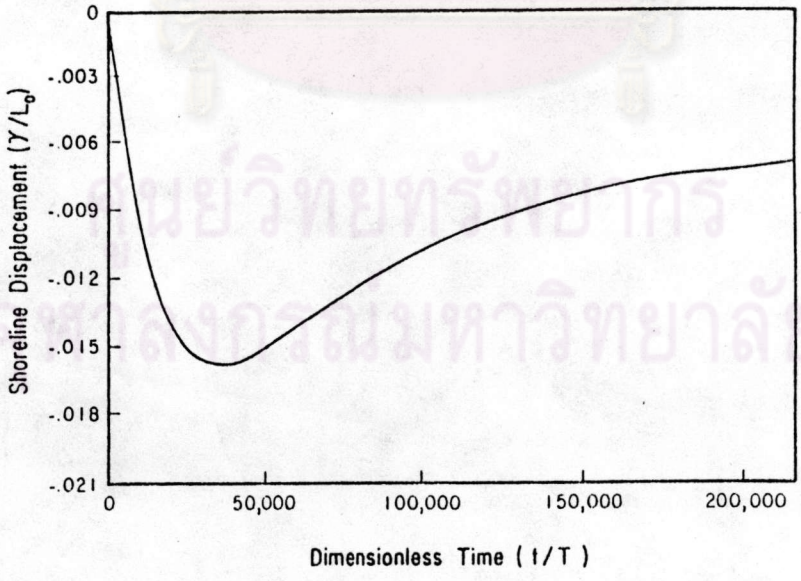
รูป 4-44 ลักษณะชายฝั่ง เมื่อ R = $1L_o$:$0.5L_o$ [30]



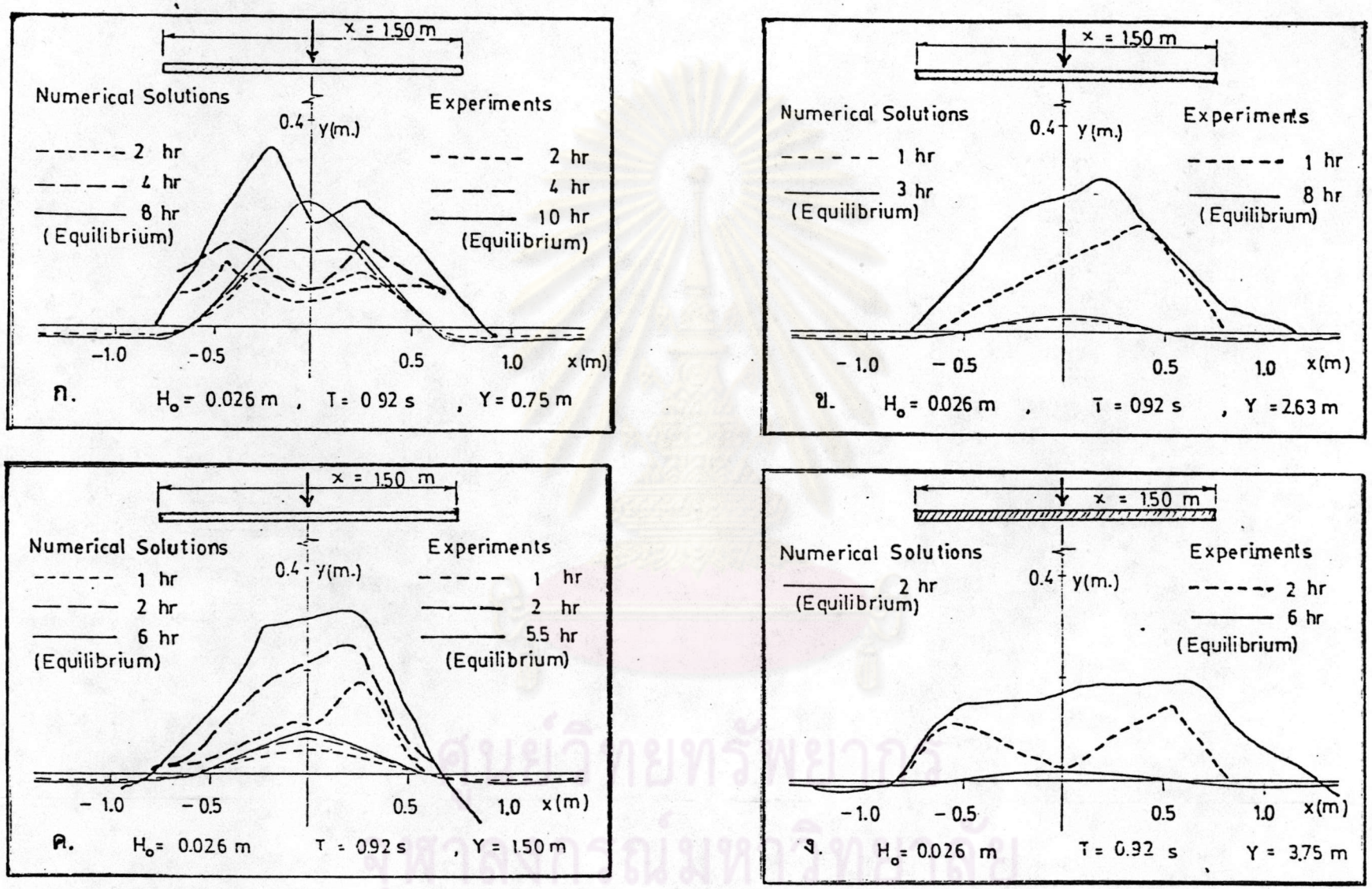
รูป 4-45 ลักษณะชายฝั่ง เมื่อ R = $2L_o$:$1L_o$ [30]



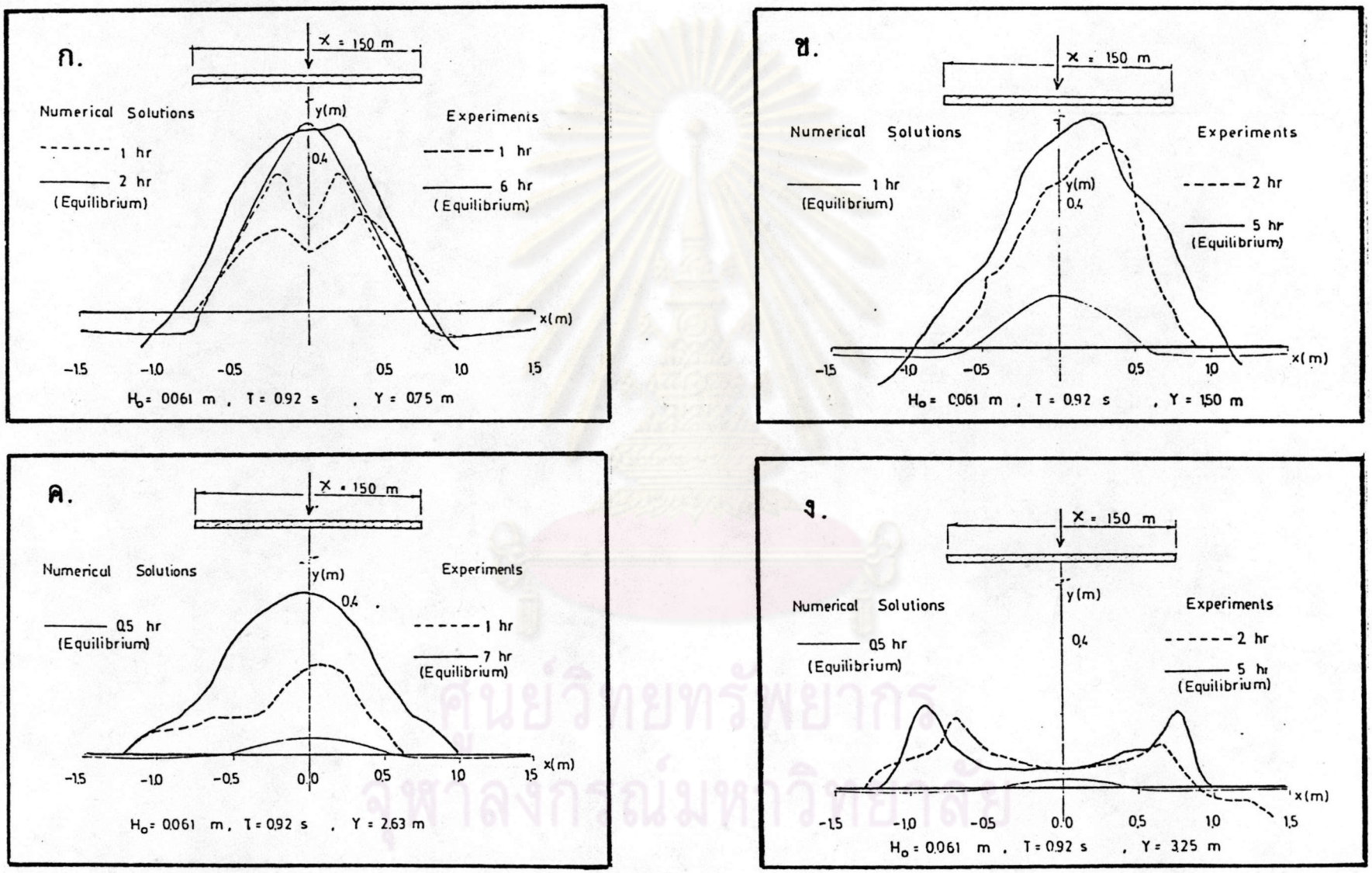
รูป 4-46 ลักษณะชายฝั่ง เมื่อ R = $2L_o$:$1L_o$ [30]



รูป 4-47 การถดถอยชายฝั่งด้านข้างของ tombolo [30]

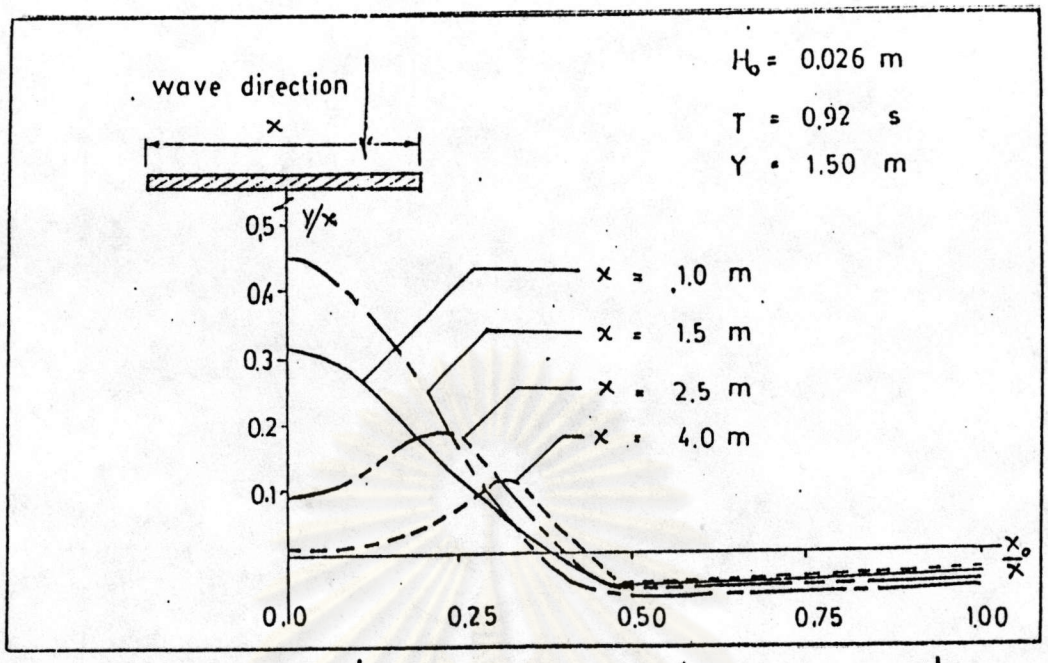


รูป 4-48 เปรียบเทียบกับผลจากแบบจำลองกายภาพของ Shinohara สำหรับ H_o = 0.026 m [31]

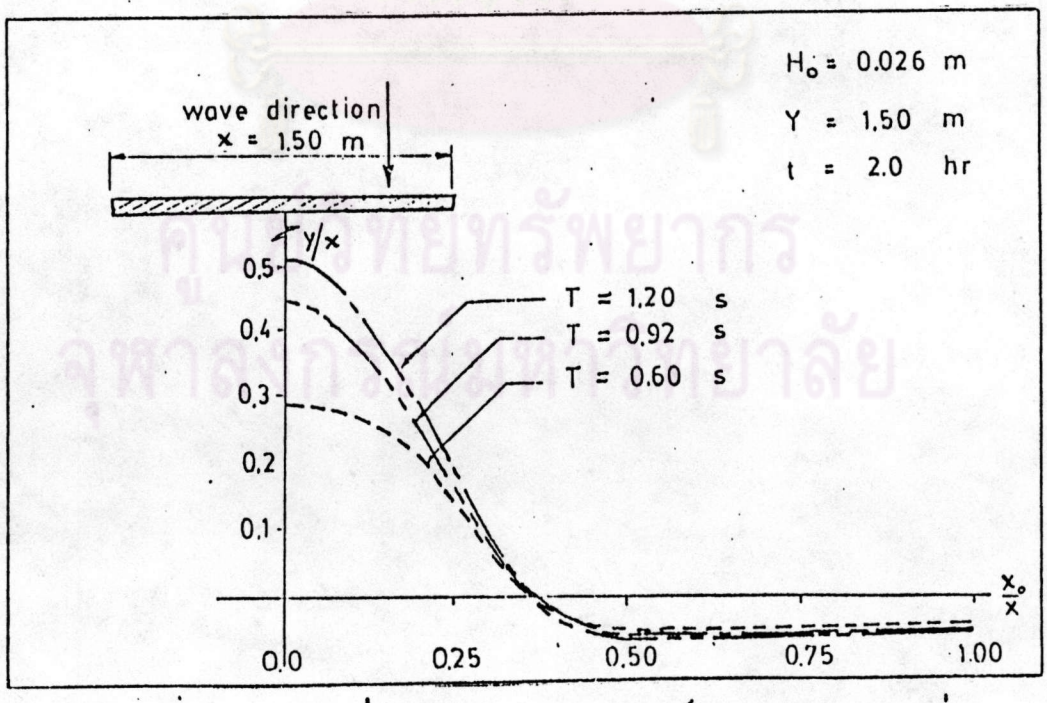


รูป 4-49 เปรียบเทียบกับผลจากแบบจำลองกายภาพของ Shinohara สำหรับ H_o = 0.061 m [31]

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูป 4-50 ลักษณะชายฝั่งจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ โดยแปรความยาวเขื่อน [31]



รูป 4-51 ลักษณะชายฝั่งจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ โดยแปรคาบเวลาคลื่น [31]