

แบบจำลองและผลการทดลอง

ปัญหาเขื่อนแตกเป็นปัญหาที่นักวิจัยให้ความสนใจและนำมาสร้างแบบจำลองเพื่อศึกษา ลักษณะการไหลของน้ำกันเป็นอย่างมาก รวมไปถึงได้มีการศึกษาวิจัยเพื่อหาแนวทางป้องกันหาก เหตุการณ์ดังกล่าวเกิดขึ้นจริง แต่เนื่องจากปัญหาเขื่อนแตกนี้เป็นปัญหาที่มีผู้ให้ความสนใจกัน อย่างแพร่หลาย นับจากในอดีตจวบจนถึงในปัจจุบันทำให้ปัญหานี้ถูกนำไปใช้อ้างอิงและใช้ ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองนั้น ๆ รวมไปถึงวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ที่จะได้นำปัญหาเขื่อน แตกมาเป็นเครื่องมือเพื่อใช้ในการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

ปัญหาเขื่อนแตกที่ถูกนำไปใช้อ้างอิงโดยส่วนใหญ่จะแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ปัญหาด้าน ทำน้ำเปียก กล่าวคือพื้นที่ทางด้านท้ายน้ำจะมีน้ำอยู่ และปัญหาด้านทำน้ำแห้ง กล่าวคือพื้นที่ ทางด้านท้ายน้ำจะแห้งหรือไม่มีน้ำอยู่เลย ซึ่งจากงานวิจัยในอดีตทำให้ทราบได้ว่าปัญหาทั้งสอง กรณีนี้ให้คำตอบที่แตกต่างกัน แต่สิ่งสำคัญก็คือเมื่อปัญหาเหล่านี้มีแรงภายนอกมากกระทำคำตอบ ของแต่ละปัญหาจะเปลี่ยนไปอย่างไร ซึ่งแรงภายนอกที่ได้กล่าวถึงนี้ก็คือน พจน์แหล่งต้นทางนั่นเอง

4.1 ปัญหาเขื่อนสี่เหลี่ยมแตกกรณีพื้นฝั่งท้ายน้ำแห้ง (dry bed rectangular dam-break problem)

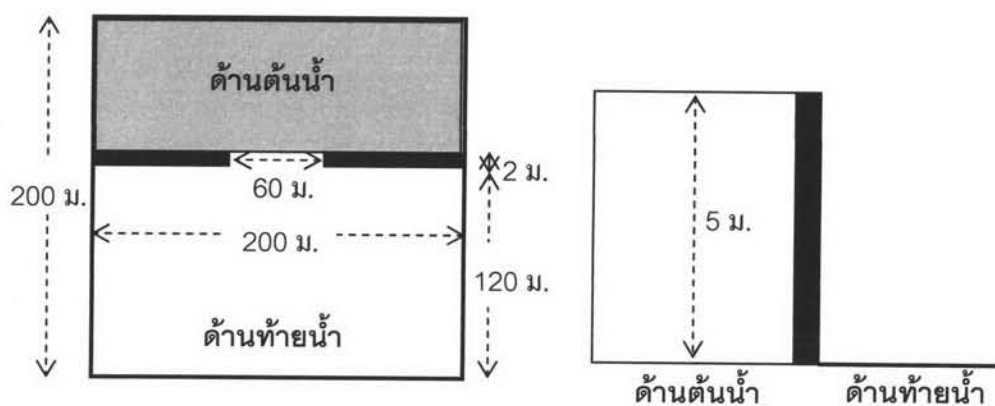
จุดประสงค์ของการศึกษากกรณีนี้เพื่อศึกษาลักษณะและรูปแบบของคลื่นที่เคลื่อนตัวผ่าน ประตูเขื่อนไปยังด้านท้ายน้ำที่เป็นลักษณะพื้นแห้ง โดยที่พื้นเป็นพื้นเรียบปราศจากแรงเสียดทาน ลักษณะของแบบจำลองนี้มีผู้ที่ได้ทำการศึกษาไว้ก่อนหน้านี้ เช่น Valiani, Caleffi, และ Zanni [13, 17], Stephen และ Christopher [18], Wang และ He [1]

รายละเอียดของกรณีศึกษานี้คือ บริเวณที่พิจารณามีความกว้าง 200 เมตร และความยาว 200 เมตร เขื่อนกั้นน้ำหนา 2 เมตรและตั้งอยู่ห่างจากขอบทางด้านท้ายน้ำ (downstream) เป็น ระยะทาง 120 เมตร ประตูน้ำอยู่ตรงกลางเขื่อนซึ่งมีความกว้างประตูน้ำ 60 เมตร ระดับความสูง ของน้ำทางด้านต้นน้ำ (upstream) มีความสูง 5 เมตร และด้านท้ายน้ำไม่มีน้ำ

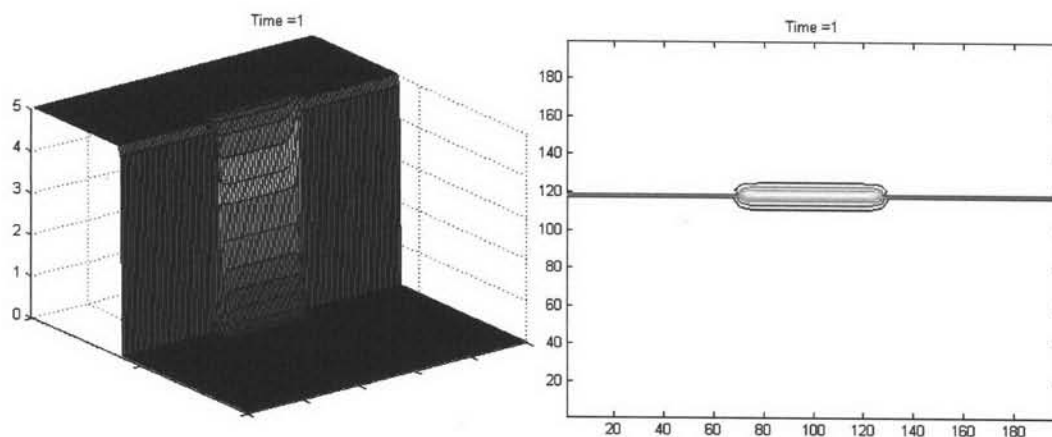
รายละเอียดของค่าตัวแปรที่ใช้ในกรณีศึกษานี้คือ ค่าแรงโน้มถ่วงโลกเท่ากับ 9.8 เมตรต่อ วินาที<sup>2</sup> ขนาดของกริดเซลล์ความกว้าง ( $\Delta x$ ) 2 เมตร และความยาว ( $\Delta y$ ) 2 เมตร ผลต่างของ เวลา ( $\Delta t$ ) เท่ากับ 0.02 วินาที เวลาทั้งหมดของแบบจำลองเท่ากับ 6 วินาที กำหนดค่าความ

ผิดพลาดเท่ากับ  $10^{-10}$  เงื่อนไขค่าขอบเป็นแบบผนังและใช้วิธีของ HLLC ที่ให้ค่าความถูกต้องอันดับสองแบบตัวปรับค่าความชันมินมอดในการประมาณค่าของปัญหาวิมานน์

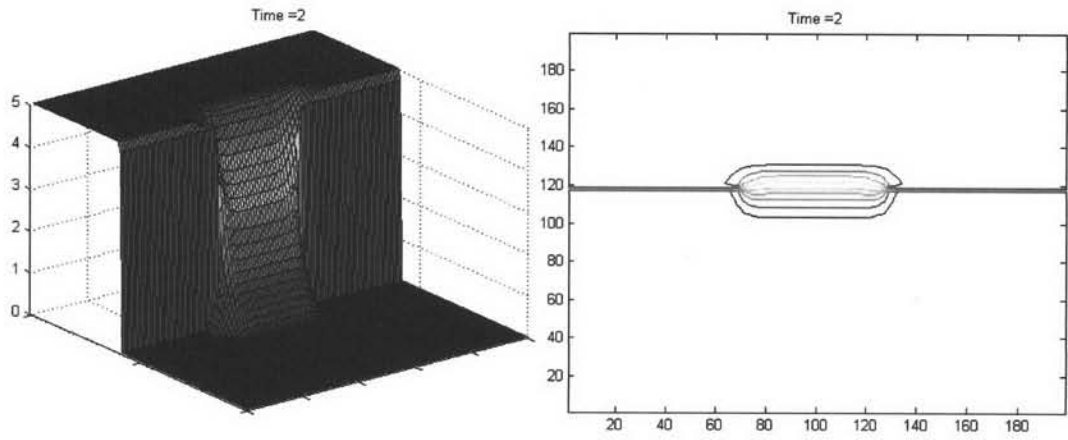
ผลที่ได้จากแบบจำลองนี้เมื่อได้ทดลองเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ได้มีผู้ทำไว้ในอดีตพบว่ามีความใกล้เคียงกัน และค่าความถูกต้องอันดับสองแบบตัวปรับค่าความชันมินมอดให้ค่าดีที่สุดเมื่อเทียบกับตัวปรับค่าความชันวิธีอื่น ๆ และจากรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าลักษณะของหน้าคลื่นราบเรียบไม่เกิดปรากฏการณ์คลื่นช็อค (shock wave) แต่อย่างไรก็ตาม สำหรับกรณีศึกษาที่เวลา 6 วินาที น้ำยังเคลื่อนที่ไม่ถึงขอบ ซึ่งหมายความว่า เงื่อนไขค่าขอบไม่ส่งผลกระทบต่อรูปแบบของคลื่น



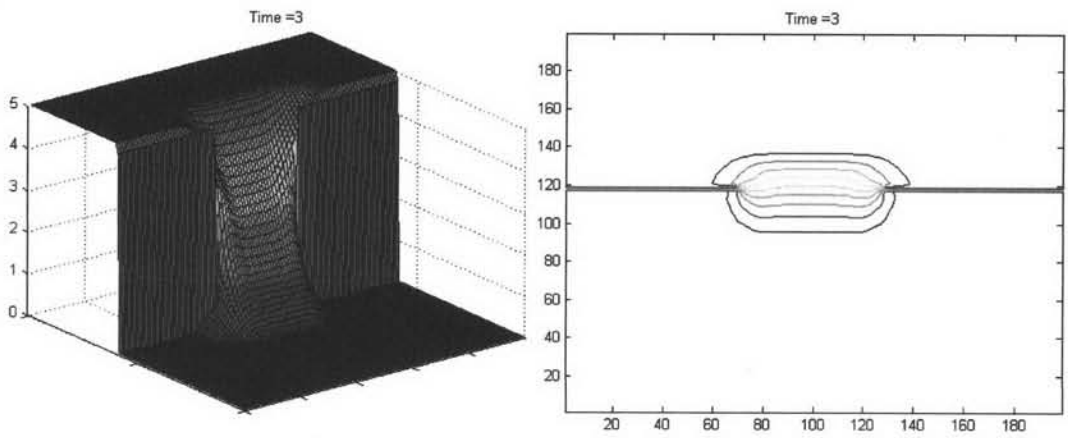
(a) โครงสร้างของแบบจำลอง



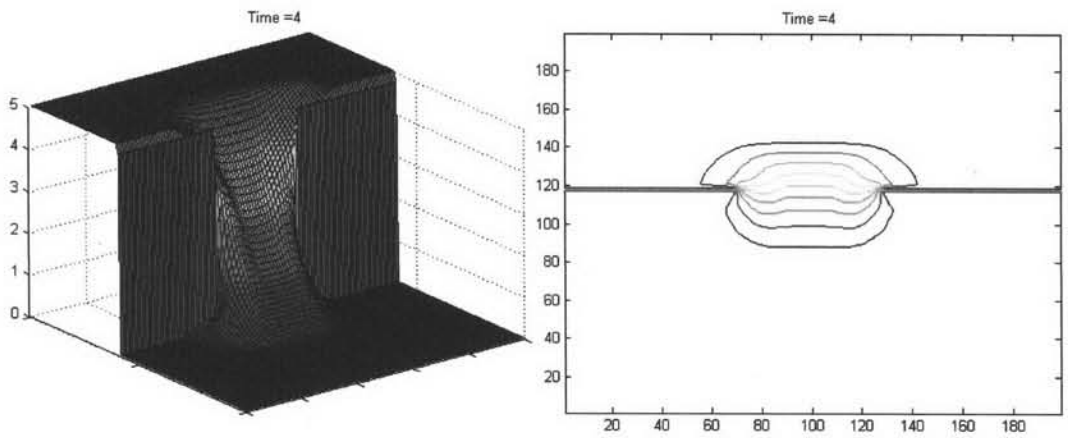
(b) ที่เวลา 1 วินาที



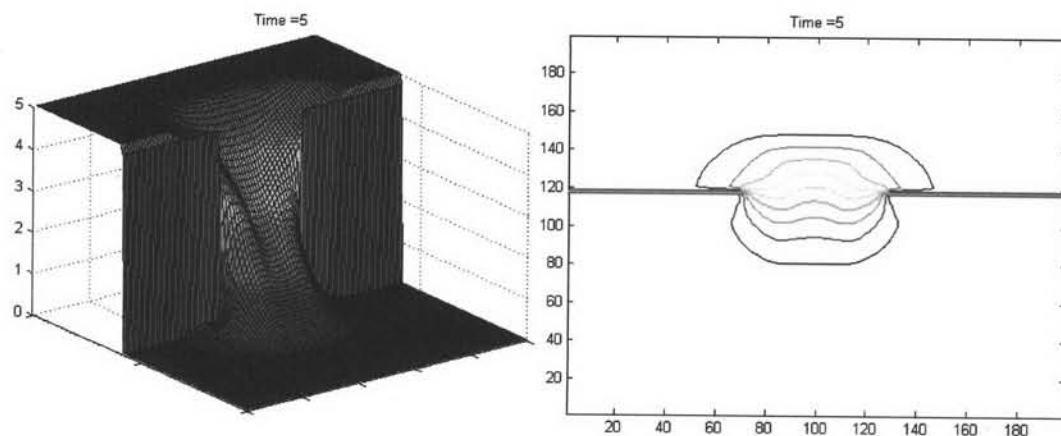
(c) ที่เวลา 2 วินาที



(d) ที่เวลา 3 วินาที



(e) ที่เวลา 4 วินาที



(f) ที่เวลา 5 วินาที

รูปที่ 4.1 (a) แสดงโครงสร้างของแบบจำลองสำหรับปัญหาเขื่อนแตกกรณีน้ำแห้ง

รูป (b-f) แสดงภาพจำลองในแต่ละเวลาของปัญหาเขื่อนแตกกรณีน้ำแห้ง

รูป (ซ้าย) คือรูปแบบการไหลของน้ำเมื่อเขื่อนแตก และ (ขวา) คือเส้นคอนทัวร์ (contour line)

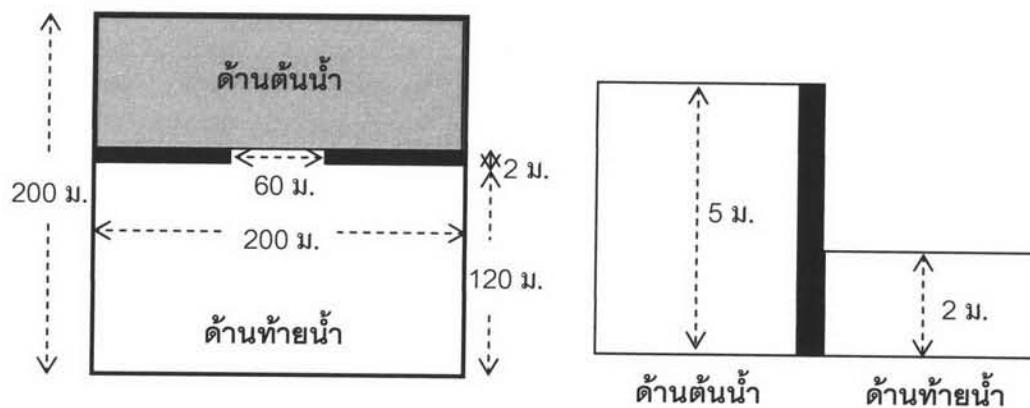
#### 4.2 ปัญหาเขื่อนสี่เหลี่ยมแตกกรณีพื้นฝั่งท้ายน้ำเปียก (wet bed rectangular dam-break problem)

จุดประสงค์ของการศึกษานี้เพื่อศึกษาลักษณะและรูปแบบของคลื่นที่เคลื่อนตัวผ่านประตูเขื่อนไปยังด้านท้ายน้ำที่เป็นลักษณะพื้นเปียก โดยที่พื้นเป็นพื้นเรียบปราศจากแรงเสียดทาน ลักษณะของแบบจำลองนี้มีผู้ที่ได้ทำการศึกษาไว้ก่อนหน้านี้ เช่น Valiani, Caleffi, และ Zanni [13], Zhao, Shen, Tabios, Lai และ Tan, [19], Alcrudo และ Garcia – Navarro [11], Fennema และ Chaudhry [20], Ambrosi [21], Sleight, Gaskell, Berzins และ Wright [22]

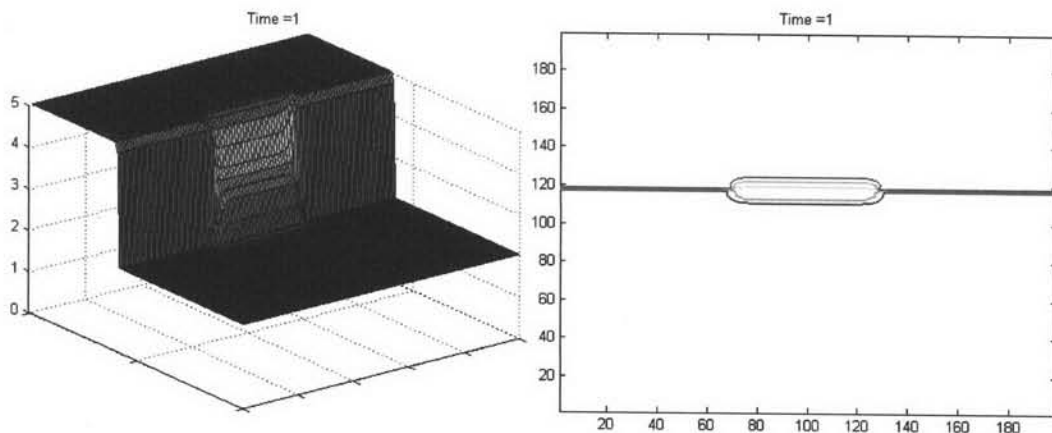
รายละเอียดของกรณีศึกษานี้คือ บริเวณที่พิจารณามีความกว้าง 200 เมตร และความยาว 200 เมตร เขื่อนกั้นน้ำหนา 2 เมตรและตั้งอยู่ห่างจากขอบทางด้านท้ายน้ำเป็นระยะทาง 120 เมตร ประตูน้ำอยู่ตรงกลางเขื่อนซึ่งมีความกว้างประตูน้ำ 60 เมตร ระดับความสูงของน้ำทางด้านต้นน้ำมีความสูง 5 เมตร และทางด้านท้ายน้ำมีความสูง 2 เมตร

รายละเอียดของค่าตัวแปรที่ใช้ในกรณีศึกษานี้คือ ค่าแรงโน้มถ่วงโลกเท่ากับ 9.8 เมตรต่อวินาที<sup>2</sup> ขนาดของกริดเซลล์ความกว้าง ( $\Delta x$ ) 2 เมตร และความยาว ( $\Delta y$ ) 2 เมตร ผลต่างของเวลา ( $\Delta t$ ) เท่ากับ 0.02 วินาที เวลาทั้งหมดของแบบจำลองเท่ากับ 6 วินาที กำหนดค่าความผิดพลาดเท่ากับ  $10^{-10}$  เงื่อนไขขอบเป็นแบบผนังและใช้วิธีของ HLLC ที่ให้ค่าความถูกต้องอันดับสองแบบตัวปรับค่าความชันมินมอดในการประมาณค่าของปัญหาริมนันท์

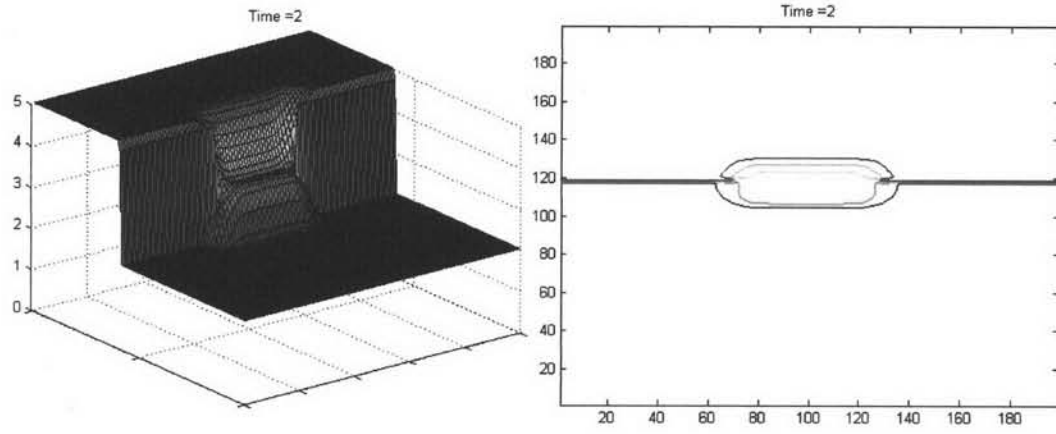
จากแบบจำลองนี้ เมื่อได้ทดลองใช้วิธีของ Roe ที่ให้ค่าความถูกต้องอันดับหนึ่งในการประมาณค่าของปัญหาที่มันพบ ทำให้ค่าใกล้เคียงกับวิธีของ HLLC ดังนั้นวิธีของ Roe จึงเหมาะสมสำหรับกรณีนี้ เนื่องจากค่าความถูกต้องอันดับหนึ่งให้ค่าที่ใกล้เคียงค่าความถูกต้องอันดับสอง และจากรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าลักษณะของหน้าคลื่นเกิดปรากฏการณ์ช็อคเวฟ กล่าวคือ คลื่นมีความชันมากจนเกือบจะตั้งฉากกับแนวราบ



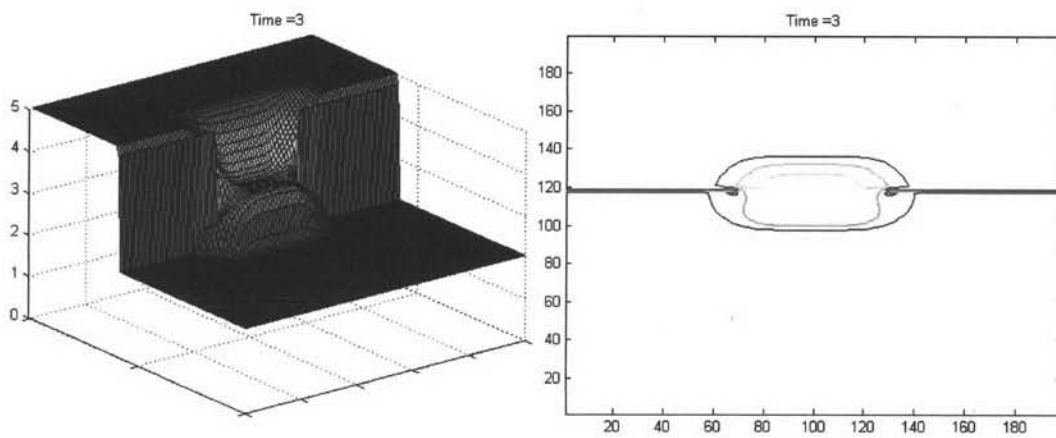
(a) โครงสร้างของแบบจำลอง



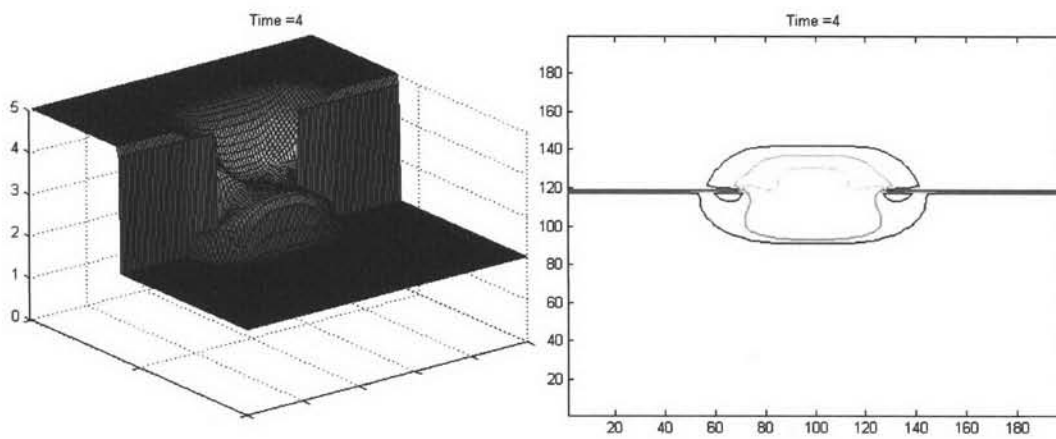
(b) ที่เวลา 1 วินาที



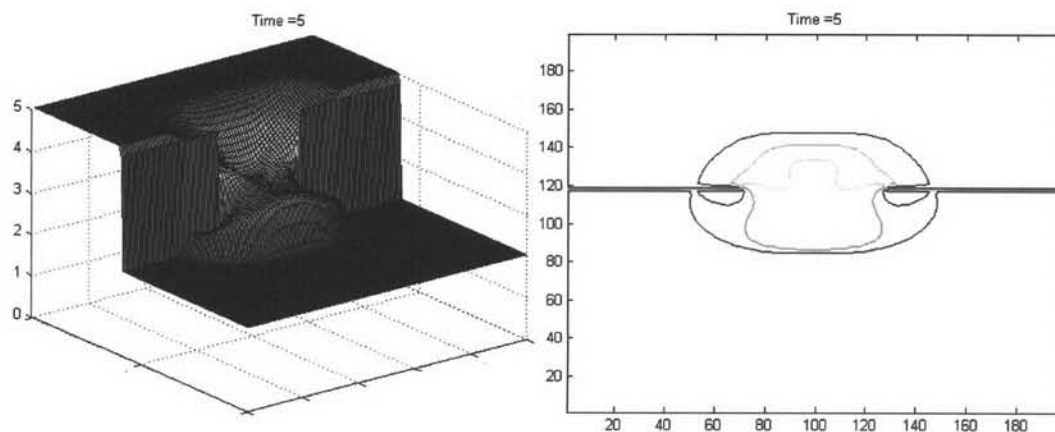
(c) ที่เวลา 2 วินาที



(d) ที่เวลา 3 วินาที



(e) ที่เวลา 4 วินาที



(f) ที่เวลา 5 วินาที

รูปที่ 4.2 (a) แสดงโครงสร้างของแบบจำลองสำหรับปัญหาเขื่อนแตกกรณีพื้นฝั่งท้ายน้ำเปียก  
รูป (b-f) แสดงภาพจำลองในแต่ละเวลาของปัญหาเขื่อนแตกกรณีพื้นฝั่งท้ายน้ำเปียก  
รูป (ซ้าย) คือรูปแบบการไหลของน้ำเมื่อเขื่อนแตก และ (ขวา) คือเส้นคอนทัวร์

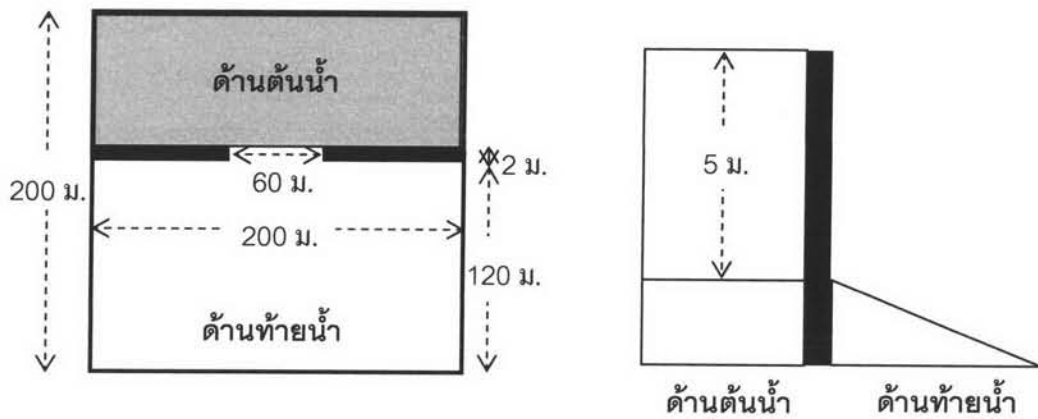
#### 4.3 ปัญหาเขื่อนสี่เหลี่ยมแตกกรณีพื้นฝั่งท้ายน้ำแห้งที่มีความลาดชันและแรงเสียดทาน (dry bed rectangular dam-break problem with bottom slope and bottom friction)

จุดประสงค์ของการศึกษานี้เพื่อศึกษาลักษณะและรูปแบบของคลื่นที่เคลื่อนตัวผ่านประตูเขื่อนไปยังด้านท้ายน้ำที่เป็นลักษณะพื้นแห้ง โดยที่พื้นเป็นพื้นเรียบแต่มีความลาดชันและแรงเสียดทาน ลักษณะของแบบจำลองนี้มีผู้ที่ได้ทำการศึกษาไว้ก่อนหน้า เช่น Alcudo และ Garcia - Navarro [23], Bermudez และ Vazquez [24]

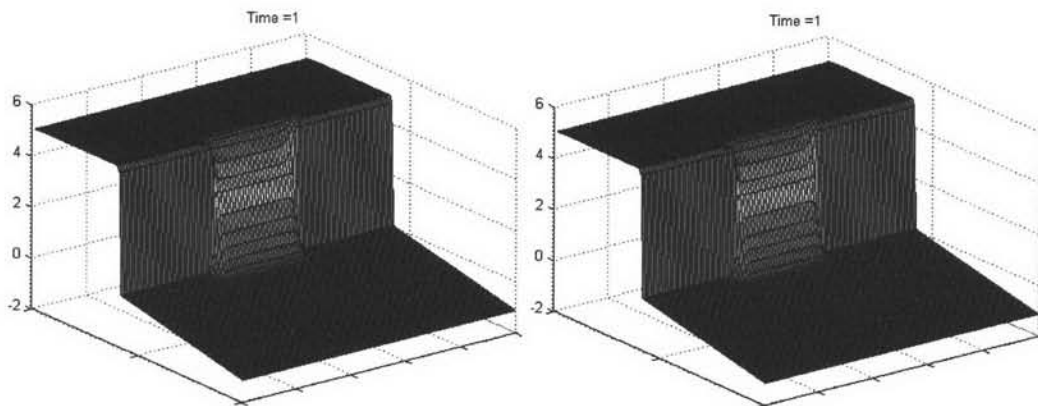
รายละเอียดของกรณีศึกษานี้คือ บริเวณที่พิจารณามีความกว้าง 200 เมตร และความยาว 200 เมตร เขื่อนกั้นน้ำหนา 2 เมตรและตั้งอยู่ห่างจากขอบทางด้านท้ายน้ำเป็นระยะทาง 120 เมตร ประตูน้ำอยู่ตรงกลางเขื่อนซึ่งมีความกว้างประตูน้ำ 60 เมตร ระดับความสูงของน้ำทางด้านต้นน้ำมีความสูง 5 เมตร ทางด้านท้ายน้ำมีความลาดชันเท่ากับ 0.01 และมีสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ  $0.015 \text{ วินาที} \cdot \text{เมตร}^{-1/3}$

รายละเอียดของค่าตัวแปรที่ใช้ในกรณีศึกษานี้คือ ค่าแรงโน้มถ่วงโลกเท่ากับ 9.8 เมตรต่อวินาที<sup>2</sup> ขนาดของกริดเซลล์ ความกว้าง ( $\Delta x$ ) 2 เมตร และความยาว ( $\Delta y$ ) 2 เมตร ผลต่างของเวลา ( $\Delta t$ ) เท่ากับ 0.02 วินาที เวลาทั้งหมดของแบบจำลองเท่ากับ 6 วินาที กำหนดค่าความผิดพลาดเท่ากับ  $10^{-10}$  เงื่อนไขขอบเป็นแบบผนังและใช้วิธีของ HLLC ที่ให้ค่าความถูกต้องอันดับสองแบบตัวปรับค่าความชันมินิมอดในการประมาณค่าของปัญหาที่นิ่ง

จากรูปที่ 4.3-d (ซ้าย) เมื่อเปรียบเทียบกับ รูปที่ 4.3-d (ขวา) แสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนที่ของน้ำเมื่อพื้นผิวมีความลาดชันแต่ปราศจากแรงเสียดทาน หน้าคลื่นจะราบเรียบ ซึ่งแตกต่างอย่างเห็นได้ชัดกับพื้นผิวที่มีความลาดชันและมีแรงเสียดทาน ซึ่งหน้าคลื่นจะเกิดการต้านการเคลื่อนที่ ทำให้เห็นหน้าคลื่นในลักษณะตั้งชันไม่ราบเรียบเหมือนในกรณีปราศจากแรงเสียดทาน ทั้งนี้เป็นเพราะแรงเสียดทานที่เกิดขึ้น ซึ่งจากการทดลองเมื่อค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของแมนนิ่งมีค่ามากขึ้น พบว่าหน้าคลื่นจะเกิดลักษณะตั้งชันมากขึ้น ซึ่งลักษณะของการเคลื่อนที่แบบนี้มีความใกล้เคียงกับงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมาและสอดคล้องกับความเป็นจริง อย่างไรก็ตาม สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของแมนนิ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดของพื้นผิวด้วย

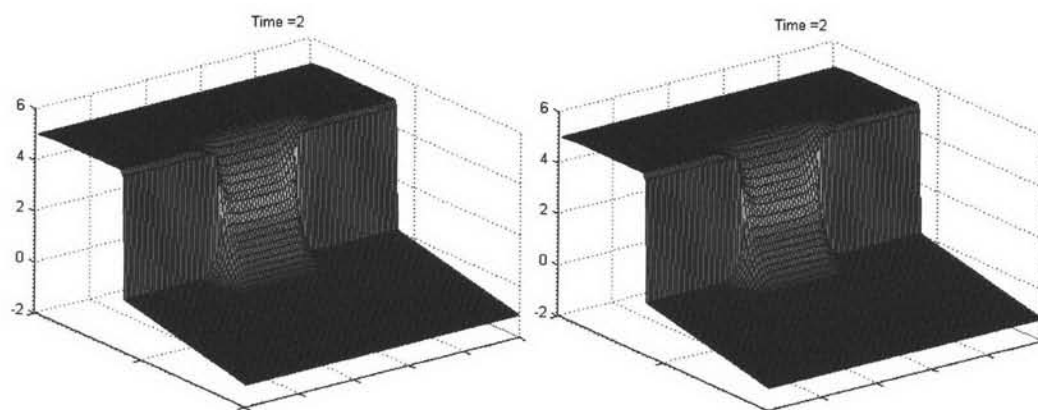


(a) โครงสร้างของแบบจำลอง

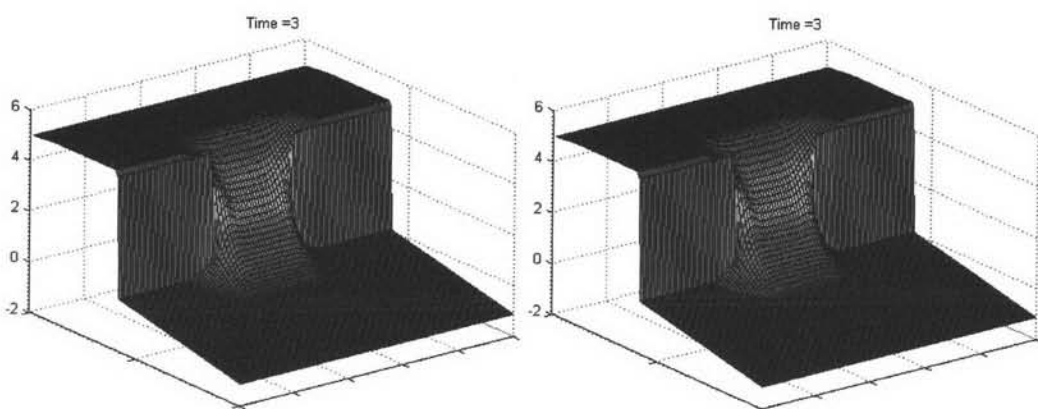


(b) ที่เวลา 1 วินาที

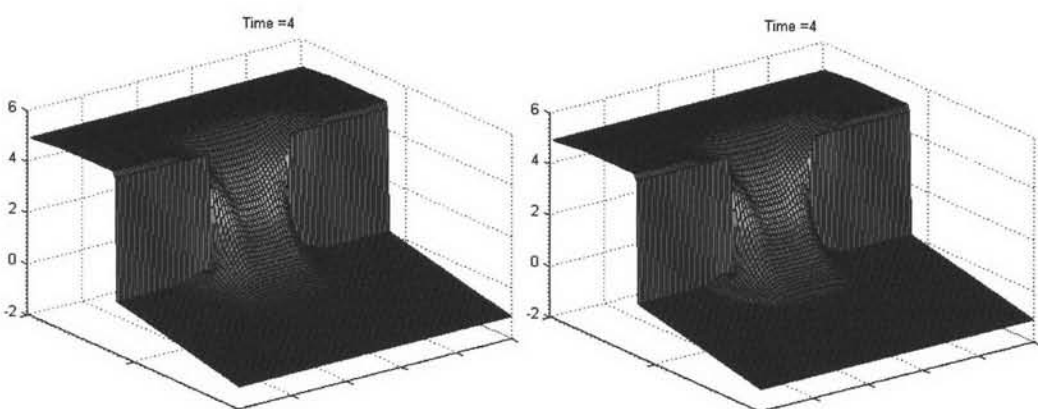




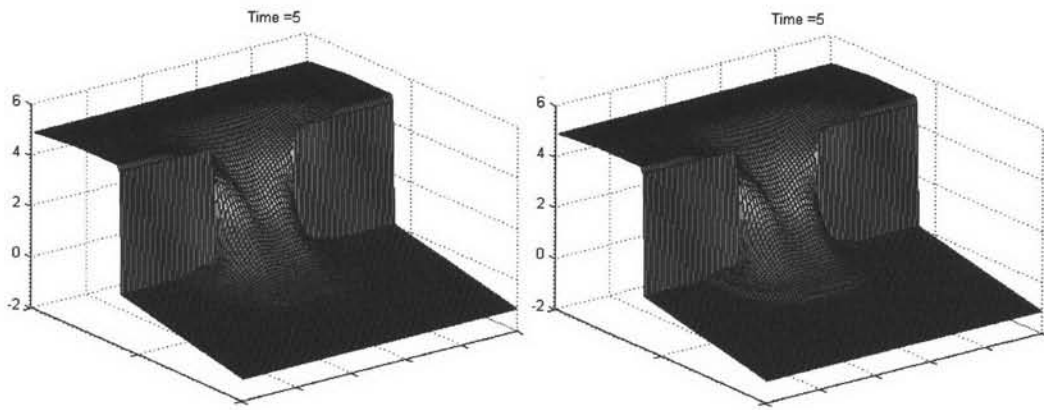
(c) ที่เวลา 2 วินาที



(d) ที่เวลา 3 วินาที



(e) ที่เวลา 4 วินาที



(f) ที่เวลา 5 วินาที

รูปที่ 4.3 (a) แสดงโครงสร้างของแบบจำลองสำหรับปัญหาเขื่อนแตกกรณีพื้นผิวมีความลาดชัน รูป (b-f) แสดงภาพจำลองเปรียบเทียบปัญหาเขื่อนแตกเมื่อ รูป (ซ้าย) คือพื้นผิวมีความลาดชันแต่ไม่มีแรงเสียดทาน และ รูป (ขวา) คือพื้นผิวมีความลาดชันและมีแรงเสียดทาน

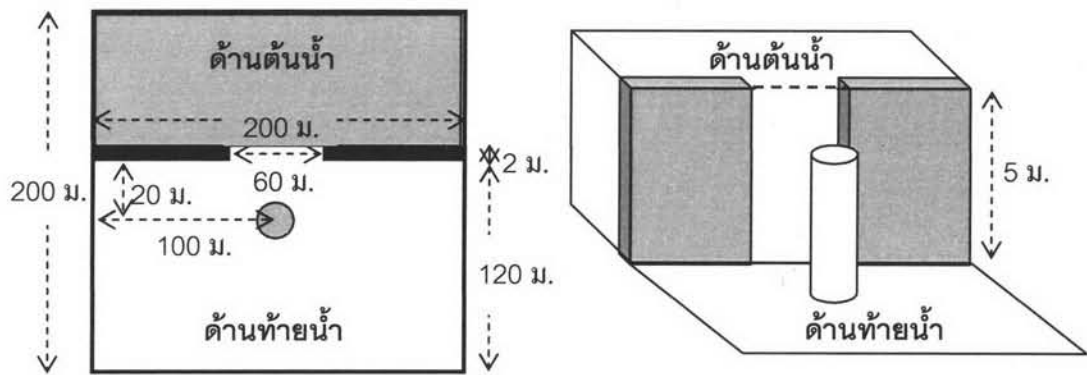
#### 4.4 ปัญหาเขื่อนสี่เหลี่ยมแตกกรณีที่มีวัตถุกีดขวาง (rectangular dam-break flow pass problem)

จุดประสงค์ของการศึกษาคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาลักษณะและรูปแบบของคลื่นที่เคลื่อนตัวผ่านประตูเขื่อนไปยังด้านท้ายน้ำที่เป็นลักษณะพื้นแข็ง โดยที่พื้นเป็นพื้นเรียบปราศจากแรงเสียดทาน โดยมีวัตถุรูปทรงกระบอกวางขวางทางการเคลื่อนตัวของน้ำ

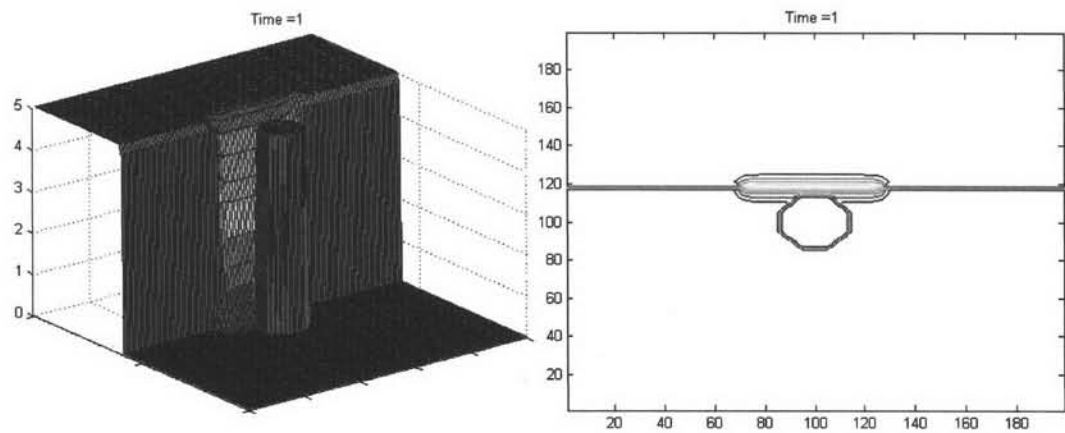
รายละเอียดของกรณีศึกษานี้คือ บริเวณที่พิจารณามีความกว้าง 200 เมตร และความยาว 200 เมตร เขื่อนกั้นน้ำหนา 2 เมตรและตั้งอยู่ห่างจากขอบทางด้านท้ายน้ำเป็นระยะทาง 120 เมตร ประตูน้ำอยู่ตรงกลางเขื่อนซึ่งมีความกว้างประตูน้ำ 60 เมตร ระดับความสูงของน้ำทางด้านต้นน้ำมีความสูง 5 เมตร และทางด้านท้ายน้ำไม่มีน้ำแต่มีสิ่งกีดขวางที่มีลักษณะเป็นทรงกระบอกซึ่งมีจุดศูนย์กลางอยู่ห่างจากเขื่อน 20 เมตร และอยู่ห่างจากขอบของโดเมน 100 เมตร และมีรัศมี 14 เมตร

รายละเอียดของค่าตัวแปรที่ใช้ในกรณีศึกษานี้คือ ค่าแรงโน้มถ่วงโลกเท่ากับ 9.8 เมตรต่อวินาที<sup>2</sup> ขนาดของกริดเซลล์ความกว้าง ( $\Delta x$ ) 2 เมตร และความยาว ( $\Delta y$ ) 2 เมตร ผลต่างของเวลา ( $\Delta t$ ) เท่ากับ 0.02 วินาที เวลาทั้งหมดของแบบจำลองเท่ากับ 6 วินาที กำหนดค่าความผิดพลาดเท่ากับ  $10^{-10}$  เงื่อนไขค่าขอบเป็นแบบผนังและใช้วิธีของ HLLC ที่ให้ค่าความถูกต้องอันดับสองแบบตัวปรับค่าความชันมีนمودในการประมาณค่าของปัญหาริมนันท์

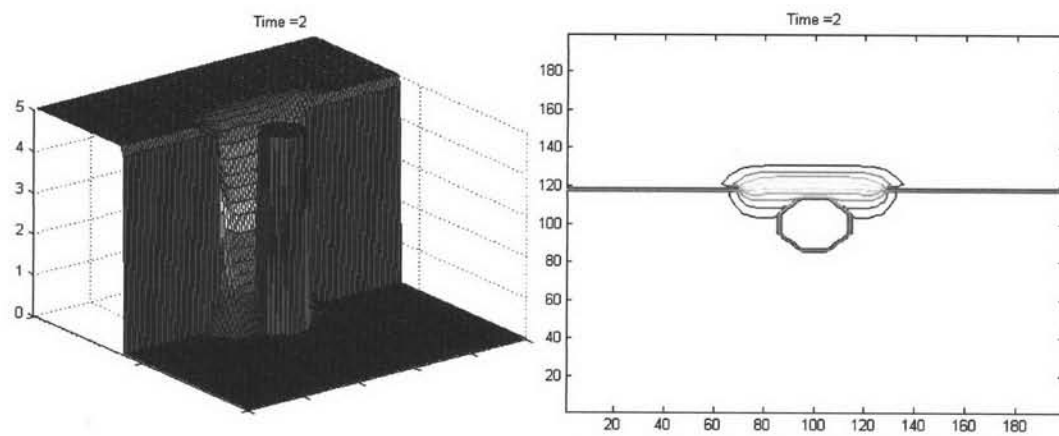
จากรูปที่ 4.4 พบว่าเมื่อน้ำไหลผ่านวัตถุทรงกระบอกที่วางขวางทางน้ำไหลอยู่นั้นน้ำจะไหลอ้อมวัตถุ รูปทรงของวัตถุที่ขวางมีผลต่อการไหลของน้ำและจะช่วยลดความเร็วของน้ำลงบ้าง ซึ่งจากรูปที่ 4.4 เมื่อเปรียบเทียบกับรูปที่ 4.1 พบว่าระยะทางของคลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านวัตถุที่ขวางนี้จะไปได้ไกลน้อยกว่าเมื่อไม่มีสิ่งกีดขวาง ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพในความเป็นจริง ทั้งนี้วัตถุทรงกระบอกที่วางขวางอยู่นั้นได้ถูกสมมุติให้มีความแข็งแรงไม่ทลาย ดังนั้นเมื่อพิจารณาบริเวณผิวของทรงกระบอกนี้ถือได้ว่าเป็นปัญหาค่าขอบแบบหนึ่ง นั่นคือจะส่งผลให้น้ำที่ไหลมาชนวัตถุนี้จะสะท้อนกลับออกไป ซึ่งลักษณะดังกล่าวนี้ได้เลือกใช้ปัญหาค่าขอบแบบนอนมันน์



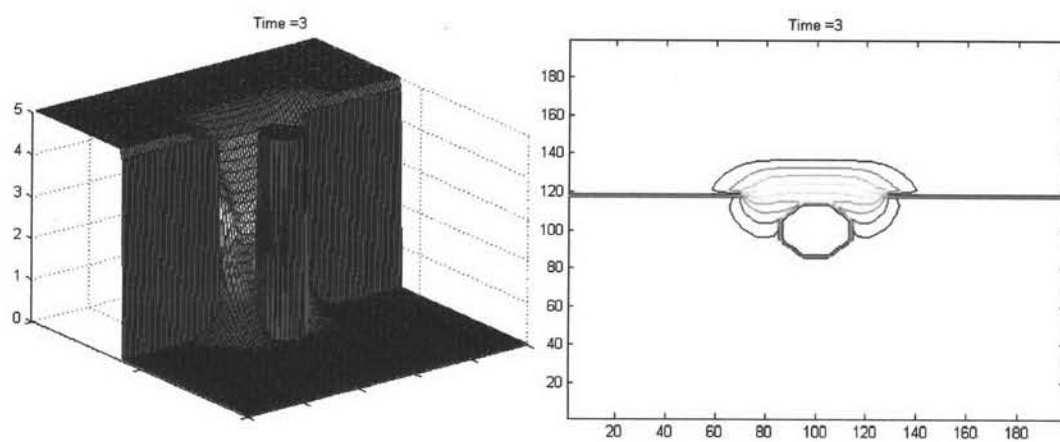
(a) โครงสร้างของแบบจำลอง



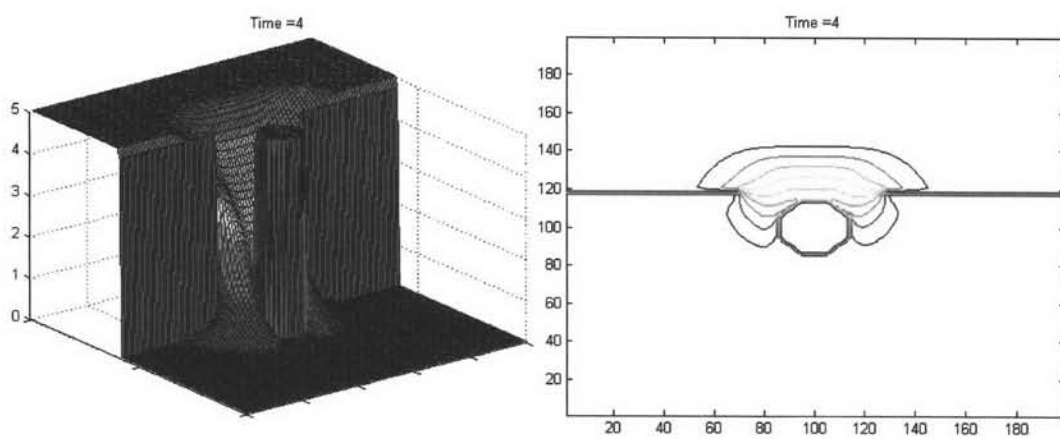
(b) ที่เวลา 1 วินาที



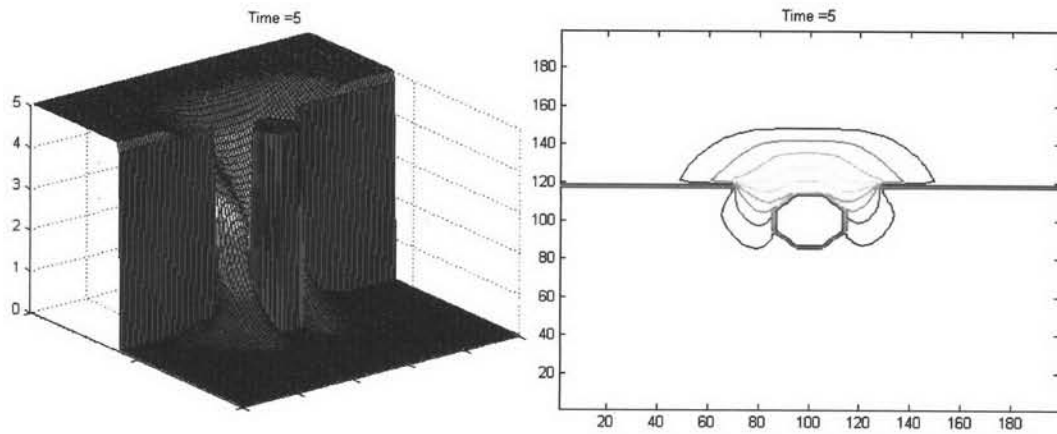
(c) ที่เวลา 2 วินาที



(d) ที่เวลา 3 วินาที



(e) ที่เวลา 4 วินาที



(f) ที่เวลา 5 วินาที

**รูปที่ 4.4** (a) แสดงโครงสร้างของแบบจำลองสำหรับปัญหาเขื่อนแตกกรณีที่มีวัตถุกีดขวาง  
รูป (a-f) แสดงภาพจำลองในแต่ละเวลาของปัญหาเขื่อนแตกกรณีที่มีวัตถุกีดขวาง  
รูป (ซ้าย) คือรูปแบบการไหลของน้ำเมื่อเขื่อนแตก และ (ขวา) คือเส้นคอนทัวร์

เพื่อเป็นการยืนยันคำตอบที่ได้จากแบบจำลองจึงจำเป็นต้องทำการเปรียบเทียบคำตอบที่ได้กับผลการทดลอง ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะได้ทำการเปรียบเทียบกับการทดลองในสองลักษณะคือ ผลการทดลองเมื่อไม่มีสิ่งกีดขวาง (Fraccarollo and Toro 1995) และผลการทดลองเมื่อมีสิ่งกีดขวาง (laboratory of the Civil and Environmental Engineering Department of the University catholique de Louvain (UCL) in Belgium) โดยในแต่ละการทดลองจะมีเครื่องมือวัดระดับความสูงของน้ำวางในตำแหน่งต่าง ๆ เพื่อทำการเก็บข้อมูลความสูงของระดับน้ำที่เวลาเปลี่ยนแปลงไป และนำข้อมูลความสูงของระดับน้ำที่ได้จากการทดลองนั้น ๆ มาทำการเปรียบเทียบกับคำตอบที่ได้จากแบบจำลอง

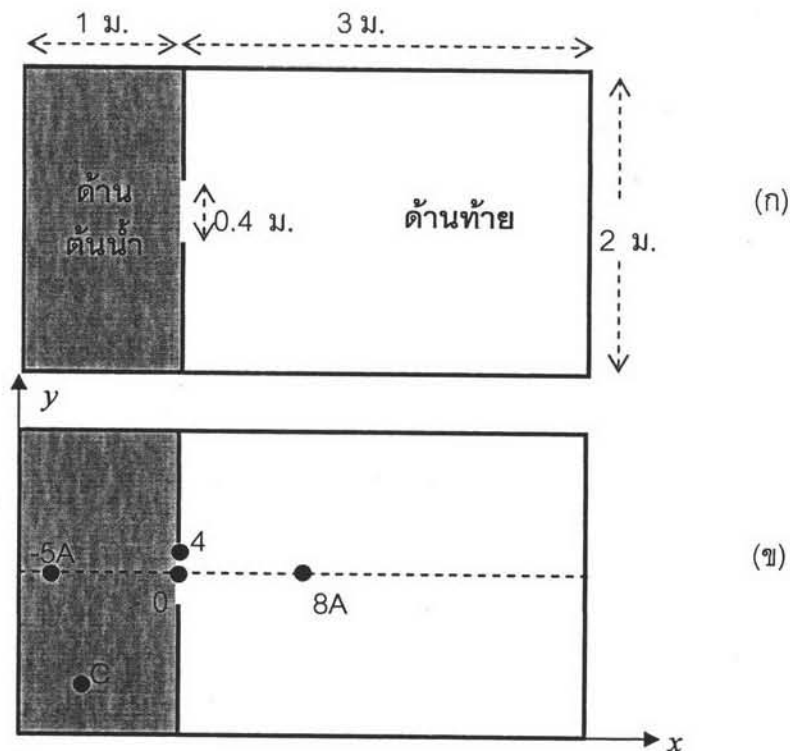
#### 4.5 ผลการทดลองเมื่อไม่มีสิ่งกีดขวาง (experiment without obstacle)

ผลการทดลองนี้จำลองมาจากปัญหาเขื่อนแตก [25] โดยออกแบบให้แบบจำลองมีความกว้าง 2 เมตร ความยาว 4 เมตร โดยมีเขื่อนกั้นน้ำตั้งอยู่ห่างจากขอบทางด้านท้ายน้ำเป็นระยะทาง 3 เมตร ประตูน้ำอยู่ตรงกลางเขื่อนซึ่งมีความกว้างประตูน้ำ 0.4 เมตร ระดับความสูงของน้ำทางด้านต้นน้ำมีความสูง 0.6 เมตร และทางด้านท้ายน้ำไม่มีน้ำ โดยขอบของด้านต้นน้ำเป็นแบบปิด และขอบของด้านท้ายน้ำเป็นแบบเปิด และได้ทำการวางเครื่องมือวัดระดับน้ำในตำแหน่งต่าง ๆ รวมห้าตำแหน่งซึ่งแสดงตำแหน่งของเครื่องมือวัดระดับน้ำในตารางที่ 4.1

รายละเอียดของค่าตัวแปรที่ใช้ในกรณีศึกษาี้คือ ค่าแรงโน้มถ่วงโลกเท่ากับ 9.8 เมตรต่อวินาที<sup>2</sup> ขนาดของกริดเซลล์ความกว้าง ( $\Delta x$ ) 0.00125 เมตร และความยาว ( $\Delta y$ ) 0.00125 เมตร ผลต่างของเวลา ( $\Delta t$ ) เท่ากับ 0.0025 วินาที เวลาทั้งหมดของแบบจำลองเท่ากับ 10 วินาที กำหนดค่าความผิดพลาดเท่ากับ  $10^{-10}$  และใช้วิธีของ HLLC ที่ให้ค่าความถูกต้องอันดับสองแบบตัวปรับค่าความชันมินมอดในการประมาณค่าของปัญหาที่รัน

การทดลองนี้ถูกออกแบบให้พื้นที่กักเก็บน้ำทางด้านต้นน้ำเป็นในลักษณะของผนัง และพื้นที่ทางด้านท้ายน้ำเปิดโล่ง ดังนั้นการทดลองนี้จึงจำเป็นต้องนำเงื่อนไขปัญหาค่าขอบแบบผนังมาประยุกต์ใช้กับขอบทางด้านต้นน้ำ และเงื่อนไขค่าขอบแบบนอยมันน์มาประยุกต์ใช้กับขอบทางด้านท้ายน้ำ ซึ่งพบว่าเมื่อน้ำไหลมาชนขอบทางด้านท้ายน้ำจะไม่เกิดการไหลสะท้อนกลับมาแต่อย่างใด ในทำนองกลับกันน้ำทางด้านต้นน้ำจะเกิดการแกว่ง ดังรูปที่ 4.6-a และ 4.6-b อันเนื่องมาจากการสะท้อนกลับของน้ำที่บริเวณขอบของฝั่งต้นน้ำ

ในผลการทดลองนี้ได้มีการเปรียบเทียบผลระหว่างวิธีปริมาตรจำกัดและวิธีผลต่างสืบเนื่องซึ่งทั้งสองวิธีต่างก็เลือกใช้ค่าความถูกต้องอันดับสองเช่นกัน ซึ่งจากรูปที่ 4.6 พบว่าวิธีปริมาตรจำกัดให้ค่าที่ใกล้เคียงกับผลการทดลองอยู่ในเกณฑ์ดี ดังแสดงค่าความผิดพลาดแบบรากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสอง (root mean square error) ในตารางที่ 4.2



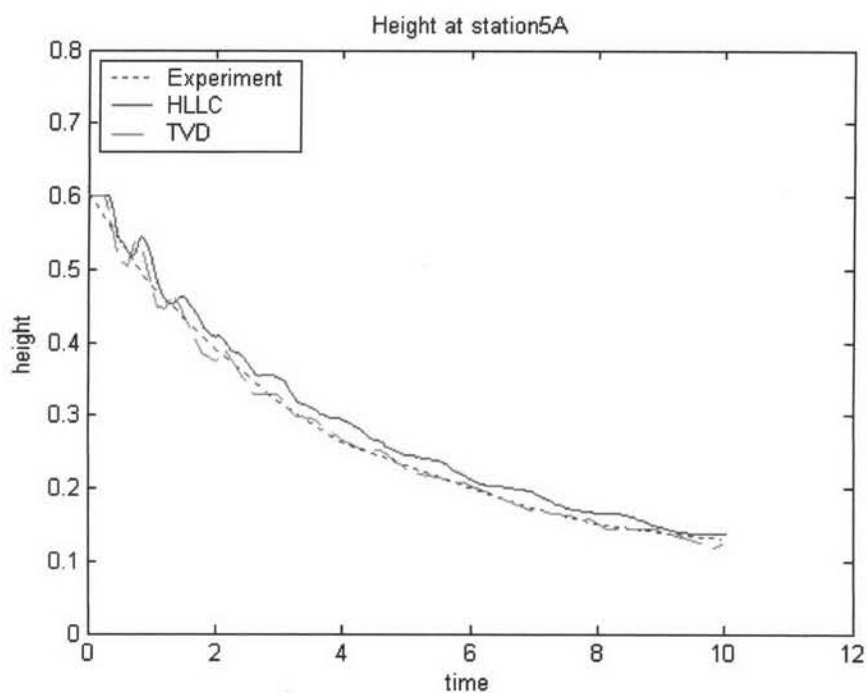
รูปที่ 4.5 แสดงโครงสร้างของแบบจำลองกรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง

รูป (ก) แสดงโครงสร้างของแบบจำลองเมื่อมองจากด้านบน

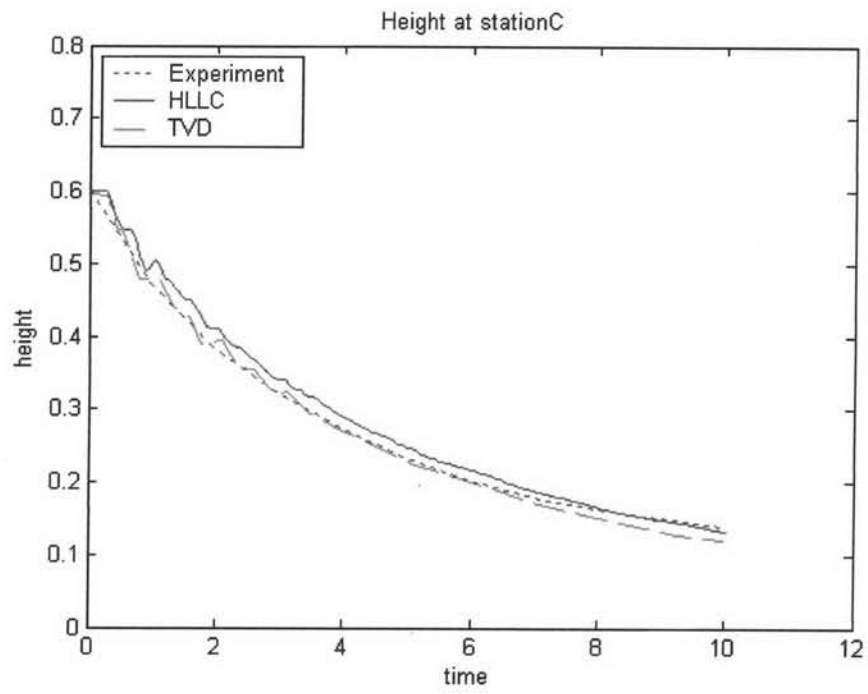
รูป (ข) แสดงตำแหน่งอุปกรณ์วัดระดับความสูง

ตำแหน่ง อุปกรณ์วัด	-5A	C	4	0	8A
$x$ (เมตร)	0.18	0.48	1.00	1.00	1.722
$y$ (เมตร)	1.00	0.40	1.16	1.00	1.00

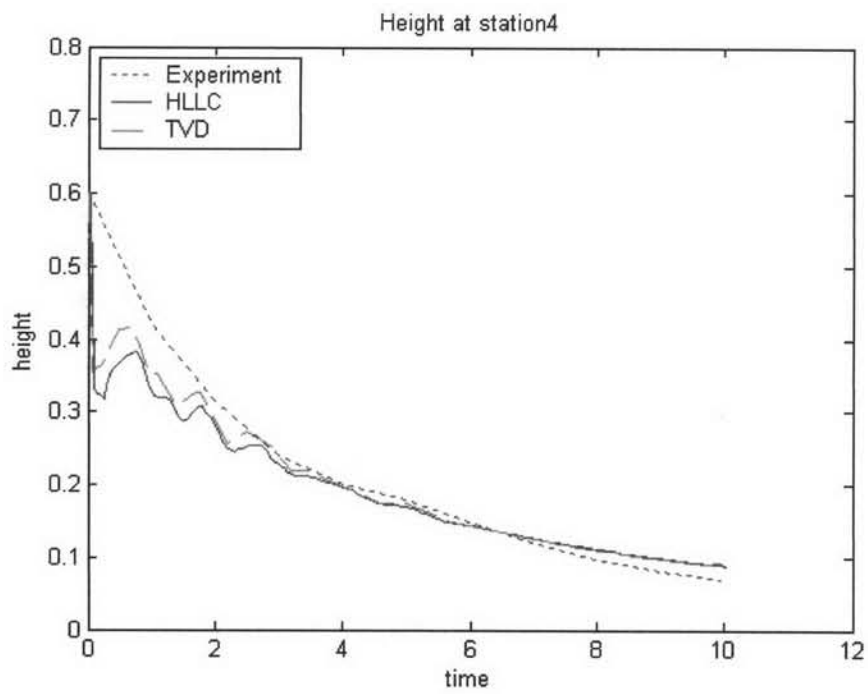
ตารางที่ 4.1 แสดงพิกัดตำแหน่งของอุปกรณ์วัดระดับความสูงของน้ำ  
สำหรับกรณีผลการทดลองเมื่อไม่มีสิ่งกีดขวาง



(a) แสดงระดับความสูงของน้ำ ณ ตำแหน่งวัดระดับน้ำที่ -5A

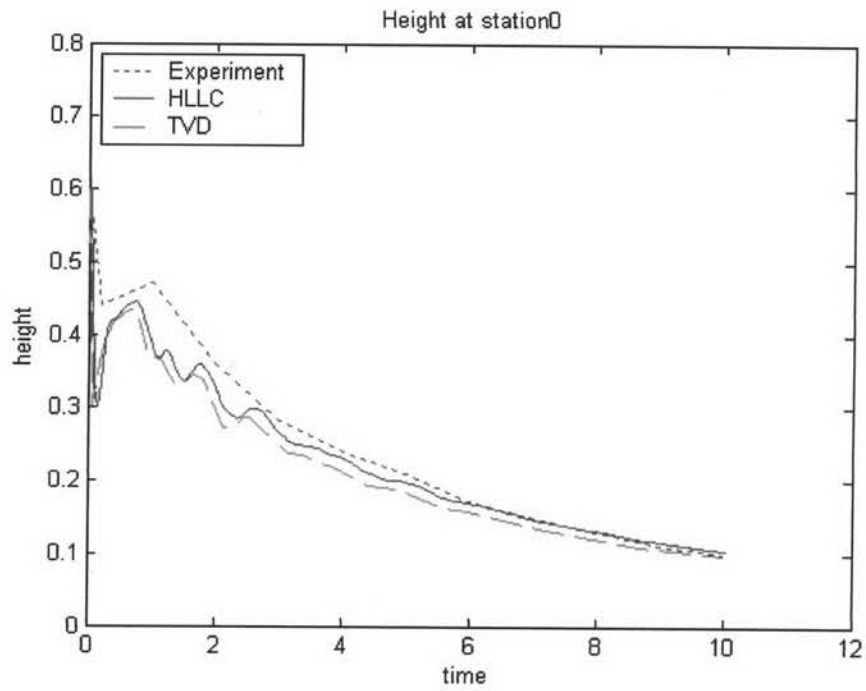


(b) แสดงระดับความสูงของน้ำ ณ ตำแหน่งวัดระดับน้ำที่ C

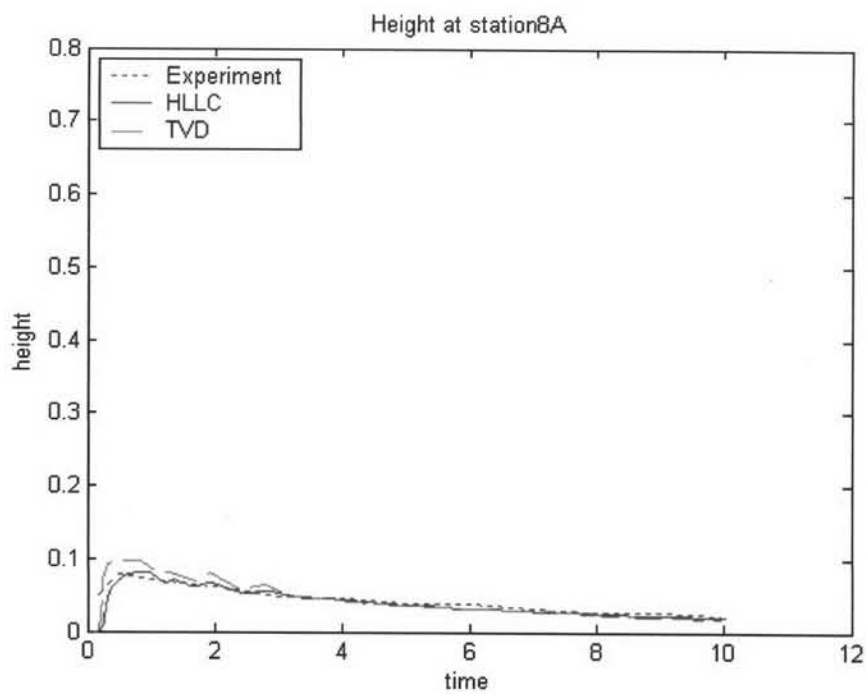


(c) แสดงระดับความสูงของน้ำ ณ ตำแหน่งวัดระดับน้ำที่ 4





(d) แสดงระดับความสูงของน้ำ ณ ตำแหน่งวัดระดับน้ำที่ 0



(e) แสดงระดับความสูงของน้ำ ณ ตำแหน่งวัดระดับน้ำที่ 8A

รูปที่ 4.6 (a-e) แสดงระดับความสูงของน้ำเมื่อเปรียบเทียบระหว่าง ผลการทดลองกับคำตอบเชิงตัวเลขของ HLLC และ TVD ในกรณีไม่มีสิ่งกีดขวาง

	HLLC	TVD
Gate 0	0.006421	0.042433
Gate 4	0.008616	0.045651
Gate 5A	0.002034	0.009123
Gate 8A	0.001624	0.020416
Gate C	0.001670	0.010557

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความผิดพลาดแบบรากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองระหว่างวิธีของ HLLC และวิธีของ TVD

#### 4.6 ผลการทดลองที่มีสิ่งกีดขวาง (Experiment with obstacle)

ผลการทดลองนี้จำลองมาจากปัญหาเขื่อนแตก [26] โดยออกแบบให้แบบจำลองมีความกว้าง 3.6 เมตร ความยาว 35.8 เมตร โดยมีเขื่อนกั้นน้ำตั้งอยู่ห่างจากขอบทางด้านต้นน้ำเป็นระยะทาง 6.9 เมตร ประตูน้ำอยู่ตรงกลางเขื่อนซึ่งมีความกว้างประตูน้ำ 1 เมตร ความหนาของเขื่อน 0.8 เมตร ระดับความสูงของน้ำทางด้านต้นน้ำและบริเวณประตูน้ำมีความสูง 0.4 เมตร และทางด้านท้ายน้ำมีน้ำสูง 0.01 เมตร และพื้นผิวมีสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานเท่ากับ 0.01 วินาที เมตร<sup>-1/3</sup> ดังรูปที่ 4.7 และได้ทำการวางเครื่องมือวัดระดับน้ำในตำแหน่งต่าง ๆ รวมหกตำแหน่งซึ่งแสดงตำแหน่งของเครื่องมือวัดระดับน้ำในตารางที่ 4.3

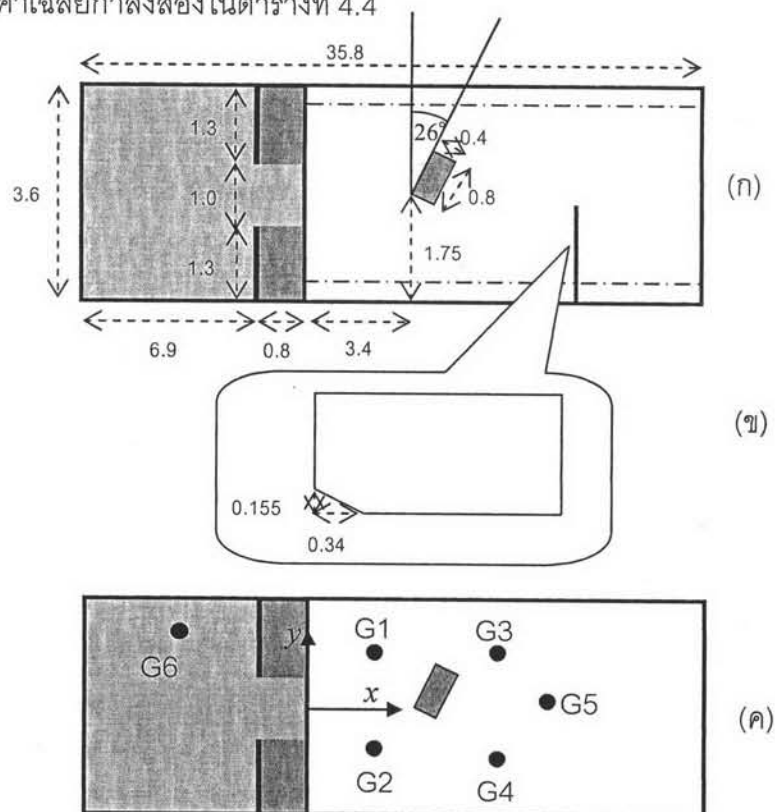
สิ่งกีดขวางมีลักษณะเป็นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากซึ่งมีความกว้าง 0.4 เมตร ความยาว 0.8 เมตรและส่วนสูง 1 เมตร วางอยู่ทางด้านท้ายน้ำในลักษณะเอียงทำมุมกับแนวเขื่อน 26 องศา

รายละเอียดของค่าตัวแปรที่ใช้ในกรณีศึกษาครั้งนี้คือ ค่าแรงโน้มถ่วงโลกเท่ากับ 9.8 เมตรต่อวินาที<sup>2</sup> ขนาดของกริดเซลล์ ความกว้าง ( $\Delta x$ ) 0.05 เมตร และความยาว ( $\Delta y$ ) 0.05 เมตร ผลต่างของเวลา ( $\Delta t$ ) เท่ากับ 0.005 วินาที เวลาทั้งหมดของแบบจำลองเท่ากับ 30 วินาที กำหนดค่าความผิดพลาดเท่ากับ  $10^{-10}$  และใช้วิธีของ HLLC ที่ให้ค่าความถูกต้องอันดับสองแบบตัวปรับค่าความชันมีนمودในการประมาณค่าของปัญหาริมันน์

แบบจำลองนี้เกิดขึ้นในห้องทดลองดังรูปที่ 4.8 ซึ่งถูกออกแบบให้พื้นที่กักเก็บน้ำทางด้านต้นน้ำเป็นในลักษณะของผนังและพื้นที่ทางด้านท้ายน้ำเป็นในลักษณะของผนังเช่นเดียวกัน ดังนั้นแบบจำลองนี้จึงจำเป็นต้องนำเงื่อนไขค่าขอบแบบผนังมาประยุกต์ใช้กับขอบในทุก ๆ ขอบของโดเมน และบริเวณผิวของสิ่งกีดขวางนี้ก็ถือเป็นปัญหาค่าขอบเช่นเดียวกันจึงได้นำปัญหาค่าขอบแบบผนังมาประยุกต์ใช้บริเวณขอบของวัตถุ

จากกรณีศึกษาที่ 4.4 พบว่าเมื่อน้ำไหลผ่านวัตถุทรงกระบอกจะไหลอ้อมวัตถุ แต่สำหรับกรณีนี้ผลที่ได้จากแบบจำลองแสดงให้เห็นว่า น้ำไหลอ้อมวัตถุทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากเช่นเดียวกันแต่จะมีปริมาณน้ำบางส่วนที่ไม่สามารถเคลื่อนตัวผ่านวัตถุกีดขวางนี้ได้ เนื่องจากเกิดการอันบริเวนขอบของวัตถุในระยะเวลาแรก ๆ ดังรูปที่ 4.10 และจากรูปที่ 4.9 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำในแต่ละสถานีวัดน้ำแต่ละจุดซึ่งเปรียบเทียบให้เห็นถึงความแตกต่างของระดับน้ำด้วยวิธีของ HLLC, AUR [26] และ CAP [26] ซึ่งต่างก็ใช้กริดเซลล์แบบเดียวกันและขนาดเท่ากัน ซึ่งวิธีของ HLLC ให้ผลเป็นที่น่าพอใจ แต่ทั้งนี้ก็จะพบว่ามี ความคลาดเคลื่อนอยู่สูงเมื่อเทียบกับผลการทดลอง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากกริดเซลล์ที่เลือกใช้เป็นแบบสี่เหลี่ยมและการจัดเรียงกริดเซลล์ในแนวเดียวกับแกนอ้างอิงทำให้ไม่สามารถจัดเรียงกริดเซลล์ให้พอดีกับรูปทรงของวัตถุกีดขวางที่เฉียงทำมุมกับแกนอ้างอิงได้ ซึ่งเป็นสาเหตุหลักสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดค่าความผิดพลาดสูง

ในผลการทดลองนี้ได้มีการเปรียบเทียบผลระหว่างวิธีปริมาตรจำกัดและวิธีของ AUR และ CAP ซึ่งทั้งสองวิธีต่างก็เลือกใช้ค่าความถูกต้องอันดับสองเช่นกัน ดังแสดงค่าความผิดพลาดแบบรากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองในตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.7 โครงสร้างของแบบจำลองกรณีมีสิ่งกีดขวาง

รูป (ก) โครงสร้างของแบบจำลองเมื่อมองจากด้านบน

รูป (ข) รูปภาคตัดขวางในแนวขนานกับเขื่อน

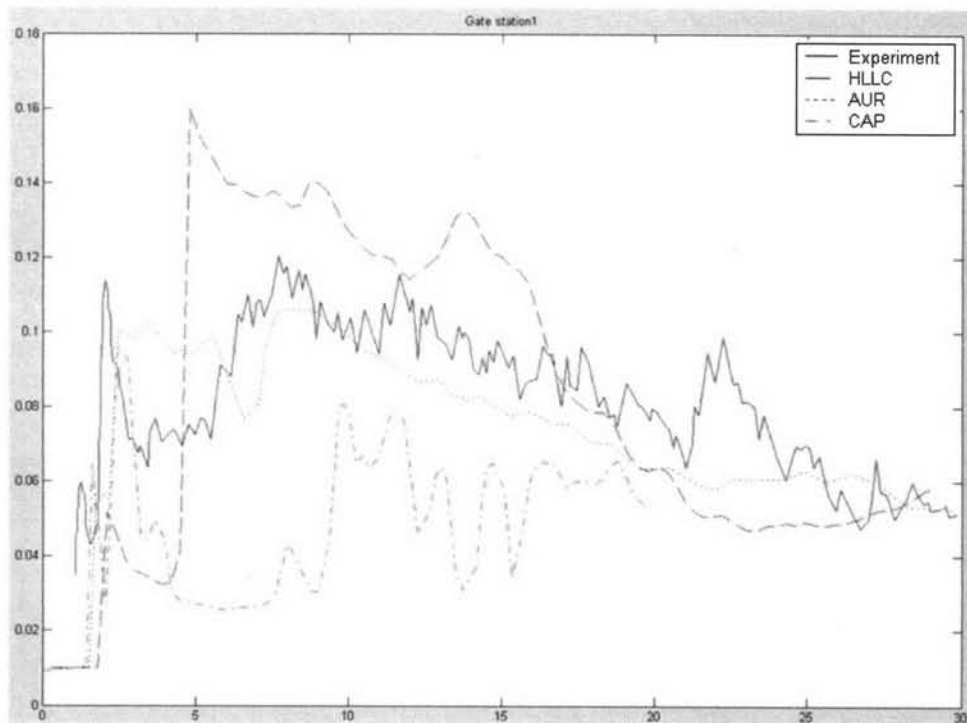
รูป (ค) แสดงตำแหน่งอุปกรณ์วัดระดับความสูง



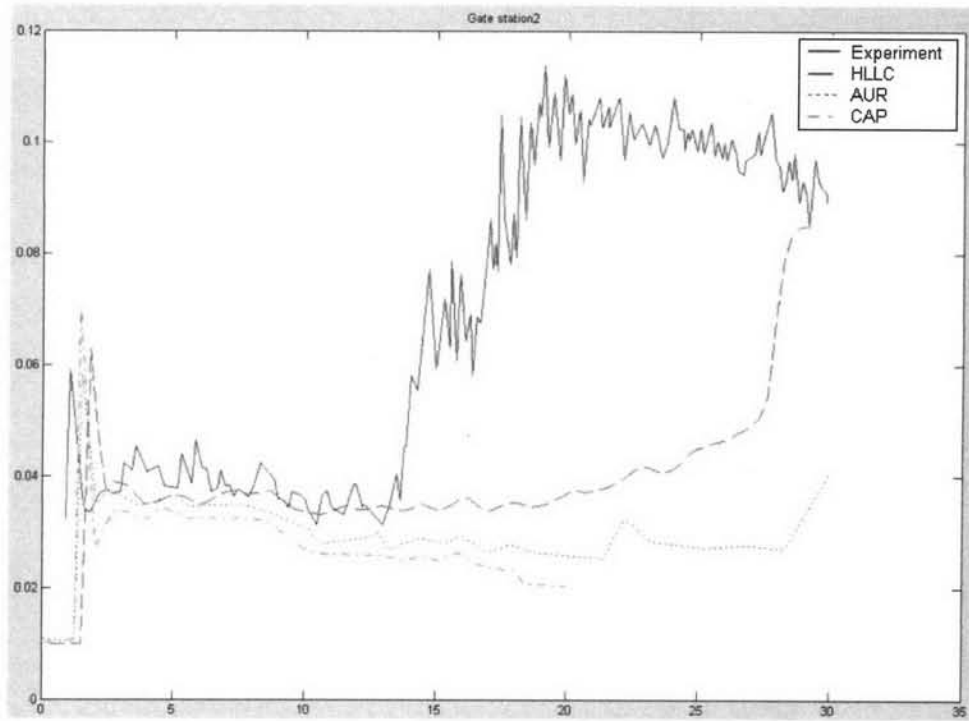
รูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นถึงแบบจำลองในห้องทดลอง

ตำแหน่ง อุปกรณ์วัด	G1	G2	G3	G4	G5	G6
$x$ (เมตร)	2.65	2.65	4.00	4.00	5.20	-1.87
$y$ (เมตร)	1.15	-0.60	1.15	-0.80	0.30	1.10

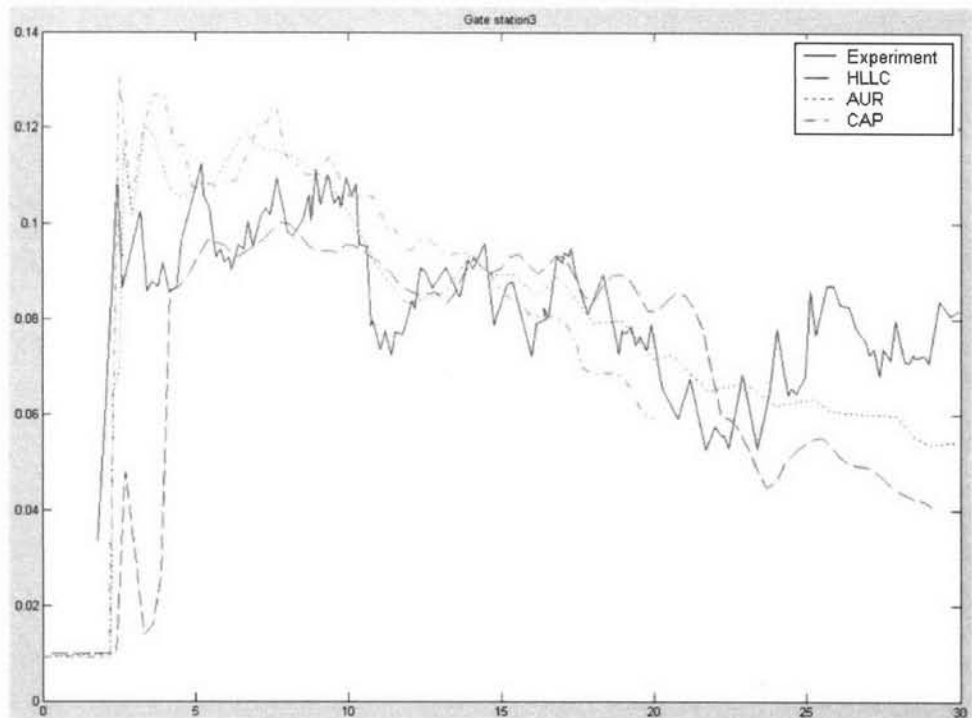
ตารางที่ 4.3 แสดงพิกัดตำแหน่งของอุปกรณ์วัดระดับความสูงของน้ำ  
สำหรับกรณีผลการทดลองที่มีสิ่งกีดขวาง



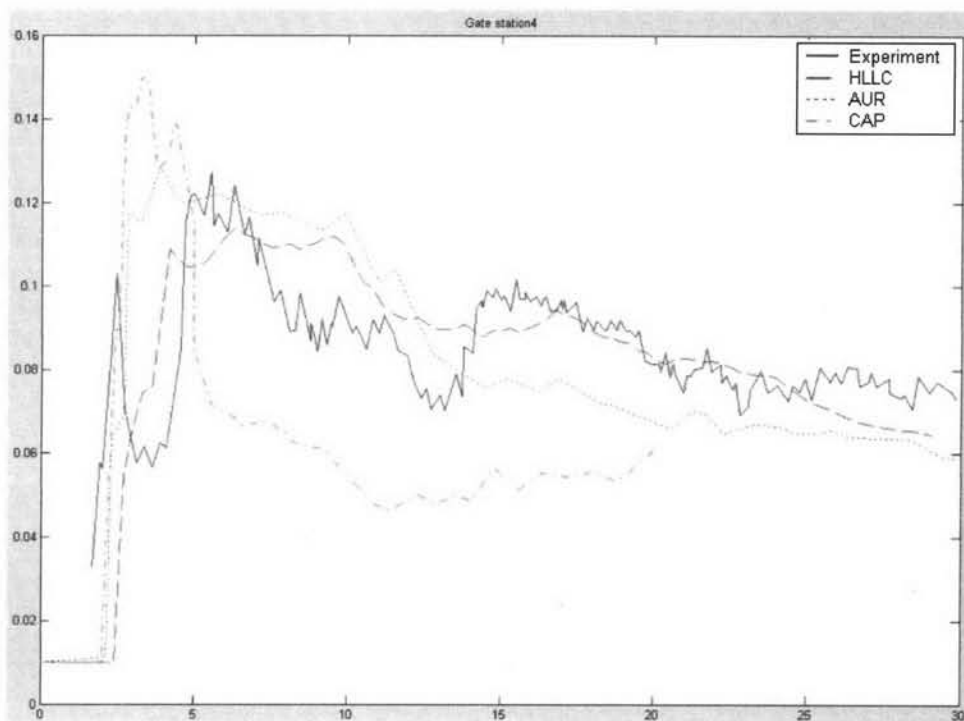
(a) แสดงระดับความสูงของน้ำ ณ ตำแหน่งวัดระดับน้ำที่ 1



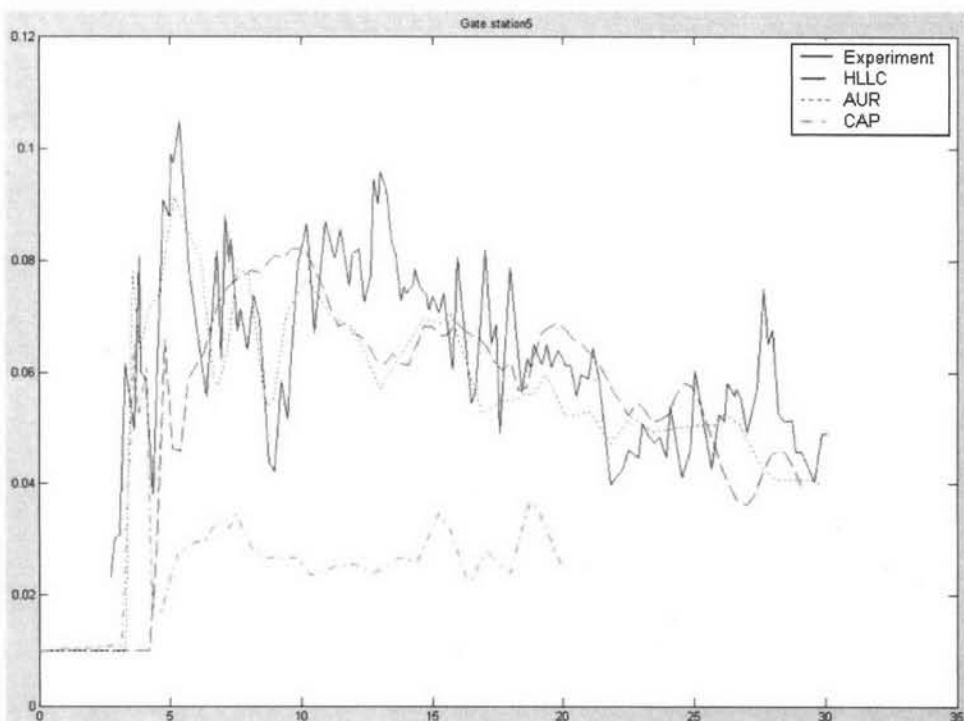
(b) แสดงระดับความสูงของน้ำ ณ ตำแหน่งวัดระดับน้ำที่ 2



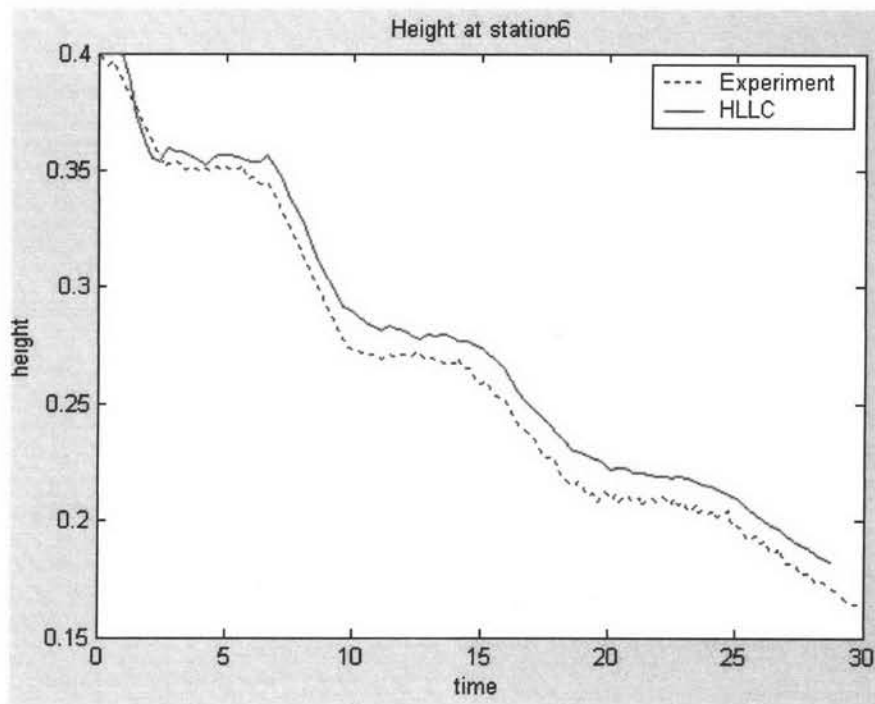
(c) แสดงระดับความสูงของน้ำ ณ ตำแหน่งวัดระดับน้ำที่ 3



(d) แสดงระดับความสูงของน้ำ ณ ตำแหน่งวัดระดับน้ำที่ 4

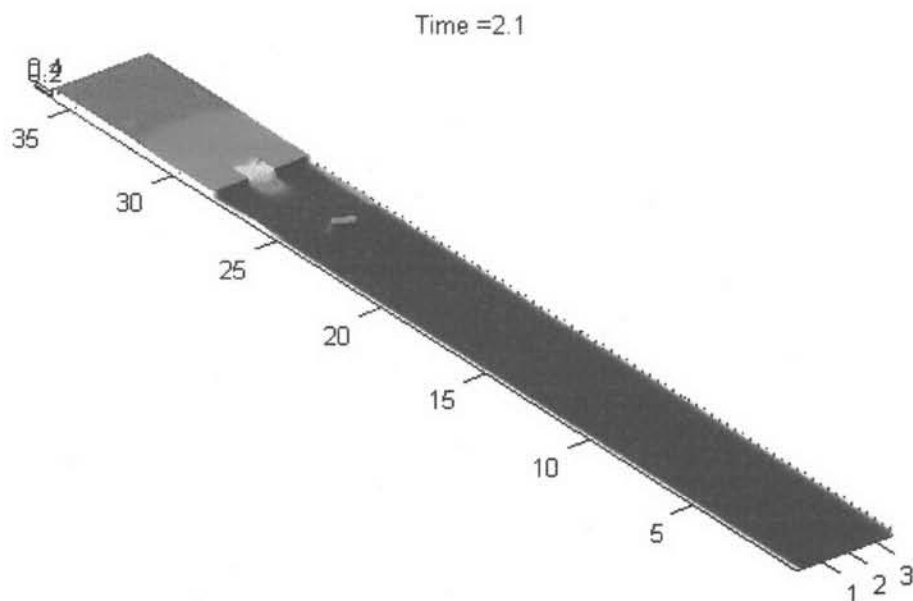


(e) แสดงระดับความสูงของน้ำ ณ ตำแหน่งวัดระดับน้ำที่ 5

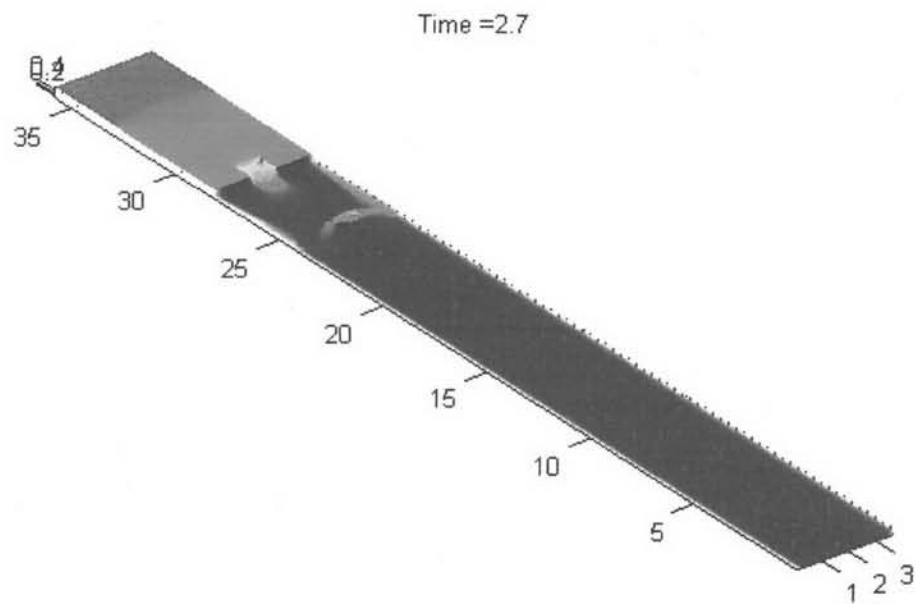


(f) แสดงระดับความสูงของน้ำ ณ ตำแหน่งวัดระดับน้ำที่ 6

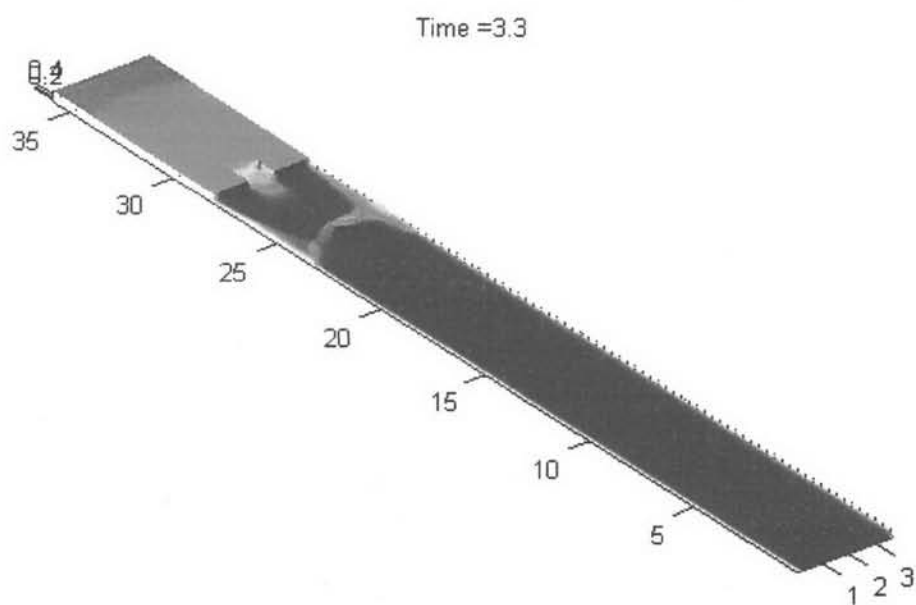
รูปที่ 4.9 (a-f) แสดงระดับความสูงของน้ำเมื่อเปรียบเทียบระหว่าง ผลการทดลองกับคำตอบเชิงตัวเลขในกรณีเมื่อมีสิ่งกีดขวาง



(a) แสดงลักษณะการเคลื่อนตัวของน้ำ ณ เวลา 2.1 วินาที

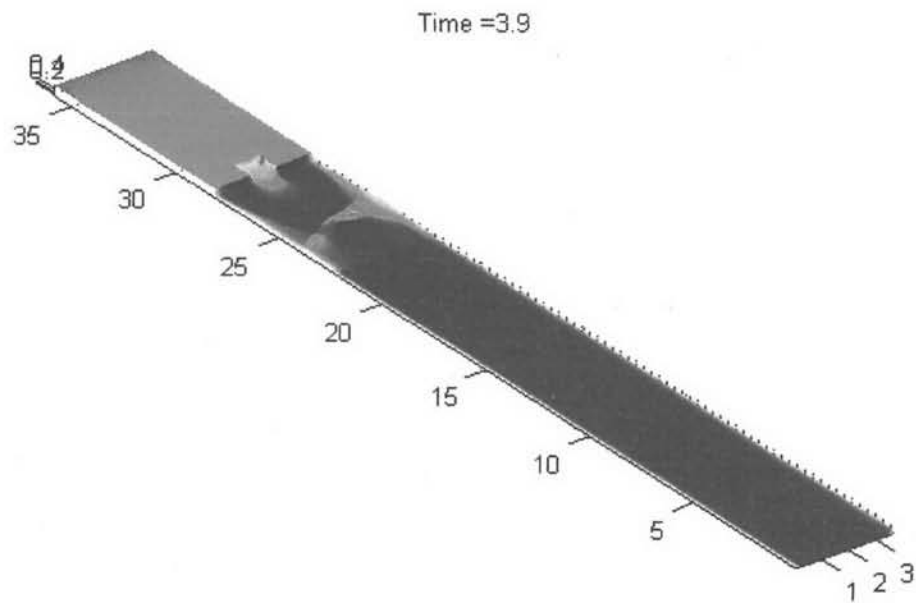


(b) แสดงลักษณะการเคลื่อนตัวของน้ำ ณ เวลา 2.7 วินาที

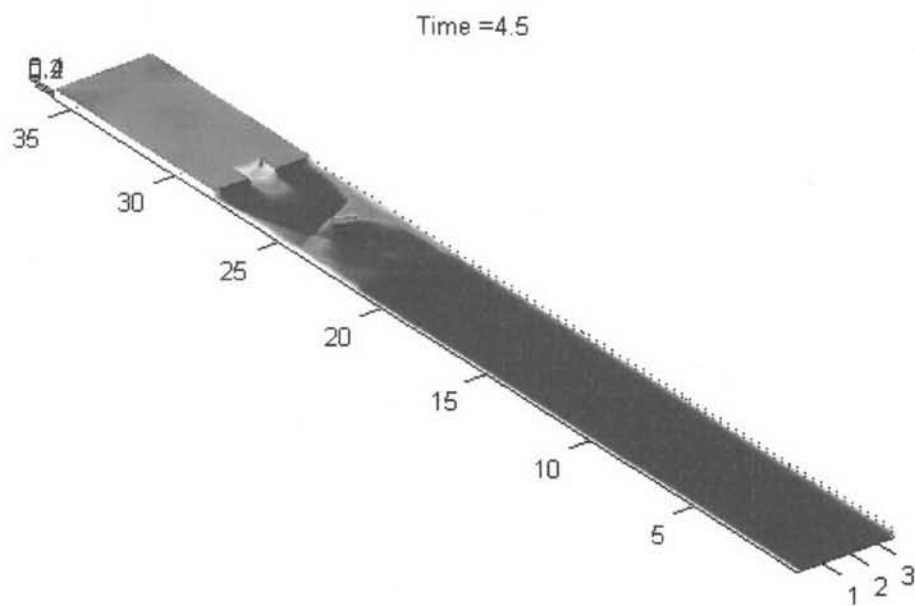


(c) แสดงลักษณะการเคลื่อนตัวของน้ำ ณ เวลา 3.3 วินาที

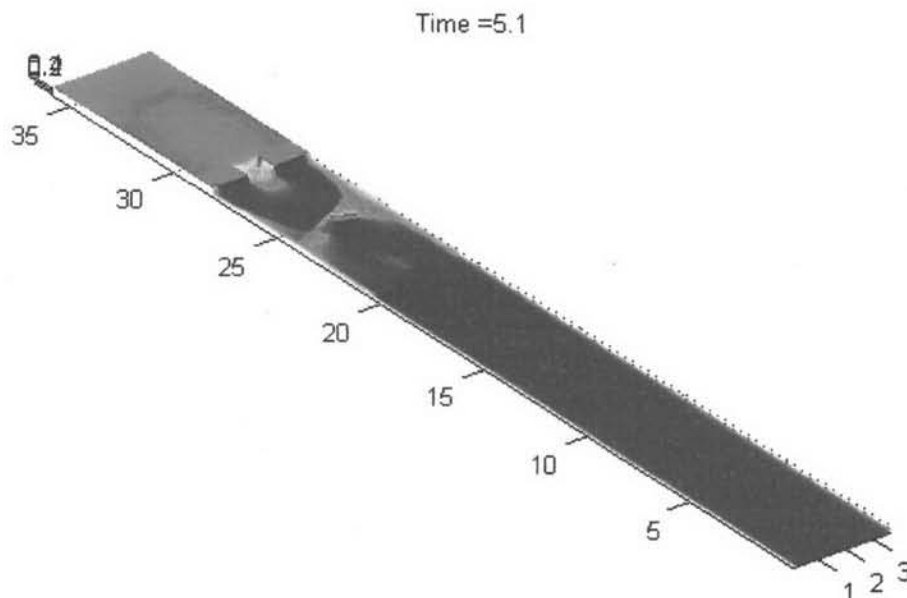




(d) แสดงลักษณะการเคลื่อนตัวของน้ำ ณ เวลา 3.9 วินาที



(e) แสดงลักษณะการเคลื่อนตัวของน้ำ ณ เวลา 4.5 วินาที



(f) แสดงลักษณะการเคลื่อนตัวของน้ำ ณ เวลา 5.1 วินาที

รูปที่ 4.10 (a-f) แสดงลักษณะการเคลื่อนตัวของน้ำของแบบจำลอง  
สำหรับกรณีที่มีสิ่งกีดขวาง ณ เวลาต่าง ๆ

	HLLC	AUR	CAP
Gate 1	0.0464	0.2953	0.2983
Gate 2	0.0516	0.0365	0.0389
Gate 3	0.0271	0.0283	0.0298
Gate 4	0.0173	0.0306	0.0444
Gate 5	0.0219	0.0247	0.0467
Gate 6	0.0128	-	-

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าความผิดพลาดแบบรากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสอง  
โดยเปรียบเทียบวิธีของ HLLC, AUR และ CAP