

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อการวิเคราะห์การกระจายตัวของมลภาวะในน้ำดื่ม

นายสมบูรณ์ โอตรวรรณะ

ศูนย์วิทยทรัพยากร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

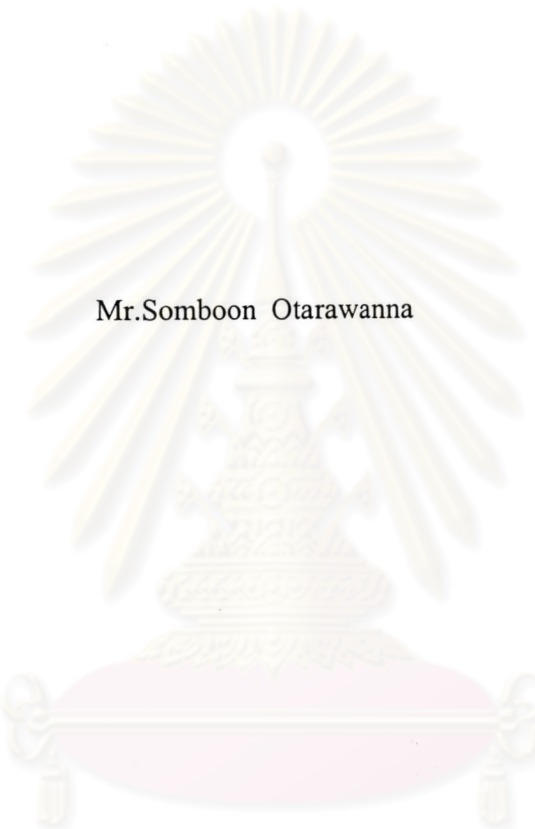
ISBN 974-17-2024-6

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I 208 298 ๐8

FINITE ELEMENT METHOD FOR ANALYSIS OF
POLLUTANT DISPERSION IN SHALLOW WATER

Mr.Somboon Otarawanna



ศูนย์วิทยทรัพยากร
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering
Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering
Chulalongkorn University

Academic Year 2002

ISBN 974-17-2024-6

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อการวิเคราะห์การกระจายตัวของ
มลภาวะในน้ำตื้น

โดย

นายสมบุญ ใต้วรรณะ

สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษา

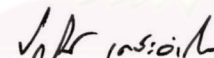
ศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์ เฉชะอำไพ


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

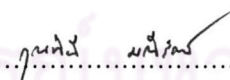

..... คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการสอบ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ไชยะภินันท์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์ เฉชะอำไพ)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.กฤษณี มณีรัตน์)

สมบูรณ์ โอตรวรรณะ : ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อการวิเคราะห์การกระจายตัวของมลภาวะในน้ำตื้น. (FINITE ELEMENT METHOD FOR ANALYSIS OF POLLUTANT DISPERSION IN SHALLOW WATER) อ. ที่ปรึกษา : ศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์ เดชะอำไพ, 152 หน้า. ISBN 974-17-2024-6.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้แสดงขั้นตอนการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์กับปัญหาการกระจายตัวของมลภาวะในน้ำตื้นซึ่งพิจารณาเป็นปัญหาในสองมิติเฉลี่ยตลอดความลึก โดยมลภาวะในที่นี้หมายถึงสิ่งที่ทำให้น้ำมีคุณภาพต่ำลง เช่น น้ำร้อนที่ถูกปล่อยจากโรงไฟฟ้า แบคทีเรียที่ทำให้น้ำเกิดการเน่าเสีย เป็นต้น การวิเคราะห์ปัญหาการกระจายตัวของมลภาวะนี้ได้แบ่งการคำนวณออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนการคำนวณการไหลของน้ำซึ่งพิจารณาในสภาวะอยู่ตัว และส่วนการคำนวณการส่งผ่านของมลภาวะในน้ำซึ่งพิจารณาให้มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา

สำหรับสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ของการคำนวณการไหลได้ถูกประดิษฐ์ขึ้นจากสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของการอนุรักษ์มวลและโมเมนตัมของของไหล และเนื่องจากสมการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สอดคล้องกับการไหลนี้อยู่ในรูปแบบไม่เชิงเส้นจึงต้องประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีการทำซ้ำของนิวตัน-ราฟสันในการหาผลลัพธ์ สำหรับการคำนวณการส่งผ่านของมลภาวะนั้นสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของการส่งผ่านของมลภาวะได้ถูกนำมาประดิษฐ์สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่สอดคล้องกันและทำการสร้างความสัมพันธ์เวียนบังเกิดเพื่อแก้ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับเวลา นอกจากนี้ยังได้ทำการประยุกต์เทคนิคการปรับขนาดเอลิเมนต์โดยอัตโนมัติเพื่อเพิ่มความถูกต้องแม่นยำของผลลัพธ์และเพิ่มประสิทธิภาพของการคำนวณด้วย

ความถูกต้องของไฟไนต์เอลิเมนต์โปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้ถูกตรวจสอบโดยการนำผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ปัญหาด้วยโปรแกรมที่ประดิษฐ์ขึ้นไปเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ในบทความวิชาการในวารสารทางวิชาการระดับนานาชาติ หลังจากนั้นจะนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์ทั้งสองนี้ไปวิเคราะห์ปัญหาที่มีความซับซ้อนยิ่งขึ้น ผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ปัญหาต่างๆในวิทยานิพนธ์นี้ได้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการทำนายพฤติกรรมของการกระจายตัวของมลภาวะในน้ำ

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา 2545

ลายมือชื่อนิติ สมบูรณ์ โอตรวรรณะ
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ผ.ดร. ปราโมทย์
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

4370537621 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING
KEY WORD: FINITE ELEMENT / POLLUTANT DISPERSION / SHALLOW WATER / ADAPTIVE MESHING

SOMBOON OTARAWANNA : FINITE ELEMENT METHOD FOR ANALYSIS OF POLLUTANT DISPERSION IN SHALLOW WATER. THESIS ADVISOR : PROF. PRAMOTE DECHAUMPHAI, Ph.D. 152 pp. ISBN 974-17-2024-6.

This thesis presents a finite element computational method for solving pollutant dispersion in shallow water considered as two-dimensional depth-averaged problem. Pollutant here means something that causes water quality to become worse, for examples, hot water discharged from power station, bacteria causing water decay, etc. The computation of pollutant dispersion was divided into two parts. The first is flow computation considered as steady-state problem. And the second is computation of pollutant transport considered as transient problem.

The corresponding finite element equations of flow computation were derived from the set of partial differential equations which satisfy the law of conservation of mass and conservation of momentums. Non-linearity of such equations is treated with Newton-Raphson iterative method. As for pollutant transport computation, the partial differential equation of pollutant transport was used to derive the corresponding finite element equation and applying recurrence relations in time domain. Moreover, an adaptive meshing technique is implemented to increase the solution accuracy and computing performance.

The computer programs were verified by comparing the results obtained in this study with the results obtained from technical papers in the international journals before applying to solve more complex problems. The results in this thesis have demonstrated the capability of the finite element method for the prediction of pollutant dispersion behaviors.

DepartmentMechanical Engineering..... Student's signature Somboon Otarawanna
Field of studyMechanical Engineering..... Advisor's signature Pramote Dechaumphai
Academic Year2002..... Co-advisor's signature-.....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์ เดชะอำไพ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์เป็นอย่างสูงสำหรับความรู้และคำแนะนำเกี่ยวกับงานวิจัยที่ท่านอาจารย์มีให้ อย่างสม่ำเสมอตลอดช่วงเวลาในการทำงานวิจัยนี้ นอกจากนี้ท่านยังได้ถ่ายทอดข้อคิดหลายสิ่ง หลายอย่างที่มีคุณค่ายิ่งเกี่ยวกับการทำงานและการดำรงชีวิตให้กับผู้วิจัย

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ไชยะภินันท์ ประธาน กรรมการ อาจารย์ ดร.สมพงษ์ พุทธิวิสุทธิศักดิ์ และอาจารย์ ดร.คุณทีน มณีรัตน์ กรรมการ ที่ได้ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์และถ่ายทอดความรู้ต่างๆที่เกี่ยวกับงานวิจัยนี้ ซึ่งทำให้วิทยานิพนธ์ ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่กองสำรวจและสร้างแผนที่ กรมเจ้าท่า สำหรับ ความอนุเคราะห์ที่ท่านได้ให้ข้อมูลและความรู้เพิ่มเติมเกี่ยวกับการสำรวจความลึกของแม่น้ำ เจ้าพระยา

ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ สมาชิกในห้องปฏิบัติการวิจัยกลศาสตร์การ คำนวณทุกท่าน นับตั้งแต่ พี่วิโรจน์ ลิมตระกูล พี่สุทธิศักดิ์ พงศ์ธนาพาณิชย์ พี่นิพนธ์ วรรณ โสภากย์ พี่เสฏฐวรรธ สุจริตกวัตสกุล คุณอาชว์ ปวีณวัฒน์ คุณสุธี ไตรวิวัฒนา คุณสุธี โอฬารฤทธินันท์ คุณยศกร ประทุมวัลย์ คุณเกรียงไกร ปัญญารัตนะ คุณพัชรี ธีระเอก และ น้องปริญญา บุญมาเลิศ สำหรับข้อเสนอ ความช่วยเหลือและกำลังใจตลอดเวลาการทำงานวิจัยนี้ ขอขอบคุณ คุณชาญชัย ก้องปฐมพร เพื่อนที่ศึกษาต่ออยู่ต่างประเทศที่ได้มีน้ำใจช่วยส่งเอกสารทาง วิชาการมาให้ผู้วิจัยได้ศึกษาเพิ่มเติม นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณอุมาพร บุรณสุขสมบัติ ที่ยินดี ช่วยตรวจพิสูจน์อักษรวิทยานิพนธ์นี้

ท้ายสุดนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาและสมาชิกในครอบครัวที่ได้ให้ความ เข้าใจ กำลังใจและสนับสนุนการศึกษาของผู้วิจัยอย่างดีที่สุดมาโดยตลอด อนึ่งประโยชน์และ คุณค่าอันใดที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์นี้ขอมอบเป็นกตัญญูตราบูชาแด่บิดามารดา ครูอาจารย์ ตลอดจน ผู้มีพระคุณทุกท่านที่มีโอกาสบุญนามได้หมดในที่นี้

สารบัญ

| | หน้า |
|---|-----------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | จ |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ฉ |
| สารบัญ..... | ช |
| สารบัญภาพ..... | ญ |
| คำอธิบายสัญลักษณ์..... | ณ |
| | |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความสำคัญและที่มาของวิทยานิพนธ์..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์..... | 2 |
| 1.3 ขั้นตอนการดำเนินงานและขอบเขตของวิทยานิพนธ์..... | 2 |
| 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับจากวิทยานิพนธ์..... | 3 |
| 1.5 เนื้อหาโดยสังเขปของบทต่างๆภายในวิทยานิพนธ์..... | 3 |
| | |
| บทที่ 2 สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยสำหรับการวิเคราะห์การกระจายตัว ของมลภาวะในน้ำตื้น..... | 5 |
| 2.1 สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของการอนุรักษ์มวลและโมเมนตัม..... | 6 |
| 2.2 สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยของการส่งผ่านของมลภาวะ..... | 10 |
| 2.3 บทสรุปของสมการเชิงอนุพันธ์สำหรับการวิเคราะห์ การกระจายตัวของมลภาวะในน้ำตื้น..... | 12 |
| | |
| บทที่ 3 การประยุกต์ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์..... | 13 |
| 3.1 ขั้นตอนทั่วไปของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์..... | 13 |
| 3.2 สมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการไหลในน้ำตื้น..... | 16 |
| 3.2.1 การประดิษฐ์สมการไฟไนต์เอลิเมนต์..... | 18 |
| 3.2.2 ไฟไนต์เอลิเมนต์เมตริกซ์ที่เกี่ยวข้อง..... | 25 |
| 3.2.3 การประยุกต์ระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสัน..... | 34 |
| 3.3 สมการไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการส่งผ่านของมลภาวะในน้ำตื้น..... | 37 |
| 3.3.1 การประดิษฐ์สมการไฟไนต์เอลิเมนต์..... | 37 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|-----------|
| 3.3.2 ไฟไนต์เอลิเมนต์เมตริกซ์ที่เกี่ยวข้อง..... | 40 |
| 3.3.3 การสร้างความสัมพันธ์เวียนบังเกิด..... | 42 |
| บทที่ 4 ไฟไนต์เอลิเมนต์โปรแกรมคอมพิวเตอร์..... | 45 |
| 4.1 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ SWFLOW..... | 45 |
| 4.1.1 ขั้นตอนการคำนวณ..... | 45 |
| 4.1.2 รายละเอียดของโปรแกรมคอมพิวเตอร์..... | 46 |
| 4.1.3 รายละเอียดของไฟล์ข้อมูลนำเข้า..... | 46 |
| 4.1.4 ลักษณะของไฟล์ผลลัพธ์..... | 49 |
| 4.2 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ SWCONC..... | 50 |
| 4.2.1 ขั้นตอนการคำนวณ..... | 50 |
| 4.2.2 รายละเอียดของโปรแกรมคอมพิวเตอร์..... | 51 |
| 4.2.3 รายละเอียดของไฟล์ข้อมูลนำเข้า..... | 51 |
| 4.2.4 ลักษณะของไฟล์ผลลัพธ์..... | 54 |
| บทที่ 5 การตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมคอมพิวเตอร์..... | 55 |
| 5.1 ปัญหาการไหลระหว่างแผ่นคู่ขนานเนื่องมาจากความหนืด..... | 56 |
| 5.2 ปัญหาการไหลระหว่างแผ่นคู่ขนานเนื่องมาจากความดัน..... | 58 |
| 5.3 ปัญหาการไหลหมุนวนในช่องสี่เหลี่ยม..... | 63 |
| 5.4 ปัญหาการไหลในคลองรูปสี่เหลี่ยมที่มีความลึกคงที่..... | 65 |
| 5.5 ปัญหาการไหลในคลองรูปสี่เหลี่ยมที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับของพื้นน้ำ..... | 67 |
| 5.6 ปัญหาการไหลในคลองรูปสี่เหลี่ยมที่มีความเสียดทานที่พื้นน้ำไม่เท่ากัน..... | 69 |
| 5.7 ปัญหาการไหลผ่านอ่างเก็บน้ำรูปวงกลม..... | 71 |
| 5.8 ปัญหาการไหลผ่านท่านบก้นน้ำ..... | 73 |
| 5.9 ปัญหาการกระจายตัวของมลภาวะผ่านช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยม..... | 78 |
| บทที่ 6 เทคนิคการปรับขนาดเอลิเมนต์โดยอัตโนมัติ..... | 81 |
| 6.1 หลักการของเทคนิคการปรับขนาดเอลิเมนต์โดยอัตโนมัติ..... | 81 |

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

| | | |
|----------------|--|------------|
| 6.2 | การนำเทคนิคการปรับขนาดเอลิเมนต์โดยอัตโนมัติมาใช้กับ ปัญหาการไหล..... | 85 |
| 6.3 | โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับประยุกต์การปรับขนาดเอลิเมนต์..... | 87 |
| 6.4 | ขั้นตอนในการประยุกต์เทคนิคการปรับขนาดเอลิเมนต์โดยอัตโนมัติ..... | 88 |
| 6.5 | ตัวอย่างการนำเทคนิคการปรับขนาดเอลิเมนต์โดยอัตโนมัติ มาประยุกต์ใช้กับปัญหาการไหล..... | 88 |
| บทที่ 7 | การวิเคราะห์ปัญหาการกระจายตัวของมลภาวะในแม่น้ำเจ้าพระยา..... | 98 |
| 7.1 | การวิเคราะห์การไหลในแม่น้ำเจ้าพระยา..... | 98 |
| 7.2 | การวิเคราะห์การส่งผ่านของมลภาวะในแม่น้ำเจ้าพระยา..... | 108 |
| บทที่ 8 | บทสรุป ปัญหาที่พบและข้อเสนอแนะ..... | 112 |
| 8.1 | บทสรุป..... | 112 |
| 8.2 | ปัญหาที่พบในขณะทำวิทยานิพนธ์..... | 113 |
| 8.3 | ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต..... | 114 |
| | รายการอ้างอิง..... | 115 |
| | ภาคผนวก..... | 117 |
| | ภาคผนวก ก รายละเอียดของโปรแกรม SWFLOW..... | 118 |
| | ภาคผนวก ข รายละเอียดของโปรแกรม SWCONC..... | 139 |
| | ภาคผนวก ค การเปรียบเทียบระหว่างสมการของการไหลในสองมิติ เฉลี่ยตลอดความลึกกับสมการของการไหลในสองมิติ..... | 150 |
| | ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... | 152 |

สารบัญภาพ

| ภาพประกอบ | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 2.1 ลักษณะของการไหลในน้ำตื้น..... | 7 |
| รูปที่ 3.1 การแบ่งโดเมนของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์..... | 13 |
| รูปที่ 3.2 เอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบสามจุดต่อ..... | 14 |
| รูปที่ 3.3 โดเมนของการไหลในน้ำตื้น..... | 18 |
| รูปที่ 3.4 เอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบหกจุดต่อสำหรับการไหลในน้ำตื้น..... | 25 |
| รูปที่ 3.5 การคำนวณโหนดเวกเตอร์ของความเร็วที่ขอบทางเข้าของเอลิเมนต์..... | 33 |
| รูปที่ 3.6 การเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นที่จุดต่อใดๆกับเวลา..... | 42 |
| รูปที่ 4.1 แผนภูมิการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ SWFLOW..... | 47 |
| รูปที่ 4.2 แผนภูมิการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ SWCONC..... | 52 |
| รูปที่ 5.1 ลักษณะของปัญหาการไหลระหว่างแผ่นคู่ขนานเนื่องจากความหนืด..... | 56 |
| รูปที่ 5.2 รูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์พร้อมเงื่อนไขขอบเขตของปัญหาการไหลระหว่างแผ่นคู่ขนานเนื่องจากความหนืด..... | 57 |
| รูปที่ 5.3 การกระจายตัวของความเร็วสำหรับปัญหาการไหลระหว่างแผ่นคู่ขนานเนื่องจากความหนืด..... | 57 |
| รูปที่ 5.4 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเร็วที่ได้จากการคำนวณกับผลเฉลยแม่นยำตรง ณ ตำแหน่ง x ต่างๆของปัญหาการไหลระหว่างแผ่นคู่ขนานเนื่องจากความหนืด..... | 58 |
| รูปที่ 5.5 ลักษณะของปัญหาการไหลระหว่างแผ่นคู่ขนานเนื่องจากความดัน..... | 58 |
| รูปที่ 5.6 รูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์พร้อมเงื่อนไขขอบเขตของปัญหาการไหลระหว่างแผ่นคู่ขนานเนื่องจากความดัน..... | 61 |
| รูปที่ 5.7 การกระจายตัวของความเร็วของปัญหาการไหลระหว่างแผ่นคู่ขนานเนื่องจากความดัน..... | 61 |
| รูปที่ 5.8 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเร็วที่คำนวณได้ ณ ตำแหน่ง x ต่างๆของปัญหาการไหลระหว่างแผ่นคู่ขนานเนื่องจากความดัน..... | 62 |
| รูปที่ 5.9 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของความดันที่คำนวณได้ ณ ตำแหน่ง y ต่างๆของปัญหาการไหลระหว่างแผ่นคู่ขนานเนื่องจากความดัน..... | 62 |
| รูปที่ 5.10 ลักษณะของปัญหาการไหลหมุนวนในช่องสี่เหลี่ยม..... | 63 |

สารบัญญภาพ (ต่อ)

| ภาพประกอบ | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 5.11 รูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์พร้อมเงื่อนไขขอบเขตของปัญหา การไหลหมุนวนในช่องสี่เหลี่ยม..... | 64 |
| รูปที่ 5.12 การกระจายตัวของความเร็วสำหรับปัญหาการไหลหมุนวน ในช่องสี่เหลี่ยม..... | 64 |
| รูปที่ 5.13 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเร็วสำหรับปัญหาการไหลหมุนวน ในช่องสี่เหลี่ยม..... | 65 |
| รูปที่ 5.14 ลักษณะของปัญหาการไหลในคลองรูปสี่เหลี่ยมที่ความลึกคงที่..... | 66 |
| รูปที่ 5.15 รูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์พร้อมเงื่อนไขขอบเขตของ ปัญหาการไหลในคลองรูปสี่เหลี่ยมที่ความลึกคงที่..... | 66 |
| รูปที่ 5.16 การกระจายตัวของความเร็วสำหรับปัญหาการไหลในคลองรูปสี่เหลี่ยม ที่ความลึกคงที่..... | 66 |
| รูปที่ 5.17 การกระจายตัวของระดับผิวน้ำสำหรับปัญหาการไหลในคลองรูปสี่เหลี่ยม ที่ความลึกคงที่..... | 67 |
| รูปที่ 5.18 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเร็วสำหรับปัญหาการไหล ในคลองรูปสี่เหลี่ยมที่ความลึกคงที่..... | 67 |
| รูปที่ 5.19 ลักษณะของปัญหาการไหลในคลองรูปสี่เหลี่ยมที่มีการเปลี่ยนแปลง ระดับของพื้นน้ำ..... | 68 |
| รูปที่ 5.20 รูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์พร้อมเงื่อนไขขอบเขตของปัญหาการไหล ในคลองรูปสี่เหลี่ยมที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับของพื้นน้ำ..... | 68 |
| รูปที่ 5.21 การกระจายตัวของความเร็วสำหรับปัญหาการไหลในคลองรูปสี่เหลี่ยม ที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับของพื้นน้ำ..... | 68 |
| รูปที่ 5.22 การกระจายตัวของระดับผิวน้ำสำหรับปัญหาการไหลในคลองรูปสี่เหลี่ยม ที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับของพื้นน้ำ..... | 69 |
| รูปที่ 5.23 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเร็วสำหรับปัญหาการไหล ในคลองรูปสี่เหลี่ยมที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับของพื้นน้ำ..... | 69 |
| รูปที่ 5.24 ลักษณะของปัญหาการไหลในคลองรูปสี่เหลี่ยมที่มีความเสียดทานที่พื้นน้ำ ไม่เท่ากัน..... | 70 |

สารบัญญภาพ (ต่อ)

| ภาพประกอบ | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 5.25 รูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์พร้อมเงื่อนไขขอบเขตของปัญหาการไหล ในคลองรูปสี่เหลี่ยมที่มีความเสียดทานที่พื้นน้ำไม่เท่ากัน..... | 70 |
| รูปที่ 5.26 การกระจายตัวของความเร็วสำหรับปัญหาการไหลในคลองรูปสี่เหลี่ยม ที่มีความเสียดทานที่พื้นน้ำไม่เท่ากัน..... | 70 |
| รูปที่ 5.27 การกระจายตัวของระดับผิวน้ำสำหรับปัญหาการไหลในคลองรูปสี่เหลี่ยม ที่มีความเสียดทานที่พื้นน้ำไม่เท่ากัน..... | 71 |
| รูปที่ 5.28 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเร็วสำหรับปัญหาการไหล ในคลองรูปสี่เหลี่ยมที่มีความเสียดทานที่พื้นน้ำไม่เท่ากัน..... | 71 |
| รูปที่ 5.29 ลักษณะของปัญหาการไหลผ่านอ่างเก็บน้ำรูปวงกลม..... | 72 |
| รูปที่ 5.30 รูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์พร้อมเงื่อนไขขอบเขตของ ปัญหาการไหลผ่านอ่างเก็บน้ำรูปวงกลม..... | 72 |
| รูปที่ 5.31 การกระจายตัวของความเร็วสำหรับปัญหาการไหลผ่านอ่างเก็บน้ำรูปวงกลม..... | 73 |
| รูปที่ 5.32 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเร็วที่คำนวณได้ ณ ตำแหน่ง y ต่างๆ ของปัญหาการไหลผ่านอ่างเก็บน้ำรูปวงกลม..... | 73 |
| รูปที่ 5.33 ลักษณะของปัญหาการไหลผ่านทำนบกั้นน้ำ..... | 74 |
| รูปที่ 5.34 รูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์พร้อมเงื่อนไขขอบเขตของปัญหาการไหล ผ่านทำนบกั้นน้ำ..... | 75 |
| รูปที่ 5.35 การกระจายตัวของความเร็วสำหรับปัญหาการไหลผ่านทำนบกั้นน้ำ..... | 75 |
| รูปที่ 5.36 รายละเอียดของการกระจายตัวของความเร็วสำหรับปัญหาการไหล ผ่านทำนบกั้นน้ำ..... | 75 |
| รูปที่ 5.37 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเร็วที่คำนวณได้ ณ ตำแหน่ง y ต่างๆ ของปัญหาการไหลผ่านทำนบกั้นน้ำ | |
| (a) ที่ตำแหน่ง $y/b=1$ | 76 |
| (b) ที่ตำแหน่ง $y/b=1.5$ | 76 |
| (c) ที่ตำแหน่ง $y/b=2$ | 77 |
| (d) ที่ตำแหน่ง $y/b=3$ | 77 |
| (e) ที่ตำแหน่ง $y/b=4$ | 78 |

สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพประกอบ | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 5.38 ลักษณะของปัญหาการกระจายตัวของมลภาวะผ่านช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยม | 79 |
| รูปที่ 5.39 รูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์พร้อมเงื่อนไขขอบเขตของปัญหาการกระจายตัวของมลภาวะผ่านช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยม | 79 |
| รูปที่ 5.40 การกระจายตัวของความเข้มข้นสำหรับปัญหาการกระจายตัวของมลภาวะผ่านช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมที่เวลา 36 วินาที | 79 |
| รูปที่ 5.41 การเปรียบเทียบการกระจายตัวของความเข้มข้นที่คำนวณได้ ณ ตำแหน่ง x ต่างๆของปัญหาการกระจายตัวของมลภาวะผ่านช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยม | 80 |
| รูปที่ 6.1 ค่าอนุพันธ์ของจุดต่อ i ที่มีเอลิเมนต์ล้อมรอบอยู่ 6 เอลิเมนต์ | 83 |
| รูปที่ 6.2 ลักษณะของปัญหาการไหลภายในท่อที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดทันทีทันใด | 89 |
| รูปที่ 6.3 ข้อมูลในไฟล์ชื่อ 'backward.dat' | 91 |
| รูปที่ 6.4 ลำดับขั้นตอนที่ปรากฏบนจอคอมพิวเตอร์ในขณะที่ใช้โปรแกรม BUILT | 91 |
| รูปที่ 6.5 ลักษณะการแบ่งแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของปัญหาการไหลภายในท่อที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดทันทีทันใดออกเป็นเอลิเมนต์แบบสมมาตร | |
| (a) รูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ | 92 |
| (b) การกระจายตัวของความเร็ว | 92 |
| (c) การกระจายตัวของความดัน | 92 |
| รูปที่ 6.6 ตัวอย่างข้อมูลในไฟล์ชื่อ 'backward.v0' | 93 |
| รูปที่ 6.7 ลำดับขั้นตอนที่ปรากฏบนจอคอมพิวเตอร์ในขณะที่ใช้โปรแกรม SPACE | 94 |
| รูปที่ 6.8 ตัวอย่างข้อมูลภายในไฟล์ 'backward.r0' | 94 |
| รูปที่ 6.9 ลำดับขั้นตอนที่ปรากฏบนจอคอมพิวเตอร์ในขณะที่ใช้โปรแกรม BUILT เพื่อการปรับขนาดครั้งใหม่ | 95 |
| รูปที่ 6.10 ลักษณะการแบ่งแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของปัญหาการไหลภายในท่อที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดทันทีทันใดที่ได้ทำการปรับขนาดเอลิเมนต์ครั้งที่ 1 | |
| (a) รูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ | 96 |
| (b) การกระจายตัวของความเร็ว | 96 |
| (c) การกระจายตัวของความดัน | 97 |

สารบัญญภาพ (ต่อ)

| ภาพประกอบ | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 6.11 ลักษณะการแบ่งแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของปัญหาการไหลภายในท่อที่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดทันทีทันใดที่ได้ทำการปรับขนาดเอลิเมนต์ครั้งที่ 2 | |
| (a) รูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์..... | 97 |
| (b) การกระจายตัวของความเร็ว..... | 97 |
| (c) การกระจายตัวของความดัน..... | 97 |
| รูปที่ 7.1 ลักษณะของปัญหาการไหลในแม่น้ำเจ้าพระยา..... | 99 |
| รูปที่ 7.2 รูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ของปัญหาการไหลในแม่น้ำเจ้าพระยาที่มีการแบ่งเอลิเมนต์อย่างสม่ำเสมอพร้อมด้วยเงื่อนไขขอบเขต..... | 99 |
| รูปที่ 7.3 การกระจายตัวของความเร็วของปัญหาการไหลในแม่น้ำเจ้าพระยาที่มีการแบ่งเอลิเมนต์อย่างสม่ำเสมอ | |
| (a) กรณีฤดูแล้ง..... | 100 |
| (b) กรณีฤดูน้ำหลาก..... | 100 |
| รูปที่ 7.4 รายละเอียดการกระจายตัวของความเร็วบริเวณใกล้โรงงานของปัญหาการไหลในแม่น้ำเจ้าพระยาที่มีการแบ่งเอลิเมนต์อย่างสม่ำเสมอ | |
| (a) กรณีฤดูแล้ง..... | 101 |
| (b) กรณีฤดูน้ำหลาก..... | 101 |
| รูปที่ 7.5 รูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ของปัญหาการไหลในแม่น้ำเจ้าพระยาที่ผ่านการปรับขนาดเอลิเมนต์โดยอัตโนมัติครั้งที่ 1 | |
| (a) กรณีฤดูแล้ง..... | 102 |
| (b) กรณีฤดูน้ำหลาก..... | 102 |
| รูปที่ 7.6 การกระจายตัวของความเร็วของปัญหาการไหลในแม่น้ำเจ้าพระยาที่ผ่านการปรับขนาดเอลิเมนต์โดยอัตโนมัติครั้งที่ 1 | |
| (a) กรณีฤดูแล้ง..... | 103 |
| (b) กรณีฤดูน้ำหลาก..... | 103 |
| รูปที่ 7.7 รายละเอียดการกระจายตัวของความเร็วบริเวณใกล้โรงงานของปัญหาการไหลในแม่น้ำเจ้าพระยาที่ผ่านการปรับขนาดเอลิเมนต์โดยอัตโนมัติครั้งที่ 1 | |
| (a) กรณีฤดูแล้ง..... | 104 |
| (b) กรณีฤดูน้ำหลาก..... | 104 |

สารบัญภาพ (ต่อ)

| ภาพประกอบ | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 7.8 รูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ของปัญหาการไหลในแม่น้ำเจ้าพระยา ที่ผ่านการปรับขนาดเอลิเมนต์โดยอัตโนมัติครั้งที่ 2 | |
| (a) กรณีฤดูแล้ง..... | 105 |
| (b) กรณีฤดูน้ำหลาก..... | 105 |
| รูปที่ 7.9 การกระจายตัวของความเร็วของปัญหาการไหลในแม่น้ำเจ้าพระยา ที่ผ่านการปรับขนาดเอลิเมนต์โดยอัตโนมัติครั้งที่ 2 | |
| (a) กรณีฤดูแล้ง..... | 106 |
| (b) กรณีฤดูน้ำหลาก..... | 106 |
| รูปที่ 7.10 รายละเอียดการกระจายตัวของความเร็วบริเวณใกล้โรงงานของปัญหาการไหล ในแม่น้ำเจ้าพระยาที่ผ่านการปรับขนาดเอลิเมนต์โดยอัตโนมัติครั้งที่ 2 | |
| (a) กรณีฤดูแล้ง..... | 107 |
| (b) กรณีฤดูน้ำหลาก..... | 107 |
| รูปที่ 7.11 ลักษณะของปัญหาการส่งผ่านของมลภาวะในแม่น้ำเจ้าพระยา พร้อมด้วยเงื่อนไขขอบเขต..... | 108 |
| รูปที่ 7.12 รูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ของปัญหาการส่งผ่านของมลภาวะในแม่น้ำเจ้าพระยา..... | 109 |
| รูปที่ 7.13 การกระจายตัวของมลภาวะของปัญหาการส่งผ่านของมลภาวะ ในแม่น้ำเจ้าพระยาที่เวลา 12,000 วินาที | |
| (a) กรณีฤดูแล้ง..... | 110 |
| (b) กรณีฤดูน้ำหลาก..... | 110 |
| รูปที่ 7.14 รายละเอียดการกระจายตัวของมลภาวะบริเวณใกล้โรงงานของ ปัญหาการส่งผ่านของมลภาวะในแม่น้ำเจ้าพระยาที่เวลา 12,000 วินาที | |
| (a) กรณีฤดูแล้ง..... | 111 |
| (b) กรณีฤดูน้ำหลาก..... | 111 |

คำอธิบายสัญลักษณ์

| | |
|-----------|--|
| a_i | สัมประสิทธิ์ของฟังก์ชัน โคออร์ดิเนตพื้นที่ซึ่งเกี่ยวข้องกับค่า x และ y |
| b_i | สัมประสิทธิ์ของฟังก์ชัน โคออร์ดิเนตพื้นที่ซึ่งเกี่ยวข้องกับค่า y |
| c_i | สัมประสิทธิ์ของฟังก์ชัน โคออร์ดิเนตพื้นที่ซึ่งเกี่ยวข้องกับค่า x |
| g | ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก |
| h | ความลึกเฉลี่ย ขนาดของเอลิเมนต์ |
| i | เวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทาง x |
| j | เวกเตอร์หนึ่งหน่วยในทิศทาง y |
| l | ทิศทางโคซายน์ในแนวแกน x ของเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับขอบของโดเมน |
| m | ทิศทางโคซายน์ในแนวแกน y ของเวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับขอบของโดเมน |
| \hat{n} | เวกเตอร์หนึ่งหน่วยที่ตั้งฉากกับขอบของโดเมน |
| p | ความดัน |
| p_a | ความดันบรรยากาศ |
| t | เวลา |
| u | ความเร็วในแนวแกน x |
| u_i | ความเร็วในรูปแบบของเทนเซอร์ |
| u_i^b | ความเร็วที่พื้นน้ำ |
| u_i^s | ความเร็วที่ผิวน้ำ |
| v | ความเร็วในแนวแกน y |
| w | ความเร็วในแนวแกน z |
| x | ระยะในแนวแกน x |
| x_i | ระยะในรูปแบบของเทนเซอร์ |
| y | ระยะในแนวแกน y |
| z | ระยะในแนวแกน z |
| A | พื้นที่ของเอลิเมนต์ |
| [A] | เมตริกซ์คงที่ของฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์อันดับสอง |
| [B] | เมตริกซ์คงที่เชิงอนุพันธ์ x เมตริกซ์ฟังก์ชันการประมาณภายในความชันของความเข้มข้น |
| C | สัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่พื้นน้ำ |
| [C] | เมตริกซ์คงที่เชิงอนุพันธ์ y เมตริกซ์ของการจุมลภาวะ |

คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

| | |
|--|---|
| $C_{\alpha\beta}$ | เมตริกซ์ของความเสียดทานที่พื้นน้ำ |
| D | ค่าอนุพันธ์สัมบูรณ์ สัมประสิทธิ์ของการแพร่กระจายมวลภาวะ |
| H | ความลึกกรวม |
| H_i | เมตริกซ์การประมาณภายในเอลิเมนต์อันดับหนึ่ง |
| $H_{\alpha\mu^x}$ | เมตริกซ์คงที่เชิงแรงในแนวแกน x |
| $H_{\alpha\mu^y}$ | เมตริกซ์คงที่เชิงแรงในแนวแกน y |
| $J_{\mu\beta\eta^x}, J_{\mu\beta\eta^y}$ | เมตริกซ์ที่เกี่ยวข้องกับการอนุรักษ์มวลในเอลิเมนต์ |
| [K] | เมตริกซ์ความแข็งแกร่งของสมการของการส่งผ่าน |
| [K_c] | เมตริกซ์ของการแพร่กระจายมวลภาวะ |
| [K_v] | เมตริกซ์ของการพามลภาวะ |
| $K_{\alpha\beta^x}$ | เมตริกซ์แรงเฉื่อยในแนวแกน x |
| $K_{\alpha\beta^y}$ | เมตริกซ์แรงเฉื่อยในแนวแกน y |
| L | ตัวดำเนินการเชิงอนุพันธ์ |
| L_i | ฟังก์ชัน โคออร์ดิเนตพื้นที่ |
| N_i | ฟังก์ชันการประมาณภายในเอลิเมนต์อันดับสอง |
| {Q} | เมตริกซ์โหนดเวกเตอร์ของสมการของการส่งผ่าน |
| { Q_q } | เมตริกซ์โหนดเวกเตอร์ของปริมาณฟลักซ์ของมลภาวะที่กำหนดให้ที่ขอบ |
| { Q_Q } | เมตริกซ์โหนดเวกเตอร์ของปริมาณมลภาวะที่ผลิตได้เอง |
| Q_{α^x} | เมตริกซ์โหนดเวกเตอร์ของแรงในแนวแกน x |
| Q_{α^y} | เมตริกซ์โหนดเวกเตอร์ของแรงในแนวแกน y |
| R | เศษตกค้าง |
| {R} | เมตริกซ์ของฟังก์ชัน โคออร์ดิเนตพื้นที่อันดับสอง |
| $R_{\eta\mu}$ | เมตริกซ์ของความเร็วที่ไหลผ่านเอลิเมนต์ |
| Re | ค่าเรย์โนลด์ส์นัมเบอร์ |
| S | ขอบของเอลิเมนต์ |
| $S_{\alpha\beta^{xx}}, S_{\alpha\beta^{yy}}$ | เมตริกซ์คงที่ของผลรวมเชิงความหนืด |
| $S_{\alpha\beta^{xy}}, S_{\alpha\beta^{yx}}$ | เมตริกซ์คงที่เชิงความหนืด |
| T_x | แรงรวมที่ขอบในแนวแกน x |
| T_y | แรงรวมที่ขอบในแนวแกน y |

คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

| | |
|---------------|---|
| U | ความเร็วเฉลี่ยตลอดความลึกในแนวแกน x |
| V | ความเร็วเฉลี่ยตลอดความลึกในแนวแกน y |
| W | ความเร็วลัพธ์ |
| W_i | ฟังก์ชันน้ำหนัก |
| δ_{ij} | ครอนเคอร์เดลตาฟังก์ชัน (Kronecker Delta function) |
| ζ | ระดับผิวน้ำ |
| μ | ความหนืด |
| ν | ความหนืดจลนศาสตร์ |
| ρ | ความหนาแน่น |
| σ_x | ความเค้นตั้งฉากในแนวแกน x |
| σ_y | ความเค้นตั้งฉากในแนวแกน y |
| τ_{xy} | ความเค้นเฉือนในแนวแกน y บนระนาบที่ตั้งฉากกับแกน x |
| τ_{yx} | ความเค้นเฉือนในแนวแกน x บนระนาบที่ตั้งฉากกับแกน y |
| ϕ | ตัวแปรใดๆ ที่จุดต่อ |
| Γ_c | ขอบเอลิเมนต์ |
| Θ | ความเข้มข้นของมลภาวะ |
| Ω_c | โดเมนเอลิเมนต์ |

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย