



สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิมพ์ครั้งที่ 3 ฉบับปรับปรุง

กลศาสตร์ของไหล

หนังสือกลศาสตร์ของไหลนี้ได้ถูกเรียบเรียงเป็นตำราภาษาไทยขึ้นเพื่อให้นิสิต นักศึกษา และผู้ที่สนใจสามารถทำความเข้าใจในวิชากลศาสตร์ของไหลได้ง่ายและลึกซึ้งมากยิ่งขึ้น และนอกเหนือจากเนื้อหาทั่วไปแล้วยังได้กล่าวถึงการวิเคราะห์สมรรถนะของกังหันลมในรายละเอียด และได้เพิ่มเติมรายละเอียดในเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับสมรรถนะ ข้อควรระวังในการเลือก การติดตั้งเครื่องสูบน้ำและพัดลม ซึ่งเป็นอุปกรณ์หลักที่ใช้กับระบบท่อน้ำและระบบท่อลมในงานระบบปรับอากาศ และงานระบายอากาศของโรงงานอุตสาหกรรม อีกทั้งยังได้เพิ่มเติมส่วนของการใช้สัญญาณการสั่นสะเทือนมาทำนายปัญหาการเกิดปรากฏการณ์คาบิเดชันในเครื่องจักรกลของไหล ทำให้หนังสือเล่มนี้เหมาะสำหรับที่จะให้วิศวกรและช่างซึ่งทำงานวิชาชีพที่เกี่ยวข้องกับการขับเคลื่อนของไหล ใช้ศึกษาและใช้อ้างอิงได้ด้วย นอกจากนี้ผู้เขียนยังได้เพิ่มเติมเนื้อหาในเรื่องการใช้เทนเซอร์การใช้สัญญาณดรรชนีในการบรรยายปรากฏการณ์การไหล ซึ่งจะช่วยให้อ่านเข้าใจในบทความในวารสารทางวิชาการสามารถเข้าใจในเนื้อหาที่มีการใช้สัญญาณดรรชนีในการบรรยายได้ดียิ่งขึ้น

กลศาสตร์ของไหล

สมศักดิ์ โยะกิตินันท์

สพจ.
837/3



www.ChulaPress.com

กลศาสตร์ของไหล...3
ISBN 978-974-03-3252-7



9 789740 332527
C112
3151500 540.00 บาท



จัดพิมพ์โดย
สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330
โทร. 0-2218-3269 โทรสาร 0-2218-3266
e-mail: cupress@chula.ac.th
www.ChulaPress.com Knowledge to All
สสฤณคำวิชาการ ผู้สังคัม

กลศาสตร์ของไหล FLUID MECHANICS

สมศักดิ์ โยะกิตินันท์

จัดพิมพ์โดย
สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330
โทร. 0-2218-3247 0-2218-3269 โทรสาร 0-2218-3266
e-mail: cupress@chula.ac.th www.ChulaPress.com
Knowledge to All

กลศาสตร์ของไหล FLUID MECHANICS สมศักดิ์ โยะกิตินันท์

ศาสตร์พื้นฐานที่สำคัญที่ใช้ในการวิเคราะห์ปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับของไหลในงานวิศวกรรม

กลศาสตร์ของไหล

กลศาสตร์ของไหล

สมศักดิ์ ไชยะภินันท์



สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2557

540.-

สมศักดิ์ ไชยะภินันท์

กลศาสตร์ของไหล / สมศักดิ์ ไชยะภินันท์

1. กลศาสตร์ของไหล.

620.106

ISBN 978-974-03-3252-7

สพจ. 837/3



สรรคุณคำวิชาการ ผู้สังคย

www.ChulaPress.com

Knowledge to All

ลิขสิทธิ์ของสำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิมพ์ครั้งที่ 1 จำนวน 2,000 เล่ม พ.ศ. 2547

พิมพ์ครั้งที่ 2 จำนวน 2,000 เล่ม พ.ศ. 2552 (ฉบับปรับปรุงใหม่)

พิมพ์ครั้งที่ 3 จำนวน 2,000 เล่ม พ.ศ. 2557 (ฉบับปรับปรุง)

การผลิตและการลอกเลียนหนังสือเล่มนี้ไม่ว่ารูปแบบใดทั้งสิ้น

ต้องได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากสำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผู้จัดทำนาย ศุภนัยหนังสือจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

สาขา ศาลาพระเกี้ยว โทร. 0-2218-7000-3 โทรสาร 0-2255-4441

สยามสแควร์ โทร. 0-2218-9881-2 โทรสาร 0-2254-9495

ม.นเรศวร จ.พิษณุโลก โทร. 0-5526-0162-4 โทรสาร 0-5526-0165

ม.เทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา โทร. 0-4421-6131-4 โทรสาร 0-4421-6135

ม.บูรพา จ.ชลบุรี โทร. 0-3839-4855-9 โทรสาร 0-3839-3239

โรงเรียนนายร้อย จปร. จ.นครนายก โทร. 0-3739-3023 โทรสาร 0-3739-3023

ม.พะเยา จ.พะเยา โทร. 0-5446-6799-800 โทรสาร 0-5446-6798

จัตุรัสจามจุรี (CHAMCHURI SQUARE) ชั้น 4 โทร. 0-2160-5301-2

โทรสาร 0-2160-5304

รัตนานิเบศร์ (แยกแคราย) โทร. 0-2950-5408-9 โทรสาร 0-2950-5405

Call Center (จัดส่งทั่วประเทศ) โทร. 0-2255-4433 <http://www.chulabook.com>

และเครือข่าย

ร้านค้า, หนังสือเข้าชั้นเรียน ติดต่อแผนกขายส่ง สาขารัตนาธิเบศร์ (แยกแคราย) โทร. 0-2950-5408-9

โทรสาร 0-2950-5405

กองบรรณาธิการ : จุฑามาศ ตั้งจิตพิริชัย **พิสูจน์อักษร** : บุษราวรรณ มณีญาณโรจน์

พิมพ์ที่ : โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โทร. 0-2215-3612, 0-2218-3557 [5711-016]

<http://www.cuprint.chula.ac.th>

คำนำพิมพ์ครั้งที่ 3

ในการพิมพ์หนังสือกลศาสตร์ของไหล ครั้งที่ 3 นี้ จะคงเนื้อหาทั้งหมดของการพิมพ์ครั้งที่ 2 เป็นหลัก จะมีการแก้ไขคำผิดที่เกิดขึ้นในการพิมพ์ครั้งที่ 2 และได้มีการเพิ่มเติมตัวอย่างของการแก้ปัญหามาของการไหลในท่อในบทที่ 7 ที่มีเครื่องจักรกลของไหลประกอบอยู่กับระบบท่อ โดยที่ผู้อ่านสามารถ download ตัวอย่างดังกล่าว และตรวจสอบการแก้ไขหรือข้อมูลเพิ่มเติม (หากมี) ของหนังสือเล่มนี้ได้ที่ <http://fmescy.lecturer.eng.chula.ac.th/fluid.pdf>

สมศักดิ์ ไชยะภินันท์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

มิถุนายน 2557

คำนำพิมพ์ครั้งที่ 2

ในการพิมพ์หนังสือกลศาสตร์ของไหล ครั้งที่ 2 นี้ นอกจากได้ทำการแก้ไขคำพิมพ์ผิดที่มีอยู่ในการพิมพ์ครั้งที่ 1 และแก้ไขหน่วยทั้งหมดที่ใช้ในหนังสือตั้งแต่บทที่ 2 ถึง 11 ให้เป็นระบบเอสไอแล้ว ผู้เขียนได้เพิ่มเติมเนื้อหาในบทต่าง ๆ ให้มีความสมบูรณ์และครอบคลุมศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับกลศาสตร์ของไหลมากขึ้น โดยเฉพาะการวิเคราะห์ที่เกี่ยวข้องกับกังหันลมที่ครอบคลุมถึงการวิเคราะห์ทางด้านสมรรถนะของกังหันลมแนวนอนและกังหันลมแนวตั้ง อีกทั้งการวิเคราะห์ภาระที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างของกังหันลม รวมถึงการออกแบบใบกังหันลมที่มีประสิทธิภาพสูงทางอากาศพลศาสตร์ ทำให้เนื้อหาเฉพาะที่เกี่ยวข้องกับกังหันลมมีมากกว่า 50

หน้า ซึ่งถือได้ว่าเป็นหนังสือที่ให้รายละเอียดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับกังหันลมที่สมบูรณ์มากเล่มหนึ่ง และในหนังสือยังคงเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับการเลือกใช้ และข้อระมัดระวังในการติดตั้งเครื่องจักรกลของไหลที่เป็น เครื่องสูบน้ำและพัดลม ซึ่งเป็นอุปกรณ์หลักที่ใช้กับระบบท่อน้ำและท่อลมในงานระบบปรับอากาศและระบายอากาศของอาคารพาณิชย์ และโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งน่าจะเป็นประโยชน์ต่อวิศวกรและช่างที่ประกอบวิชาชีพที่เกี่ยวข้องกับการขับเคลื่อนของไหลในการศึกษาและใช้อ้างอิง

รายละเอียดการเพิ่มหลัก ๆ ในการพิมพ์ครั้งที่ 2 ได้แก่ เพิ่มหัวข้อ 2.7 กลศาสตร์ของไหลเชิงธรณีฟิสิกส์ในบทที่ 2 เพิ่มหัวข้อ 6.4.7 การทดลองแบบจำลองโดยใช้อุโมงค์ลมหรืออุโมงค์น้ำในบทที่ 6 เพิ่มหัวข้อ 9.10.4 สมรรถนะของกังหันลมแนวนอนและหัวข้อ 9.10.5 การศึกษาสมรรถนะและโครงสร้างของกังหันลมที่ถูกออกแบบให้มีประสิทธิภาพสูงทางอากาศพลศาสตร์ในบทที่ 9 และเพิ่มหัวข้อ 11.10 สมการหลักของกลศาสตร์ของไหลในบทที่ 11 นอกจากนั้น ผู้เขียนยังได้เพิ่มเติมรายละเอียดย่อย ๆ จำนวนมากในบทต่าง ๆ เพื่อให้ผู้อ่านสามารถเข้าใจเนื้อหาได้ง่ายขึ้น รวมทั้งได้เพิ่มคำตอบของแบบฝึกหัดในข้อเลขคู่ไว้ให้ผู้อ่านสามารถตรวจสอบเวลาทำแบบฝึกหัดด้วย

ผู้เขียนหวังว่าหนังสือกลศาสตร์ของไหลในการพิมพ์ครั้งที่ 2 นี้จะมีความสมบูรณ์มากขึ้นและจะเป็นประโยชน์ต่อนิสิต นักศึกษา วิศวกร และผู้สนใจอ่านทั่วไป ในการทำความเข้าใจในศาสตร์ของกลศาสตร์ของไหล และสามารถประยุกต์ใช้ดังกล่าวไปแก้ปัญหาทางวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องได้ต่อไป และผู้อ่านสามารถตรวจสอบการแก้ไขหรือข้อมูลเพิ่มเติม (หากมี) ของหนังสือเล่มนี้ได้ที่ <http://fmescy.lecturer.eng.chula.ac.th/fluid.pdf>

สมศักดิ์ ไชยะภินันท์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พฤษภาคม 2552

คำนำพิมพ์ครั้งที่ 1

หนังสือกลศาสตร์ของไหลเล่มนี้ ได้ถูกเรียบเรียงขึ้นเพื่อให้เป็นตำราพื้นฐานในวิชากลศาสตร์ของไหลที่เป็นภาษาไทย เพื่อช่วยให้นิสิต นักศึกษา และผู้ที่สนใจสามารถทำความเข้าใจในวิชากลศาสตร์ของไหลได้ง่ายและลึกซึ้งมากยิ่งขึ้น กลศาสตร์ของไหลเป็นศาสตร์พื้นฐานที่สำคัญที่ใช้ในการวิเคราะห์ปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับของไหลในงานวิศวกรรมหลากหลายสาขาวิชา เช่น สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา สาขาวิชาวิศวกรรมเหมืองแร่ สาขาวิชาวิศวกรรมเรือ และสาขาวิชาวิศวกรรมอากาศยาน เป็นต้น หนังสือเล่มนี้ได้ถูกเรียบเรียงเพื่อให้สามารถใช้ในการเรียนการสอนของวิชากลศาสตร์ของไหลในระดับปริญญาตรี ซึ่งครอบคลุมเนื้อหาสำหรับ 2 ภาคการศึกษา และนอกเหนือจากเนื้อหาทั่วไปแล้วยังได้เพิ่มเติมรายละเอียดเพื่อให้สามารถใช้เป็นตำราประกอบอ้างอิงในระดับปริญญาโทได้ ในบางส่วน จากการที่ผู้เขียนได้มีโอกาสทำการสอนวิชากลศาสตร์ของไหลทั้งในระดับปริญญาตรีและปริญญาโทมากกว่า 18 ปี และได้ทำงานวิชาชีพและงานวิจัยในศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับกลศาสตร์ของไหลนี้ ผู้เขียนได้นำประสบการณ์ต่าง ๆ เหล่านี้มาประกอบในการเขียนและเรียบเรียงเพื่อให้หนังสือเล่มนี้มีความสมบูรณ์ ทันสมัย และอ่านเข้าใจง่าย พยายามเพิ่มเติมคำอธิบายในตัวอย่างแต่ละตัวอย่างถึงแนวคิดในการแก้ปัญหา และยังได้เพิ่มเติมคำอธิบายในท้ายตัวอย่างเพื่อแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของผลเฉลยจากปัญหาในตัวอย่างที่ไปเกี่ยวพันกับงานทางวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ของการไหล และได้พยายามนำตัวอย่างของปัญหาของไหลที่เกี่ยวข้องกับงานทางวิศวกรรมที่เป็นปัญหาจริงรอบตัวเราสอดแทรกไว้ เพื่อให้ผู้อ่านสามารถเห็นประโยชน์ของวิชากลศาสตร์ของไหลในการแก้ไขปัญหาทางวิศวกรรมอย่างเป็นรูปธรรม ในบทที่เกี่ยวข้องกับเครื่องจักรกลของไหล นอกจากจะได้กล่าวถึงชนิด คุณสมบัติ สมรรถนะและข้อควรระวังในการติดตั้งของเครื่องจักรกลของไหลสำคัญชนิดต่าง ๆ แล้ว ผู้เขียนได้เพิ่มเติมส่วนของการใช้สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนความถี่มาทำนายปัญหาการเกิด

ปรากฏการณ์ควิเตชันในเครื่องจักรกลของไหลซึ่งอาจเกิดขึ้นจากการติดตั้งที่ไม่เหมาะสม และเพิ่มเติมรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับสมรรถนะพัคลม มาตรฐานการทดสอบหาค่าสมรรถนะของพัคลมตามมาตรฐานสากลที่ใช้อยู่ในวงการวิชาชีพ เพื่อให้ผู้อ่านมีความเข้าใจและสามารถทำการเลือกใช้พัคลมได้อย่างถูกต้องและเหมาะสมมากขึ้น ซึ่งพัคลมจะเป็นอุปกรณ์หลักอย่างหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับศาสตร์การปรับอากาศและระบายอากาศ และในส่วนของกังหันลม ได้นำเสนอทฤษฎีอากาศพลศาสตร์ของกังหันลม และวิธีที่ใช้ในการวิเคราะห์สมรรถนะของกังหันลมทั้งในกังหันลมแนวนอน และกังหันลมแนวตั้งในรายละเอียด และท้ายสุด ผู้เขียนได้เพิ่มเติมบทอีกหนึ่งบทขึ้นโดยเฉพาะเพื่อกล่าวถึงการใช้เทนเซอร์ และการใช้สัญกรณ์ดรรชนีในการบรรยายปรากฏการณ์การไหล ซึ่งจะช่วยให้ผู้อ่านสามารถเข้าใจเวลาไปอ่านวารสารทางวิชาการที่มีการใช้สัญกรณ์ดรรชนีในการบรรยายได้ดียิ่งขึ้น

หนังสือเล่มนี้แบ่งออกเป็น 11 บท โดยที่บทที่ 1 จะเป็นบทนำ ที่กล่าวถึงนิยามต่าง ๆ ของของไหล หน่วยและมิติ และประวัติศาสตร์การคิดค้นของกลศาสตร์ของไหล

บทที่ 2 จะกล่าวถึง หลักการพื้นฐาน โดยเน้นการพิจารณาของไหลให้เป็นสภาพต่อเนื่อง ความเค้นและคุณสมบัติที่สำคัญของของไหล สภาวะการไหล และเงื่อนไขขอบเขตระหว่างของไหลกับของแข็งที่สัมผัสกัน

บทที่ 3 จะกล่าวถึง ของไหลสถิต เริ่มตั้งแต่การหาค่าความดันที่เปลี่ยนแปลงในของไหลสถิต ทั้งที่เป็นของไหลอัดได้ และของไหลอัดไม่ได้ การหาแรงที่กระทำต่อวัตถุแผ่นราบและวัตถุผิวโค้ง แรงลอยตัว และการวิเคราะห์ของไหลที่มีการเคลื่อนที่ในลักษณะวัตถุเกร็ง

บทที่ 4 จะเป็นการกล่าวถึง จลนศาสตร์ของของไหลและการวิเคราะห์เชิงปริมาตรควบคุม เริ่มตั้งแต่การบรรยายของไหลในสภาวะการเคลื่อนที่ สนามความเร็วที่มีการบรรยายการเคลื่อนที่ของของไหลเป็นแบบ Eulerian และ Lagrangian และกล่าวถึงกฎพื้นฐานที่ใช้วิเคราะห์ปัญหาของของไหล และการนำกฎดังกล่าวมาประยุกต์ใช้กับการแก้ปัญหาของของไหลด้วยการใช้ปริมาตรควบคุม ซึ่งในบทที่ 4 นี้จะเป็นการนำเสนอวิธีการในการแก้ปัญหาของของไหลในรูปแบบอินทิกรัล หรือการแก้ปัญหาในลักษณะภาพรวม

บทที่ 5 จะเป็นการกล่าวถึง การวิเคราะห์เชิงอนุพันธ์ของการเคลื่อนที่ของของไหล ซึ่งจะเป็นการวิเคราะห์ในลักษณะที่สมมุติตนเองเป็นอนุภาคของของไหล และดูพฤติกรรมของอนุภาคของไหลในขณะที่เคลื่อนที่ในแง่ของจลนศาสตร์และความเค้นที่เกิดขึ้น ซึ่งจะนำไปสู่การพัฒนาสมการนาเวียร์-สโตกส์ สมการ Euler และสมการเบอร์นูลี ที่สามารถนำไปใช้แก้ปัญหาของของไหลจริงและของไหลภายใต้สมมุติฐานไร้ความหนืดได้ นอกจากนี้ ในบทนี้ยังได้กล่าวถึงการนำทฤษฎีการไหลไร้ความหนืด (Potential flow) ไปประยุกต์ใช้เพื่อทำนายการไหลผ่านวัตถุในส่วนที่อยู่นอกชั้นขอบเขต ซึ่งสามารถอนุมานให้ของไหลดังกล่าวมีพฤติกรรมเหมือนของไหลไร้ความหนืดได้

บทที่ 6 จะเป็นการกล่าวถึง การวิเคราะห์มิติและความคล้าย ซึ่งจะเป็นการนำเอามิติที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์การไหลมาวิเคราะห์เพื่อหาตัวแปรไร้มิติที่มีผลต่อพฤติกรรมการไหลดังกล่าว และยังนำผลดังกล่าวไปใช้กับการทดสอบแบบจำลอง และนำผลการทดสอบจากแบบจำลองไปใช้กับวัตถุต้นแบบ ซึ่งการทดสอบดังกล่าวจะต้องทำภายใต้เงื่อนไขการมีความคล้ายคลึงเชิงพลวัต นอกจากนี้ยังได้กล่าวถึงการวิเคราะห์ในกรณีที่ไม่สามารถสร้างเงื่อนไขการเกิดความคล้ายคลึงเชิงพลวัตได้อย่างสมบูรณ์

บทที่ 7 จะเป็นการกล่าวถึง การไหลแบบภายใน ซึ่งก็คือการไหลของของไหลภายในส่วนที่มีผนังล้อมรอบ การไหลดังกล่าวจะก่อให้เกิดการเติบโตของชั้นขอบเขตขึ้นในของไหลที่ผนังวัตถุที่ล้อมรอบอยู่ ทำให้ของไหลมีการเคลื่อนที่ในลักษณะที่ทำให้เกิดเป็นรูปร่างความเร็ว (velocity profile) ขึ้น และเมื่อชั้นขอบเขตดังกล่าวเติบโตจนชนกันเต็มพื้นที่ภาคตัดขวางของท่อ หรือแผ่นล้อมรอบ ก็เกิดสภาพการไหลแบบพัฒนาเต็มที่แล้ว จากความเข้าใจในเรื่องการเกิดและเจริญเติบโตของรูปร่างความเร็วของของไหล จะทำให้สามารถหาค่าความเร็วเฉลี่ย ความดันลด และความเค้นของของไหลได้ ทั้งในสภาวะการไหลแบบราบเรียบ และการไหลแบบปั่นป่วน ความเข้าใจดังกล่าวจะนำไปสู่การวิเคราะห์หาการสูญเสียของพลังงานในของไหลซึ่งเกิดจากแรงเสียดทานเมื่อมีการไหลผ่านระบบท่อ และอุปกรณ์ในระบบท่อ และในบทนี้ยังได้กล่าวถึงการวัดการไหลในท่อ ซึ่งจะได้บรรยายถึงเทคนิคและอุปกรณ์การวัดการไหลแบบต่าง ๆ

บทที่ 8 จะเป็นการกล่าวถึง การไหลแบบภายนอก ซึ่งเป็นปรากฏการณ์การไหลที่มีความสำคัญอย่างมากในงานวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบยานพาหนะหรือวัตถุที่เคลื่อนที่ในของไหล เช่น รถยนต์ รถไฟฟ้า เครื่องบิน จรวดนำวิถี ยานอวกาศ เรือ เรือดำน้ำ หรือแม้กระทั่งลูกกอล์ฟและลูกเทนนิส เป็นต้น บทนี้จะกล่าวถึงความสำคัญของการเกิดขึ้นขอบเขตของการไหลผ่านผิวของวัตถุ ซึ่งก่อให้เกิดค่าความเค้นเฉือนที่ผิววัตถุ และทำให้เกิดเป็นแรงเสียดทานผิวขึ้นทั้งการไหลในสภาวะราบเรียบและปั่นป่วน ทั้งในกรณีแผ่นที่มีความเรียบ และแผ่นที่มีความขรุขระ นอกจากนั้นยังกล่าวถึงการเกิดปรากฏการณ์การแยก ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในกรณีที่ของไหลเคลื่อนที่ผ่านวัตถุที่มีสภาพความดันแตกต่างที่ไม่เป็นที่ชื่นชอบมากพอที่ทำให้ของไหลเคลื่อนที่หลุดออกจากผิวของวัตถุที่ของไหลเคลื่อนที่ผ่านได้ ก่อให้เกิดแรงเสียดทานจากความดันลดลง และยังได้กล่าวถึงการพัฒนาวิธีวิเคราะห์และแก้ปัญหาเพื่อหาค่าแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นบนวัตถุที่พิจารณา โดยใช้ทั้งวิธีวิเคราะห์โดยตรง และใช้วิธีวิเคราะห์อ้างอิงกับค่าที่ได้จากการทดลอง นอกจากนั้นยังกล่าวถึงการเกิดแรงยกและแรงหน่วงของวัตถุรูปแพนอากาศที่เคลื่อนที่อยู่ในของไหล

บทที่ 9 จะเป็นบทที่กล่าวถึง เครื่องจักรกลของไหลแบบต่าง ๆ และกล่าวถึงการวิเคราะห์การไหลแบบอุดมคติของเครื่องจักรแบบใบพัด ประสิทธิภาพ และสมรรถนะของเครื่องจักรกลแบบใบพัด อันได้แก่ เครื่องสูบลม พัดลม เครื่องอัด กังหันน้ำ และกังหันลม นอกเหนือจากความเข้าใจในเรื่องสมรรถนะเชิงอุดมคติแล้ว ในบทนี้ยังได้นำเสนอลักษณะสมรรถนะจริงของเครื่องจักรกลของไหลชนิดต่าง ๆ รวมทั้งข้อเด่น ข้อด้อยของเครื่องจักรกลของไหลแต่ละประเภท โดยเฉพาะเครื่องสูบลมและพัดลมชนิดต่าง ๆ และข้อควรระวังในการติดตั้งที่อาจนำไปสู่ปัญหาต่าง ๆ เช่น ปรากฏการณ์คาวิตีเทชัน และเทคนิคการใช้สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนความถี่มาทำนายปัญหาปรากฏการณ์คาวิตีเทชัน ซึ่งน่าจะเป็นประโยชน์ในระดับหนึ่งต่อผู้อ่านที่ประกอบวิชาชีพทางวิศวกรรมเครื่องกลที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบ การดูแล และการติดตั้งเครื่องจักรกลของไหลเหล่านี้ และในท้ายบทยังได้กล่าวถึงกังหันลมชนิดต่าง ๆ และทฤษฎีที่ใช้วิเคราะห์สมรรถนะของกังหันลมแนวนอนและแนวตั้งในรายละเอียด

บทที่ 10 จะเป็นบทที่กล่าวถึง การไหลแบบอัดได้หนึ่งมิติ ซึ่งเป็นการไหลที่มีความเร็วของของไหลสูงพอที่จะก่อให้เกิดผลของการอัดได้ปรากฏขึ้นอย่างเด่นชัด บทนี้จะเป็นการบรรยายการไหลแบบอัดได้ที่ค่อนข้างเรียบง่าย อันได้แก่ การไหลของของไหลที่สามารถอนุมานให้มีการไหลเป็นแบบหนึ่งมิติ คงตัว และมีพฤติกรรมที่สามารถสมมุติให้ของไหลดังกล่าวเป็นก๊าซอุดมคติได้ เนื้อหาหลักจะครอบคลุมการไหลแบบไอเซนทรอปิกผ่านหัวฉีดแบบลู่อู่เข้า และหัวฉีดแบบลู่อู่เข้าและบานออก การไหลผ่านท่อซึ่งมีพื้นที่หน้าตัดคงที่และมีแรงเสียดทานเกิดขึ้นแต่ไม่มีการถ่ายเทความร้อน การไหลผ่านท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดคงที่และไม่มีแรงเสียดทานเกิดขึ้นแต่มีการถ่ายเทความร้อน การไหลผ่านช็อกแบบตั้งฉาก และช็อกแบบเอียง

บทที่ 11 จะเป็นบทที่กล่าวถึง เทนเซอร์และการใช้สัญกรณ์ดรรชนีช่วยในการเขียนพจน์ทางคณิตศาสตร์ที่อยู่ในรูปของสเกลาร์ เวกเตอร์ และเทนเซอร์ ได้สั้นและกระชับขึ้น และได้แสดงถึงกฎและข้อกำหนดต่าง ๆ ในการนำสัญกรณ์ดรรชนีไปใช้บรรยายปรากฏการณ์ของของไหล ซึ่งจะช่วยให้อ่านสามารถนำความรู้ในบทนี้ไปใช้เขียนพจน์ทางคณิตศาสตร์ของบทความวิชาการหรือบทความวิจัยที่จะลงตีพิมพ์ในวารสารทางวิชาการได้สั้นและกระชับขึ้นให้เป็นไปตามข้อกำหนดในเรื่องความยาวของบทความของวารสารต่าง ๆ และยังทำให้สามารถอ่านบทความหรือตำราของผู้อื่นที่มีการใช้สัญกรณ์ดรรชนีได้เข้าใจง่ายขึ้น

ผู้เขียนขอขอบคุณ คุณอรุณรัศมี ศรีแสง ที่ได้ช่วยในการพิมพ์หนังสือเล่มนี้ และอาจารย์ นพรัตน์ คำพร ที่ช่วยเขียนรูปในหนังสือเล่มนี้เป็นส่วนใหญ่ และขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. อติ บุญจิตราคุลย์ ที่ได้กรุณาอ่านตรวจสอบต้นฉบับของหนังสือเล่มนี้ และได้ให้ข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ทำให้เนื้อหาในหนังสือเล่มนี้สมบูรณ์มากขึ้น และยังได้กรุณาเอื้อเฟื้อภาพของการไหลที่ได้จากการทดลองในอุโมงค์ลมของห้องปฏิบัติการพลศาสตร์การไหลและการควบคุมการไหล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มาใช้ประกอบในหนังสือเล่มนี้ด้วย

ท้ายนี้ผู้เขียนหวังว่า หนังสือเล่มนี้จะเป็นประโยชน์ต่อนิสิต นักศึกษา และผู้สนใจอ่านทั่วไป ในการเรียนและทำความเข้าใจในศาสตร์ของกลศาสตร์ของไหล และสามารถเห็นประโยชน์ของการประยุกต์วิชาดังกล่าวไปแก้ปัญหาทางวิศวกรรมได้ต่อไป

สมศักดิ์ ไชยะภินันท์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

มิถุนายน 2547

สารบัญ

บทที่ 1	บทนำ	1
1.1	ปรากฏการณ์ของของไหล	1
1.2	ประวัติศาสตร์การคิดค้นของกลศาสตร์ของไหล	7
1.3	นิยามของของไหล	10
1.4	มิติและหน่วย	11
	บรรณานุกรม	16
	แบบฝึกหัด	18
บทที่ 2	หลักการพื้นฐาน	21
2.1	การแก้ปัญหาโดยใช้ข้อสมมุติฐานของการมีสภาพต่อเนื่อง (continuum)	21
2.2	การพิจารณาของไหลให้มีสภาพต่อเนื่อง	22
2.3	ความเค้นในของไหล (fluid stress)	25
2.4	ค่าคุณสมบัติที่สำคัญของของไหล	30
	2.4.1 ค่าความหนืด (viscosity)	33
	2.4.2 ค่าแรงตึงผิว (surface tension)	41
2.5	เงื่อนไขขอบเขตระหว่างของไหลกับของแข็งที่สัมผัสกัน	44
2.6	สภาวะของของไหล	46
2.7	กลศาสตร์ของไหลเชิงธรณีฟิสิกส์	51
	บรรณานุกรม	54
	แบบฝึกหัด	56
บทที่ 3	ของไหลสถิต	61
3.1	ความดันที่จุดในของไหลสถิต	61

3.2	สมการพื้นฐานของของไหลสถิต	64
3.3	ค่าบรรยากาศมาตรฐาน	67
3.4	การวิเคราะห์หาค่าความเปลี่ยนแปลงของความดันในของไหลสถิต	68
3.4.1	ของไหลอัดไม่ได้	68
3.4.2	ของไหลอัดได้	73
3.5	แรงที่กระทำบนวัตถุที่จมอยู่ในของไหลสถิต	76
3.5.1	แรงที่กระทำบนแผ่นราบ	76
3.5.2	การคำนวณหาขนาดของแรงเนื่องจากความดันและจุดที่แรงกระทำ	80
3.6	แรงที่กระทำต่อผิววัตถุโค้งที่จมอยู่ในของเหลวสถิต	90
3.7	แรงลอยตัวและเสถียรภาพ	97
3.8	ของไหลที่มีการเคลื่อนที่ในลักษณะเป็นวัตถุเกร็ง	101
	บรรณานุกรม	108
	แบบฝึกหัด	109
บทที่ 4	จลนศาสตร์ของของไหลและการวิเคราะห์เชิงปริมาตรควบคุม	119
4.1	สนามความเร็ว	120
4.1.1	การบรรยายการไหลแบบ Eulerian และ Lagrangian	120
4.1.2	การไหลแบบหนึ่งมิติ สองมิติ และ สามมิติ	123
4.1.3	Timeline, Pathline, Streaklines และ Streamlines	125
4.2	กฎพื้นฐานสำหรับระบบ	129
4.2.1	กฎการอนุรักษ์มวล	129
4.2.2	กฎข้อที่สองของนิวตัน หรือกฎอนุรักษ์โมเมนตัม	130
4.2.3	หลักการของการอนุรักษ์ของโมเมนตัมเชิงมุม	130
4.2.4	กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์หรือกฎอนุรักษ์พลังงาน	131
4.2.5	กฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์	132

4.3	การเขียนกฎพื้นฐานเพื่อใช้กับปริมาตรควบคุม	133
4.3.1	ความสัมพันธ์ของคุณสมบัติของไหลซึ่งอ้างอิงด้วยระบบกับ คุณสมบัติของไหลซึ่งอ้างอิงด้วยปริมาตรควบคุม	133
4.4	สมการของการอนุรักษ์มวล	138
4.5	สมการโมเมนตัมที่ใช้กับปริมาตรควบคุม	145
4.6	สมการโมเมนตัมที่ใช้กับปริมาตรควบคุมที่มีการเคลื่อนที่	157
4.6.1	ปริมาตรควบคุมเคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่	158
4.6.2	ปริมาตรควบคุมที่เคลื่อนที่ด้วยความเร่งแบบเชิงเส้นตรง	162
4.6.3	ปริมาตรควบคุมที่เคลื่อนที่ด้วยความเร่งใด ๆ	165
4.7	หลักการของโมเมนตัมเชิงมุม	167
4.8	กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์	170
4.9	กฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์	174
	บรรณานุกรม	175
	แบบฝึกหัด	176
บทที่ 5	การวิเคราะห์เชิงอนุพันธ์ของการเคลื่อนที่ของของไหล	189
5.1	จลนศาสตร์ของอนุภาคของไหล	190
5.2	ความเร่งของอนุภาคของของไหล	196
5.3	สมการของการอนุรักษ์มวล	200
5.4	สมการโมเมนตัมในรูปอนุพันธ์	204
5.5	สมการนาเวียร์-สโตกส์	208
5.6	สมการ Euler สำหรับการไหลไร้ความหนืด	209
5.7	สมการเบอร์นูลลี	211
5.7.1	การวิเคราะห์บนแกนพิกัดเส้น streamline	211
5.7.2	สมการ Euler บนแกนพิกัด n	219
5.8	ความดันสถิต ความดันพลวัต และความดันรวม	220

5.9	สตรีมฟังก์ชันสำหรับการไหลอัดไม่ได้ 2 มิติ	225
5.10	การไหลแบบ potential (potential flow)	229
5.10.1	การไหลแบบไม่หมุน (irrotational flow)	230
5.10.2	สมการเบอร์นูลลีสำหรับการไหลแบบไม่หมุน	230
5.10.3	Velocity potential	232
5.10.4	การไหลแบบ potential สำหรับการไหลแบบอัดไม่ได้ 2 มิติ	233
5.10.5	การไหลแบบ potential พื้นฐานที่เป็นระนาบ	236
5.10.5.1	การไหลแบบสม่ำเสมอ	236
5.10.5.2	การไหลแบบซอร์ส (source)	238
5.10.5.3	การไหลแบบซิงก์ (sink)	240
5.10.5.4	การไหลแบบ vortex	241
5.10.5.5	การไหลแบบดับเบิลต์ (doublet)	243
5.10.6	การนำเอาการไหลพื้นฐานมาซ้อนกัน	245
	บรรณานุกรม	254
	แบบฝึกหัด	255
บทที่ 6	การวิเคราะห์มิติและความคล้าย	263
6.1	การวิเคราะห์มิติ	264
6.2	ทฤษฎี Buckingham- π	266
6.3	พารามิเตอร์ไร้มิติที่มีความหมายทางกายภาพ	271
6.4	การศึกษาความคล้ายและแบบจำลอง	273
6.4.1	ความคล้ายคลึงเชิงเรขาคณิต	274
6.4.2	ความคล้ายคลึงเชิงจลนศาสตร์	275
6.4.3	ความคล้ายคลึงเชิงพลวัต	275
6.4.4	การวิเคราะห์เพื่อใช้ในการศึกษาแบบจำลอง	276

6.4.5	การทดลองในกรณีที่มีการไหลไม่สามารถมีความ คล้ายคลึงที่แท้จริง	279
6.4.6	การศึกษาการไหลที่ขึ้นกับพารามิเตอร์ไร้มิติตามหลายค่า	285
6.4.7	การทดลองแบบจำลองโดยใช้อุโมงค์ลมหรืออุโมงค์น้ำ	290
6.4.7.1	อุโมงค์ลม	291
6.4.7.2	อุโมงค์น้ำ	295
6.4.7.3	ตัวอย่างการทดลองวัตถุแบบจำลอง	296
	บรรณานุกรม	304
	แบบฝึกหัด	306
บทที่ 7	การไหลแบบภายใน	313
7.1	การไหลช่วงขาเข้ากับการไหลแบบพัฒนาเต็มที่	313
7.2	การไหลแบบราบเรียบที่พัฒนาเต็มที่	316
7.2.1	การไหลแบบราบเรียบที่พัฒนาเต็มที่ระหว่างแผ่นราบที่ยาว เป็นอนันต์วางขนานกัน	316
7.2.1.1	การไหลผ่านแผ่นราบที่ยาวเป็นอนันต์วางขนานกัน โดยแผ่นทั้งสองอยู่กับที่	316
7.2.1.2	การไหลผ่านแผ่นราบขนานที่แผ่นบน มีการเคลื่อนที่	323
7.2.2	การไหลแบบราบเรียบที่พัฒนาเต็มที่ในท่อกลม	327
7.3	การไหลที่มีการพัฒนาเต็มที่ซึ่งอยู่ในสภาวะปั่นป่วน	333
7.4	การสูญเสียในการไหลในท่อ	341
7.5	การสูญเสียหลักและการสูญเสียรอง	344
7.5.1	การสูญเสียหลัก	344
7.5.1.1	การไหลแบบราบเรียบ	345
7.5.1.2	การไหลแบบปั่นป่วน	346

7.5.2	การสูญเสียรอง	352
7.5.3	ท่อที่ไม่ใช่ท่อกลม	359
7.6	ปัญหาของการไหลในท่อ	359
7.6.1	ระบบท่อเดี่ยว	359
7.6.2	ระบบท่อแบบหลายท่อ	373
7.7	การวัดการไหลในท่อ	378
7.7.1	อุปกรณ์การวัดที่ใช้หลักการของการวัดการไหลโดยตรง	379
7.7.2	มาตรวัดที่ใช้หลักการที่ก่อให้เกิดความดันลดในท่อ	379
7.7.3	มาตรวัดการไหลที่ใช้หลักการของการแปรแบบเชิงเส้น	386
7.7.4	มาตรวัดการไหลที่ใช้วิธีวัดแบบตามขวาง	389
	บรรณานุกรม	399
	แบบฝึกหัด	400
บทที่ 8	การไหลแบบภายนอก	411
8.1	แนวคิดของชั้นขอบเขต	411
8.2	คุณลักษณะของชั้นขอบเขต	414
8.3	สมการชั้นขอบเขตสำหรับการไหลแบบราบเรียบ	421
8.4	ผลเฉลยของבלาเซียสสำหรับการไหลในชั้นขอบเขตแบบราบเรียบผ่านแผ่นราบ	426
8.5	สมการโมเมนต์อินทิกรัล	436
8.6	การใช้สมการโมเมนต์อินทิกรัลกับการไหลผ่านแผ่นราบ	440
8.6.1	การไหลแบบราบเรียบ	440
8.6.2	การไหลแบบปั่นป่วน	444
8.7	การเกิดปรากฏการณ์การแยก (Separation)	445
8.8	แรงบนวัตถุที่จมอยู่ในของไหล	447
8.8.1	แรงหน่วง	447

8.8.1.1	แรงหน่วงจากความเค้นเฉือนบนแผ่นราบที่เรียบ	447
8.8.1.2	ค่าแรงหน่วงจากความเค้นเฉือนบนแผ่นราบ ที่ขรุขระ	459
8.8.1.3	แรงหน่วงจากความดัน	463
8.8.1.4	แรงหน่วงที่เกิดจากความเค้นเฉือนและความดัน	464
8.8.1.5	การทำให้วัตถุมีรูปร่างเพียวตามกระแสการไหล	469
8.8.2	แรงยก	473
8.8.2.1	การไหลผ่านแพนอากาศ	474
8.8.2.2	การไหลผ่านแพนอากาศในลักษณะสามมิติ	479
	บรรณานุกรม	487
	แบบฝึกหัด	488
บทที่ 9	เครื่องจักรกลของไหล	495
9.1	การแบ่งชนิดของเครื่องจักรกลของไหล	496
9.1.1	เครื่องจักรกลแบบการจัดเป็นบวก	496
9.1.2	เครื่องจักรกลแบบพลวัต	496
9.1.3	กังหันและเครื่องสูบ	500
9.2	การวิเคราะห์การไหลแบบอุดมคติของเครื่องจักรกลแบบใบพัด	503
9.2.1	หลักการของโมเมนตัมเชิงมุม	504
9.2.2	แผนภาพความเร็ว	506
9.2.3	ผลของมุมใบพัดที่มีต่อเครื่องจักรกลแบบไหลตามรัศมี	517
9.3	ประสิทธิภาพของเครื่องจักรกลของไหล	521
9.4	สมรรถนะของเครื่องสูบ	523
9.5	ปรากฏการณ์คาวิตีเทชันและค่าหัวดูดสุทธิที่เป็นบวก	525
9.5.1	ปรากฏการณ์คาวิตีเทชัน	526
9.5.2	ค่าหัวดูดสุทธิที่เป็นบวก	530

9.5.3	การสันตะเหื่อนจากปรากฏการณ์ควิเตชัน	537
9.6	กฎของความคล้าย	542
9.7	การทำงานของระบบของไหล	546
9.8	พัคดลม	557
9.9	กั้งหันน้ำ	575
9.10	กั้งหันลม	581
9.10.1	ทฤษฎีกั้งหันลมแนวนอน	584
9.10.1.1	ทฤษฎีโมเมนตัมตามแนวแกนสำหรับ กั้งหันลมแนวนอน	584
9.10.1.2	ทฤษฎีชิ้นส่วนย่อยของใบกั้งหันสำหรับ กั้งหันลมแนวนอน	587
9.10.1.3	ทฤษฎีสูตรสำหรับกั้งหันลมแนวนอน	589
9.10.2	ทฤษฎีกั้งหันลมแนวตั้ง	592
9.10.2.1	ทฤษฎีโมเมนตัมตามแนวแกนสำหรับ กั้งหันลมแนวตั้ง	593
9.10.2.2	ทฤษฎีชิ้นส่วนย่อยของใบกั้งหันสำหรับ กั้งหันลมแนวตั้ง	594
9.10.2.3	ทฤษฎีสูตรสำหรับกั้งหันลมแนวตั้ง	594
9.10.3	การเลือกกั้งหันลม	603
9.10.4	สมรรถนะของกั้งหันลมแนวนอน	607
9.10.4.1	ทฤษฎีโมเมนตัมตามแนวแกนที่รวมผลของ ลำอากาศหมุนทางด้านหลังกั้งหัน	607
9.10.4.2	ทฤษฎีชิ้นส่วนย่อยของใบกั้งหันลมแนวนอนที่ พิจารณาผลของลำอากาศหมุน	610
9.10.4.3	ทฤษฎีสูตรสำหรับกั้งหันลมแนวนอนเมื่อ คิดผลของลำอากาศหมุน	611

9.10.4.4	สภาวะที่ไม่สามารถใช้ทฤษฎีโมเมนตัม	612
9.10.4.5	การสูญเสียที่ปลายใบ	614
9.10.4.6	ความเค้นของใบก้านล้มแนวนอน	617
9.10.4.7	ก้านล้มในสภาพหนีลม	621
9.10.5	การศึกษาสมรรถนะและโครงสร้างของก้านล้มที่ ถูกออกแบบให้มีประสิทธิภาพสูงทางอากาศพลศาสตร์	624
	บรรณานุกรม	634
	แบบฝึกหัด	638
บทที่ 10	การไหลแบบอัดได้หนึ่งมิติ	647
10.1	ความสัมพันธ์ทางเทอร์โมไดนามิกส์	648
10.2	การเคลื่อนที่ของคลื่นเสียง	652
10.3	รูปกรวยมัค	655
10.4	คุณสมบัติสแตกเนชันไอเซนทรอปิกเฉพาะที่	657
10.5	สมการพื้นฐานสำหรับการไหลแบบไอเซนทรอปิก	658
10.6	ผลของการเปลี่ยนแปลงขนาดของพื้นที่สำหรับ การไหลแบบไอเซนทรอปิก	661
10.7	การไหลแบบไอเซนทรอปิกของก๊าซอุดมคติ	665
10.8	การไหลผ่านหัวฉีด	670
	10.8.1 การไหลผ่านหัวฉีดแบบลู่เข้า	670
	10.8.2 การไหลผ่านหัวฉีดแบบลู่เข้าและบานออก	678
10.9	การไหลในส่วนของท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดคงที่และมีความเสียดทาน	685
	10.9.1 เส้นแฟนน	685
	10.9.2 การหาค่าคุณสมบัติของการไหลบนเส้นแฟนน โดยใช้ค่าตัวเลขมัค	694
	10.9.3 การไหลแบบอุดมภูมิมีค่าคงที่	702

10.10	การไหลแบบมีการถ่ายเทความร้อนในส่วนของท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดคงที่แต่ไม่มีความเสียดทาน	705
10.10.1	เส้นเรย์ลี	705
10.10.2	การหาความสัมพันธ์ของคุณสมบัติการไหลบนเส้นเรย์ลี	712
10.11	คลื่นช็อกแบบตั้งฉาก	715
10.12	ช็อกแบบเอียง	724
	บรรณานุกรม	729
	แบบฝึกหัด	730
บทที่ 11	เทนเซอร์	739
11.1	เวกเตอร์และเทนเซอร์	739
11.1.1	การเขียนเทนเซอร์โดยสัญลักษณ์ทั่วไป	740
11.1.2	การเขียนเทนเซอร์ด้วยสัญลักษณ์ดรรชนี	740
11.2	กฎของการใช้สัญลักษณ์ดรรชนีและกฎการแปลงของเทนเซอร์	741
11.2.1	สัญลักษณ์พิสัย	741
11.2.2	สัญลักษณ์ผลบวก	742
11.2.3	กฎการแปลงของเทนเซอร์	743
11.3	การบวกและลบกันของเทนเซอร์ที่แสดงโดยใช้สัญลักษณ์ดรรชนี	746
11.4	การคูณกันของเทนเซอร์	748
11.4.1	ผลคูณภายใน	748
11.4.2	ผลคูณภายนอก	753
11.5	เกรเดียนต์ของฟังก์ชันสเกลาร์	753
11.6	ไดเวอร์เจนซ์ของฟังก์ชันเวกเตอร์	754
11.7	เคิร์ลของฟังก์ชันเวกเตอร์	755
11.8	เอกลักษณ์ $\epsilon - \delta$	756
11.9	การอินทิเกรตเส้น พื้นที่ และปริมาตร	758

11.10	สมการหลักของกลศาสตร์ของไหล	761
	บรรณานุกรม	763
	แบบฝึกหัด	764
ภาคผนวก ก	คุณสมบัติของของไหล	767
ภาคผนวก ข	ตารางการไหลแบบอัดได้ของอากาศ	779
ภาคผนวก ค	สมการในรูปของแกนพิกัดทรงกระบอก	795
ภาคผนวก ง	ตารางการแปลงหน่วย	797
คำตอบ		801
ดัชนี		805

บทนำ

ในบทแรกของหนังสือเล่มนี้จะเป็นบทนำที่จะเกริ่นถึงความสำคัญของวิชากลศาสตร์ของไหล โดยจะพยายามแสดงให้เห็นถึงเหตุการณ์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ของของไหลซึ่งมนุษย์นำไปประยุกต์ใช้งาน และนำไปออกแบบงานทางวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องกับการใช้ชีวิตประจำวันรอบตัวเรา และยังได้กล่าวถึงประวัติการคิดค้นศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับกลศาสตร์ของไหลที่สำคัญตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบัน เพื่อให้ผู้อ่านได้ตระหนักถึงพัฒนาการของศาสตร์ในวิชากลศาสตร์ของไหล ได้เห็นถึงความสำคัญของการเรียนวิชาดังกล่าวนี้อย่างแท้จริง และเห็นแนวทางการนำความรู้ที่ได้ไปประยุกต์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์และแก้ปัญหาทางวิศวกรรมที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมของของไหล นอกจากนี้ในบทนี้ยังได้กล่าวถึงนิยามของของไหล มิติและหน่วย และการแปลงหน่วย

1.1 ปรากฏการณ์ของของไหล

วิชากลศาสตร์ของไหลนั้นเป็นวิชาที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาพฤติกรรมและผลที่เกิดขึ้นเนื่องจากของไหลกระทำต่อผิวของวัตถุที่สัมผัส หรือกระทำต่อของไหลอีกชนิด โดยที่ของไหลดังกล่าวอาจจะอยู่ในสถานะที่เคลื่อนที่หรือสถานะที่อยู่นิ่งก็ได้ ของไหลที่กล่าวถึงนี้ยังสามารถแบ่งออกได้เป็น ของเหลวและก๊าซ ปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับของไหลและกลศาสตร์ของไหลที่อยู่รอบตัวเรานั้นมีมากมาย ตัวอย่างของปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องมีตั้งแต่การไหลของเลือดใน

หลอดเลือดที่มีขนาดเล็ก จนถึงการไหลของน้ำมันดิบในท่อส่งที่อาจมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 1 เมตร ปรากฏการณ์เกี่ยวกับอากาศที่อยู่รอบวัตถุที่เคลื่อนที่ก็เป็นพฤติกรรมที่สำคัญอีกอย่างของของไหล ตัวอย่างเช่น ปรากฏการณ์ของอากาศที่ทำให้เครื่องบิน จรวด และชีปนาวุธสามารถบินอยู่ในอากาศได้ ซึ่งนำไปสู่การออกแบบปีกเครื่องบิน การออกแบบลำตัวเครื่องบินหรือจรวด การออกแบบชีปนาวุธให้สามารถเคลื่อนที่จากเรือรบไปสู่เป้าหมายอย่างแม่นยำ การออกแบบรูปร่างของวัตถุที่แหวกอากาศ เช่น ลูกกอล์ฟ ลูกเทนนิส ลูกเบสบอล และปรากฏการณ์ของการเคลื่อนที่ของยานพาหนะบนดินที่เคลื่อนแหวกอากาศ ซึ่งนำไปสู่การออกแบบรถยนต์ให้วิ่งฝ่าอากาศด้วยความเร็วสูงโดยมีความต้านทานต่ำ การออกแบบระบบขนส่งไฟฟ้า การออกแบบรถไฟที่เคลื่อนที่ฝ่าอากาศ และการออกแบบรถไฟใต้ดินที่เคลื่อนที่แหวกอากาศในอุโมงค์ใต้ดิน เป็นต้น การระบายอากาศ หรือผลของอากาศที่ถูกอัดภายใต้การเคลื่อนที่ของรถไฟในอุโมงค์ใต้ดิน ต่างเป็นพฤติกรรมหรือเหตุการณ์ที่ต้องใช้ความเข้าใจเกี่ยวกับกลศาสตร์ของไหลทั้งนั้น นอกจากนั้น การออกแบบยานพาหนะที่เคลื่อนที่ในของไหลที่เป็นของเหลวเช่นน้ำ ได้แก่ เรือ เรือดำน้ำ เรือสะเทินน้ำสะเทินบก ก็เป็นอีกส่วนหนึ่งที่ต้องใช้ความเข้าใจในเรื่องกลศาสตร์ของไหล การดึงพลังงานออกจากของไหลโดยใช้กังหัน เช่น กังหันลม กังหันน้ำ และอุปกรณ์ขับเคลื่อนของไหลต่าง ๆ อันได้แก่ พัดลม เครื่องสูบลม เครื่องอัดอากาศ เครื่องสูบน้ำ เครื่องสูบสารแขวนลอยต่าง ๆ ต่างก็เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทของไหล แม้กระทั่งภูมิอากาศที่เปลี่ยนแปลงตามส่วนต่าง ๆ ของโลก อันได้แก่ ลมมรสุม ลมกรรโชก การเคลื่อนที่ของเมฆฝน ฝนตก ก็ยังเป็นปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับของไหลทั้งนั้น ดังนั้น จะเห็นได้ว่าความเข้าใจในพฤติกรรมของของไหลจึงเป็นสิ่งสำคัญต่อการนำมาพัฒนาเพื่อใช้ประโยชน์ต่อ ไม่ว่าจะเป็นประโยชน์ในแง่ของการนำไปใช้งานหรือประโยชน์ในแง่นำไปออกแบบเพื่อให้ได้สิ่งที่ต้องการตามความมุ่งหมาย

หากนำปรากฏการณ์หรือเหตุการณ์ที่กล่าวถึงมาจับเป็นกลุ่มเพื่อพยายามชี้ชัดลงไปให้เห็นว่า ทำไมนิสิตหรือนักศึกษาที่ศึกษาในสายวิชาวิศวกรรมจำเป็นต้องเรียนและเข้าใจในวิชากลศาสตร์ของไหลแล้วนั้น งานที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมของของไหลอาจสามารถแบ่งเป็นหมวดใหญ่ ๆ ได้เป็น

1. การออกแบบของยานพาหนะที่ใช้ในการขนส่ง จะต้องการความเข้าใจในหลักการของกลศาสตร์ของไหล ของไหลที่ยานพาหนะเคลื่อนที่ผ่านสามารถแบ่งเป็น ของเหลวกับอากาศ ในกรณีของอากาศ การออกแบบยานพาหนะที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ เครื่องบิน ที่ไม่ว่าจะเป็นเครื่องบินโดยสารซึ่งโดยทั่วไปจะบินด้วยความเร็วต่ำกว่าเสียง (subsonic) หรือเครื่องบินรบที่มักจะบินด้วยความเร็วสูงกว่าเสียง (supersonic) หรือเครื่องบินที่เคลื่อนที่ขึ้นลงในแนวดิ่ง เครื่องเฮลิคอปเตอร์ รถยนต์ และรถไฟฟ้าโดยสารไม่ว่าจะอยู่บนดินหรือแล่นในอุโมงค์ใต้ดิน เป็นต้น การออกแบบยานพาหนะเหล่านี้เกี่ยวข้องกับการออกแบบรูปร่างและการออกแบบระบบขับเคลื่อน ซึ่งจะทำให้ยานพาหนะสามารถขับเคลื่อนฝ่าอากาศไปในความเร็วที่กำหนดโดยใช้พลังงานน้อยที่สุด [1, 2] ดังนั้น ผู้ออกแบบจำเป็นต้องรู้ถึงพฤติกรรมของของไหลในรูปของอากาศที่เมื่อถูกวัตถุเคลื่อนที่ผ่านว่าจะทำให้ความเร็วของของไหลเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร มีแรงเสียดทานเกิดขึ้นมากน้อยแค่ไหน ความรู้และความเข้าใจในกลศาสตร์ของไหลจะช่วยให้ผู้ออกแบบสามารถวิเคราะห์และออกแบบได้ถูกต้อง กลศาสตร์ของไหลที่เกี่ยวข้องกับอากาศที่ไหลผ่านวัตถุมักจะถูกเรียกย่อยเป็น อากาศพลศาสตร์ (aerodynamics) ในขณะเดียวกัน ถ้าของไหลเป็นของเหลว เช่น น้ำ การออกแบบที่เกี่ยวข้องกับยานพาหนะที่เคลื่อนที่ในน้ำ ได้แก่ การออกแบบเรือสินค้า เรือรบ และเรือดำน้ำ เป็นต้น ซึ่งการออกแบบยานพาหนะดังกล่าวต้องมีความเข้าใจถึงพฤติกรรมของการลอยตัว (buoyancy) และพฤติกรรมของแรงต้านของน้ำเมื่อเรือเคลื่อนที่ [3]

2. การออกแบบทางโครงสร้าง เมื่อกล่าวถึงคำว่า โครงสร้าง คนทั่วไปมักนึกถึงการออกแบบในสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา ไม่น่าจะมีอะไรเกี่ยวข้องกับวิชากลศาสตร์ของไหลเลย แต่อย่าลืมว่าโครงสร้างอาคารสมัยใหม่มักจะมีขนาดใหญ่และสูง เมื่ออาคารมีขนาดใหญ่และสูงแล้ว ภาระที่เกิดขึ้นกับตัวโครงสร้างนั้นนอกเหนือภาระที่เกิดขึ้นจากผู้อยู่อาศัยและเครื่องจักรที่ติดตั้งบนอาคารแล้ว จะยังมีภาระจากภายนอกอีก ก็คือภาระจากลม อาคารยิ่งสูงเท่าใดลมก็ยิ่งแรงขึ้น ลมก็จะเป็นภาระส่วนหนึ่งที่กระทำต่ออาคาร และลมอาจเป็นลมกรรโชก หรือลมพายุที่แปรเปลี่ยนตามเวลา การออกแบบอาคารสมัยใหม่ จึงต้องมีความเข้าใจเกี่ยวกับสภาวะการรับภาระจากลม จนได้มีการศึกษาเพื่อกำหนดมาตรฐานแรงลมสำหรับการออกแบบอาคารสูงใหม่ในประเทศไทย [4] ตัวอย่างสำหรับโครงสร้างอีกแบบที่ต้องทำการศึกษาพฤติกรรมของลมอย่าง

มากก็คือสนามกีฬาขนาดใหญ่ที่มีหลังคายื่นออกไปคลุมอัฒจันทร์ที่นั่งคนดู ซึ่งจุดมุ่งหมายหลักของสนามกีฬามักอยู่ที่ต้องการจุคนมาก ๆ มีหลังคาคลุมกันแดดกันฝน และเมื่อนั่งดูแล้วไม่ว่านั่งจากที่นั่งจุดใดในสนามสามารถมองเห็นการแข่งขันในสนามโดยไม่มีอะไรขวาง จากเงื่อนไขดังกล่าวจะเห็นว่าสนามกีฬาที่ดีจะมีขนาดใหญ่จุคนได้มากและจะมีหลังคาคลุมทั้ง 4 ด้าน และจะต้องไม่มีเสาค้ำยันหลังคาที่ยื่นออกมา เพราะเสาจะเป็นตัวบดบังทัศนวิสัยของผู้ชมกีฬาที่บังเอิญไปนั่งหลังเสาเหล่านั้นได้ ดังนั้น หลังคาจึงต้องเป็นลักษณะยื่นออกมาแบบ cantilever ซึ่งสนามยังมีขนาดใหญ่ขึ้นเท่าใดแผ่นหลังคาก็จะต้องยื่นยาวออกมามากขึ้น ภาระทั้งหมดบนโครงสร้างหลังคาจะถูกรองรับจากโครงสร้างที่อยู่ด้านขอบหลังคาด้านหลัง การออกแบบการรับภาระปกติไม่ใช่เรื่องยากในศาสตร์ทางสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา แต่ผู้ออกแบบต้องมีความเข้าใจผลของลมที่อาจพัดเข้าหาแผ่นหลังคาด้วยความเร็วสูง และทำให้ตัวแผ่นหลังคาทำหน้าที่เหมือนปีกเครื่องบิน คือเกิดแรงยกขึ้นจากผลของลมที่พัดผ่านแผ่นหลังคา ซึ่งแรงเหล่านี้จะแปรตามความเร็ว ทำให้แผ่นหลังคาอาจมีการขยับตัวตามแรงยกที่เกิดขึ้น ดังนั้น โครงสร้างหลังคาในลักษณะดังกล่าวต้องมีการออกแบบเพื่อสำหรับภาระจากแรงยกในสภาวะไม่คงตัวที่เกิดจากลมที่พัดผ่าน และต้องมีการคำนวณในเรื่องการวิบัติจากปัญหาการสั่นสะเทือนของโครงสร้างภายใต้ลมดังกล่าว โดยที่ตัวโครงสร้างจะมีความถี่ธรรมชาติหลายโหมดและหลายความถี่ ในงานโครงสร้างสมัยใหม่จึงมักมีการศึกษา และการนำแบบจำลองไปทดสอบในอุโมงค์ลม ตัวอย่างเช่น หลังคาและโครงสร้างของสนามกีฬาราชมั่งคลาสสถานที่ตั้งอยู่ที่หัวหมาก ก็ได้มีการทดสอบภาระจากแรงลมในอุโมงค์ลมที่ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย [5] นอกจากนั้นโครงสร้างของสะพานต่าง ๆ ก็ต้องมีการนำกลศาสตร์ของไหลไปใช้ร่วมในการออกแบบ ซึ่งการวิบัติของสะพาน Tacoma ในปี ค.ศ. 1940 เป็นตัวอย่างที่ถือว่าเป็นตัวอย่างคลาสสิกของการละเลยผลของการใช้กลศาสตร์ของไหลไปวิเคราะห์ร่วมกับการออกแบบทางโครงสร้าง สะพาน Tacoma เป็นสะพานข้ามช่องเขาที่มีลักษณะค่อนข้างยาว ในขณะที่ด้านกว้างของตัวสะพานนั้นค่อนข้างแคบ ดังนั้น สะพานดังกล่าวจึงมีลักษณะคล้ายไม้บรรทัดยาวพาดผ่านช่องเขา วิศวกรที่ออกแบบได้คำนวณภาระต่าง ๆ สำหรับการออกแบบโครงสร้างสะพาน และยังได้คำนวณเพื่อภาระจากลมที่พัดผ่านสะพานให้มีผลเกิดการแกว่งตัวตามแนวลมไว้แล้วด้วย แต่เนื่องจากลักษณะของสะพานมีลักษณะเป็นแผ่นบางเมื่อลมพัดให้มัน

แกว่ง ตัวสะพานจะมีลักษณะเหมือนปีกเครื่องบินที่เียงปีกรับลม (เกิดมูมปะทะ) ทำให้เกิดแรงยกขึ้น ดังนั้น นอกเหนือจากการแกว่งในแนวขวาง ตัวสะพานจะถูกยกขึ้นและลงในแนวที่ตั้งฉากกับพื้นถนน ซึ่งเหตุการณ์ดังกล่าวเกิดขึ้นกับตัวสะพาน Tacoma ในวันที่มีลมแรง เมื่อสะพานมีการเคลื่อนที่ในแนวตั้งเกิดขึ้นในลักษณะขึ้นและลง การเคลื่อนที่ดังกล่าวเกิดขึ้นที่ความถี่ซึ่งไปสอดคล้องกับความถี่ธรรมชาติของสะพานในโหมดย่อยโหมดหนึ่ง ส่งผลให้การเคลื่อนที่ดังกล่าวขยายตัวมากขึ้น จนกระทั่งสะพานคอนกรีตทั้งสะพานพังลงมา [6] หลังจากนั้น การออกแบบสะพานก็ได้มีการนำผลของลมดังกล่าวที่มีต่อสะพานไปพิจารณาประกอบการออกแบบด้วย สะพานชิงพระราม 9 หรือสะพานชิงพระราม 8 ต่างมีการออกแบบโดยนำกลศาสตร์ทางของไหลไปพิจารณาประกอบด้วย และการออกแบบดังกล่าวมักจะต้องนำหุ่นจำลองไปทดสอบในอุโมงค์ลมเพื่อหาแรงจากอากาศพลศาสตร์ที่กระทำต่อโครงสร้าง รวมทั้งดูสภาพสนามการไหลรอบตัวโครงสร้างดังกล่าว ปล่องควันสูง ๆ จากโรงงานผลิตภัณฑ์ทางเคมี โรงกลั่นน้ำมัน หรือโรงงานอุตสาหกรรมพลาสติก ต่างมีการพิจารณาผลของลมที่อาจจะทำให้ปล่องวิบัติลงมาได้ แม้กระทั่งการจะตั้งโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการปล่อยควันหรือของเสียใกล้กับที่อยู่อาศัย ในบางประเทศที่เข้มงวด ทางราชการบังคับให้ทางโรงงานอุตสาหกรรมนั้นจะต้องทำแบบหุ่นจำลองของตัวโรงงานและตัวอาคารที่อยู่อาศัยที่ใกล้เคียง และทำการทดสอบในอุโมงค์ลมว่าหากปล่อยของเสียออกจากปล่องและมีลมพัดในทิศทางต่างกันด้วยความเร็วลมต่างกัน ลมจะม้วนหรือพัดเอาของเสียเข้าหาอาคารที่อยู่อาศัยทางด้านไหนอย่างไรบ้าง เพื่อจะได้มีการออกแบบระบบป้องกันและระบบการปล่อยของเสียที่ไม่รบกวนชาวบ้านได้ ซึ่งการวิเคราะห์ดังกล่าวต้องอาศัยความรู้ทางกลศาสตร์ของไหลอย่างแน่นอน

3. การออกแบบเครื่องจักรของไหล (fluid machinery) อันได้แก่ เครื่องสูบน้ำ พัดลม เครื่องเป่าลม เครื่องอัดอากาศ กังหันลม และกังหันน้ำนั้น ต่างต้องใช้ความรู้จากวิชากลศาสตร์ของไหล และต้องมีความเข้าใจถึงระบบที่นำมาต่อใช้งานกับเครื่องจักรกลของไหลเหล่านี้ เพื่อจะได้สามารถออกแบบหรือเลือกเครื่องจักรกลของไหลมาใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ระบบลำเลียงของไหลที่นำมาใช้กับเครื่องจักรกลของไหลนั้นมีมากมาย เช่น ระบบท่อที่ใช้ในการระบายอากาศ หรือระบบท่อส่งลมเย็นที่ใช้ในระบบปรับอากาศและระบายอากาศของอาคารสำนักงาน

อาคารพาณิชย์ขนาดใหญ่ หรือโรงงานอุตสาหกรรม ระบบที่ใช้ในการระบายอากาศในอุโมงค์ใต้ดินของสถานีรถไฟใต้ดิน ระบบท่อน้ำเย็นและระบบท่อน้ำหล่อเย็นของระบบปรับอากาศขนาดใหญ่ ระบบท่อน้ำที่ใช้ในขบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรม ระบบท่อน้ำมันหรือระบบท่อน้ำมันส่งก๊าซขนาดใหญ่ เป็นต้น ศาสตร์ในวิชากลศาสตร์ของไหลจะช่วยให้เกิดความเข้าใจในเรื่องแรงเสียดทานจากการไหล ความเข้าใจในเรื่องความดันลดในท่อ ปรากฏการณ์ควาวิตะชันที่เกิดจากการเหนี่ยวนำของการไหลซึ่งจะก่อให้เกิดการสั่นสะเทือนและการกัดกร่อนในวัสดุที่ของไหลไหลผ่าน [7] ความเข้าใจในเรื่องดังกล่าวจะช่วยทำให้สามารถออกแบบระบบลำเลียงของไหลและสามารถออกแบบและเลือกอุปกรณ์ขับเคลื่อนของไหลที่เป็นเครื่องจักรกลของไหลได้อย่างมีประสิทธิภาพ การผลิตพลังงานจากของไหลต่าง ๆ โดยใช้เครื่องจักรของไหลที่เป็นกังหัน ก็เป็นงานทางวิศวกรรมอีกส่วนหนึ่งที่มีความสำคัญ การเลือกใช้และออกแบบกังหันน้ำ และกังหันลมที่เหมาะสมกับสถานะที่มีตามธรรมชาตินั้น ก็จำเป็นต้องใช้ความรู้จากวิชากลศาสตร์ของไหล โดยเฉพาะสำหรับการออกแบบกังหันลมนั้นจำเป็นต้องมีความเข้าใจในภาวะที่เกิดขึ้นบนทั้งตัวใบและโครงสร้างของกังหันลมที่เกิดจากการที่ใบกังหันเคลื่อนที่ตัดผ่านกระแสลม [8, 9, 10]

4. งานในส่วนอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับกลศาสตร์ของไหลนอกเหนือจาก 3 หัวข้อดังกล่าวนี้ ยังมีอีกมากมาย เช่น การออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้เกี่ยวข้องกับกีฬาที่แหวกอากาศ ตัวอย่างเช่น การออกแบบลูกกอล์ฟ การออกแบบไม้กอล์ฟที่ทำให้ลูกกอล์ฟเคลื่อนที่ไปได้ไกล การควบคุมการเลี้ยวของลูกกอล์ฟ ลูกเทนนิส การออกแบบไม้เทนนิส การออกแบบเกี่ยวกับอุปกรณ์ทางการแพทย์ที่เกี่ยวข้องกับการไหลของโลหิต เช่น หัวใจเทียม หลอดเลือดเทียม การหล่อลื่นต่าง ๆ การออกแบบการผสมของเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ให้มีประสิทธิภาพสูง การออกแบบการระบายความร้อนของอุปกรณ์ต่าง ๆ การออกแบบการไหลของพลาสติกเหลวในแม่พิมพ์ โดยใช้หลักการของระเบียบวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics) มาช่วยในการทำนายการไหลในแม่พิมพ์ [11] เพื่อให้มีชิ้นงานที่สมบูรณ์ การออกแบบเพื่อลดเสียงรบกวนจากการเคลื่อนที่ของอากาศความเร็วสูง เป็นต้น ต่างต้องใช้ความรู้และความเข้าใจในกลศาสตร์ของไหลทั้งนั้น

ยังมีงานอีกมากมายที่ต้องใช้ความรู้ทางกลศาสตร์ของไหลนำมาวิเคราะห์ ที่อาจไม่ได้แสดงอยู่ใน 4 หัวข้อที่กล่าวถึง แต่จุดมุ่งหมายของการยกตัวอย่างต่าง ๆ นี้ ก็เพื่อให้เห็นถึงความสำคัญของวิชากลศาสตร์ของไหล

1.2 ประวัติศาสตร์การคิดค้นของกลศาสตร์ของไหล

ก่อนที่จะเราจะทำการศึกษาลักษณะและทฤษฎีต่าง ๆ ในกลศาสตร์ของไหล นิสินน่าจะรู้ถึงพัฒนาการของศาสตร์ดังกล่าวว่า มีประวัติการพัฒนามาอย่างไรจากอดีตถึงปัจจุบัน การค้นพบที่สำคัญที่ถือว่าเป็นจุดเริ่มต้นของกลศาสตร์ของไหลคือ การค้นพบหลักการลอยตัวของ Archimedes ที่มีชีวิตอยู่ในช่วงปี 287 ถึง 212 ก่อนคริสต์ศักราช นอกจากนั้นได้มีการค้นพบว่าชาวโรมันเองก็มีความเข้าใจในเรื่องพฤติกรรมการไหลและแรงเสียดทานมาตั้งแต่โบราณ โดยยืนยันได้จากหลักฐานของการออกแบบระบบส่งน้ำตามรางที่มีมาตั้งแต่ยุคสมัยดังกล่าว ระหว่างช่วงต้นคริสต์ศักราชจนถึงศตวรรษที่สิบห้า ถึงแม้จะมีการพัฒนาความเข้าใจเกี่ยวกับการออกแบบเรือคลองหรือท่อส่งของไหล แต่ก็ไม่มีหลักฐานการค้นพบทางกลศาสตร์ของไหลที่ถือว่าสำคัญมากนัก จนกระทั่งในช่วงศตวรรษที่สิบห้า มีหลักฐานที่ชี้ให้เห็นว่า Leonardo da Vinci ชาวอิตาลีที่เป็นทั้งจิตรกร ประติมากร นักดนตรี นักปราชญ์ นักสรีรวิทยา นักพฤกษศาสตร์ นักธรณีวิทยา สถาปนิก วิศวกร และนักวิทยาศาสตร์ในคนเดียวกัน เป็นผู้ค้นพบสมการการอนุรักษ์มวลของไหลหนึ่งมิติ และยังเป็นผู้เขียนภาพที่แสดงถึงลักษณะของการเคลื่อนที่ของคลื่น การเกิด hydraulic jumps การไหลของเจ็ตอิสระ การเกิดการไหลวนของของไหลที่ด้านหลังของวัตถุเมื่อของไหลไหลผ่านวัตถุ และการลดลงของแรงต้านจากการทำให้วัตถุมีรูปร่างลู่ตามของไหล และผู้ที่ถือว่าเป็นผู้แรกที่ทำการศึกษาเรื่องแรงเสียดทานในของไหลอย่างจริงจังคือ ชาวฝรั่งเศสชื่อว่า Edme Mariotte (ค.ศ. 1620 - 1684) ได้ทำการวัดแรงหน่วงของแบบจำลองในการไหล และถือว่าเป็นผู้ประดิษฐ์อุโมงค์ของไหลตัวแรกขึ้น การค้นพบทางกลศาสตร์ของไหลที่ถือว่ามีความสำคัญมากนั้นเริ่มต้นขึ้นเมื่อเซอร์ Isaac Newton ได้ตีพิมพ์การค้นพบที่สำคัญของเขาในปี ค.ศ. 1687 ที่กล่าวถึงความสัมพันธ์ของของไหลบางชนิดที่ความต้านทานในของไหลเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วในของไหลที่ต่างกันในแต่ละชั้น ซึ่งในเวลาต่อมา ได้มีการนิยามของไหลที่มีพฤติกรรม

ดังกล่าว เป็นของไหล Newtonian เพื่อเป็นเกียรติต่อการค้นพบดังกล่าว และ Daniel Bernoulli ในปี ค.ศ. 1738 เป็นผู้ที่แสดงให้เห็นว่า ค่าความแตกต่างของความดันจะแปรเป็นสัดส่วนกับค่าความเร่งในของไหลแบบไร้ความเสียดทาน และ Leonhard Euler ในปี ค.ศ. 1755 เป็นอีกคนที่คิดค้นสมการที่ใช้บรรยายความสัมพันธ์ของของไหลที่อยู่ในสภาพไร้ความเสียดทาน ซึ่งต่อมาถูกเรียกว่า สมการ Bernoulli นอกจากนี้ Lagrange, Laplace, Gerstner ต่างเป็นผู้ที่มีส่วนสำคัญในการพัฒนาความรู้เกี่ยวกับกลศาสตร์ของไหล ด้วยการสร้างสมการคณิตศาสตร์ที่ใช้บรรยายพฤติกรรมของไหลที่อยู่ในรูปของของไหลไร้ความเสียดทาน ในขณะเดียวกัน Jean d'Alembert ได้ตีพิมพ์ข้อความขัดแย้ง (paradox) ที่มีชื่อเสียงซึ่งมีใจความว่า วัตถุที่จมอยู่ในการไหลที่ไม่มีแรงเสียดทานจะไม่ก่อให้เกิดแรงต้าน ซึ่งคำกล่าวดังกล่าวถูกเรียกว่า d'Alembert paradox ซึ่งพบว่าขัดแย้งต่อพฤติกรรมของการไหลในของไหลจริงหลายกรณีที่ไม่สามารถใช้สมมุติฐานว่าเป็นของไหลไร้ความเสียดทานได้ ในการทดลองหลาย ๆ กรณีได้พบว่า ในการไหลของของไหลผ่านวัตถุจะเกิดแรงต้านขึ้น

การค้นพบและการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับการไหลแบบไร้ความเสียดทานได้ดำเนินไปอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อมีการทำการทดลองกับของไหลเพื่อยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะพบว่าผลของการทดลองเมื่อเปรียบเทียบกับผลเฉลยของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ถูกคิดค้นในลักษณะของของไหลไร้ความเสียดทานนั้นจะขัดแย้งกัน จนทำให้บุคคลอีกสายหนึ่งซึ่งเชื่อมั่นในผลการวิเคราะห์จากการทดลอง ไม่ยอมรับผลที่ได้จากนักวิทยาศาสตร์สายที่คิดค้นและแก้ปัญหาด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ กลศาสตร์ของไหลจึงถูกแบ่งการพัฒนาเป็นสองกลุ่ม โดยกลุ่มแรกจะถูกเรียกว่ากลุ่ม hydrodynamics กลุ่มนี้จะเป็นนักวิทยาศาสตร์ที่เก่งทางคณิตศาสตร์และเชื่อมั่นในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และทฤษฎีที่คิดค้นของของไหลไร้ความเสียดทาน ในขณะที่กลุ่มที่สองจะถูกเรียกว่ากลุ่ม hydraulics กลุ่มนี้จะไม่เชื่อถือทฤษฎีและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่าง ๆ ที่ได้ถูกคิดค้นมา แต่เชื่อมั่นในผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการทดลองเพียงอย่างเดียว กลุ่มดังกล่าว อันได้แก่ Che'zy Pitot Borda Weber Francis Hagen Poiseuille Darcy Manning Bazin และ Weisbach เป็นต้น ได้ทำการทดสอบและสร้างข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมของการไหลจริงจำนวนมาก การ

ขัดแย้งของกลุ่มทั้งสองดำเนินต่อไปเกือบ 150 ปี จนกระทั่ง Navier ในปี ค.ศ. 1827 Cauchy ในปี ค.ศ. 1828 Poisson ในปี ค.ศ. 1829 St. Venant ในปี ค.ศ. 1843 และ Stokes ในปี ค.ศ. 1845 ได้ทำการคิดค้นและได้เพิ่มผลของความเสียดทานในของไหลเข้าไปในสมการของไหลไร้ความหนืดของ Euler ซึ่งผลของการคิดค้นถูกเขียนเป็นสมการที่ถือเป็นสมการหลักสมการหนึ่งของวิชากลศาสตร์ของไหลที่รวมถึงความเสียดทาน และถูกเรียกว่า สมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier-Stokes equation)

สมการนาเวียร์-สโตกส์เป็นสมการที่มีความซับซ้อน และเป็นสมการไม่เชิงเส้น (nonlinear) ดังนั้น การหาผลเฉลยโดยตรงจากสมการนาเวียร์-สโตกส์จะสามารถกระทำได้เฉพาะกรณีที่เป็นการไหลที่ไม่ซับซ้อนเท่านั้น การคิดค้นที่ถือว่าเป็นกรณีที่สำคัญยิ่งของกลศาสตร์ของไหล คือ การที่ Ludwig Prandtl ในปี ค.ศ. 1904 ได้กำหนดชั้นขอบเขตบาง ๆ ในของไหลที่อยู่ติดกับผิวสัมผัสของแข็งซึ่งมีผลของความหนืดที่มีต่อการไหลเกิดขึ้นอย่างเด่นชัด ซึ่งชั้นบาง ๆ นี้ จะถูกเรียกว่าชั้นขอบเขต (boundary layer) ซึ่งการคิดค้นดังกล่าวช่วยให้การแก้ปัญหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลทำได้ง่ายขึ้น โดยสามารถแบ่งการวิเคราะห์ของไหลเป็นสองส่วน ส่วนแรกจะเป็นส่วนที่อยู่ติดกับผิวสัมผัสของแข็ง (ในส่วนของชั้นขอบเขต) ซึ่งต้องใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่รวมถึงผลของความหนืด (ความเสียดทาน) อยู่ ในขณะที่ส่วนที่สองจะเป็นการไหลที่อยู่นอกชั้นขอบเขตซึ่งสามารถใช้ทฤษฎีของของไหลไร้ความเสียดทานมาวิเคราะห์ได้ ผลของการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่ไม่รู้ค่าบางตัวจากการไหลนอกชั้นขอบเขตจะสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ในของไหลที่อยู่ในชั้นขอบเขตได้ การดำเนินการดังกล่าวทำให้เราสามารถวิเคราะห์และแก้ปัญหการไหลได้ดีกว่าการนำสมการนาเวียร์-สโตกส์ไปใช้กับการไหลทั้งหมด และนอกจากนั้นได้มีการวิวัฒนาการในเรื่องของการทำการทดลองเกี่ยวกับการไหลอย่างมั่นคงด้วยการนำวิธีวิเคราะห์ทางมิติเข้ามาประกอบในการกำหนดพารามิเตอร์ที่ทำการทดลอง โดยมี William Froude (ค.ศ. 1810 - 1879) Robert Froude (ค.ศ. 1946 - 1924) และ Lord Rayleigh (ค.ศ. 1842 - 1912) ซึ่งต่างก็เป็นผู้ที่มีส่วนสำคัญในการพัฒนาในส่วนดังกล่าว ในปี ค.ศ. 1883 Osborne Reynolds เป็นอีกคนที่ทำการทดลองเรื่องการไหลในท่อ ซึ่งแสดงถึงความสำคัญของตัวเลขไร้มิติที่ใช้กำหนดสภาวะการไหล ที่ต่อมาถูกกำหนดให้มีชื่อเป็น ตัวเลข

เรย์โนลด์ เพื่อเป็นเกียรติแก่ผู้คิดค้น นอกจากนั้น Theodore von Karman (ค.ศ. 1881 - 1963) และ Sir Geoffrey I. Taylor (ค.ศ. 1886 - 1975) ก็เป็นบุคคลสำคัญในยุคเดียวกับ Prandtl (ค.ศ. 1875 - 1953) ที่ได้พัฒนาทฤษฎีการไหลต่าง ๆ ที่อยู่บนเงื่อนไขที่สอดคล้องกับผลการทดลอง

หลังจากยุคที่ได้กล่าวมาเบื้องต้นนี้แล้ว ก็ยังมีการคิดค้นอีกมากมาย นอกเหนือจากการคิดค้นทฤษฎีแล้วก็ได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีในการทำการทดลอง และมีการพัฒนาเครื่องมือในการวัดของไหลให้ก้าวหน้ามากขึ้น อันได้แก่ การวัดความเร็วของของไหลด้วย hot-wire, hot-film, ultrasonic, laser-doppler การวัดความดันและอุณหภูมิด้วยตัวตรวจรู้ที่มีขนาดเล็กและแม่นยำ นอกจากนั้น เทคนิคการเห็นสภาพการไหล (flow visualization) ก็กลายเป็นที่นิยมในการแสดงถึงสภาวะการไหลที่แท้จริง รวมทั้งได้มีการพัฒนาเทคนิคในการคำนวณและแสดงผลเฉลยของการไหลในรูปของกราฟิกที่เรียกว่า computation fluid dynamics (CFD) การพัฒนาการของกลศาสตร์ของไหลยังดำเนินการอย่างต่อเนื่อง ซึ่งคงอยู่นอกเหนือจุดมุ่งหมายของหนังสือเล่มนี้ที่จะกล่าวถึงจนหมด

รายละเอียดในหัวข้อ 1.2 นี้ได้อ้างอิงมาจากเอกสาร [12, 13]

1.3 นิยามของของไหล

สสารในโลกอาจสามารถแบ่งออกเป็นของแข็งและของไหล ของไหลจะสามารถนิยามได้เป็น “สสารที่เสียรูปอย่างต่อเนื่อง (ไหล) เมื่อมีความเค้นเฉือนมากระทำ” จากคำนิยามดังกล่าวก็อาจจะสามารถกล่าวได้อีกลักษณะหนึ่งว่า ของไหล คือ สสารซึ่งหากอยู่ในสภาวะที่อยู่หนึ่งจะต้องไม่มีความเค้นเฉือนมากระทำ เพราะหากมีความเค้นเฉือนมากระทำต่อของไหล ของไหลจะต้องเสียรูปอย่างต่อเนื่อง นั่นก็คือ ของไหลจะต้องไหล ซึ่งก็คือไม่อยู่นิ่ง ในขณะที่ของแข็งอาจนิยามในลักษณะเดียวกันว่าเป็นสสารที่จะเสียรูปเมื่อมีความเค้นเฉือนมากระทำ แต่การเสียรูปนั้นจะมีค่าไม่ต่อเนื่อง คือไม่เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเปลี่ยนไปหากการเสียรูปของสสารดังกล่าวยังไม่เกินขอบเขตของการคราก (yield)

1.4 มิติและหน่วย

มิติ (dimension) คือ สิ่งที่ใช้บรรยายลักษณะทางกายภาพ เช่น ความยาว (length) มวล (mass) เวลา (time) และอุณหภูมิ (temperature) เป็นต้น ในขณะที่หน่วย (unit) เป็นการกำหนดชื่อและขนาดให้กับมิติขึ้นเองเพื่อบอกปริมาณที่วัดตามมาตรฐานที่กำหนด ตัวอย่างของหน่วยที่ใช้กับมิติที่เป็นความยาว ได้แก่ เมตร เซนติเมตร ฟุต เป็นต้น จะเห็นได้ว่า มิติที่บอกปริมาณทางกายภาพแต่ละปริมาณนั้น จะมีแค่มิติเดียว เช่น มิติความยาว แต่ในมิติความยาวนี้อาจมีหน่วยได้มากมาย เช่น ฟุต เมตร เซนติเมตร หลา เป็นต้น

นอกเหนือจากการใช้มิติเป็นตัวบ่งบอกปริมาณทางกายภาพทั่วไปแล้ว เรายังสามารถแบ่งมิติเป็น มิติปฐมภูมิ (primary dimension) และมิติทุติยภูมิ (secondary dimension) โดยที่มิติปฐมภูมิจะหมายถึงมิติหลักที่เรามักกำหนดขึ้น และมิติทุติยภูมิจะหมายถึงมิติที่ประกอบขึ้นจากการรวมกันของมิติปฐมภูมิ หากกำหนดมิติปฐมภูมิเป็น ความยาว เวลา และมวลแล้ว มิติทุติยภูมิอาจได้แก่ ความเร็ว แรง และความเร่ง เป็นต้น เนื่องจากความเร็วจะมีมิติที่ประกอบด้วยมิติความยาวหารด้วยมิติเวลา แรงจะมีมิติที่ประกอบด้วยผลคูณของมิติมวลกับความยาวหารด้วยเวลากำลังสอง ความเร่งจะมีมิติที่ประกอบด้วยมิติความยาวหารด้วยเวลากำลังสอง ในปัจจุบันจะมีการกำหนดมิติปฐมภูมิที่นิยมอยู่สามแบบ คือ

ก.	มวล [M]	ความยาว [L]	เวลา [t]	อุณหภูมิ [T]	
ข.	แรง [F]	ความยาว [L]	เวลา [t]	อุณหภูมิ [T]	
ค.	แรง [F]	มวล [M]	ความยาว [L]	เวลา [t]	อุณหภูมิ [T]

ในระบบที่ใช้มิติปฐมภูมิแบบ ก แรง [F] จะเป็นมิติทุติยภูมิ ในขณะที่ระบบที่ใช้มิติปฐมภูมิแบบ ข มวล [M] จะกลายเป็นมิติทุติยภูมิ และจากนิยามของมิติที่ได้กล่าวมาเบื้องต้น สมการที่เขียนขึ้นจะเป็นสมการที่ถูกต้องตามทฤษฎีอย่างน้อยจะต้องมิติที่เหมือนกัน (dimensionally homogeneous) นั่นคือ เทอมที่เขียนในแต่ละข้างของเครื่องหมายเท่ากับต่างต้องมีมิติเดียวกัน