สมบัติกายภาพ ของสสาร : ของไหล 1

PHYSICAL PROPERTIES OF MATTER : FLUIDS 1

ดร.ปนัดดา เดชาดิลก

ชื่อหนังสือ : **สมบัติกายภาพของสสาร : ของไหล 1**

(Physical Properties of Matter : Fluid 1)

ผู้แต่ง : ปนัดดา เดชาดิลก

ข้อมูลทางบรรณานุกรมของสำนักหอสมุดแห่งชาติ

ปนัดดา เดชาดิลก.

สมบัติกายภาพของสสาร : ของไหล 1 = Physical Properties of Matter : Fluid 1. --

กรุงเทพฯ : [ม.ป.พ.], 2569.

101 หน้า.

1. กลศาสตร์ของไหล. I. ชื่อเรื่อง.

620.106

ISBN (e-book) : 978-616-631-576-9

สงวนลิขสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ 2537

ห้ามคัดลอก จัดพิมพ์ หรือทำซ้ำรวมทั้งดัดแปลงเป็นสื่ออื่น ๆ ก่อนได้รับอนุญาต

พิมพ์ครั้งที่ 1: เดือนเมษายน 2569 E-Book ขนาด A4

ราคา : 150

พิมพ์ที่ : PROTEXTS.COM

บริษัท แดเน็กซ์ อินเตอร์คอร์ปอเรชั่น จำกัด

103/11 ซอยกำแพงเพชร 6 ซ.5 แขวงตลาดบางเขน

เขตหลักสี่ กรุงเทพมหานคร 10210 โทรศัพท์ 02-575-1791

Website: www.Protexts.com **E-mail:** Protexts@hotmail.com

คำนำ (Preface)

หนังสือเล่มนี้จัดพิมพ์และรวบรวมขึ้นเพื่อใช้ประกอบการเรียนการสอนรายวิชาสมบัติทางฟิสิกส์ของสสาร (2304377) ซึ่งเป็นวิชาเลือกในหลักสูตรปริญญาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เนื้อหาครึ่งแรกของภาคการศึกษาคือสมบัติทางฟิสิกส์ของสสารซึ่งเป็นของไหล ขอบเขตของรายวิชาถูกกล่าวถึงในบทที่ 1 ลำดับหัวข้อเป็นไปตามประมวลรายวิชาคือเริ่มจากเนื้อหาที่นิสิตเคยศึกษาในระดับปริญญาตรีปีที่ 1 ได้แก่ แก๊สอุดมคติ ทฤษฎีจลน์ของแก๊ส และของไหลอุดมคติ ในบทที่ 2 และ 3 โดยมีการเพิ่มเนื้อหาจาก 2304103 เช่น การใช้เส้นทางอิสระเฉลี่ยในการระบุสมบัติมหภาคของแก๊สอุดมคติ สมการของสถานะสำหรับแก๊สไม่อุดมคติ ศักย์การไหล เป็นต้น ส่วนเนื้อหาของบทที่ 4 กล่าวถึงปรากฏการณ์ขนส่งได้แก่ การขนส่งมวล ความร้อน และตัวถูกละลาย เนื่องจากปรากฏการณ์ขนส่งถูกกล่าวถึงเพียงสังเขปในรายวิชาฟิสิกส์ทั่วไป 1 (2304103) นอกจากนี้สมการการขนส่ง (transport equations) มีลักษณะทางคณิตศาสตร์คล้ายคลึงกับสมการการเคลื่อนที่ (equations of motions) ของของไหลซึ่งถูกอภิปรายในบทที่ 5 – 7 และในหนังสือเล่มที่ 2 เป็นอย่างมาก คณิตศาสตร์ที่ต้องใช้ในรายวิชานี้นั้นอยู่ในภาคผนวกเพื่อให้นิสิตระดับปริญญาตรีจากภาควิชาอื่น ๆ ของคณะวิทยาศาสตร์และคณะครุศาสตร์ที่สนใจสามารถลงทะเบียนเรียนได้ ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่าหนังสือเล่มนี้จะเป็นประโยชน์แก่ผู้อ่านไม่มากก็น้อย

ปนัดดา เดชาดิลก

3 มีนาคม 2569

สารบัญ (Table of content)

บทที่ 1 บทนำ (Introduction) 1

1.1 นิยามของของไหล ตัวเลขเดบบอราห์ และกลศาสตร์ต่อเนื่อง (Definition of fluids, Deborah number and continuum mechanics) 1

1.2 ปรากฏการณ์ขนส่ง (Transport phenomena) 3

1.3 สรุป (Conclusion) 3

1.4 แบบฝึกหัด (Exercises) 4

บทที่ 2 สมบัติทางฟิสิกส์ของแก๊ส (Physical properties of gases) 5

2.1 ทฤษฎีจลน์ของแก๊สและกฎของแก๊สอุดมคติ (Kinetic theory of gases and ideal gas law) 5

2.2 สมการของสถานะสำหรับแก๊สไม่อุดมคติ (Equations of state for nonideal gases) 7

2.3 การแจกแจงอัตราเร็วแมกซ์เวลล์โบลทซ์มานน์ เส้นทางอิสระเฉลี่ย และการระบุสมบัติของแก๊ส (Maxwell-Boltzmann speed distribution, mean free path and determination of gaseous properties) 10

2.4 สรุป (Conclusion) 15

2.5 แบบฝึกหัด (Exercises) 15

บทที่ 3 กลศาสตร์ของไหลสำหรับของไหลอุดมคติ (Fluid mechanics of ideal fluids) 17

3.1 ของไหลอุดมคติ สมการแบร์นูลลี และสมการต่อเนื่อง (Ideal fluids, Bernoulli equation and the continuity equation) 17

3.2 การพิจารณาว่าของไหลในระบบที่สนใจเป็นของไหลอุดมคติหรือไม่ (Determination of whether the fluid in the system of interest is an ideal fluid) 19

3.3 ศักย์การไหล (Flow potential) 25

3.4 สรุป (Conclusion) 27

3.5 แบบฝึกหัด (Exercises) 28

บทที่ 4 ทฤษฎีขนส่ง 1 : การขนส่งมวลและความร้อน (Transport theory 1 : heat and mass transfer) 29

4.1 สมการขนส่งในรูปแบบทั่วไป (Generalized form of transport equations) 29

4.2 การอนุรักษ์มวล (Conservation of mass) 30

4.3 การขนส่งความร้อน (Heat transfer) 30

4.4 การขนส่งตัวถูกละลาย (Solute transport) 31

4.5 สรุป (Conclusion) 36

4.6 แบบฝึกหัด (Exercises) 36

บทที่ 5 การขนส่งโมเมนตัม 1 (Momentum Transfer 1) 38

5.1 เกรเดียนต์ของความเร็วของไหล (Fluid Velocity Gradient) 38

5.2 การไหลแบบ 1 มิติของของไหลนิวโตเนียนแบบอัดไม่ได้ (Unidirectional flows of incompressible Newtonian fluids) 39

5.3 เทนเซอร์เรทออฟสเตรน (Rate-of-Strain Tensor) 40

5.4 แบบฝึกหัด (Exercises) 42

บทที่ 6 การขนส่งโมเมนตัม 2 (Momentum Transfer 2) 44

6.1 การอนุรักษ์มวล 44

6.2 โมเมนตัมภายในปริมาตรสมมติ 45

6.3 แรงกระทำต่อปริมาตรและแรงกระทำต่อพื้นผิว (Volumetric Forces and Surface Forces) 45

6.4 สมการโมเมนตัมโคชี (Cauchy Momemtum Equation) 47

6.5 ความเค้นเนื่องจากความหนืด (viscous stress) 48

6.6 ของไหลนิวโตเนียนแบบอัดไม่ได้และสมการนาเวียร์สโตกส์ 48
(Incompressible Newtonian Fluid and Navier-Stokes Equation)

6.7 เงื่อนไขขอบสำหรับแก้สมการนาเวียร์สโตกส์ 49

6.8 แบบฝึกหัด 50

บทที่ 7 การขนส่งโมเมนตัม 3 (Momentum Transfer 3) 52

7.1 การไหลแบบคงตัวใน 1 มิติ (Steady Unidirectional Flow) 52

7.2 การไหลแบบไม่คงตัวใน 1 มิติ (Time-dependent Unidirectional Flow) 55

7.3 ทฤษฎีหล่อลื่น (Lubrication Theory) 56

7.4 ความแตกต่างระหว่างสมการนาเวียร์สโตกส์สำหรับการไหลแบบคงตัวใน 1 มิติ
และการประมาณโดยใช้ทฤษฎีหล่อลื่น 60

7.5 แบบฝึกหัด 60

บรรณานุกรม (References) 62

ภาคผนวก (Appendix) 63

ดัชนี (Indices)

บทที่ 1: บทนำ (Introduction)

เนื้อหาครึ่งแรกของรายวิชาสมบัติทางฟิสิกส์ของสสาร (2304377) คือการศึกษาสมบัติของของไหลโดยเป็นการศึกษาในระดับเบื้องต้น (introductory) เพื่อให้เหมาะกับนิสิตระดับปริญญาตรี การระบุขอบเขตของการศึกษานี้คือเนื้อหาของบทที่ 1 โดยเริ่มจากการกล่าวถึงนิยามของของไหลและกลศาสตร์ต่อเนื่องซึ่งถูกอภิปรายในบทที่ 1.1 รวมถึงปรากฏการณ์ขนส่งปริมาณทางฟิสิกส์ต่าง ๆ ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างการไหลได้แก่การขนส่งมวล โมเมนตัม พลังงานความร้อน (thermal energy) และตัวถูกละลาย (ในสารละลายซึ่งมีของไหลเป็นตัวทำละลาย) ดังระบุในบทที่ 1.2

1.1 นิยามของของไหล ตัวเลขเดบบอราห์ และกลศาสตร์ต่อเนื่อง (Definition of fluids, Deborah number and continuum mechanics)

นิยามทางกลศาสตร์ของของไหลคือ “สสารที่ไม่สามารถรองรับความเค้นเฉือน (shear stress) ได้ เป็นสสารที่"บิดเบี้ยว"อย่างต่อเนื่องเมื่อมีความเค้นเฉือนกระทำ” กล่าวอย่างง่ายที่สุด "ของไหล"คือของที่ "ไหลได้" หากเปรียบเทียบระหว่างของแข็งและของไหล เมื่อของแข็งอยู่ภายใต้ความเค้นหาก "บิดเบี้ยว" จะเปลี่ยนรูปร่างและได้รูปร่างใหม่ที่คงที่ในที่สุดทำให้สามารถระบุค่าความเครียด (strain) ได้ ขณะที่ของไหลนั้นเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปเรื่อย ๆ ไม่สามารถวัดค่าความเครียดได้ วัดได้เพียงอัตราการบิดเบี้ยว (rate of deformation) หรืออัตราความเครียด (rate of strain) หากมองในระดับโมเลกุล การจัดสถานะของสสารว่าเป็นของแข็งหรือของไหลในทางริโอโลยี (rheology) นั้นกระทำโดยพิจารณาค่าของตัวเลขเดโบราห์ (Deborah Number) หรืออัตราส่วนระหว่างสองสเกลเวลากล่าวคือ

$$De = \frac{\{t\}_{relaxation}}{\{t\}_{observation}} \tag{1.1}$$

โดยที่ $\{t\}_{relaxation}$ คือสเกลเวลาของกระบวนการ relaxation หรือสเกลเวลาของกระบวนการจัดเรียงตัวใหม่ของโมเลกุลของสสารเมื่อถูกความเค้นกระทำซึ่งขึ้นอยู่กับพันธะระหว่างโมเลกุลของสสารชนิดนั้น $\{t\}_{relaxation}$ ของโลหะซึ่งจับกันด้วยพันธะโลหะย่อมมีค่ามากกว่า $\{t\}_{relaxation}$ ของก๊าซซึ่งมีพันธะระหว่างโมเลกุลคือพันธะแวนเดอวาลล์ ขณะที่ $\{t\}_{observation}$ คือเวลาที่ใช้ในการสังเกต แล้วแต่ “นาฬิกา” ของผู้สังเกต

หาก $\{t\}_{relaxation} << \{t\}_{observation}$ ตัวเลขเดโบราห์หรือ $De << 1$ สสารดังกล่าวจะถูกจัดว่าเป็นของไหล เช่นน้ำซึ่งมี $\{t\}_{relaxation}$ อยู่ในระดับ 10^{-12} วินาที หากผู้สังเกตมองด้วยตาเปล่า ตัวเลขเดโบราห์มีค่าน้อยกว่าหนึ่ง

มาก ๆ น้ำจึงถูกจัดว่าเป็นของไหล ทว่าหาก $De >> 1$ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง $\{t\}_{relaxation} >> \{t\}_{observation}$ เช่นหิน ซึ่งมี $\{t\}_{relaxation}$ อยู่ในระดับแสนปี ก้อนหินจึงเป็นของแข็งจากมุมมองของมนุษย์ ส่วนสสารที่ตัวเลขเดโบราห์มีค่าลำดับขนาด (order of magnitude) ประมาณ 1 ถูกเรียกว่าวัสดุหยุ่นหนืด (viscoelastic material) เช่น โพลีเมอร์บางชนิด สสารเช่นนี้มีทั้งสมบัติของของแข็งและของไหล ตัวอย่างหนึ่งของวัสดุหยุ่นหนืดคือของเล่นที่มีขายในสหรัฐอเมริกาลักษณะคล้ายดินน้ำมันซึ่งทำมาจากซิลิโคนโพลีเมอร์เรียกกันว่าซิลลี่พุตตี้ (silly putty) $\{t\}_{relaxation}$ ของซิลลี่พุตตี้มีค่าประมาณ 15-20 นาที หากปั้น silly putty เป็นทรงกลมวางไว้บนโต๊ะ ช่วงสิบนาทีแรกของการสังเกต ซิลลี่พุตตี้มีลักษณะเป็นของแข็งคือคงรูปเป็นทรงกลม แต่เมื่อผ่านไปราว ๆ 15-20 นาที ซิลลี่พุตตี้ซึ่งถูกกระทำโดยแรงโน้มถ่วงจะเริ่มแผ่ออก (เป็นรูปทรงคล้าย ๆ ไข่ดาว) คือเริ่มมี “การไหล” เกิดขึ้นนั่นเอง

<u>เรื่องสนุกในประวัติศาสตร์ (Historical fun fact)</u> เหตุที่ในสาขาริโอโลยี De หรืออัตราส่วนระหว่าง $\{t\}_{relaxation}$ และ $\{t\}_{observation}$ ถูกเรียกว่าตัวเลขเดโบราห์เกิดจากประโยคหนึ่งในพระคัมภีร์ไบเบิ้ลซึ่งกล่าวว่า "*ภูเขาไหลในสายตาของพระเจ้า*" แม้ว่า $\{t\}_{relaxation}$ ของหินยาวนานราวแสนปีดังอภิปรายข้างต้น แต่เนื่องจาก $\{t\}_{observation}$ ของพระเจ้าเป็นอนันต์ $De \rightarrow 0$ ภูเขาจึงจัดว่าเป็นของไหล(ในสายตาของพระเจ้า) อัตราส่วนระหว่างสเกลเวลาทั้งสองถูกตั้งชื่อตามชื่อของผู้กล่าวประโยคดังกล่าวคือราชินีเดโบราห์ (Reiner, 1964)

กลศาสตร์ต่อเนื่องคือสาขาของกลศาสตร์ซึ่งนำเสนอโดยโคชี (Cauchy) เพื่อใช้อธิบายพฤติกรรมทางกลศาสตร์ของสสารโดยถือว่าการ “ประมาณ” (approximation) ว่าสสารนั้นมีมวลต่อเนื่องเป็นการ "ประมาณ" ที่เหมาะสมสำหรับการพิจารณาพฤติกรรมทางกลศาสตร์ที่เกิดขึ้นในระบบซึ่งมีสเกลความยาวมากกว่าขนาดของโมเลกุลของสสารมาก ๆ โดยมองว่าสสารนั้นกระจายตัวทั่วทั้งปริมาตรที่ถือครอง

ตัวอย่างหนึ่งจากสาขาวิจัยของผู้เขียนทำให้เห็นว่ากลศาสตร์ต่อเนื่องเป็นการประมาณที่มีระดับ “ความโชคดี” ค่อนข้างสูง ผลการคำนวณโดยใช้กลศาสตร์ต่อเนื่องนั้นถูกต้องแม้ว่าสเกลความยาวของระบบมีค่ามากกว่าขนาดโมเลกุลของสสารไม่กี่เท่า ตัวอย่างดังกล่าวคือการคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่ของอนุภาคบราวน์ (Brownian particle) โดยใช้สมการสโตกส์-ไอน์สไตน์ซึ่งใช้แรงต้านการเคลื่อนที่เนื่องจากความหนืดที่ถูกคำนวณโดยใช้หลักการกลศาสตร์ต่อเนื่องให้คำตอบที่ถูกต้องคือมีค่าตรงกับผลการทดลองสำหรับอนุภาคแข็งเกร็งที่มีขนาดใหญ่กว่าโมเลกุลของน้ำเพียง 2-3 เท่า (Deen, 1987) การศึกษาพฤติกรรมของของไหลตลอดจนปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องในวิชา 2304377 (ซึ่งเป็นการศึกษาในระดับเบื้องต้น) จึงกระทำโดยใช้หลักการของกลศาสตร์ต่อเนื่อง

1.2 ปรากฏการณ์ขนส่ง (Transport phenomena)

ผู้เขียนได้รับการขอร้องจากอาจารย์ในภาควิชาฟิสิกส์ให้เนื้อหาของรายวิชา 2304377 มีการกล่าวถึงพื้นฐานในทางทฤษฎีของปรากฏการณ์ขนส่งเนื่องจากถูกนำใช้ในการทำวิจัยร่วมกับนิสิต ผู้เขียนได้ตอบรับคำขอร้องดังกล่าวเนื่องจากการขนส่งปริมาณทางฟิสิกส์นั้นเกิดขึ้นระหว่างการไหลของของไหลเสมอ ได้แก่ การขนส่งมวลและโมเมนตัมของของไหล การขนส่งพลังงานความร้อน (หากเป็นการไหลที่อุณหภูมิไม่คงที่หรือ non-isothermal flows) และการขนส่งตัวถูกละลาย (หากเป็นการไหลของสารละลายซึ่งมีของไหลเป็นตัวทำละลาย) นอกจากนี้ในทางคณิตศาสตร์ สมการซึ่งควบคุมพฤติกรรมของระบบซึ่งเกิดการขนส่งปริมาณทางฟิสิกส์ทั้ง 4 ปริมาณ (ได้แก่ มวล โมเมนตัม พลังงานความร้อน และตัวถูกละลาย) มีลักษณะคล้ายคลึงกันเป็นอย่างมาก ทำให้เหมาะที่จะนำมาศึกษาร่วมกับการศึกษาสมบัติของของไหลโดยปรากฏการขนส่งถูกอภิปรายในบทที่ 4 5 และ 7 ของเอกสารคำสอนนี้

1.3 สรุป (Conclusion)

ดังอภิปรายข้างต้น เนื้อหาครึ่งแรกของรายวิชา 2304377 มุ่งเน้นการศึกษาสมบัติของของไหลในระดับเบื้องต้นโดยเริ่มจากการ “ต่อยอด” จากเนื้อหาที่นิสิตคุ้นเคยในรายวิชาฟิสิกส์ทั่วไป 1 (2304103) ในบทที่ 2 และ 3 ได้แก่การกล่าวถึงสมบัติของแก๊สอุดมคติ ก่อนที่จะกล่าวถึงตัวอย่างของสมการของสถานะ (equations of state) สำหรับแก๊สที่ไม่ใช่แก๊สอุดมคติ ตลอดจนการประยุกต์ใช้การแจกแจงความเร็วแมกซ์เวลล์โบลซ์ทมานน์ (Maxwell-Boltzmann speed distribution) และเส้นทางอิสระเฉลี่ย (mean free path) ในการระบุสมบัติระดับมหภาคของแก๊สในบทที่ 2 ขณะที่เนื้อหาของบทที่ 3 กล่าวถึงของไหลอุดมคติ (ideal fluids) โดยเนื้อหาที่เพิ่มเติมจากเนื้อหาของรายวิชาฟิสิกส์ทั่วไป 1 มี 2 ประการ กล่าวคือการพิจารณาว่าการ “ประมาณ” ให้ของไหลในระบบเป็นของไหลอุดมคติเป็นการประมาณที่ดีหรือไม่สำหรับระบบที่นิสิตสนใจ และการคำนวณความเร็วของของไหลสำหรับการไหลแบบไม่หมุน (irrotational flows) โดยใช้ศักย์การไหล (flow potential)

เนื้อหาของบทที่ 4 – 8 เป็นเนื้อหาใหม่ที่นิสิตอาจเคยพบครั้งแรกในรายวิชานี้ เริ่มจากการอภิปรายเกี่ยวกับการขนส่งปริมาณสเกลาร์ ได้แก่ การขนส่งมวลของของไหล พลังงานความร้อน และตัวถูกละลายในบทที่ 4 ก่อนจะกล่าวถึงการขนส่งโมเมนตัม (momentum transfer) ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างการไหลซึ่งเป็นที่มาของสมการโมเมนตัมโคชี (Cauchy momentum equation) และสมการนาวีร์สโตกส์ (Navier-Stokes equation) ในบทที่ 5 โดยตัวอย่างการไหลที่ถูกนำมาศึกษาในรายวิชานี้จะเป็นการไหลใน 1 มิติของของไหลนิวโตเนียนแบบอัดไม่ได้ (unidirectional incompressible Newtonian fluid flows) เป็นหลักเพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจ ส่วนความ

ตึงผิว (surface tension) ซึ่งพบในระบบที่มีของไหลมากกว่า 1 ชนิดถูกกล่าวถึงในบทที่ 6 ขณะที่การขนส่งทั้งมวล โมเมนตัม และพลังงานความร้อนสำหรับการไหลแบบอุณหภูมิไม่คงที่ถูกกล่าวถึงในบทที่ 7 ปรากฏการณ์อื่น ๆ ที่น่าสนใจในระบบของของไหลได้แก่พลาสมา (plasma) ของไหลยิ่งยวด (superfluids) และขีดจำกัดของกลศาสตร์ต่อเนื่องถูกอภิปรายในบทที่ 8

1.4 แบบฝึกหัด (Exercises)

1.5.1 จงยกตัวอย่างสสารที่ $De << 1$ $De \sim 1$ และ $De >> 1$ โดยระบุ $\{t\}_{relaxation}$ ของสสารเหล่านั้น

1.5.2 หนึ่งในตัวอย่างของวัสดุหยุ่นหนืดคือเม็ดเลือดแดง จงใช้การค้นหาผ่านห้องสมุดและอินเตอร์เน็ตระบุตัวเลขเดโบราห์ของเม็ดเลือดแดงและอธิบายว่าสมบัติของวัสดุหยุ่นหนืดช่วยทำให้เม็ดเลือดแดงเข้าสู่หลอดเลือดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเม็ดเลือดแดงได้อย่างไร