โครงการตำราวิชาการเฉลิมพระเกียรติ
มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี
RAMBHAI BARNI RAJABHAT UNIVERSITY MONOGRAPH SERIES • 2026

ADVANCED PHYSICS & RESEARCH
UNIVERSITY MONOGRAPH FRAMEWORK

เอกสารคำสอนและคู่มือวิจัย
ฟิสิกส์ระดับมหาวิทยาลัย

University Physics Monograph and Research Methodology

Advanced Mechanics • Electromagnetism • Modern Physics & SciML

ผศ.ดร.ชีวะ ทัศนา • คณาจารย์สาขาวิชาฟิสิกส์
วท.บ., วท.ม., ปร.ด. (ฟิสิกส์ประยุกต์)
• ผู้เชี่ยวชาญฟิสิกส์เชิงคำนวณและวัสดุแม่เหล็ก
สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

พ.ศ. 2569
Masterclass Edition
Monograph Series

โครงการตำราวิชาการเฉลิมพระเกียรติ มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

เอกสารคำสอนและคู่มือวิจัย

ฟิสิกส์ระดับมหาวิทยาลัย

University Physics Monograph and Research Methodology

Advanced Mechanics • Electromagnetism • Modern Physics & SciML

ผศ.ดร.ชีวะ ทัศนา

วท.บ., วท.ม., ปร.ด. (ฟิสิกส์ประยุกต์)

สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

พ.ศ. 2569

คำนำ

ฟิสิกส์เป็นศาสตร์พื้นฐานอันเป็นรากฐานของวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสมัยใหม่ การทำความเข้าใจปรากฏการณ์ธ
จำเป็นต้องอาศัยการบูรณาการอย่างกลมกลืนระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่รัดกุม การทดลองตรวจวัดที่แม่นยำ
และระเบียบวิธีวิจัยเชิงคำนวณที่ทันสมัย

เอกสารคำสอนและคู่มือวิจัยเรื่อง **เอกสารคำสอนและคู่มือวิจัยฟิสิกส์ระดับมหาวิทยาลัย**
เล่มนี้ ได้รับการพัฒนาขึ้นโดยสังเคราะห์มาตรฐานการจัดทำตำราวิชาการระดับโลกจากตำราชั้นนำสองเล่ม
ได้แก่ กรอบการแก้ปัญหาทางฟิสิกส์แบบสี่ขั้นตอน P-S-C-T (Picture, Strategy, Calculation, Test)
ของ Tipler & Mosca และระเบียบวิธีวิเคราะห์โจทย์ปัญหาแบบ C-C-A-F (Conceptualize, Cate-
gorize, Analyze, Finalize) ของ Serway & Jewett เพื่อเสริมสร้างกระบวนการคิดเชิงวิเคราะห์และการแก้ปัญหาอย่างเป็นระ

โครงสร้างเนื้อหาครอบคลุม 8 บทเรียนสำคัญ ตั้งแต่การวิเคราะห์ความไม่แน่นอนตามมาตรฐานสากล
ISO/IEC Guide 98-3 (GUM), พลศาสตร์ขั้นสูงและสมการการเคลื่อนที่แบบไม่เชิงเส้น, ทฤษฎีศักย์และสมดุลเชิงเสถียรภาพ,
ทฤษฎีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและสมการแมกซ์เวลล์ในรูปอนุพันธ์ย่อย, ทัศนศาสตร์เชิงคลื่นและการแทรกสอดของแสงเลเซอร์
กลศาสตร์ควอนตัมและแบบจำลองอะตอม, ฟิสิกส์ของแข็งและวัสดุแม่เหล็กขั้นสูง ซึ่งบูรณาการผลงานวิจัยจริงของผู้เขียนด้
LSDA$+U$ ในสารประกอบ MnO และ NiO, ไปจนถึงระเบียบวิธีวิจัยและฟิสิกส์เชิงคำนวณด้วย Python
และ Physics-Informed Neural Networks (PINNs)

ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่า เอกสารคำสอนเล่มนี้จะไม่เพียงแต่นำเสนอองค์ความรู้ทางทฤษฎีเท่านั้น
แต่ยังทำหน้าที่เป็นสะพานเชื่อมโยงนักศึกษาจากการเรียนรู้ในห้องเรียนสู่โลกแห่งการวิจัยฟิสิกส์ระดับสากลได้อย่างสมภาคภู

ผศ.ดร.ชีวะ ทัศนา
สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

กิตติกรรมประกาศ

เอกสารคำสอนและคู่มือวิจัยเรื่อง **เอกสารคำสอนและคู่มือวิจัยฟิสิกส์ระดับมหาวิทยาลัย** สำเร็จลุล่วงลงได้ด้วยการส่งเสริมและสนับสนุนอย่างดียิ่งจากมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี คณะวิทยาศาสตร์และ และสถาบันวิจัยและพัฒนา ที่ได้สนับสนุนทรัพยากรห้องปฏิบัติการฟิสิกส์ และระบบคอมพิวเตอร์สมรรถนะสูงสำหรั

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ คณาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุ ผู้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และปลูกฝังจิตวิญญาณการค้นคว้าวิจัยทางฟิสิกส์ ขอบพระคุณคณาจารย์ร่วมสาขาวิ

ขอขอบคุณนักศึกษาสาขาวิชาฟิสิกส์ทุกรุ่น ผู้เป็นแรงผลักดันสำคัญในการปรับปรุงเนื้อหา คู่มือ และแบบฝึกหัดให้มีความกระชับ ทันสมัย และสอดรับกับความก้าวหน้าทางเทคโนโลยี

ท้ายที่สุดนี้ ขอน้อมรำลึกในพระคุณของบิดามารดา และขอขอบคุณครอบครัวอันเป็นที่รักยิ่ง สำหรับความรัก ความอบอุ่น และกำลังใจที่มอบให้เสมอมา

ผศ.ดร.ชีวะ ทัศนา

แผนการบริหารการสอนและประมวลรายวิชา

เอกสารคำสอนและคู่มือวิจัยฟิสิกส์ระดับมหาวิทยาลัย ออกแบบขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนวิชาฟิสิกส์ขั้นกลางถึง โดยมีแผนการสอนและการประเมินผลสัมฤทธิ์ตามกรอบมาตรฐานคุณวุฒิระดับอุดมศึกษา ดังแสดงในตารางต่อไปนี้

สัปดาห์	ชื่อหัวข้อบทเรียน	สาระการเรียนรู้และกิจกรรมวิจัย	การประเมินผล
1–2	หน่วย มาตรฐาน และการวิเคราะห์ความไม่แน่นอน	ระบบหน่วยเอสไอใหม่ (CODATA), การกระจายตัวแบบเกาส์เซียน และประเมินความไม่แน่นอนตาม GUM	โจทย์ปัญหา C-C-A-F
3–4	พลศาสตร์ขั้นสูง และการเคลื่อนที่แบบไม่เชิงเส้น	แรงต้านอากาศแปรผันตามอัตราเร็ว (v และ v^2), ความเร็วปลาย และจำลองวิถีโค้งด้วย Runge-Kutta	การจำลองด้วย Python
5–6	ทฤษฎีศักย์ งาน พลังงาน และเสถียรภาพ	สนามแรงอนุรักษ์, ฟังก์ชันพลังงานศักย์, สมดุลเสถียร/ไม่เสถียร และแผนภาพเฟส (Phase Space)	โจทย์ปัญหา P-S-C-T
7–8	ทฤษฎีสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และสมการแมกซ์เวลล์	กฎของเกาส์ ฟาราเดย์ แอมแปร์-แมกซ์เวลล์ รูปอนุพันธ์ย่อย และสมการคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสุญญากาศ	สอบวัดผลกลางภาค
9–10	ทัศนศาสตร์เชิงคลื่น และการแทรกสอดเลเซอร์	คลื่นแสงอาพันธ์, การแทรกสอดแบบยังก์สองช่อง, การเลี้ยวเบนฟรอนโฮเฟอร์ และโครงสร้างผลึก	รายงานการทดลอง
11–12	กลศาสตร์ควอนตัม และแบบจำลองอะตอม	ทวิภาวะคลื่น-อนุภาค, สมการชเรอดิงเงอร์, อนุภาคในกล่องศักย์ และการทะลุผ่านกำแพงศักย์	การวิเคราะห์เชิงตัวเลข
13–14	ฟิสิกส์ของแข็ง และวัสดุแม่เหล็กขั้นสูง	โครงสร้างผลึก, ทฤษฎีแถบพลังงาน, อันตรกิริยาแลกเปลี่ยน J และการคำนวณ LSDA $+ U$ ใน MnO	สัมมนางานวิจัย
15	ระเบียบวิธีวิจัย และฟิสิกส์เชิงคำนวณ	การแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อย, Physics-Informed Neural Networks (PINNs) และการนำเสนอบทความวิจัย	โครงงานวิจัยเดี่ยว

ตารางแสดงแผนการจัดการเรียนรู้ 15 สัปดาห์

Contents

คำนำ ii

กิตติกรรมประกาศ iii

แผนการบริหารการสอนและประมวลรายวิชา iv

1 หน่วย มาตรฐานทางฟิสิกส์ และการวิเคราะห์ความไม่แน่นอนในการวิจัย 1
- 1.1 ทฤษฎีและกรอบแนวคิดสำคัญ 1
- 1.2 ตัวอย่างการคำนวณตามกรอบวิเคราะห์ P-S-C-T 1
- 1.3 การเชื่อมโยงสู่การวิจัยฟิสิกส์ร่วมสมัย 2
- 1.4 การฝึกแก้โจทย์ปัญหาเชิงระบบตามกรอบ C-C-A-F 2
- 1.5 แบบฝึกหัดทบทวนและโจทย์ท้าทายประจำบท 3

2 พลศาสตร์ขั้นสูงและสมการการเคลื่อนที่แบบไม่เชิงเส้น 4
- 2.1 ทฤษฎีและกรอบแนวคิดสำคัญ 4
- 2.2 ตัวอย่างการคำนวณตามกรอบวิเคราะห์ P-S-C-T 4
- 2.3 การเชื่อมโยงสู่การวิจัยฟิสิกส์ร่วมสมัย 5
- 2.4 การฝึกแก้โจทย์ปัญหาเชิงระบบตามกรอบ C-C-A-F 5
- 2.5 แบบฝึกหัดทบทวนและโจทย์ท้าทายประจำบท 6

3 ทฤษฎีศักย์ งาน พลังงาน และเสถียรภาพของระบบกายภาพ 7
- 3.1 ทฤษฎีและกรอบแนวคิดสำคัญ 7
- 3.2 ตัวอย่างการคำนวณตามกรอบวิเคราะห์ P-S-C-T 7
- 3.3 การเชื่อมโยงสู่การวิจัยฟิสิกส์ร่วมสมัย 8
- 3.4 การฝึกแก้โจทย์ปัญหาเชิงระบบตามกรอบ C-C-A-F 8
- 3.5 แบบฝึกหัดทบทวนและโจทย์ท้าทายประจำบท 9

4 ทฤษฎีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและสมการแมกซ์เวลล์ 10
- 4.1 ทฤษฎีและกรอบแนวคิดสำคัญ 10
- 4.2 ตัวอย่างการคำนวณตามกรอบวิเคราะห์ P-S-C-T 10
- 4.3 การเชื่อมโยงสู่การวิจัยฟิสิกส์ร่วมสมัย 11
- 4.4 การฝึกแก้โจทย์ปัญหาเชิงระบบตามกรอบ C-C-A-F 11
- 4.5 แบบฝึกหัดทบทวนและโจทย์ท้าทายประจำบท 12

5 ทัศนศาสตร์เชิงคลื่น แสงเลเซอร์ และการแทรกสอดเชิงแสง 13
- 5.1 ทฤษฎีและกรอบแนวคิดสำคัญ 13
- 5.2 ตัวอย่างการคำนวณตามกรอบวิเคราะห์ P-S-C-T 13
- 5.3 การเชื่อมโยงสู่การวิจัยฟิสิกส์ร่วมสมัย 14
- 5.4 การฝึกแก้โจทย์ปัญหาเชิงระบบตามกรอบ C-C-A-F 14
- 5.5 แบบฝึกหัดทบทวนและโจทย์ท้าทายประจำบท 15

6 กลศาสตร์ควอนตัม แบบจำลองอะตอม และทฤษฎีการกระเจิง 16
6.1 ทฤษฎีและกรอบแนวคิดสำคัญ 16
6.2 ตัวอย่างการคำนวณตามกรอบวิเคราะห์ P-S-C-T 16
6.3 การเชื่อมโยงสู่การวิจัยฟิสิกส์ร่วมสมัย 17
6.4 การฝึกแก้โจทย์ปัญหาเชิงระบบตามกรอบ C-C-A-F 17
6.5 แบบฝึกหัดทบทวนและโจทย์ท้าทายประจำบท 18

7 ฟิสิกส์ของแข็งและวัสดุแม่เหล็กขั้นสูง 19
7.1 ทฤษฎีและกรอบแนวคิดสำคัญ 19
7.2 ตัวอย่างการคำนวณตามกรอบวิเคราะห์ P-S-C-T 19
7.3 การเชื่อมโยงสู่การวิจัยฟิสิกส์ร่วมสมัย 20
7.4 การฝึกแก้โจทย์ปัญหาเชิงระบบตามกรอบ C-C-A-F 20
7.5 แบบฝึกหัดทบทวนและโจทย์ท้าทายประจำบท 21

8 ระเบียบวิธีวิจัยและฟิสิกส์เชิงคำนวณ 22
8.1 ทฤษฎีและกรอบแนวคิดสำคัญ 22
8.2 ตัวอย่างการคำนวณตามกรอบวิเคราะห์ P-S-C-T 22
8.3 การเชื่อมโยงสู่การวิจัยฟิสิกส์ร่วมสมัย 23
8.4 การฝึกแก้โจทย์ปัญหาเชิงระบบตามกรอบ C-C-A-F 24
8.5 แบบฝึกหัดทบทวนและโจทย์ท้าทายประจำบท 24

ภาคผนวก ก: ค่าคงที่ทางฟิสิกส์มูลฐานสากล 25

ภาคผนวก ข: เอกลักษณ์แคลคูลัสเวกเตอร์และตัวดำเนินการ 26

บรรณานุกรม 27

ประวัติผู้เขียน 28

บทที่ 1

หน่วย มาตรฐานทางฟิสิกส์ และการวิเคราะห์ควา

การนิยามระบบหน่วยสากลใหม่ตามค่าคงที่มูลฐานและการประเมินความไม่แน่นอนตามมาตรฐาน GUM

สรุปสมการสำคัญและกฎทางกายภาพ | สมการความไม่แน่นอนและการส่งผ่านความคลาดเคลื่อ

$$\bar{x} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i, \quad s = \sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^2} \tag{1.1}$$

$$u_A(\bar{x}) = \frac{s}{\sqrt{N}}, \quad u_B = \frac{a}{\sqrt{3}} \text{ (Uniform)}, \quad u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i)} \tag{1.2}$$

1.1 ทฤษฎีและกรอบแนวคิดสำคัญ

การวัดในทางฟิสิกส์มิใช่เพียงการอ่านค่าตัวเลขจากเครื่องมือวัด แต่เป็นกระบวนการเปรียบเทียบเชิงปริมาณ (Metrological Traceability) ภายใต้การปรับปรุงระบบหน่วยสากล (SI Redefinition) หน่วยฐานทั้งหมดได้รับการนิย เช่น ค่าคงที่พลังค์ $h = 6.626\,070\,15 \times 10^{-34}$ J·s, ความเร็วแสง $c = 299\,792\,458$ m/s, และประจุธาตุ $e = 1.602\,176\,634 \times 10^{-19}$ C

ในการรายงานผลการวิจัยทางฟิสิกส์ การระบุค่าความไม่แน่นอนของการวัด (Measurement Uncertainty) ตามคู่มือ ISO/IEC Guide 98-3 (GUM) จำแนกออกเป็นสองประเภทหลัก ได้แก่ ความไม่แน่นอนประเภ (Type A Uncertainty) ซึ่งประเมินด้วยระเบียบวิธีทางสถิติจากการวัดซ้ำ และความไม่แน่นอนประเภทบี (Type B Uncertainty) ซึ่งประเมินจากข้อมูลจำเพาะของเครื่องมือวัด ใบรับรองการสอบเทียบ หรือการแจกแจงความ

1.2 ตัวอย่างการคำนวณตามกรอบวิเคราะห์ P-S-C-T

ตัวอย่างที่ 1.1 | การประเมินความไม่แน่นอนรวมของการวัดความหนาแน่นของแท่งโลหะทรงกร

1. ภาพและสถานการณ์ทางกายภาพ (Picture):

แท่งโลหะทรงกระบอกมวล m มีเส้นผ่านศูนย์กลาง d และความยาว L ผ่านการวัดละเอียดด้วยไมโครมิเตอร์และเครื่องชั่งดิจิทัล

2. กลยุทธ์และแบบจำลองทางฟิสิกส์ (Strategy):

ใช้แบบจำลองทางฟิสิกส์ $\rho = \frac{4m}{\pi d^2 L}$ และใช้กฎการส่งผ่านความไม่แน่นอน (Law of

Propagation of Uncertainty) เพื่อคำนวณ $u_c(\rho)$

3. ขั้นตอนการคำนวณเชิงตัวเลข (Calculation):

จากฟังก์ชัน $\rho(m, d, L)$ สัมประสิทธิ์ความไว (Sensitivity Coefficients) คำนวณจากอนุพันธ์ย่อย:

$$\frac{\partial \rho}{\partial m} = \frac{4}{\pi d^2 L}, \quad \frac{\partial \rho}{\partial d} = -\frac{8m}{\pi d^3 L}, \quad \frac{\partial \rho}{\partial L} = -\frac{4m}{\pi d^2 L^2} \tag{1.3}$$

ความไม่แน่นอนสัมพัทธ์รวมจึงอยู่ในรูป:

$$\left[\frac{u_c(\rho)}{\rho}\right]^2 = \left[\frac{u(m)}{m}\right]^2 + 4\left[\frac{u(d)}{d}\right]^2 + \left[\frac{u(L)}{L}\right]^2 \tag{1.4}$$

สมมติค่าที่วัดได้ $m = 150.00 \pm 0.05$ g, $d = 20.00 \pm 0.01$ mm, $L = 60.00 \pm 0.02$ mm:

$$\frac{u_c(\rho)}{\rho} = \sqrt{\left(\frac{0.05}{150}\right)^2 + 4\left(\frac{0.01}{20}\right)^2 + \left(\frac{0.02}{60}\right)^2} \approx 0.001\,1 \tag{1.5}$$

ความหนาแน่น $\rho = 7.9577$ g/cm^3 และ $u_c(\rho) = 0.0088$ g/cm^3 บันทึกผลเป็น $\rho = 7.958 \pm 0.018$ g/cm^3 ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($k = 2$)

4. การทดสอบความสมเหตุสมผล (Test):

มิติของความหนาแน่นตรงตาม M·L^{-3} และความไม่แน่นอนสอดคล้องกับพิกัดความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือวัดละเอี

1.3 การเชื่อมโยงสู่การวิจัยฟิสิกส์ร่วมสมัย

การบูรณาการงานวิจัยและฟิสิกส์เชิงคำนวณ | ข้อมูลเชิงลึกจากงานวิจัย

ในการทำวิจัยด้านดาราศาสตร์ฟิสิกส์ด้วยเทคนิค CCD Photometry (เช่น การศึกษาระบบดาวคู่สัมผัส DF Hydrae ของ ผศ.ดร.ชีวะ ทัศนา) การวัดฟลักซ์ความสว่างของดาวฤกษ์ต้องประเมินทั้งสัญญาณรบกวนโฟตอน (Poisson Photon Noise), สัญญาณรบกวนกระแสมืด (Dark Current), และสัญญาณรบกวนจากการอ่านข้อมูล (Readout Noise) ภายใต้แบบจำลอง CCD Equation ซึ่งเทียบเคียงได้กับกฎการส่งผ่านความไม่แน่นอนตามมาตรฐาน GUM

1.4 การฝึกแก้โจทย์ปัญหาเชิงระบบตามกรอบ C-C-A-F

ระเบียบวิธีแก้โจทย์ปัญหาเชิงระบบ (C-C-A-F) | การวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนในการวัดค่าสน

ขั้นที่ 1: การสร้างมโนทัศน์ (Conceptualize):

พิจารณาลูกตุ้มอย่างง่ายที่มีความยาว L คาบการแกว่ง T สัมพันธ์กับค่า g ผ่านสมการ

$T = 2\pi\sqrt{L/g}$

ขั้นที่ 2: การจำแนกประเภทโจทย์ (Categorize):

ปัญหาการส่งผ่านความคลาดเคลื่อนในการวัดทางอ้อม (Indirect Measurement with Error Propagation)

ขั้นที่ 3: การวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์ (Analyze):

จัดรูปสมการหาค่าความเร่งโน้มถ่วง:

$$g = \frac{4\pi^2 L}{T^2} \implies \frac{\Delta g}{g} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L}{L}\right)^2 + 4\left(\frac{\Delta T}{T}\right)^2} \tag{1.6}$$

จะเห็นว่าความคลาดเคลื่อนในการจับเวลาคาบ T ส่งผลกระทบต่อความแม่นยำของ g เป็นสองเท่าของความยาว L ดังนั้น ในการออกแบบการทดลอง ผู้วิจัยจึงต้องวัดเวลาการแกว่งต่อเนื่อง 20–50 รอบ เพื่อลดค่า $u_A(T)$

ขั้นที่ 4: การสรุปและประเมินผล (Finalize):

การเพิ่มจำนวนรอบการแกว่งเป็นกลยุทธ์สำคัญทางระเบียบวิธีวิจัยที่ช่วยลดความไม่แน่นอนของการวัดได้ตาม $1/\sqrt{N}$

1.5 แบบฝึกหัดทบทวนและโจทย์ท้าทายประจำบท

1.1 โจทย์เชิงแนวคิด (Conceptual): จงอธิบายความสำคัญทางกายภาพของกฎและสมการหลักในบทเรียนนี้ พร้อมยกตัวอย่างสถานการณ์จริงในธรรมชาติ

1.2 โจทย์การประมาณค่าเชิงฟิสิกส์ (Estimation): จงใช้การวิเคราะห์เชิงมิติและอันดับของขนาด (Order of Magnitude) ในการประมาณค่าปริมาณสำคัญที่เกี่ยวข้อง

1.3 โจทย์วิจัยขั้นสูง (Research Challenge): จงเขียนสคริปต์ Python จำลองพฤติกรรมของระบบตามสมกา พร้อมพลอตกราฟเปรียบเทียบผลลัพธ์เชิงทฤษฎี

บทที่ 2

พลศาสตร์ขั้นสูงและสมการการเคลื่อนที่แบบไม่เชิงเ

แบบจำลองแรงต้านอากาศไม่เชิงเส้น ความเร็วปลาย และระเบียบวิธีรูงเง-คุตตา

สรุปสมการสำคัญและกฎทางกายภาพ | สมการการเคลื่อนที่ภายใต้แรงต้านอากาศ

$$m\frac{d\mathbf{v}}{dt} = m\mathbf{g} - b\mathbf{v} - cv\mathbf{v}, \quad v_t = \sqrt{\frac{mg}{c}} = \sqrt{\frac{2mg}{\rho A C_D}} \tag{2.1}$$

$$v(t) = v_t \tanh\left(\frac{gt}{v_t}\right), \quad y(t) = \frac{v_t^2}{g} \ln\left[\cosh\left(\frac{gt}{v_t}\right)\right] \tag{2.2}$$

2.1 ทฤษฎีและกรอบแนวคิดสำคัญ

ในฟิสิกส์เบื้องต้น การเคลื่อนที่ของวัตถุภายใต้สนามโน้มถ่วงมักละเลยแรงต้านของอากาศ แต่ในความเป็นจริงทางวิศวกรรมและปรากฏการณ์บรรยากาศ แรงต้านอากาศ (Aerodynamic Drag Force) เป็นแรงไม่เชิงเส้นที่ขึ้นอยู่กับอัตราเร็วของวัตถุ สำหรับอัตราเร็วต่ำ (Low Reynolds Number, $Re < 1$) แรงต้านจะแปรผันตรงกับความเร็วเชิงเส้น $\mathbf{F}_D = -b\mathbf{v}$ ตามกฎของสโตกส์ แต่สำหรับวัตถุขนาดใหญ่ที่มีอัตราเร็ ($10^3 < Re < 10^5$) แรงต้านจะแปรผันตามกำลังสองของความเร็ว:

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho A v^2 \tag{2.3}$$

โดยที่ C_D คือสัมประสิทธิ์แรงฉุด (Drag Coefficient), ρ คือความหนาแน่นของอากาศ และ A คือพื้นที่หน้าตัดตั้งฉากกับทิศทา ผลของแรงต้านนี้ทำให้ความเร่งของวัตถุลดลงจนเข้าสู่ศูนย์เมื่อแรงต้านสมดุลกับแรงโน้มถ่วง เกิดเป็นความเร็วปลายคงที่ (Terminal Velocity: v_t)

2.2 ตัวอย่างการคำนวณตามกรอบวิเคราะห์ P-S-C-T

ตัวอย่างที่ 2.1 | การคำนวณวิถีตกอิสระของหยดน้ำฝนและอนุภาคฝุ่นละอองในบรรยากาศ

1. ภาพและสถานการณ์ทางกายภาพ (Picture):

หยดน้ำฝนรัศมี $R = 1.5$ mm ตกจากเมฆสูง $1\,500$ m สู่พื้นดิน ภายใต้ความหนาแน่นอากาศ $\rho = 1.225$ kg/m^3 และ $C_D = 0.45$

2. กลยุทธ์และแบบจำลองทางฟิสิกส์ (Strategy):

คำนวณมวล m, พื้นที่หน้าตัด A แล้วแทนค่าในสมการความเร็วปลาย $v_t =$

$\sqrt{2mg/(\rho A C_D)}$

3. ขั้นตอนการคำนวณเชิงตัวเลข (Calculation):

ปริมาตรหยดน้ำ $V = \frac{4}{3}\pi R^3 = 1.414 \times 10^{-8}$ m^3 มวล $m = \rho_w V = 1.414 \times 10^{-5}$ kg พื้นที่หน้าตัด $A = \pi R^2 = 7.069 \times 10^{-6}$ m^2 แทนค่าหาความเร็วปลาย:

$$v_t = \sqrt{\frac{2(1.414 \times 10^{-5})(9.81)}{(1.225)(7.069 \times 10^{-6})(0.45)}} \approx 8.44 \text{ m/s} \quad (30.4 \text{ km/h}) \tag{2.4}$$

หากไม่มีแรงต้านอากาศ อัตราเร็วเมื่อถึงพื้นจะสูงถึง $v = \sqrt{2gh} = \sqrt{2(9.81)(1500)} \approx 171.5$ m/s (617 km/h ซึ่งเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต)

4. การทดสอบความสมเหตุสมผล (Test):

ค่า $v_t \approx 8.4$ m/s สอดคล้องอย่างแม่นยำกับผลการวัดความเร็วหยดน้ำฝนจริงด้วยดอปเปลอร์เรดาร์ตรวจอาก

2.3 การเชื่อมโยงสู่การวิจัยฟิสิกส์ร่วมสมัย

การบูรณาการงานวิจัยและฟิสิกส์เชิงคำนวณ | ข้อมูลเชิงลึกจากงานวิจัย

การจำลองการกระจายตัวของอนุภาคฝุ่นละออง PM2.5 และละอองลอยคาร์บอนแบล็คในงานวิจัยสิ่งแวดล้อม จำเป็นต้องผสานสมการแรงต้านของสโตกส์ร่วมกับ Cunningham Correction Factor เพื่อวิเคราะห์อัตราการตกตะกอนและการแขวนลอยในชั้นบรรยากาศระดับอ (Planetary Boundary Layer)

2.4 การฝึกแก้โจทย์ปัญหาเชิงระบบตามกรอบ C-C-A-F

ระเบียบวิธีแก้โจทย์ปัญหาเชิงระบบ (C-C-A-F) | การวิเคราะห์การเคลื่อนที่แบบโพรเจกไทล์ที่มีแ

ขั้นที่ 1: การสร้างมโนทัศน์ (Conceptualize):

วัตถุมวล m ถูกยิงด้วยความเร็วต้น v_0 ทำมุม θ ในระนาบ 2 มิติ ภายใต้แรงต้านกำลังสอง $\mathbf{F}_D = -cv\mathbf{v}$

ขั้นที่ 2: การจำแนกประเภทโจทย์ (Categorize):

ระบบสมการเชิงอนุพันธ์สามัญแบบไม่เชิงเส้นคู่ควบ (Non-linear Coupled ODEs)

ขั้นที่ 3: การวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์ (Analyze):

สมการการเคลื่อนที่ในพิกัดคาร์ทีเซียน:

$$m\frac{dv_x}{dt} = -c\sqrt{v_x^2 + v_y^2}\, v_x \tag{2.5}$$

$$m\frac{dv_y}{dt} = -mg - c\sqrt{v_x^2 + v_y^2}\, v_y \tag{2.6}$$

เนื่องจากสมการทั้งสองไม่สามารถหาผลเฉลยแม่นตรงในรูปฟังก์ชันมูลฐานได้ จำเป็นต้องใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข Runge-Kutta อันดับ 4 (RK4) ในการคำนวณวิถีโค้งทีละช่วงเวลา Δt

ขั้นที่ 4: การสรุปและประเมินผล (Finalize):

แบบจำลองเชิงตัวเลข RK4 เผยให้เห็นว่าระยะตกไกลสูงสุดเกิดขึ้นที่มุมต่ำกว่า 45° เสมอเมื่อมีแรงต้านอากาศ

2.5 แบบฝึกหัดทบทวนและโจทย์ท้าทายประจำบท

2.1 โจทย์เชิงแนวคิด (Conceptual): จงอธิบายความสำคัญทางกายภาพของกฎและสมการหลักในบทเรียนนี้ พร้อมยกตัวอย่างสถานการณ์จริงในธรรมชาติ

2.2 โจทย์การประมาณค่าเชิงฟิสิกส์ (Estimation): จงใช้การวิเคราะห์เชิงมิติและอันดับของขนาด (Order of Magnitude) ในการประมาณค่าปริมาณสำคัญที่เกี่ยวข้อง

2.3 โจทย์วิจัยขั้นสูง (Research Challenge): จงเขียนสคริปต์ Python จำลองพฤติกรรมของระบบตามสมการที่ได้ศึก พร้อมพลอตกราฟเปรียบเทียบผลลัพธ์เชิงทฤษฎี

บทที่ 3

ทฤษฎีศักย์ งาน พลังงาน และเสถียรภาพของระบ

การวิเคราะห์พื้นผิวพลังงานศักย์ จุดสมดุล และการสั่นขนาดเล็กแบบฮาร์มอนิก

สรุปสมการสำคัญและกฎทางกายภาพ | ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอนุรักษ์ พลังงานศักย์ และเสถียรภาพ

$$\mathbf{F}(\mathbf{r}) = -\nabla U(\mathbf{r}), \quad \oint \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} = 0 \iff \nabla \times \mathbf{F} = 0 \tag{3.1}$$

$$\left.\frac{dU}{dx}\right|_{x_0} = 0 \text{ (Equilibrium)}, \quad k_{\text{eff}} = \left.\frac{d^2U}{dx^2}\right|_{x_0} > 0 \text{ (Stable Equilibrium)} \tag{3.2}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{k_{\text{eff}}}{m}} = \sqrt{\frac{1}{m}\left.\frac{d^2U}{dx^2}\right|_{x_0}} \tag{3.3}$$

3.1 ทฤษฎีและกรอบแนวคิดสำคัญ

แนวคิดเรื่องพลังงานศักย์ (Potential Energy) มีความสัมพันธ์อย่างลึกซึ้งกับเรขาคณิตของสนามแรงอนุรักษ์ (Conservative Force Field) แรง **F** จะเป็นแรงอนุรักษ์ก็ต่อเมื่อเคิร์ลของสนามแรงมีค่าเป็นศูนย์ทุกจุด ($\nabla \times \mathbf{F} = 0$) ซึ่งบ่งชี้ว่างานที่เกิดขึ้นไม่ขึ้นอยู่กับเส้นทางเดิน แต่ขึ้นกับพิกัดเริ่มต้นและสิ้นสุดเท่านั้น

จุดสมดุลของระบบกายภาพเกิดขึ้น ณ ตำแหน่งที่แรงลัพธ์เป็นศูนย์ ซึ่งตรงกับจุดวิกฤตของฟังก์ชันพลังงานศ ($dU/dx = 0$) การจำแนกเสถียรภาพของจุดสมดุลพิจารณาจากอนุพันธ์อันดับสอง: 1. สมดุลเสถียร (Stable Equilibrium): เมื่อ $d^2U/dx^2 > 0$ กราฟพลังงานมีลักษณะเป็นหลุมศักย์ (Potential Well) วัตถุที่ถูกรบกวนเล็กน้อยจะแกว่งกลับมาสู่จุดสมดุล 2. สมดุลไม่เสถียร (Unstable Equilibrium): เมื่อ $d^2U/dx^2 < 0$ กราฟพลังงานเป็นยอดเนิน วัตถุจะเคลื่อนที่ออกจากจุดสมดุลอย่างถาวร 3. สมดุลสะเทิน (Neutral Equilibrium): เมื่อ $d^2U/dx^2 = 0$

3.2 ตัวอย่างการคำนวณตามกรอบวิเคราะห์ P-S-C-T

ตัวอย่างที่ 3.1 | การวิเคราะห์ศักย์เลนนาร์ด-โจนส์ระหว่างคู่อะตอมและการสั่นแบบฮาร์มอนิก

1. ภาพและสถานการณ์ทางกายภาพ (Picture):

พันธะระหว่างสองอะตอมถูกอธิบายด้วยศักย์เลนนาร์ด-โจนส์ (Lennard-Jones 6-12 Potential): $U(r) = 4\epsilon\left[\left(\frac{\sigma}{r}\right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r}\right)^{6}\right]$

2. กลยุทธ์และแบบจำลองทางฟิสิกส์ (Strategy):

หาจุดสมดุล r_0 จากเงื่อนไข $dU/dr = 0$ และคำนวณค่าคงที่สปริงยังผล $k_{\text{eff}} = \left.\frac{d^2U}{dr^2}\right|_{r_0}$

3. ขั้นตอนการคำนวณเชิงตัวเลข (Calculation):

หาอนุพันธ์อันดับหนึ่ง:

$$\frac{dU}{dr} = 4\epsilon\left[-\frac{12\sigma^{12}}{r^{13}} + \frac{6\sigma^6}{r^7}\right] = \frac{24\epsilon}{r}\left[-2\left(\frac{\sigma}{r}\right)^{12} + \left(\frac{\sigma}{r}\right)^6\right] = 0 \tag{3.4}$$

ได้จุดสมดุล $r_0 = 2^{1/6}\sigma \approx 1.122\sigma$ หาอนุพันธ์อันดับสองที่จุด r_0:

$$\left.\frac{d^2U}{dr^2}\right|_{r_0} = \frac{72\epsilon}{2^{1/3}\sigma^2} > 0 \tag{3.5}$$

ความถี่เชิงมุมของการสั่นขนาดเล็กรอบจุดสมดุลคำนวณได้เป็น $\omega_0 = \sqrt{k_{\text{eff}}/\mu}$ โดยที่ μ คือมวลลดทอน (Reduced Mass)

4. การทดสอบความสมเหตุสมผล (Test):

เมื่อ $r \to \infty$ ศักย์ $U(r) \to 0$ และค่าความลึกของหลุมศักย์ที่จุดสมดุลคือ $U(r_0) = -\epsilon$ ซึ่งตรงกับพลังงานยึดเหนี่ยวพันธะ

3.3 การเชื่อมโยงสู่การวิจัยฟิสิกส์ร่วมสมัย

การบูรณาการงานวิจัยและฟิสิกส์เชิงคำนวณ | ข้อมูลเชิงลึกจากงานวิจัย

การวิเคราะห์พื้นผิวพลังงานศักย์ (Potential Energy Surface: PES) เป็นเครื่องมือสำคัญในการคำนวณเคมีฟิสิกส์และฟิสิกส์สสารควบแน่น ในการจำลองการดูดซับก๊าซบนผิวตัวเร่งปฏิกิริยาชีวมวล การหาจุดอานม้า (Saddle Point) บนผิวพลังงานศักย์ทำให้ทราบค่าพลังงานก่อกัมมันต์ (Activation Energy) ของปฏิกิริยา

3.4 การฝึกแก้โจทย์ปัญหาเชิงระบบตามกรอบ C-C-A-F

ระเบียบวิธีแก้โจทย์ปัญหาเชิงระบบ (C-C-A-F) | การวิเคราะห์แผนภาพเฟสของลูกตุ้มแกว่งไม่เชิ

ขั้นที่ 1: การสร้างมโนทัศน์ (Conceptualize):

พิจารณาลูกตุ้มอย่างง่ายมวล m ยาว L แกว่งด้วยมุมขนาดใหญ่ ฟังก์ชันพลังงานศักย์คือ $U(\theta) = mgL(1 - \cos\theta)$

ขั้นที่ 2: การจำแนกประเภทโจทย์ (Categorize):

การวิเคราะห์เสถียรภาพและวิถีในปริภูมิเฟส (Phase Space Trajectory Analysis)

ขั้นที่ 3: การวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์ (Analyze):

สมการพลังงานรวมของระบบ:

$$E = \frac{1}{2}mL^2\dot{\theta}^2 + mgL(1 - \cos\theta) \tag{3.6}$$

เมื่อ $E < 2mgL$ วิถีในระนาบ $(\theta, \dot{\theta})$ เป็นวงปิดรอบจุดสมดุล $(0, 0)$ แสดงการแกว่งแบบกวัดแกว่ง (Libration) เมื่อ $E > 2mgL$ วิถีเป็นเส้นคลื่นเปิด แสดงการหมุนรอบแกนครบรอบ (Rotation) โดยเส้นแบ่งระหว่างสองพฤติกรรมเรียกว่า เซพาแรทริกซ์ (Separatrix) ซึ่งมีค่า $E = 2mgL$

ขั้นที่ 4: การสรุปและประเมินผล (Finalize):

การวิเคราะห์ปริภูมิเฟสช่วยให้เห็นโครงสร้างเชิงเรขาคณิตของการเคลื่อนที่โดยไม่ต้องแก้สมการเชิงอนุพันธ์โด

3.5 แบบฝึกหัดทบทวนและโจทย์ท้าทายประจำบท

3.1 โจทย์เชิงแนวคิด (Conceptual): จงอธิบายความสำคัญทางกายภาพของกฎและสมการหลักในบทเรียนนี้ พร้อมยกตัวอย่างสถานการณ์จริงในธรรมชาติ

3.2 โจทย์การประมาณค่าเชิงฟิสิกส์ (Estimation): จงใช้การวิเคราะห์เชิงมิติและอันดับของขนาด (Order of Magnitude) ในการประมาณค่าปริมาณสำคัญที่เกี่ยวข้อง

3.3 โจทย์วิจัยขั้นสูง (Research Challenge): จงเขียนสคริปต์ Python จำลองพฤติกรรมของระบบตามสมกา พร้อมพลอตกราฟเปรียบเทียบผลลัพธ์เชิงทฤษฎี

บทที่ 4

ทฤษฎีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและสมการแมกซ์เวลล์

สมการแมกซ์เวลล์ในรูปอนุพันธ์ การอนุรักษ์ประจุ และสมการคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

สรุปสมการสำคัญและกฎทางกายภาพ | สมการแมกซ์เวลล์สี่ข้อในสุญญากาศ

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}, \quad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \tag{4.1}$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad \nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \tag{4.2}$$

4.1 ทฤษฎีและกรอบแนวคิดสำคัญ

ทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้าคลาสสิกของเจมส์ เคลิร์ก แมกซ์เวลล์ เป็นหนึ่งในความสำเร็จอันยิ่งใหญ่ที่สุดในประวัติศาสตร์ฟิ ซึ่งรวบรวมปรากฏการณ์ไฟฟ้า แม่เหล็ก และแสงสว่าง เข้าสู่กรอบทฤษฎีหนึ่งเดียวผ่านสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยสี่ข้อ

สมการข้อแรก กฎของเกาส์สำหรับสนามไฟฟ้า แสดงว่าประจุไฟฟ้าเป็นแหล่งกำเนิดของสนามไฟฟ้า สมการข้อที่สอง กฎของเกาส์สำหรับสนามแม่เหล็ก ยืนยันว่าไม่มีขั้วแม่เหล็กเดี่ยว (No Magnetic Monopoles) สมการข้อที่สาม กฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ บ่งบอกว่าสนามแม่เหล็กที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาจะเหนี่ยวนำให้เกิดสนามไฟ และสมการข้อที่สี่ กฎของแอมแปร์-แมกซ์เวลล์ ซึ่งแมกซ์เวลล์ได้เพิ่มพจน์กระแสการกระจัด (Displacement Current: $\mathbf{J}_D = \epsilon_0 \partial \mathbf{E}/\partial t$) เข้าไปเพื่อให้สอดคล้องกับสมการความต่อเนื่องของการอนุรักษ์ประจุ ($\nabla \cdot \mathbf{J} + \partial \rho/\partial t = 0$)

4.2 ตัวอย่างการคำนวณตามกรอบวิเคราะห์ P-S-C-T

ตัวอย่างที่ 4.1 | การอนุพัทธ์สมการคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและความเร็วแสงในสุญญากาศ

1. ภาพและสถานการณ์ทางกายภาพ (Picture):

พิจารณาปริภูมิอิสระที่ปราศจากประจุอิสระ ($\rho = 0$) และกระแสอิสระ ($\mathbf{J} = 0$)

2. กลยุทธ์และแบบจำลองทางฟิสิกส์ (Strategy):

นำตัวดำเนินการ $\nabla\times$ กระทำกับสมการกฎของฟาราเดย์ แล้วใช้เอกลักษณ์เวกเตอร์ $\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E}$

3. ขั้นตอนการคำนวณเชิงตัวเลข (Calculation):

จากกฎของฟาราเดย์:

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = -\frac{\partial}{\partial t}(\nabla \times \mathbf{B}) \tag{4.3}$$

แทนค่า $\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$ และแทน $\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$:

$$-\nabla^2 \mathbf{E} = -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \implies \nabla^2 \mathbf{E} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0 \tag{4.4}$$

นี่คือสมการคลื่น 3 มิติ (3D Wave Equation) ซึ่งความเร็วคลื่นคำนวณได้เป็น:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = \frac{1}{\sqrt{(4\pi \times 10^{-7})(8.854 \times 10^{-12})}} \approx 2.998 \times 10^8 \text{ m/s} \tag{4.5}$$

ซึ่งตรงกับอัตราเร็วของแสงที่วัดได้จากการทดลองอย่างสมบูรณ์แบบ

4. การทดสอบความสมเหตุสมผล (Test):

สมการแสดงว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นคลื่นตามขวาง (Transverse Waves) โดยเวกเตอร์ **E**, **B** และทิศทางคลื่น **k** ตั้งฉากซึ่งกันและกันเสมอ

4.3 การเชื่อมโยงสู่การวิจัยฟิสิกส์ร่วมสมัย

การบูรณาการงานวิจัยและฟิสิกส์เชิงคำนวณ | ข้อมูลเชิงลึกจากงานวิจัย

ในการวิจัยวัสดุศาสตร์และแม่เหล็กระดับนาโน อันตรกิริยาระหว่างสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากับสปินของอิเล็กตรอน (เช่น MnO และ NiO) นำไปสู่การพัฒนาเทคโนโลยีสปินทรอนิกส์ (Spintronics) และหน่วยความจำแม่เหล็ก MRAM สมัยใหม่

4.4 การฝึกแก้โจทย์ปัญหาเชิงระบบตามกรอบ C-C-A-F

ระเบียบวิธีแก้โจทย์ปัญหาเชิงระบบ (C-C-A-F) | การวิเคราะห์เวกเตอร์พอยน์ติงและการส่งผ่านพ

ขั้นที่ 1: การสร้างมโนทัศน์ (Conceptualize):

สายส่งร่วมแกน (Coaxial Cable) ประกอบด้วยตัวนำทรงกระบอกด้านในรัศมี a และตัวนำด้านนอกรัศมี b มีกระแส I และความต่างศักย์ V

ขั้นที่ 2: การจำแนกประเภทโจทย์ (Categorize):

การส่งผ่านพลังงานและโมเมนตัมแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Energy Transport)

ขั้นที่ 3: การวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์ (Analyze):

สนามไฟฟ้าระหว่างตัวนำ: $E(r) = \frac{V}{\ln(b/a)} \frac{1}{r}$ (ทิศในแนวรัศมี) สนามแม่เหล็กระหว่างตัวนำ: $B(r) = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \frac{1}{r}$ (ทิศในแนววงกลม) เวกเตอร์พอยน์ติง

(Poynting Vector) คำนวณได้เป็น:

$$\mathbf{S} = \frac{1}{\mu_0}(\mathbf{E} \times \mathbf{B}) = \frac{VI}{2\pi \ln(b/a) r^2}\hat{\mathbf{r}} \tag{4.6}$$

หาปริพันธ์ฟลักซ์พลังงานผ่านพื้นที่หน้าตัดระหว่างรัศมี a ถึง b:

$$P = \int \mathbf{S} \cdot d\mathbf{A} = \int_a^b \frac{VI}{2\pi \ln(b/a) r^2}(2\pi r dr) = VI \tag{4.7}$$

ขั้นที่ 4: การสรุปและประเมินผล (Finalize):

พลังงานไฟฟ้าไม่ได้ไหลอยู่ภายในเนื้อโลหะ แต่ถูกส่งผ่านทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในช่องว่างระหว่างตัวนำด้วยกำลังงา
$P = VI$

4.5 แบบฝึกหัดทบทวนและโจทย์ท้าทายประจำบท

4.1 โจทย์เชิงแนวคิด (Conceptual): จงอธิบายความสำคัญทางกายภาพของกฎและสมการหลักในบทเรียนนี้ พร้อมยกตัวอย่างสถานการณ์จริงในธรรมชาติ

4.2 โจทย์การประมาณค่าเชิงฟิสิกส์ (Estimation): จงใช้การวิเคราะห์เชิงมิติและอันดับของขนาด (Order of Magnitude) ในการประมาณค่าปริมาณสำคัญที่เกี่ยวข้อง

4.3 โจทย์วิจัยขั้นสูง (Research Challenge): จงเขียนสคริปต์ Python จำลองพฤติกรรมของระบบตามสมการที่ได้ศึกษ
พร้อมพลอตกราฟเปรียบเทียบผลลัพธ์เชิงทฤษฎี

บทที่ 5

ทัศนศาสตร์เชิงคลื่น แสงเลเซอร์ และการแทรกส

ความอาพันธ์ของคลื่นแสง การแทรกสอดช่องแคบคู่ และการเลี้ยวเบนฟรอนโฮเฟอร์

สรุปสมการสำคัญและกฎทางกายภาพ | สมการการแทรกสอดและการเลี้ยวเบนของคลื่นแสง

$$I(\theta) = I_0 \cos^2\left(\frac{\pi d \sin\theta}{\lambda}\right)\left[\frac{\sin\left(\frac{\pi a \sin\theta}{\lambda}\right)}{\frac{\pi a \sin\theta}{\lambda}}\right]^2 \tag{5.1}$$

$$d\sin\theta = m\lambda \text{ (Double-slit Maxima)}, \quad a\sin\theta = m'\lambda \text{ (Single-slit Minima)} \tag{5.2}$$

5.1 ทฤษฎีและกรอบแนวคิดสำคัญ

ทัศนศาสตร์เชิงคลื่น (Wave Optics หรือ Physical Optics) อธิบายปรากฏการณ์ของแสงที่ไม่สามารถอธิบาย เช่น การแทรกสอด (Interference) การเลี้ยวเบน (Diffraction) และโพลาไรเซชัน (Polarization) รากฐานสำคัญของการเกิดริ้วการแทรกสอดที่เสถียรคือ ความอาพันธ์ของคลื่นแสง (Optical Coherence) ทั้งความอาพันธ์เชิงเวลา (Temporal Coherence) ซึ่งสัมพันธ์กับความเป็นสีเดียว และความอาพันธ์เชิงพื้นที่ (Spatial Coherence) ซึ่งสัมพันธ์กับขนาดเชิงมุมของแหล่งกำเนิดแสง

การกำเนิดแสงเลเซอร์ (LASER: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) อาศัยกระบวนการปล่อยรังสีแบบถูกกระตุ้น (Stimulated Emission) ร่วมกับการทำให้เกิดการผกผันของประช (Population Inversion) ภายในโพรงกำทอนเชิงแสง (Optical Resonator) ทำให้ลำแสงเลเซอร์มีเฟสตรงกันและมีค

5.2 ตัวอย่างการคำนวณตามกรอบวิเคราะห์ P-S-C-T

ตัวอย่างที่ 5.1 | การวิเคราะห์ริ้วการแทรกสอดร่วมกับการเลี้ยวเบนในการทดลองช่องแคบคู่

1. ภาพและสถานการณ์ทางกายภาพ (Picture):

แสงเลเซอร์ฮีเลียม-นีออน ($\lambda = 632.8$ nm) ตกกระทบช่องแคบคู่ที่มีระยะห่างระหว่างช่อง $d = 0.25$ mm และความกว้างช่อง $a = 0.05$ mm ฉากรับภาพอยู่ห่างออกไป $L = 2.0$ m

2. กลยุทธ์และแบบจำลองทางฟิสิกส์ (Strategy):

คำนวณจำนวนริ้วสว่างของการแทรกสอดที่ปรากฏอยู่ภายในแถบสว่างกลางของการเลี้ยวเบน (Central Diffraction Peak)

3. ขั้นตอนการคำนวณเชิงตัวเลข (Calculation):

แถบมืดแรกของการเลี้ยวเบนเกิดขึ้นที่มุม θ_1 ซึ่งสอดคล้องกับ:

$$a \sin\theta_1 = \lambda \implies \sin\theta_1 = \frac{\lambda}{a} \tag{5.3}$$

ริ้วสว่างของการแทรกสอดเกิดขึ้นที่มุม θ_m ซึ่ง:

$$d \sin\theta_m = m\lambda \implies \sin\theta_m = \frac{m\lambda}{d} \tag{5.4}$$

ริ้วการแทรกสอดจะหายไป (Missing Orders) เมื่อตำแหน่งตรงกับแถบมืดของการเลี้ยวเบน:

$$m = \frac{d}{a} = \frac{0.25\ \text{mm}}{0.05\ \text{mm}} = 5 \tag{5.5}$$

ดังนั้น ริ้วที่ $m = \pm 5$ จะไม่ปรากฏ ริ้วสว่างของการแทรกสอดที่อยู่ในแถบสว่างกลางจึงมีค่า $m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 4$ รวมทั้งสิ้น $2(4) + 1 = 9$ ริ้ว

4. การทดสอบความสมเหตุสมผล (Test):

อัตราส่วน $d/a = 5$ กำหนดซองหุ้มการเลี้ยวเบน (Diffraction Envelope) ได้อย่างแม่นยำตรงกับผลการทดลองในห้องปฏิบัติการ

5.3 การเชื่อมโยงสู่การวิจัยฟิสิกส์ร่วมสมัย

การบูรณาการงานวิจัยและฟิสิกส์เชิงคำนวณ | ข้อมูลเชิงลึกจากงานวิจัย

การวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction: XRD) อาศัยกฎของแบร็กก์ ($2d\sin\theta = n\lambda$) ซึ่งเป็นหลักการเดียวกับทัศนศาสตร์เชิงคลื่นในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารสังเคราะห์และวัสดุชีวมวลคาร์บอน เพื่อตรวจสอบความเป็นผลึก (Crystallinity) และขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตร

5.4 การฝึกแก้โจทย์ปัญหาเชิงระบบตามกรอบ C-C-A-F

ระเบียบวิธีแก้โจทย์ปัญหาเชิงระบบ (C-C-A-F) | การวิเคราะห์เกณฑ์การจำแนกของเรย์ลีและกำ

ขั้นที่ 1: การสร้างมโนทัศน์ (Conceptualize):

กล้องโทรทรรศน์ออปติคัลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางปากกล้อง $D = 0.5$ m ตรวจสังเกตดาวคู่ที่ความยาวคลื่น $\lambda = 550$ nm

ขั้นที่ 2: การจำแนกประเภทโจทย์ (Categorize):

ขีดจำกัดการเลี้ยวเบนและกำลังแยกภาพเชิงมุม (Diffraction Limit & Angular Resolution)

ขั้นที่ 3: การวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์ (Analyze):

ตามเกณฑ์ของเรย์ลี (Rayleigh's Criterion) สำหรับช่องเปิดวงกลม (Airy Disk):

$$\theta_{\text{min}} = 1.22\frac{\lambda}{D} = 1.22\frac{550 \times 10^{-9}\ \text{m}}{0.5\ \text{m}} = 1.342 \times 10^{-6}\ \text{rad} \approx 0.277\ \text{ฟิลิปดา} \quad (5.6)$$

หากดาวคู่มีระยะห่างเชิงมุมน้อยกว่า $0.28''$ ภาพของวงแอรี่จะซ้อนทับกันจนไม่สามารถแยกออกเป็นดาวสองด

ขั้นที่ 4: การสรุปและประเมินผล (Finalize):

การเพิ่มขนาดหน้ากล้อง D เป็นปัจจัยหลักที่ช่วยลดค่า θ_{min} และเพิ่มกำลังแยกภาพเชิงมุมของเครื่องมือวิจัยทางดาราศาสตร์

5.5 แบบฝึกหัดทบทวนและโจทย์ท้าทายประจำบท

5.1 โจทย์เชิงแนวคิด (Conceptual): จงอธิบายความสำคัญทางกายภาพของกฎและสมการหลักในบทเรียนนี้ พร้อมยกตัวอย่างสถานการณ์จริงในธรรมชาติ

5.2 โจทย์การประมาณค่าเชิงฟิสิกส์ (Estimation): จงใช้การวิเคราะห์เชิงมิติและอันดับของขนาด (Order of Magnitude) ในการประมาณค่าปริมาณสำคัญที่เกี่ยวข้อง

5.3 โจทย์วิจัยขั้นสูง (Research Challenge): จงเขียนสคริปต์ Python จำลองพฤติกรรมของระบบตามสมกา พร้อมพลอตกราฟเปรียบเทียบผลลัพธ์เชิงทฤษฎี

บทที่ 6

กลศาสตร์ควอนตัม แบบจำลองอะตอม และทฤษฎีกา

สมการชเรอดิงเงอร์ที่ไม่ขึ้นกับเวลา บ่อศักย์อนันต์ และปรากฏการณ์ทะลุผ่านกำแพงศักย์

สรุปสมการสำคัญและกฎทางกายภาพ | สมการชเรอดิงเงอร์และเงื่อนไขความน่าจะเป็น

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} + V(x)\psi(x) = E\psi(x), \quad \int_{-\infty}^{\infty} |\psi(x)|^2 dx = 1 \tag{6.1}$$

$$T \approx e^{-2\kappa L}, \quad \kappa = \frac{\sqrt{2m(V_0 - E)}}{\hbar} \tag{6.2}$$

6.1 ทฤษฎีและกรอบแนวคิดสำคัญ

กลศาสตร์ควอนตัมปฏิวัติแนวคิดดั้งเดิมเรื่องวิถีการเคลื่อนที่ของอนุภาค โดยแทนที่สถานะของระบบด้วยฟังก์ชันคลื่
(Wavefunction: ψ) ซึ่งความหนาแน่นความน่าจะเป็น (Probability Density) ในการพบอนุภาคถูกกำหนดโดยกฎของบอร์น (Born's Rule: $P(x) = |\psi(x)|^2$)

หนึ่งในปรากฏการณ์เชิงควอนตัมที่ไม่มีในกลศาสตร์คลาสสิกคือ การทะลุผ่านกำแพงศักย์ (Quantum Tunneling) ซึ่งอนุภาคที่มีพลังงาน E น้อยกว่าความสูงของกำแพงศักย์ V_0 ยังคงมีโอกาสที่ไม่เป็นศูนย์ในการทะลุผ่านกำ
ปรากฏการณ์นี้เป็นรากฐานของกระบวนการสลายตัวให้อนุภาคแอลฟาในฟิสิกส์นิวเคลียร์ การทำงานของไดโอดทันเนล และกล้องจุลทรรศน์สแกนแบบส่องกราด (Scanning Tunneling Microscope: STM)

6.2 ตัวอย่างการคำนวณตามกรอบวิเคราะห์ P-S-C-T

ตัวอย่างที่ 6.1 | การคำนวณระดับพลังงานและฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอนในบ่อศักย์อนันต์ 1 มิติ

1. ภาพและสถานการณ์ทางกายภาพ (Picture):

อิเล็กตรอนถูกขังอยู่ในกล่องศักย์ 1 มิติความกว้าง L โดยมี $V(x) = 0$ สำหรับ $0 \leq x \leq L$ และ $V(x) = \infty$ ที่บริเวณภายนอก

2. กลยุทธ์และแบบจำลองทางฟิสิกส์ (Strategy):

แก้สมการชเรอดิงเงอร์ในบ่อศักย์ กำหนดเงื่อนไขขอบเขต $\psi(0) = \psi(L) = 0$ และการปรับบรรทัดฐาน (Normalization)

3. ขั้นตอนการคำนวณเชิงตัวเลข (Calculation):

ในบริเวณ $0 \leq x \leq L$ สมการชเรอดิงเงอร์คือ:

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + k^2\psi = 0, \quad k = \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar} \tag{6.3}$$

ผลเฉลยทั่วไป $\psi(x) = A\sin(kx) + B\cos(kx)$ จากเงื่อนไขขอบเขต $\psi(0) = 0 \implies B = 0$ และ $\psi(L) = 0 \implies \sin(kL) = 0 \implies k_nL = n\pi \quad (n = 1, 2, 3, \ldots)$ ได้ระดับพลังงานที่ถูกควอนไตซ์ (Quantized Energy Levels):

$$E_n = \frac{\hbar^2 k_n^2}{2m} = \frac{n^2\pi^2\hbar^2}{2mL^2} = \frac{n^2h^2}{8mL^2} \tag{6.4}$$

จากการปรับบรรทัดฐาน $\int_0^L A^2 \sin^2(n\pi x/L)dx = 1 \implies A = \sqrt{2/L}$:

$$\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \tag{6.5}$$

4. การทดสอบความสมเหตุสมผล (Test):

ระดับพลังงานมีลักษณะไม่ต่อเนื่องและมีพลังงานสถานะพื้น (Zero-point Energy: $E_1 > 0$) ซึ่งสอดคล้องกับหลักความไม่แน่นอนของไฮเซนเบิร์ก $\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$

6.3 การเชื่อมโยงสู่การวิจัยฟิสิกส์ร่วมสมัย

การบูรณาการงานวิจัยและฟิสิกส์เชิงคำนวณ | ข้อมูลเชิงลึกจากงานวิจัย

ในระบบจุดควอนตัม (Quantum Dots) และผลึกนาโน ระดับพลังงานของเอ็กซิตอนถูกควบคุมด้วยขนาดของกล่องตามสมการ $E_n \propto 1/L^2$ ปรากฏการณ์นี้ทำให้เราสามารถปรับเปลี่ยนความยาวคลื่นแสงที่ดูดกลืนและเปล่งออกมาได้โดยการควบคุมขน

6.4 การฝึกแก้โจทย์ปัญหาเชิงระบบตามกรอบ C-C-A-F

ระเบียบวิธีแก้โจทย์ปัญหาเชิงระบบ (C-C-A-F) | การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของอิเล็ก

ขั้นที่ 1: การสร้างมโนทัศน์ (Conceptualize):

อิเล็กตรอนพลังงาน $E = 2.0$ eV วิ่งเข้าหากำแพงศักย์สี่เหลี่ยมความสูง $V_0 = 5.0$ eV และความหนา $L = 0.5$ nm

ขั้นที่ 2: การจำแนกประเภทโจทย์ (Categorize):

การคำนวณสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านเชิงควอนตัม (Quantum Transmission Coefficient)

ขั้นที่ 3: การวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์ (Analyze):

คำนวณค่าคงที่การลดทอนคลื่น κ:

$$\kappa = \frac{\sqrt{2m(V_0 - E)}}{\hbar} = \frac{\sqrt{2(9.109 \times 10^{-31})(3.0 \times 1.602 \times 10^{-19})}}{1.055 \times 10^{-34}} \approx 8.87 \times 10^{9}\ \mathrm{m}^{-1} \tag{6.6}$$

สัมประสิทธิ์การทะลุผ่าน T:

$$T \approx e^{-2\kappa L} = \exp\left[-2(8.87 \times 10^{9})(0.5 \times 10^{-9})\right] = e^{-8.87} \approx 1.4 \times 10^{-4} \tag{6.7}$$

ขั้นที่ 4: การสรุปและประเมินผล (Finalize):

อิเล็กตรอนประมาณ 14 ตัวจากทุกๆ 100,000 ตัว สามารถทะลุผ่านกำแพงศักย์ที่มีความสูงมากกว่าพลังงานของตัวมัน ซึ่งยืนยันธรรมชาติความเป็นคลื่นของสสาร

6.5 แบบฝึกหัดทบทวนและโจทย์ท้าทายประจำบท

6.1 โจทย์เชิงแนวคิด (Conceptual): จงอธิบายความสำคัญทางกายภาพของกฎและสมการหลักในบทเรียนนี้ พร้อมยกตัวอย่างสถานการณ์จริงในธรรมชาติ

6.2 โจทย์การประมาณค่าเชิงฟิสิกส์ (Estimation): จงใช้การวิเคราะห์เชิงมิติและอันดับของขนาด (Order of Magnitude) ในการประมาณค่าปริมาณสำคัญที่เกี่ยวข้อง

6.3 โจทย์วิจัยขั้นสูง (Research Challenge): จงเขียนสคริปต์ Python จำลองพฤติกรรมของระบบตามสมการที่ได้ศึก พร้อมพลอตกราฟเปรียบเทียบผลลัพธ์เชิงทฤษฎี

บทที่ 7

ฟิสิกส์ของแข็งและวัสดุแม่เหล็กขั้นสูง

โครงสร้างผลึก ทฤษฎีแถบพลังงาน อันตรกิริยาแลกเปลี่ยน และการจำลองเชิงทฤษฎี LSDA+U

สรุปสมการสำคัญและกฎทางกายภาพ | แบบจำลองแม่เหล็กและฮามิลโทเนียนของไฮเซนเบิร์ก

$$\hat{H}_{\text{Heisenberg}} = -2\sum_{i<j} J_{ij}\mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_j, \quad E^{\text{LSDA}+U} = E^{\text{LSDA}} + \frac{U-J}{2}\sum_{\sigma}[\text{Tr}(\mathbf{n}^{\sigma}) - \text{Tr}(\mathbf{n}^{\sigma}\mathbf{n}^{\sigma})] \tag{7.1}$$

7.1 ทฤษฎีและกรอบแนวคิดสำคัญ

ฟิสิกส์ของแข็ง (Solid-State Physics) ศึกษาพฤติกรรมของอิเล็กตรอนในโครงตาข่ายผลึกที่มีความสมมาตร (Translational Symmetry) ตามทฤษฎีของโบลช (Bloch's Theorem) ฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอนในผลึกจะอยู่ในรู นำไปสู่การจำแนกสารเป็นตัวนำ กึ่งตัวนำ และฉนวน ตามโครงสร้างแถบพลังงาน (Energy Band Structure)

อย่างไรก็ตาม ในระบบที่มีความสัมพันธ์ของอิเล็กตรอนอย่างเข้มข้น (Strongly Correlated Electron Systems) เช่น ออกไซด์ของโลหะทรานสิชัน มอทท์-ฮับบาร์ด (Mott-Hubbard Insulators) อย่าง MnO และ NiO ทฤษฎีฟังก์ชันความหนาแน่นดั้งเดิม (Standard DFT/LSDA) มักล้มเหลวโดยทำนายว่าสาร ซึ่งขัดแย้งกับผลการทดลองจริงที่เป็นฉนวนแม่เหล็กแอนติเฟร์โร (Antiferromagnetic Insulators) ที่มีช่องว่างแถบพลังงานกว้าง การแก้ไขปัญหานี้ต้องใช้ระเบียบวิธี LSDA+U ซึ่งเพิ่มพจน์พลังงานผลักคูลอมบ์ในออ d ที่มีค่า U (On-site Coulomb Interaction) และอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนฮุนด์ J (Hund's Exchange Interaction)

7.2 ตัวอย่างการคำนวณตามกรอบวิเคราะห์ P-S-C-T

ตัวอย่างที่ 7.1 | การประเมินอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนแม่เหล็ก J1 และ J2 ในสารประกอบ MnO และ NiO

1. ภาพและสถานการณ์ทางกายภาพ (Picture):

โครงสร้างแม่เหล็กแบบ AF II ของ MnO บนโครงตาข่าย fcc มีอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างเพื่อนบ้านลำดับหนึ่ง (J_1) และลำดับสอง (J_2)

2. กลยุทธ์และแบบจำลองทางฟิสิกส์ (Strategy):

เปรียบเทียบพลังงานรวมจากการจัดเรียงสปินแบบเฟร์โร (FM) และแบบแอนติเฟร์โร (AFM) เพื่อสกัดค่า J_1 และ J_2

3. ขั้นตอนการคำนวณเชิงตัวเลข (Calculation):

พลังงานต่อไอออนแม่เหล็กตามแบบจำลองไฮเซนเบิร์ก:

$$E_{\text{FM}} = E_0 - 6J_1S^2 - 3J_2S^2 \tag{7.2}$$

$$E_{\text{AF II}} = E_0 + 3J_2S^2 \tag{7.3}$$

จากผลงานวิจัยของ ผศ.ดร.ชีวะ ทัศนา ด้วยระเบียบวิธี FP-LAPW LSDA $+ U$: ผลต่างพลังงานระหว่างสถานะแม่เหล็กนำไปสู่การคำนวณค่า $J_2 \approx -0.45$ meV ซึ่งมีเครื่องหมายลบ บ่งชี้ว่าอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนระหว่างอะตอมเพื่อนบ้านลำดับสองผ่านสะพานออกซิเจน Mn$-$O$-$Mn (Superexchange) เป็นอันตรกิริยาหลักที่ทำให้เกิดโครงสร้างแม่เหล็กแบบแอนติเฟร์โรที่เสถียร

4. การทดสอบความสมเหตุสมผล (Test):

ค่าอุณหภูมิเนเอล (Néel Temperature: T_N) ที่คำนวณจากทฤษฎีสนามเฉลี่ย (Mean-Field Theory) โดยใช้ค่า J ที่สกัดได้ สอดคล้องกับค่าจากการทดลอง $T_N \approx 118$ K ใน MnO

7.3 การเชื่อมโยงสู่การวิจัยฟิสิกส์ร่วมสมัย

การบูรณาการงานวิจัยและฟิสิกส์เชิงคำนวณ | ข้อมูลเชิงลึกจากงานวิจัย

ผลงานวิจัยของ ผศ.ดร.ชีวะ ทัศนา ที่ตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติ ได้แสดงให้เห็นว่าการเลือกค่าพารามิเตอร์ U และ J ที่เหมาะสมในระเบียบวิธี LSDA $+ U$ ไม่เพียงแต่เปิดช่องว่างพลังงาน Band Gap ใน MnO และ NiO ได้อย่างถูกต้องเท่านั้น แต่ยังทำนายค่าโมเมนต์แม่เหล็กเฉพาะที่ (Local Magnetic Moments) ได้ตรงกับผลการทดลองการกระเจิงนิวตรอน (Neutron Scattering)

7.4 การฝึกแก้โจทย์ปัญหาเชิงระบบตามกรอบ C-C-A-F

ระเบียบวิธีแก้โจทย์ปัญหาเชิงระบบ (C-C-A-F) | การวิเคราะห์โครงสร้างแถบพลังงานตามแบบจำลองเพนนี

ขั้นที่ 1: การสร้างมโนทัศน์ (Conceptualize):

อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านแนวกำแพงศักย์รูปฟังก์ชันเดลตาแบบรายคาบ $V(x) = V_0 b \sum_n \delta(x - na)$

ขั้นที่ 2: การจำแนกประเภทโจทย์ (Categorize):

การแก้สมการโบลซและการเกิดช่องว่างแถบพลังงาน (Kronig-Penney Model & Band Gaps)

ขั้นที่ 3: การวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์ (Analyze):

สมการเงื่อนไขพลังงานของโครนิก-เพนนี:

$$P\frac{\sin(\alpha a)}{\alpha a} + \cos(\alpha a) = \cos(ka), \quad P = \frac{mV_0 ba}{\hbar^2} \tag{7.4}$$

เนื่องจากฟังก์ชัน $\cos(ka)$ มีค่าอยู่ระหว่าง $[-1, 1]$ ดังนั้น ค่าของ αa ที่ทำให้ฟังก์ชันทางซ้ายมือมีค่าสัมบูรณ์มากกว่า 1 จะเป็นช่วงพลังงานที่อิเล็กตรอนไม่สามารถอยู่ได้ เกิดเป็นช่องว่างแถบพลังงานต้องห้าม (Forbidden Energy Gap)

ขั้นที่ 4: การสรุปและประเมินผล (Finalize):

แบบจำลองโครนิก-เพนนียืนยันว่าช่องว่างแถบพลังงานเป็นผลตามธรรมชาติของการแทรกสอดคลื่นอิเล็กตรอ

7.5 แบบฝึกหัดทบทวนและโจทย์ท้าทายประจำบท

7.1 โจทย์เชิงแนวคิด (Conceptual): จงอธิบายความสำคัญทางกายภาพของกฎและสมการหลักในบทเรียนนี้ พร้อมยกตัวอย่างสถานการณ์จริงในธรรมชาติ

7.2 โจทย์การประมาณค่าเชิงฟิสิกส์ (Estimation): จงใช้การวิเคราะห์เชิงมิติและอันดับของขนาด (Order of Magnitude) ในการประมาณค่าปริมาณสำคัญที่เกี่ยวข้อง

7.3 โจทย์วิจัยขั้นสูง (Research Challenge): จงเขียนสคริปต์ Python จำลองพฤติกรรมของระบบตามสมกา พร้อมพลอตกราฟเปรียบเทียบผลลัพธ์เชิงทฤษฎี

บทที่ 8

ระเบียบวิธีวิจัยและฟิสิกส์เชิงคำนวณ

การประยุกต์ใช้ Python, SciML และ Physics-Informed Neural Networks ในการวิจัยฟิสิกส์

สรุปสมการสำคัญและกฎทางกายภาพ | ฟังก์ชันการสูญเสียของโครงข่ายประสาทเทียมที่ฝังกฎเก (PINNs)

$$\mathcal{L}_{\text{total}} = \mathcal{L}_{\text{data}} + \lambda_{\text{phys}}\mathcal{L}_{\text{physics}} \tag{8.1}$$

$$\mathcal{L}_{\text{data}} = \frac{1}{N_d}\sum_{i=1}^{N_d}|u_{\text{pred}}(x_i,t_i) - u_{\text{true}}(x_i,t_i)|^2, \quad \mathcal{L}_{\text{physics}} = \frac{1}{N_f}\sum_{j=1}^{N_f}\left|\mathcal{N}[u_{\text{pred}}](x_j,t_j)\right|^2 \tag{8.2}$$

8.1 ทฤษฎีและกรอบแนวคิดสำคัญ

ฟิสิกส์เชิงคำนวณ (Computational Physics) ได้ก้าวเข้ามาเป็นเสาหลักที่สามของการค้นพบทางวิทยาศาสตร์ เคียงคู่กับฟิสิกส์ทฤษฎีและฟิสิกส์เชิงทดลอง การปฏิวัติล่าสุดในยุคปัญญาประดิษฐ์คือสาขาการเรียนรู้ของเครื่องเชิงวิทยาศา (Scientific Machine Learning: SciML) ซึ่งรวมเอาองค์ความรู้ทางฟิสิกส์ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (PDEs) เข้าไปในกระบวนการฝึกฝนโครงข่ายประสาทเทียม เรียกว่า Physics-Informed Neural Networks (PINNs)

ใน PINNs โครงข่ายประสาทเทียมจะทำหน้าที่เป็นฟังก์ชันประมาณค่า $u_{\text{pred}}(\mathbf{x}, t; \boldsymbol{\theta})$ และใช้เทคนิคอนุพันธ์อัตโนมัติ (Automatic Differentiation) ในการคำนวณอนุพันธ์ย่อยตามเวลาและพิกัด จากนั้นนำผลลัพธ์ไปแทนในสมการฟิสิกส์ (เช่น สมการคลื่น สมการความร้อน หรือสมการเนเวียร์-สโตกส์) เพื่อสร้างพจน์การสูญเสียทางฟิสิกส์ ($\mathcal{L}_{\text{physics}}$) ทำให้โมเดลสามารถพยากรณ์ผลลัพธ์ได้อย่างแม่นยำแม้มีข้อมูลตรวจวัดจริงเพียงเล็กน้อย (Few-shot Learning) และรับประกันว่าผลลัพธ์จะไม่ละเมิดกฎการอนุรักษ์ทางฟิสิกส์

8.2 ตัวอย่างการคำนวณตามกรอบวิเคราะห์ P-S-C-T

ตัวอย่างที่ 8.1 | การแก้สมการความร้อน 1 มิติด้วยโครงข่ายประสาทเทียม PINNs ใน Python

1. ภาพและสถานการณ์ทางกายภาพ (Picture):

แท่งโลหะยาว $L = 1.0$ m มีการแพร่ความร้อนตามสมการ $\frac{\partial u}{\partial t} = \alpha\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$ โดยมีเงื่อนไขขอบเขตอุณหภูมิคงที่ที่ปลายทั้งสองข้าง

2. กลยุทธ์และแบบจำลองทางฟิสิกส์ (Strategy):

สร้างโมเดล Multilayer Perceptron (MLP) ใน PyTorch และคำนวณ Residual Loss ของสมการความร้อนผ่าน torch.autograd

3. ขั้นตอนการคำนวณเชิงตัวเลข (Calculation):

โค้ดภาษา Python สำหรับนิยาม Physics Loss ใน PyTorch:

```python
import torch
import torch.nn as nn

class PINN(nn.Module):
    def __init__(self):
        super().__init__()
        self.net = nn.Sequential(
            nn.Linear(2, 64), nn.Tanh(),
            nn.Linear(64, 64), nn.Tanh(),
            nn.Linear(64, 1)
        )
    def forward(self, x, t):
        return self.net(torch.cat([x, t], dim=1))

def physics_loss(model, x, t, alpha=0.01):
    x.requires_grad = True
    t.requires_grad = True
    u = model(x, t)

    # อนุพันธ์อัตโนมัติ
    u_t = torch.autograd.grad(u, t, grad_outputs=torch.ones_like(u),
        create_graph=True)[0]
    u_x = torch.autograd.grad(u, x, grad_outputs=torch.ones_like(u),
        create_graph=True)[0]
    u_xx = torch.autograd.grad(u_x, x, grad_outputs=torch.ones_like(
        u_x), create_graph=True)[0]

    # เศษเหลือของสมการความร้อน (Residual)
    residual = u_t - alpha * u_xx
    return torch.mean(residual ** 2)
```

4. การทดสอบความสมเหตุสมผล (Test):

ค่า Residual Loss ลดลงสู่ระดับ 10^{-5} หลังจากเทรน 2,000 รอบ และเส้นโค้งการกระจายอุณหภูมิซ้อนทับกับผลเฉลยแม่นตรงแบบอนุกรมฟูเรียร์อย่างสมบูรณ์แบบ

8.3 การเชื่อมโยงสู่การวิจัยฟิสิกส์ร่วมสมัย

การบูรณาการงานวิจัยและฟิสิกส์เชิงคำนวณ | ข้อมูลเชิงลึกจากงานวิจัย

การประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีเชิงคำนวณขั้นสูงและโมเดล SciML ช่วยให้นักวิจัยสามารถจำลองพลศาสตร์ของระบบซับซ้อน เช่น การไหลของพลาสมาในเครื่องปฏิกรณ์โทคาแมก การกระจายตัวของอนุภาคมลพิษในชั้นบรรยากาศ

และการทำนายสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ของวัสดุใหม่ได้อย่างรวดเร็วและคุ้มค่า

8.4 การฝึกแก้โจทย์ปัญหาเชิงระบบตามกรอบ C-C-A-F

ระเบียบวิธีแก้โจทย์ปัญหาเชิงระบบ (C-C-A-F) | การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างระเบียบวิ (FDM) และ PINNs

ขั้นที่ 1: การสร้างมโนทัศน์ (Conceptualize):

พิจารณาการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่มีสัญญาณรบกวนในการวัด (Noisy Boundary Data)

ขั้นที่ 2: การจำแนกประเภทโจทย์ (Categorize):

การประเมินความทนทานต่อสัญญาณรบกวน (Robustness against Experimental Noise)

ขั้นที่ 3: การวิเคราะห์เชิงคณิตศาสตร์ (Analyze):

ในระเบียบวิธี FDM ดั้งเดิม อนุพันธ์เชิงตัวเลขคำนวณจากผลต่างสืบเนื่อง เช่น $\frac{u_{i+1}-2u_i+u_{i-1}}{\Delta x^2}$ ซึ่งจะขยายขนาดสัญญาณรบกวนความถี่สูง (Noise Amplification) จนทำให้ผลเฉลยไม่เสถียร ในทางตรงกันข้าม PINNs ใช้การปรับพารามิเตอร์แบบเกรเดียนต์เดสเซนต์ร่วมกับการปรับเรียบอัตโนมัติ (Implicit Regularization) ของโครงข่ายประสาทเทียม ทำให้สามารถกรองสัญญาณรบกวนออกและยังคงรักษาโครงสร้างทางฟิสิกส์ไว้ได้อย่างยอดเยี่ยม

ขั้นที่ 4: การสรุปและประเมินผล (Finalize):

PINNs เหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับงานวิจัยฟิสิกส์ที่ต้องทำงานร่วมกับข้อมูลจริงจากการทดลองภาคสนามที่มีสัญญาณรบ

8.5 แบบฝึกหัดทบทวนและโจทย์ท้าทายประจำบท

8.1 โจทย์เชิงแนวคิด (Conceptual): จงอธิบายความสำคัญทางกายภาพของกฎและสมการหลักในบทเรียนนี้ พร้อมยกตัวอย่างสถานการณ์จริงในธรรมชาติ

8.2 โจทย์การประมาณค่าเชิงฟิสิกส์ (Estimation): จงใช้การวิเคราะห์เชิงมิติและอันดับของขนาด (Order of Magnitude) ในการประมาณค่าปริมาณสำคัญที่เกี่ยวข้อง

8.3 โจทย์วิจัยขั้นสูง (Research Challenge): จงเขียนสคริปต์ Python จำลองพฤติกรรมของระบบตามสมการที่ได้ศึกษ พร้อมพลอตกราฟเปรียบเทียบผลลัพธ์เชิงทฤษฎี

ภาคผนวก ก: ค่าคงที่ทางฟิสิกส์มูลฐานสากล

ตารางต่อไปนี้แสดงค่าคงที่ทางฟิสิกส์มูลฐานตามข้อแนะนำของคณะกรรมการข้อมูลสำหรับวิทยาศาสตร์และ (CODATA 2026 Recommended Values)

ปริมาณทางฟิสิกส์	สัญลักษณ์	ค่าเชิงตัวเลข	หน่วยมาตรฐานเอสไอ
ความเร็วแสงในสุญญากาศ	c	$299\,792\,458$	$\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1}$ (ค่าคงที่แม่นตรง)
ค่าคงที่พลังค์	h	$6.626\,070\,15 \times 10^{-34}$	$\mathrm{J} \cdot \mathrm{s}$ (ค่าคงที่แม่นตรง)
ค่าคงที่พลังค์ลดทอน	$\hbar = h/2\pi$	$1.054\,571\,817 \times 10^{-34}$	$\mathrm{J} \cdot \mathrm{s}$
ประจุธาตุ	e	$1.602\,176\,634 \times 10^{-19}$	C (ค่าคงที่แม่นตรง)
ค่าคงที่โบลต์ซมันน์	k_B	$1.380\,649 \times 10^{-23}$	$\mathrm{J} \cdot \mathrm{K}^{-1}$ (ค่าคงที่แม่นตรง)
เลขอาโวกาโดร	N_A	$6.022\,140\,76 \times 10^{23}$	mol^{-1} (ค่าคงที่แม่นตรง)
ค่าคงที่โน้มถ่วงสากล	G	$6.674\,30(15) \times 10^{-11}$	$\mathrm{m}^3 \cdot \mathrm{kg}^{-1} \cdot \mathrm{s}^{-2}$
สภาพยอมของสุญญากาศ	ϵ_0	$8.854\,187\,8128(13) \times 10^{-12}$	$\mathrm{F} \cdot \mathrm{m}^{-1}$
สภาพให้ซึมได้ของสุญญากาศ	μ_0	$1.256\,637\,062\,12(19) \times 10^{-6}$	$\mathrm{N} \cdot \mathrm{A}^{-2}$
มวลนิ่งของอิเล็กตรอน	m_e	$9.109\,383\,7015(28) \times 10^{-31}$	kg
มวลนิ่งของโปรตอน	m_p	$1.672\,621\,923\,69(51) \times 10^{-27}$	kg
มวลนิ่งของนิวตรอน	m_n	$1.674\,927\,498\,04(95) \times 10^{-27}$	kg
รัศมีของบอร์	a_0	$5.291\,772\,109\,03(80) \times 10^{-11}$	m

Table 8.1: ค่าคงที่ทางฟิสิกส์มูลฐานตามมาตรฐาน CODATA

ภาคผนวก ข: เอกลักษณ์แคลคูลัสเวกเตอร์และตัวดำ

รวบรวมเอกลักษณ์สำคัญของพีชคณิตและแคลคูลัสเวกเตอร์ เพื่อประโยชน์ในการวิเคราะห์สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยใ

1. เอกลักษณ์เวกเตอร์พื้นฐาน

$$\mathbf{A} \cdot (\mathbf{B} \times \mathbf{C}) = \mathbf{B} \cdot (\mathbf{C} \times \mathbf{A}) = \mathbf{C} \cdot (\mathbf{A} \times \mathbf{B}) \tag{8.3}$$

$$\mathbf{A} \times (\mathbf{B} \times \mathbf{C}) = (\mathbf{A} \cdot \mathbf{C})\mathbf{B} - (\mathbf{A} \cdot \mathbf{B})\mathbf{C} \tag{8.4}$$

2. อนุพันธ์อันดับหนึ่งของผลคูณ

$$\nabla(fg) = f\nabla g + g\nabla f \tag{8.5}$$

$$\nabla(\mathbf{A} \cdot \mathbf{B}) = \mathbf{A} \times (\nabla \times \mathbf{B}) + \mathbf{B} \times (\nabla \times \mathbf{A}) + (\mathbf{A} \cdot \nabla)\mathbf{B} + (\mathbf{B} \cdot \nabla)\mathbf{A} \tag{8.6}$$

$$\nabla \cdot (f\mathbf{A}) = f(\nabla \cdot \mathbf{A}) + \mathbf{A} \cdot \nabla f \tag{8.7}$$

$$\nabla \cdot (\mathbf{A} \times \mathbf{B}) = \mathbf{B} \cdot (\nabla \times \mathbf{A}) - \mathbf{A} \cdot (\nabla \times \mathbf{B}) \tag{8.8}$$

$$\nabla \times (f\mathbf{A}) = f(\nabla \times \mathbf{A}) + (\nabla f) \times \mathbf{A} \tag{8.9}$$

$$\nabla \times (\mathbf{A} \times \mathbf{B}) = (\mathbf{B} \cdot \nabla)\mathbf{A} - (\mathbf{A} \cdot \nabla)\mathbf{B} + \mathbf{A}(\nabla \cdot \mathbf{B}) - \mathbf{B}(\nabla \cdot \mathbf{A}) \tag{8.10}$$

3. อนุพันธ์อันดับสองและทฤษฎีบทอินทิกรัล

$$\nabla \times (\nabla f) = 0 \quad \text{(Curl of Gradient is Zero)} \tag{8.11}$$

$$\nabla \cdot (\nabla \times \mathbf{A}) = 0 \quad \text{(Divergence of Curl is Zero)} \tag{8.12}$$

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla^2 \mathbf{A} \tag{8.13}$$

ทฤษฎีบทไดเวอร์เจนซ์ (Divergence Theorem):

$$\iiint_V (\nabla \cdot \mathbf{A})\, dV = \iint_S \mathbf{A} \cdot d\mathbf{S} \tag{8.14}$$

ทฤษฎีบทของสโตกส์ (Stokes' Theorem):

$$\iint_S (\nabla \times \mathbf{A}) \cdot d\mathbf{S} = \oint_C \mathbf{A} \cdot d\mathbf{r} \tag{8.15}$$

บรรณานุกรม

[1] Serway, R. A., & Jewett, J. W. (2018). *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics* (10th ed.). Cengage Learning.

[2] Tipler, P. A., & Mosca, G. (2008). *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics* (6th ed.). W. H. Freeman and Company.

[3] Griffiths, D. J. (2017). *Introduction to Electrodynamics* (4th ed.). Cambridge University Press.

[4] Griffiths, D. J., & Schroeter, D. F. (2018). *Introduction to Quantum Mechanics* (3rd ed.). Cambridge University Press.

[5] Kittel, C. (2005). *Introduction to Solid State Physics* (8th ed.). John Wiley & Sons.

[6] Raissi, M., Perdikaris, P., & Karniadakis, G. E. (2019). Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations. *Journal of Computational Physics*, 378, 686–707.

[7] Thassana, C. (2018). Electronic Structure, Exchange Interactions, and On-site Coulomb Effects in Mott-Hubbard Transition Metal Oxides MnO and NiO via First-Principles LSDA $+ U$ Calculations. *Journal of Applied Physics and Condensed Matter*, 124(12), 125101.

[8] Thassana, C., & Nuleg, K. (2025). Thermal Degradation and Synergistic Combustion Characteristics of Carbon Black Blended Biomass Briquettes. *Applied Thermal Engineering and Clean Energy*, 42, 102–115.

[9] Joint Committee for Guides in Metrology. (2008). *Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement* (JCGM 100:2008 / GUM 1995 with minor corrections). International Organization for Standardization.

[10] Taylor, J. R. (1997). *An Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements* (2nd ed.). University Science Books.

ประวัติผู้เขียน

ผศ.ดร.ชีวะ ทัศนา
สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี
อีเมล: chewa.t@rbru.ac.th

ประวัติการศึกษา

- **ปร.ด. (ฟิสิกส์ประยุกต์)**
  มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- **วท.ม. (ฟิสิกส์)**
  มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- **วท.บ. (ฟิสิกส์ เกียรตินิยม)**
  มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ประสบการณ์การสอนและบริหาร

- ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาฟิสิกส์ มรภ.รำไพพรรณี
- อาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
- ผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความวิจัยระดับชาติและนานาชาติ

ความเชี่ยวชาญและงานวิจัย

- **Computational Solid-State Physics:**
  การคำนวณโครงสร้างแถบพลังงาน LSDA $+$ U และอันตรกิริยาแลกเปลี่ยนแม่เหล็กในสารประกอบออกไซด์
- **Astrophysics & Photometry:**
  การวิเคราะห์ระบบดาวคู่สัมผัสและการประมวลผลสัญญาณ CCD Photometry
- **Scientific Machine Learning:**
  การประยุกต์ใช้ PINNs และ Deep Learning ในการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยทางฟิสิกส์
- **Environmental Physics:**
  การตรวจวัดอนุภาคละอองลอย PM2.5 และการประเมินพลังงานชีวมวล