

คำนำ

เอกสารประกอบการสอนฉบับนี้ จัดทำขึ้นเพื่อใช้ประกอบการสอน วิชาพื้นฐาน
สนามแม่เหล็กไฟฟ้า รหัส 3105 – 2020 เหมาะสำหรับผู้ที่กำลังศึกษาอยู่ในระดับชั้น ปวส. และ
ผู้สนใจทั่วไป ตรงตามหลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง พุทธศักราช 2546 ของสำนักงาน
คณะกรรมการการอาชีวศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ

เครื่องมือที่ใช้ในการเรียนรู้คือ เนื้อหา แบบทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียน วิธีการสร้าง
เอกสารการสอนนี้เริ่มจากศึกษาหลักสูตรรายวิชา มาตรฐานรายวิชา คำอธิบายรายวิชา หนังสือ
ตำราและจากประสบการณ์ของผู้สอนเอง จากนั้นนำมาวิเคราะห์เป็นหน่วยการเรียนรู้จำนวน 11
หน่วยการเรียนรู้ โดยเรียงลำดับตามความยากง่ายและความสัมพันธ์ของเนื้อหา ซึ่งผู้จัดทำหวังว่า
ผู้เรียนที่ผ่านการใช้เอกสารประกอบการสอนดังกล่าวจะมีผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนหลังเรียนสูงกว่า
ก่อนเรียน และสามารถนำไปปรับประยุกต์ใช้ได้ต่อไป

นายพงษ์ศักดิ์ นิลผาย

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

วิทยาลัยเทคนิคท่าหลวงจันทบุรีไทยอนุสรณ์

โครงสร้างการจัดการเรียนรู้
วิชาพื้นฐานสนามแม่เหล็กไฟฟ้า รหัสวิชา 3105-2020 3 หน่วยกิต 3 ชั่วโมง

จุดประสงค์รายวิชา

1. เพื่อให้มีความเข้าใจหลักการพื้นฐานสนามไฟฟ้า สนามแม่เหล็ก และคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
2. เพื่อให้สามารถวิเคราะห์สนามไฟฟ้า สนามแม่เหล็ก และคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
3. เพื่อให้มีทัศนคติในการค้นคว้าหาความรู้เพิ่มเติม

มาตรฐานรายวิชา

1. วิเคราะห์สนามไฟฟ้าสถิต ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์เวกเตอร์
2. วิเคราะห์สนามแม่เหล็กสถิต ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์เวกเตอร์
3. วิเคราะห์คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์เวกเตอร์และสมการแมกซ์เวลล์

คำอธิบายรายวิชา

ศึกษาหลักการวิเคราะห์เวกเตอร์ ระบบ Coordinate และการแปลง เวกเตอร์แคลคูลัส สนามไฟฟ้าสถิต สนามไฟฟ้าในวัสดุ สนามแม่เหล็กสถิต แรง วัสดุและอุปกรณ์แม่เหล็ก สมการแมกซ์เวลล์ และคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

การจัดหน่วยการเรียนรู้
วิชาพื้นฐานสนามแม่เหล็กไฟฟ้า รหัสวิชา 3105-2020 3 หน่วยกิต 3 ชั่วโมง

จากคำอธิบายรายวิชา ผู้สอนได้นำมาวิเคราะห์และจัดเรียงลำดับหัวข้อการเรียนรู้ โดย
 คำนึงถึงขั้นตอนการสอนเพื่อให้ผู้เรียนสามารถเรียนรู้ได้อย่างเป็นลำดับขั้น ประกอบด้วยหน่วยการ
 เรียน 11 หน่วย ดังนี้

ตารางการวิเคราะห์คำอธิบายรายวิชา
วิชาพื้นฐานสนามแม่เหล็กไฟฟ้า รหัส 3105 - 2020

หน่วยที่	หัวข้อเรื่อง	แหล่งข้อมูล			
		A	B	C	D
1	การวิเคราะห์เวกเตอร์	✓	✓	✓	✓
2	ระบบพิกัด	✓	✓	✓	✓
3	การแปลงระบบพิกัด	✓	✓	✓	✓
4	เวกเตอร์แคลคูลัส	✓	✓	✓	✓
5	สนามไฟฟ้าสถิต	✓	✓	✓	✓
6	สนามไฟฟ้าในวัสดุ	✓	✓	✓	✓
7	สนามแม่เหล็กสถิต	✓	✓	✓	✓
8	แรงในสนามแม่เหล็ก	✓	✓	✓	✓
9	วัสดุและอุปกรณ์แม่เหล็ก	✓	✓	✓	✓
10	สมการแมกซ์เวลล์	✓	✓	✓	✓
11	คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	✓	✓	✓	✓

แหล่งข้อมูล

A : คำอธิบายรายวิชา D : ประสบการณ์ของผู้สอน
 B : ผู้เชี่ยวชาญ C : ผู้ชำนาญงาน

**ตารางวิเคราะห์หน่วยการเรียนรู้ตามจุดประสงค์รายวิชา และมาตรฐานรายวิชา
วิชาพื้นฐานสนามแม่เหล็กไฟฟ้า รหัสวิชา 3105-2020**

จุดประสงค์รายวิชา

1. เพื่อให้มีความเข้าใจหลักการพื้นฐานสนามไฟฟ้า สนามแม่เหล็ก และคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
2. เพื่อให้สามารถวิเคราะห์สนามไฟฟ้า สนามแม่เหล็ก และคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
3. เพื่อให้มีกิจนิสัยในการค้นคว้าหาความรู้เพิ่มเติม

มาตรฐานรายวิชา

1. วิเคราะห์สนามไฟฟ้าสถิต ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์เวกเตอร์
2. วิเคราะห์สนามแม่เหล็กสถิต ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์เวกเตอร์
3. วิเคราะห์คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ด้วยเทคนิคการวิเคราะห์เวกเตอร์และสมการแมกซ์เวลล์

หน่วยการเรียนรู้	จุดประสงค์รายวิชา			มาตรฐานรายวิชา		
	1	2	3	1	2	3
1 การวิเคราะห์เวกเตอร์	✓	✓	✓			
2 ระบบพิกัด	✓	✓	✓			
3 การแปลงระบบพิกัด	✓	✓	✓			
4 เวกเตอร์แคลคูลัส	✓	✓	✓			
5 สนามไฟฟ้าสถิต	✓	✓	✓	✓		
6 สนามไฟฟ้าในวัสดุ	✓	✓	✓	✓		
7 สนามแม่เหล็กสถิต	✓	✓	✓		✓	
8 แรงในสนามแม่เหล็ก	✓	✓	✓		✓	
9 วัสดุและอุปกรณ์แม่เหล็ก	✓	✓	✓		✓	
10 สมการแมกซ์เวลล์	✓	✓	✓			✓
11 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	✓	✓	✓			✓

การแยกแยะเนื้อหาตามรายการหัวข้อเรื่อง

เพื่อให้การประเมินค่าเนื้อหาในแต่ละหัวข้อที่ได้วิเคราะห์มาแล้ว มีรายละเอียดชัดเจน และเพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณาหัวข้อเรื่องที่จะสอนต่อไปได้ดียิ่งขึ้น จึงนำหัวข้อเรื่องที่ผ่านการพิจารณาองค์ประกอบต่างๆมาแล้ว มาแตกเป็นหัวข้อย่อย เพื่อเขียนจุดประสงค์เชิงพฤติกรรมได้ชัดเจน สามารถระบุขอบเขตของเนื้อหา สะดวกในการค้นหาเนื้อหา เลือกวิธีการสอนได้ จัดแผนการสอนได้ง่าย จัดทำแบบสรุปเนื้อหาได้รวดเร็ว ตลอดจนการวัดและประเมินผล ได้ตรงกับจุดประสงค์เชิงพฤติกรรม

หน่วยที่ 1 การวิเคราะห์เวกเตอร์

- 1.1 บทนำ
- 1.2 ปริมาณสเกลาร์และปริมาณเวกเตอร์
- 1.3 ระบบแกนอ้างอิงสามมิติ $x - y - z$
- 1.4 การเขียนปริมาณเวกเตอร์แบบ 3 มิติ
- 1.5 พีชคณิตเวกเตอร์ (Vector Algebra)
 - 1.5.1 การบวกและลบเวกเตอร์
 - 1.5.2 การคูณเวกเตอร์ด้วยสเกลาร์
 - 1.5.3 การหารเวกเตอร์ด้วยสเกลาร์
- 1.6 ผลคูณเวกเตอร์
 - 1.6.1 ผลคูณแบบจุดหรือผลคูณชนิดสเกลาร์
 - 1.6.2 ผลคูณกากบาทหรือผลคูณชนิดเวกเตอร์
- 1.7 ส่วนประกอบของเวกเตอร์ในทิศทางที่กำหนด
 - 1.7.1 ส่วนประกอบชนิดสเกลาร์ของเวกเตอร์หนึ่งในทิศทางของอีกเวกเตอร์หนึ่ง
 - 1.7.2 ส่วนประกอบชนิดเวกเตอร์ของเวกเตอร์หนึ่งในทิศทางของอีกเวกเตอร์หนึ่ง
- 1.8 สนามสเกลาร์และสนามเวกเตอร์
- 1.9 ขนาดเวกเตอร์และเวกเตอร์หนึ่งหน่วย
 - 1.9.1 ขนาดหรือค่าสัมบูรณ์ของเวกเตอร์
 - 1.9.2 เวกเตอร์หนึ่งหน่วย
- 1.10 บทสรุป

หน่วยที่ 2 ระบบพิกัด

2.1 บทนำ

2.2 ระบบพิกัดทรงเหลี่ยม

2.2.1 ตัวแปรในระบบพิกัดทรงเหลี่ยม

2.2.2 เวกเตอร์หนึ่งหน่วยในระบบพิกัดทรงเหลี่ยม

2.2.3 การระบุพิกัดในระบบพิกัดทรงเหลี่ยม

2.2.4 เวกเตอร์บอกตำแหน่งในระบบพิกัดทรงเหลี่ยม

2.3 ระบบพิกัดทรงกระบอก

2.3.1 ตัวแปรในระบบพิกัดทรงกระบอก

2.3.2 เวกเตอร์หนึ่งหน่วยในระบบพิกัดทรงกระบอก

2.3.3 การระบุพิกัดในระบบพิกัดทรงกระบอก

2.3.4 เวกเตอร์บอกตำแหน่งในระบบพิกัดทรงกระบอก

2.4 ระบบพิกัดทรงกลม

2.4.1 ตัวแปรในระบบพิกัดทรงกลม

2.4.2 เวกเตอร์หนึ่งหน่วยในระบบพิกัดทรงกลม

2.4.3 การระบุพิกัดในระบบพิกัดทรงกลม

2.4.4 เวกเตอร์บอกตำแหน่งในระบบพิกัดทรงกลม

2.5 บทสรุป

หน่วยที่ 3 การแปลงระบบพิกัด

3.1 บทนำ

3.2 การแปลงเวกเตอร์ในระบบพิกัดทรงเหลี่ยมกับระบบพิกัดทรงกระบอก

3.2.1 การแปลงส่วนประกอบสเกลาร์ในระบบพิกัดทรงเหลี่ยมกับระบบพิกัดทรงกระบอก

3.2.1.1 การแปลงส่วนประกอบสเกลาร์ในระบบพิกัดทรงเหลี่ยม
เป็นระบบพิกัดทรงกระบอก

3.2.1.2 การแปลงส่วนประกอบสเกลาร์ในระบบพิกัดทรงกระบอก
เป็นระบบพิกัดทรงเหลี่ยม

3.2.2 การแปลงตัวแปรระหว่างระบบพิกัดทรงเหลี่ยมและทรงกระบอก

3.3 การแปลงเวกเตอร์ในระบบพิกัดทรงเหลี่ยมกับระบบพิกัดทรงกลม

3.3.1 การแปลงส่วนประกอบสเกลาร์ในระบบพิกัดทรงเหลี่ยมกับระบบพิกัดทรงกลม

3.3.1.1 การแปลงส่วนประกอบสเกลาร์ในระบบพิกัดทรงเหลี่ยมเป็นระบบพิกัดทรงกลม

3.3.1.2 การแปลงส่วนประกอบสเกลาร์ในระบบพิกัดทรงกลมเป็นระบบพิกัดทรงเหลี่ยม

3.3.2 การแปลงตัวแปรระหว่างระบบพิกัดทรงเหลี่ยมและทรงกลม

3.4 บทสรุป

หน่วยที่ 4 เวกเตอร์แคลคูลัส

4.1 บทนำ

4.2 เกรเดียนท์

4.3 ไดเวอร์เจนซ์

4.4 เคิร์ล

4.5 ตัวดำเนินการเดลหรือเนบลา

4.6 ปริมาณดิฟเฟอเรนเชียล

4.7 ทฤษฎีบทไดเวอร์เจนซ์

4.8 ทฤษฎีบทของสต็อคส์

4.9 บทสรุป

หน่วยที่ 5 สนามไฟฟ้าสถิต

5.1 บทนำ

5.2 กฎของคูลอมบ์

5.3 ความเข้มสนามไฟฟ้าเนื่องจากประจุชนิดจุด

5.4 ความเข้มสนามไฟฟ้าเนื่องจากประจุชนิดเส้น

5.5 ความเข้มสนามไฟฟ้าเนื่องจากประจุชนิดแผ่น

5.6 ฟลักซ์ไฟฟ้าและความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้า

5.7 กฎของเกาส์

5.8 ผิวแบบเกาส์ชนิดพิเศษ

5.9 พลังงานไฟฟ้า

5.10 ศักย์ไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้า

5.11 บทสรุป

หน่วยที่ 6 สนามไฟฟ้าในวัสดุ

- 6.1 บทนำ
- 6.2 กระแสไฟฟ้าและความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า
- 6.3 โลหะตัวนำ
- 6.4 ตัวนำในสภาวะไฟฟ้าสถิตและเงื่อนไขขอบเขต
- 6.5 ความจุไฟฟ้า
- 6.6 บทสรุป

หน่วยที่ 7 สนามแม่เหล็กสถิต

- 7.1 บทนำ
- 7.2 กฎบีโธซาวาร์ต
- 7.3 กฎวงจรรของแอมแปร์
- 7.4 สนามแม่เหล็กเนื่องจากกระแสในเส้นลวดที่มีความยาวเป็นอนันต์
- 7.5 ฟลักซ์แม่เหล็กและความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก
- 7.6 บทสรุป

หน่วยที่ 8 แรงในสนามแม่เหล็ก

- 8.1 บทนำ
- 8.2 แรงบนประจุที่เคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็ก
- 8.3 แรงบนตัวนำกระแสในสนามแม่เหล็ก
- 8.4 บทสรุป

หน่วยที่ 9 วัสดุและอุปกรณ์แม่เหล็ก

- 9.1 บทนำ
- 9.2 ประเภทของสารแม่เหล็ก
 - 9.2.1 สารไดอแมกเนติก
 - 9.2.2 สารพาราแมกเนติก
 - 9.2.3 สารเฟอร์โรแมกเนติก
- 9.3 เส้นโค้งความสัมพันธ์ $B-H$
- 9.4 ตัวเหนี่ยวนำ
- 9.5 บทสรุป

หน่วยที่ 10 สมการแมกซ์เวลล์

10.1 บทนำ

10.2 สมการแมกซ์เวลล์ในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสถิต

10.3 สมการแมกซ์เวลล์ในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่แปรผันตามเวลา

10.4 บทสรุป

หน่วยที่ 11 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

11.1 บทนำ

11.2 สมการคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนพื้นฐานสมการแมกซ์เวลล์

11.3 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

11.4 บทสรุป

การจัดทำรายการสอน

จากการแยกแยะหัวข้อเรื่องเป็นหัวข้อหลักและหัวข้อย่อยข้างต้น นำมาจัดทำเป็นรายการสอนแต่ละหน่วยได้ดังนี้

ตารางรายการสอน วิชาพื้นฐานสนามแม่เหล็กไฟฟ้า รหัสวิชา 3105-2020

ครั้งที่	หน่วยที่	รายการสอน	จำนวนคาบ	หมายเหตุ
1-2	1	การวิเคราะห์เวกเตอร์	6	
3	2	ระบบพิกัด	3	
4-5	3	การแปลงระบบพิกัด	6	
6	4	เวกเตอร์แคลคูลัส	3	
7-8-9-10	5	สนามไฟฟ้าสถิต	12	
11	6	สนามไฟฟ้าในวัสดุ	3	
12-13	7	สนามแม่เหล็กสถิต	6	
14	8	แรงในสนามแม่เหล็ก	3	
15	9	วัสดุและอุปกรณ์แม่เหล็ก	3	
16	10	สมการแมกซ์เวลล์	3	
17	11	คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	3	
18		ประเมินผล	3	
รวม			54	

คำแนะนำการใช้เอกสารประกอบการสอน

เอกสารประกอบการสอนฉบับนี้ ใช้ประกอบกิจกรรมการเรียนการสอนรายวิชาพื้นฐาน
สนามแม่เหล็กไฟฟ้า รหัสวิชา 3105 – 2020 ระดับประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง โดยแบ่ง
ออกเป็น 11 หน่วยการเรียนรู้ ในแต่ละหน่วยกำหนดให้ผู้เรียนปฏิบัติดังนี้

1. ให้ผู้เรียนศึกษาจุดประสงค์การเรียนรู้
2. ให้ผู้เรียนทำแบบทดสอบก่อนเรียนและตรวจสอบคำตอบในแบบเฉลยด้วยความ
ซื่อสัตย์ร่วมกับผู้สอน
3. ให้ผู้เรียนศึกษาเนื้อหาให้ละเอียดด้วยความเข้าใจ
4. ให้ผู้เรียนทำแบบฝึกหัดท้ายหน่วยการเรียนรู้ และประเมินผลการทำแบบฝึกหัดด้วย
ตนเองร่วมกับผู้สอน
5. ให้ผู้เรียนทำแบบทดสอบหลังเรียน และประเมินผลด้วยความซื่อสัตย์ร่วมกับผู้สอน
6. หากผู้เรียนมีปัญหาจากการศึกษาเอกสารประกอบการสอน สามารถปรึกษาผู้สอน
ได้ที่

สารบัญ

หน้า

คำนำ ก	
โครงสร้างการจัดการเรียนรู้ ข	
การจัดหน่วยการเรียนรู้ ค	
คำแนะนำการใช้เอกสารประกอบการสอน ง	
สารบัญ จ	
รายการตาราง ฉ	
รายการรูปประกอบ ช	
รายการแจกแจงข้อสอบประเมินผลรายวิชาก่อนเรียนและหลังเรียน - ตามวัตถุประสงค์การเรียนรู้	1
ข้อสอบประเมินผลรายวิชาก่อนเรียน	5
เฉลยข้อสอบประเมินผลก่อนเรียน	19
หน่วยที่ 1 การวิเคราะห์เวกเตอร์	21
โครงสร้างหน่วยที่ 1	21
รายการแจกแจงแบบทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียน - ตามวัตถุประสงค์การเรียนรู้	23
แบบทดสอบก่อนเรียน (ตอนที่ 1)	24
แบบทดสอบก่อนเรียน (ตอนที่ 2)	27
เฉลยแบบทดสอบก่อนเรียน (ตอนที่ 1)	29
เฉลยแบบทดสอบก่อนเรียน (ตอนที่ 2)	33
บทนำ	37
ปริมาณสเกลาร์และปริมาณเวกเตอร์	38
ระบบแกนอ้างอิงสามมิติ x-y-z	38
การเขียนปริมาณเวกเตอร์แบบ 3 มิติ	39
พีชคณิตเวกเตอร์	40
การบวกและลบเวกเตอร์	40
การคูณเวกเตอร์ด้วยสเกลาร์	42
การหารเวกเตอร์ด้วยสเกลาร์	42

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ผลคูณเวกเตอร์	43
ผลคูณแบบจุดหรือผลคูณชนิดสเกลาร์	43
ผลคูณกากบาทหรือผลคูณชนิดเวกเตอร์	44
ส่วนประกอบของเวกเตอร์ในทิศทางที่กำหนด	46
ส่วนประกอบชนิดสเกลาร์ของเวกเตอร์หนึ่งในทิศทางของอีกเวกเตอร์หนึ่ง	46
ส่วนประกอบชนิดเวกเตอร์ของเวกเตอร์หนึ่งในทิศทางของอีกเวกเตอร์หนึ่ง	47
สนามสเกลาร์และสนามเวกเตอร์	49
ขนาดเวกเตอร์และเวกเตอร์หนึ่งหน่วย	50
ขนาดหรือค่าสัมบูรณ์ของเวกเตอร์	50
เวกเตอร์หนึ่งหน่วย	50
แบบฝึกหัด	52
เฉลยแบบฝึกหัด	53
แบบทดสอบหลังเรียน (ตอนที่ 1)	58
แบบทดสอบหลังเรียน (ตอนที่ 2)	60
เฉลยแบบทดสอบหลังเรียน (ตอนที่ 1)	62
เฉลยแบบทดสอบหลังเรียน (ตอนที่ 2)	66
หน่วยที่ 2 ระบบพิกัด	71
โครงสร้างหน่วยที่ 2	71
รายการแจกแจงแบบทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียน - ตามวัตถุประสงค์การเรียนรู้	73
แบบทดสอบก่อนเรียน	74
เฉลยแบบทดสอบก่อนเรียน	76
บทนำ	81
ระบบพิกัดทรงเหลี่ยมหรือระบบพิกัดฉาก	82
ตัวแปรในระบบพิกัดทรงเหลี่ยม	82
เวกเตอร์หนึ่งหน่วยในระบบพิกัดทรงเหลี่ยม	82
การระบุพิกัดในระบบพิกัดทรงเหลี่ยม	83

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เวกเตอร์บอกตำแหน่งในระบบพิกัดทรงเหลี่ยม	83
ระบบพิกัดทรงกระบอก	85
ตัวแปรในระบบพิกัดทรงกระบอก	85
เวกเตอร์หนึ่งหน่วยในระบบพิกัดทรงกระบอก	85
การระบุพิกัดในระบบพิกัดทรงกระบอก	86
เวกเตอร์บอกตำแหน่งในระบบพิกัดทรงกระบอก	86
ระบบพิกัดทรงกลม	88
ตัวแปรในระบบพิกัดทรงกลม	88
เวกเตอร์หนึ่งหน่วยในระบบพิกัดทรงกลม	88
การระบุพิกัดในระบบพิกัดทรงกลม	89
เวกเตอร์บอกตำแหน่งในระบบพิกัดทรงกลม	89
แบบฝึกหัด	91
เฉลยแบบฝึกหัด	92
แบบทดสอบหลังเรียน	95
เฉลยแบบทดสอบหลังเรียน	97
หน่วยที่ 3 การแปลงระบบพิกัด	101
โครงสร้างหน่วยที่ 3	101
รายการแจกแจงแบบทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียน -	
ตามวัตถุประสงค์การเรียนรู้	103
แบบทดสอบก่อนเรียน (ตอนที่ 1)	104
แบบทดสอบก่อนเรียน (ตอนที่ 2)	107
เฉลยแบบทดสอบก่อนเรียน (ตอนที่ 1)	110
เฉลยแบบทดสอบก่อนเรียน (ตอนที่ 2)	115
บทนำ	121
การแปลงเวกเตอร์ในระบบพิกัดทรงเหลี่ยมกับระบบพิกัดทรงกระบอก	122
การแปลงส่วนประกอบสเกลาร์ในระบบพิกัดทรงเหลี่ยมกับ -	
ระบบพิกัดทรงกระบอก	122

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
การแปลงส่วนประกอบสเกลาร์ในระบบพิกัดทรงเหลี่ยมเป็น - ระบบพิกัดทรงกระบอก	122
การแปลงส่วนประกอบสเกลาร์ในระบบพิกัดทรงกระบอกเป็น - ระบบพิกัดทรงเหลี่ยม	123
การแปลงตัวแปรระหว่างระบบพิกัดทรงเหลี่ยมและทรงกระบอก	125
การแปลงเวกเตอร์ในระบบพิกัดทรงเหลี่ยมกับระบบพิกัดทรงกลม	128
การแปลงส่วนประกอบสเกลาร์ในระบบพิกัดทรงเหลี่ยมกับ - ระบบพิกัดทรงกลม	128
การแปลงส่วนประกอบสเกลาร์ในระบบพิกัดทรงเหลี่ยมเป็น - ระบบพิกัดทรงกลม	129
การแปลงส่วนประกอบสเกลาร์ในระบบพิกัดทรงกลมเป็น - ระบบพิกัดทรงเหลี่ยม	130
การแปลงตัวแปรระหว่างระบบพิกัดทรงเหลี่ยมและทรงกลม	131
แบบฝึกหัด	136
เฉลยแบบฝึกหัด	137
แบบทดสอบหลังเรียน (ตอนที่ 1)	142
แบบทดสอบหลังเรียน (ตอนที่ 2)	145
เฉลยแบบทดสอบหลังเรียน (ตอนที่ 1)	148
เฉลยแบบทดสอบหลังเรียน (ตอนที่ 2)	153
หน่วยที่ 4 เวกเตอร์แคลคูลัส	159
โครงสร้างหน่วยที่ 4	159
รายการแจกแจงแบบทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียน - ตามวัตถุประสงค์การเรียนรู้	161
แบบทดสอบก่อนเรียน	162
เฉลยแบบทดสอบก่อนเรียน	165
บทนำ	173
เกรเดียนท์	174

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ไคเวอร์เจนซ์	175
เคิร์ล	177
ตัวดำเนินการเดลหรือเนบลา	180
ปริมาณดิฟเฟอเรนเชียล	180
ปริมาณดิฟเฟอเรนเชียลของระบบพิกัดทรงเหลี่ยม	180
ปริมาณดิฟเฟอเรนเชียลของระบบพิกัดทรงกระบอก	181
ปริมาณดิฟเฟอเรนเชียลของระบบพิกัดทรงกลม	181
ทฤษฎีบทไคเวอร์เจนซ์	182
ทฤษฎีบทของสโตกส์	185
แบบฝึกหัด	188
เฉลยแบบฝึกหัด	189
แบบทดสอบหลังเรียน	195
เฉลยแบบทดสอบหลังเรียน	198
หน่วยที่ 5 เวกเตอร์แคลคูลัส	207
โครงสร้างหน่วยที่ 5	207
รายการแจกแจงแบบทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียน - ตามวัตถุประสงค์การเรียนรู้	209
แบบทดสอบก่อนเรียน (ตอนที่ 1)	210
แบบทดสอบก่อนเรียน (ตอนที่ 2)	213
แบบทดสอบก่อนเรียน (ตอนที่ 3)	216
แบบทดสอบก่อนเรียน (ตอนที่ 4)	219
เฉลยแบบทดสอบก่อนเรียน (ตอนที่ 1)	222
เฉลยแบบทดสอบก่อนเรียน (ตอนที่ 2)	227
เฉลยแบบทดสอบก่อนเรียน (ตอนที่ 3)	232
เฉลยแบบทดสอบก่อนเรียน (ตอนที่ 4)	238
บทนำ	243
กฎของคูโลมบ์	244

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ความเข้มสนามไฟฟ้าเนื่องจากประจุชนิดจุด	246
ความเข้มสนามไฟฟ้าเนื่องจากประจุชนิดเส้น	249
ความเข้มสนามไฟฟ้าเนื่องจากประจุชนิดแผ่น	252
ฟลักซ์ไฟฟ้าและความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้า	258
กฎของเกาส์	260
ผิวแบบเกาส์ชนิดพิเศษ	261
พลังงานไฟฟ้า	264
ศักย์ไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้า	268
แบบฝึกหัด	271
เฉลยแบบฝึกหัด	273
แบบทดสอบหลังเรียน (ตอนที่ 1)	282
แบบทดสอบหลังเรียน (ตอนที่ 2)	285
แบบทดสอบหลังเรียน (ตอนที่ 3)	288
แบบทดสอบหลังเรียน (ตอนที่ 4)	291
เฉลยแบบทดสอบหลังเรียน (ตอนที่ 1)	294
เฉลยแบบทดสอบหลังเรียน (ตอนที่ 2)	299
เฉลยแบบทดสอบหลังเรียน (ตอนที่ 3)	304
เฉลยแบบทดสอบหลังเรียน (ตอนที่ 4)	310
หน่วยที่ 6 สนามไฟฟ้าในวัสดุ	315
โครงสร้างหน่วยที่ 6	315
รายการแจกแจงแบบทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียน -	
ตามวัตถุประสงค์การเรียนรู้	317
แบบทดสอบก่อนเรียน	318
เฉลยแบบทดสอบก่อนเรียน	321
บทนำ	327
กระแสไฟฟ้าและความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า	328
โลหะตัวนำ	332

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ตัวนำในสภาวะสถิตและเงื่อนไขขอบเขต	335
ความจุไฟฟ้า	339
แบบฝึกหัด	343
เฉลยแบบฝึกหัด	344
แบบทดสอบหลังเรียน	347
เฉลยแบบทดสอบหลังเรียน	350
หน่วยที่ 7 สนามแม่เหล็กสถิต	357
โครงสร้างหน่วยที่ 7	357
รายการแจกแจงแบบทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียน - ตามวัตถุประสงค์การเรียนรู้	359
แบบทดสอบก่อนเรียน (ตอนที่ 1)	360
แบบทดสอบก่อนเรียน (ตอนที่ 2)	363
เฉลยแบบทดสอบก่อนเรียน (ตอนที่ 1)	366
เฉลยแบบทดสอบก่อนเรียน (ตอนที่ 2)	372
บทนำ	379
กฎบีโธท์ – ซาวาร์ท	380
กฎวงจรรองแอมแปร์	382
สนามแม่เหล็กเนื่องจากกระแสในเส้นลวดที่มีความยาวเป็นอนันต์	385
ฟลักซ์แม่เหล็กและความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก	387
แบบฝึกหัด	394
เฉลยแบบฝึกหัด	395
แบบทดสอบหลังเรียน (ตอนที่ 1)	401
แบบทดสอบหลังเรียน (ตอนที่ 2)	404
เฉลยแบบทดสอบหลังเรียน (ตอนที่ 1)	407
เฉลยแบบทดสอบหลังเรียน (ตอนที่ 2)	413
หน่วยที่ 8 แรงในสนามแม่เหล็ก	421
โครงสร้างหน่วยที่ 8	421

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
รายการแจกแจงแบบทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียน - ตามวัตถุประสงค์การเรียนรู้	423
แบบทดสอบก่อนเรียน	424
เฉลยแบบทดสอบก่อนเรียน	427
บทนำ	435
แรงบันดาลใจที่เคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็ก	436
แรงบันดาลใจที่เคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็ก	438
แบบฝึกหัด	442
เฉลยแบบฝึกหัด	443
แบบทดสอบหลังเรียน	446
เฉลยแบบทดสอบหลังเรียน	449
หน่วยที่ 9 วัสดุและอุปกรณ์แม่เหล็ก	457
โครงสร้างหน่วยที่ 9	457
รายการแจกแจงแบบทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียน - ตามวัตถุประสงค์การเรียนรู้	459
แบบทดสอบก่อนเรียน	460
เฉลยแบบทดสอบก่อนเรียน	463
บทนำ	469
ประเภทของสารแม่เหล็ก	470
สารไดอะแมกเนติก	470
สารพาราแมกเนติก	470
สารเฟอร์โรแมกเนติก	470
เส้นโค้งความสัมพันธ์ B-H	471
ตัวเหนี่ยวนำ	472
แบบฝึกหัด	480
เฉลยแบบฝึกหัด	481
แบบทดสอบหลังเรียน	484

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
เฉลยแบบทดสอบหลังเรียน	487
หน่วยที่ 10 สมการแมกซ์เวลล์	493
โครงสร้างหน่วยที่ 10	493
รายการแจกแจงแบบทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียน - ตามวัตถุประสงค์การเรียนรู้	494
แบบทดสอบก่อนเรียน	495
เฉลยแบบทดสอบก่อนเรียน	498
บทนำ	505
สมการแมกเวลล์ในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสถิต	506
สมการแมกเวลล์ในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา	509
แบบฝึกหัด	516
เฉลยแบบฝึกหัด	517
แบบทดสอบหลังเรียน	525
เฉลยแบบทดสอบหลังเรียน	528
หน่วยที่ 11 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	535
โครงสร้างหน่วยที่ 11	535
รายการแจกแจงแบบทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียน - ตามวัตถุประสงค์การเรียนรู้	536
แบบทดสอบก่อนเรียน	537
เฉลยแบบทดสอบก่อนเรียน	540
บทนำ	547
สมการคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบนพื้นฐานสมการแมกซ์เวลล์	548
คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	551
แบบฝึกหัด	562
เฉลยแบบฝึกหัด	563
แบบทดสอบหลังเรียน	569
เฉลยแบบทดสอบหลังเรียน	572

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ข้อสอบประเมินผลรายวิชาหลังเรียน	579
เฉลยข้อสอบประเมินผลหลังเรียน	593
เอกสารอ้างอิง	595

รายการตาราง

ตาราง หน้า

3.1 ผลคุณสมบัติจุดของเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในระบบทรงเหลี่ยมและทรงกระบอก	124
3.2 ผลคุณสมบัติจุดของเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในระบบทรงเหลี่ยมและทรงกลม	131

รายการรูปประกอบ

รูป	หน้า	
1.1	แสดงระบบแกนอ้างอิงสามมิติและระนาบสองมิติที่เกี่ยวข้อง	38
1.2	แสดงแกนอ้างอิงแบบ 3 มิติและเวกเตอร์หนึ่งหน่วยประจำแต่ละแกน	39
1.3	แสดงเวกเตอร์ \vec{A} ในระบบแกนสามมิติ $x - y - z$	40
1.4	การบวกเวกเตอร์	41
1.5	ส่วนประกอบชนิดสเกลาร์และชนิดเวกเตอร์ของ \vec{B} ในทิศทางของ \vec{A}	47
2.1	แสดงเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในระบบพิกัดทรงเหลี่ยม	82
2.2	แสดงจุดพิกัด $P(3,3,2)$	83
2.3	แสดงเวกเตอร์บอกตำแหน่ง \vec{P}_A ของจุด $A(3,3,3)$ ในระบบพิกัดทรงเหลี่ยม	84
2.4	แสดงตัวแปรและเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในระบบพิกัดทรงกระบอก	85
2.5	แสดงจุดพิกัด $P(3, 45^\circ, 4)$	86
2.6	แสดงเวกเตอร์บอกตำแหน่ง \vec{P}_A ของจุด $A(4, 45^\circ, 3)$ ในระบบพิกัดทรงกระบอก	86
2.7	แสดงตัวแปรและเวกเตอร์หนึ่งหน่วยในระบบพิกัดทรงกลม	88
2.8	แสดงจุดพิกัด $P(3, 45^\circ, 30^\circ)$	89
2.9	แสดงเวกเตอร์บอกตำแหน่ง \vec{P}_A ของจุด $A(3, 45^\circ, 30^\circ)$ ในระบบพิกัดทรงกลม	90
3.1	ตัวแปรในระบบพิกัดทรงเหลี่ยมและทรงกระบอก	125
3.2	ตัวแปรในระบบพิกัดทรงเหลี่ยมและทรงกลม	132
4.1	แสดงปริมาณดิฟเฟอเรนเชียลในระบบพิกัดทรงเหลี่ยม	180
4.2	แสดงปริมาณดิฟเฟอเรนเชียลในระบบพิกัดทรงกระบอก	181
4.3	แสดงปริมาณดิฟเฟอเรนเชียลในระบบพิกัดทรงกลม	182
4.4	แสดงปริมาณผิวแบบรูปทรงกระบอก	183
4.5	แสดงทิศทางของ $d\vec{L}$ และ $d\vec{S}$ เป็นไปตามหลักเกณฑ์สกรูเกลียวขวา	185
4.6	แสดงทิศทางของ $d\vec{L}$ และ $d\vec{S}$	186
5a.1	แสดงสนามไฟฟ้าเนื่องจากประจุชนิดแผ่นทั้งสองแผ่น	230
5a.2	แสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ของประจุบนระนาบ $y - z$	240
5.1	แสดงสาระสำคัญของคูลอมบ์	244
5.2	รูปสำหรับตัวอย่างที่ 5.2	247
5.3	แสดงสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเนื่องจากประจุชนิดเส้น	250

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูป	หน้า	
5.4	แสดงตำแหน่งของเส้นลวดตัวนำและพิกัดจุด P สำหรับตัวอย่างที่ 5.3	251
5.5	ลักษณะของสนามไฟฟ้าเนื่องจากประจุชนิดแผ่น	253
5.6	แสดงตำแหน่งของแผ่นประจุสำหรับตัวอย่างที่ 5.4	254
5.7	แสดงฟลักซ์ไฟฟ้า	258
5.8	โลหะทรงกลมสองชั้น	258
5.9	แสดงความหนาแน่นของฟลักซ์ไฟฟ้าบนผิวปิดที่มีประจุอยู่ภายใน	260
5.10	แรงที่กระทำกับประจุทดสอบ Q_t เนื่องจากสนามไฟฟ้า E	264
5.11	แสดงงานที่ได้จากการเคลื่อนประจุในทิศทางตรงข้าม - และทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้า	264
5.12	จุด A และจุด B อยู่ที่ตำแหน่งในแนวรัศมี r ของทรงกลม มีประจุ Q อยู่ที่จุดกำเนิด	265
5a.3	แสดงแผ่นประจุสองแผ่นในแนวตัดขวาง	276
5a.4	แสดงสนามไฟฟ้าเนื่องจากประจุชนิดแผ่นทั้งสองแผ่น	302
5a.5	แสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ของประจุบนระนาบ $y - z$	312
6.1	แสดงปริมาณ \vec{J} , dS_n , I และ \hat{a}_r ในมุมมองแบบสามมิติและสองมิติ - ในกรณีทิศทางของกระแสตั้งฉากกับพื้นที่ย่อยส่วน	329
6.2	แสดงปริมาณ \vec{J} , dS_n , I และ \hat{a}_r ในมุมมองแบบสามมิติและสองมิติ - ในกรณีทิศทางของกระแสไม่ตั้งฉากกับพื้นที่ย่อยส่วน	330
6.3	แสดงพื้นที่ระนาบและพื้นที่ย่อยส่วน dS	331
6.4	โครงสร้างของแถบพลังงานของวัสดุ 3 ชนิด ที่อุณหภูมิ $0^\circ K$	332
6.5	แสดงรูปทรงกระบอกที่มีความยาว L พื้นที่หน้าตัด S	333
6.6	แสดงส่วนประกอบของสนามไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริง - บนผิวดำนำภายใต้เงื่อนไขแบบสถิตและเงื่อนไขขอบเขต	337
6.7	แท่งตัวนำสองแท่งมีขนาดประจุเท่ากันแต่ต่างชนิดกันวางอยู่ในอากาศ - หรือสารไดอิเล็กตริก	339
6.8	ตัวเก็บประจุไฟฟ้าแบบแผ่นตัวนำ	340
7a.1	แสดงตำแหน่งของเส้นลวดตัวนำและจุดพิกัดบนระนาบ $y - z$	360,367
7a.2	แสดงเส้นทางการอินทิเกรตวงปิดของ \vec{H}	361,369

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูป	หน้า	
7a.3	แสดงเส้นลวดตัวนำแกน y และจุดพิกัด $(3, 2, -3)$	373
7a.4	แสดงทิศทางสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่จุด $(0, 0, 1)$ มม.	374
7.1	แสดงสาระสำคัญของกฎบีโธท์ – ซาวาร์ท	380
7.2	สำหรับตัวอย่างที่ 7.1	381
7.3	แสดงเส้นทางอินทิเกรตเส้นปิดของ \vec{H}	383
7.4	สนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสไหลในเส้นลวดตัวนำขนาดเล็กยาวและยาวเป็นอนันต์	386
7.5	แสดงทิศทางสนามแม่เหล็กเมื่อมีกระแสไหลในเส้นลวดตัวนำ	386
7.6	แสดงทิศทางสนามแม่เหล็กที่จุด $P(0, 8, 0)$ มม.	387
7.7	แสดงทิศทางของกระแสและระนาบสี่เหลี่ยม	389
7.8	แสดงเส้นลวดตัวนำและพื้นที่หน้าตัดขวาง	391
7.9	แสดงบริเวณคำนวณหาฟลักซ์แม่เหล็ก	392
7.10	แสดงบริเวณคำนวณหาฟลักซ์แม่เหล็กและ $d\vec{S}$ ซึ่งมีทิศทางเป็น \hat{a}_ϕ	393
7a.5	แสดงเส้นลวดตัวนำและจุดพิกัดที่ต้องการหา $\Delta\vec{H}$	395
7a.6	เส้นทางอินทิเกรตวงปิดของ \vec{H}	397
7a.7	แสดงสาระสำคัญในโจทช์	399
7a.8	แสดงตำแหน่งของเส้นลวดตัวนำและจุดพิกัดบนระนาบ $y - z$	401,408
7a.9	แสดงเส้นทางการอินทิเกรตวงปิดของ \vec{H}	402,410
7a.10	แสดงเส้นลวดตัวนำแกน y และจุดพิกัด $(3, 2, -4)$	414
7a.11	แสดงทิศทางสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นที่จุด $(0, 0, 3)$	415
8a.1	แสดงทิศทางของความเร็วประจุ สนามแม่เหล็ก และแรงที่เกิดขึ้นตามกฎมือขวา	428
8.1	แสดงทิศทางของ \vec{F} , \vec{j} และ \vec{B}	436
8.2	แสดงทิศทางของแรงแม่เหล็กที่กระทำต่อปริมาตรเล็กจิว	438
8.3	แสดงทิศทางของแรงแม่เหล็กที่กระทำต่อเส้นลวดตัวนำสั้นจิว	439
8.4	แสดงสาระสำคัญของตัวอย่างที่ 8.2	440
8a.2	แสดงทิศทางของความเร็วประจุ สนามแม่เหล็ก และแรงที่เกิดขึ้นตามกฎมือขวา	450
9a.1	เส้นโค้งความสัมพันธ์ $\vec{B} - \vec{H}$ สำหรับคำถามข้อ 4 – 6	461

รายการรูปประกอบ (ต่อ)

รูป	หน้า	
9.1	เส้นโค้ง $\bar{B}-\bar{H}$ ของสารเฟอร์โรแมกเนติก	471
9.2	ขดลวดตัวนำ N รอบ	473
9.3	สายส่งชนิดแผ่นขนาน	474
9.4	สายส่งชนิดโคแอกเซียล	474
9.5	ขดลวดโซลินอยด์	475
9.6	ขดลวดทอรอยด์	475
9.7	ขดลวดทองแดงแกนอากาศ	476
9.8	แสดงส่วนแกนไม้ของขดลวดทอรอยด์	477
9.9	แสดงภาคตัดขวางของแกนกลางของขดลวดโซลินอยด์	478
9a.2	เส้นโค้งความสัมพันธ์ $\bar{B}-\bar{H}$	482
9a.3	เส้นโค้งความสัมพันธ์ $\bar{B}-\bar{H}$ สำหรับคำถามข้อ 4 – 6	485
11.1	แสดงคลื่นตามขวางที่คลื่นมีทิศทางตามแกน y และเคลื่อนที่ในทิศทาง x	551
11.2	แสดงรูปคลื่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	552
11.3	แสดงภาคตัดขวางของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในรูปที่ 11.2	552