สารบัญ

คำนำ ก

สารบัญตาราง ซ

สารบัญรูป ซ

บทที่ 1 แนะนำสนามแม่เหล็กไฟฟ้า 1

บทที่ 2 คณิตศาสตร์พื้นฐานสำหรับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า 4

2.1 บทนำ 4

2.2 ระบบพิกัด และการแปลงพิกัด 4

2.2.1 ระบบพิกัดคาร์ทีเซียน 4

2.2.2 ระบบพิกัดทรงกระบอก 6

2.2.3 ระบบพิกัดทรงกลม 7

2.2.4 การแปลงพิกัด และเวคเตอร์ ระหว่างระบบพิกัด 8

2.3 แคลคูลัสเวคเตอร์ 10

2.3.1 อนุพันธ์เส้น พื้นที่ และปริมาตร 11

2.3.2 ตัวดำเนินการ “เดล” 13

2.3.3 เกรเดียนต์ของปริมาณสเกลาร์ 14

2.3.4 ไดเวอร์เจนซ์ของปริมาณเวคเตอร์ 15

2.3.5 เคิร์ลของปริมาณเวคเตอร์ 16

2.3.6 ลาปลาเซียนของปริมาณสเกลาร์ 17

2.4 ทฤษฎีไดเวอร์เจนซ์และ ทฤษฎีของสโตคส์ 18

บทที่ 3 สนามไฟฟ้าสถิต 19

3.1 บทนำ 19

3.2 กฎ และ ทฤษฎี เพื่อการคำนวณหาสนามไฟฟ้าสถิต 20

3.2.1 กฎของคูลอมป์ 21

3.2.2 ความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้า 46

3.2.3 กฎของเกาส์ และสมการของแมกซ์เวล์ล 47

3.2.4 การประยุกต์ใช้กฎของเกาส์ 50

3.2.5 ศักย์ไฟฟ้า 58

3.2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้า 63

3.3 ไดโพลไฟฟ้า และเส้นฟลักซ์ไฟฟ้า 68

3.4 ความหนาแน่นของพลังงานในสนามไฟฟ้าสถิต 73

แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 3 79

บทที่ 4 สนามไฟฟ้าในปริภูมิวัสดุ 81
4.1 บทนำ 81
4.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุ 81
4.3 กระแสการพาและกระแสนำ 83
4.3.1 กระแสการพา 84
4.3.2 กระแสนำ 85
4.4 วัสดุตัวนำไฟฟ้า 86
4.5 โพลาไรเซชันในวัสดุไดอิเล็กตริก 90
4.6 สนามไฟฟ้าอันเนื่องมาจากวัสดุโพลาไรซ์ไดอิเล็กตริก 92
4.7 ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก และความเข้มแข็งไดอิเล็กตริก 94
4.8 วัสดุไดอิเล็กตริกประเภทเชิงเส้น ไอโซทรอปิค และ เนื้อเดียว 96
4.9 สมการความต่อเนื่อง และ เวลา Relaxation 97
4.10 เงื่อนไขขอบเขต 100
4.10.1เงื่อนไขขอบเขต Dielectric – Dielectric 102
4.10.2 เงื่อนไขขอบเขต Conductor – Dielectric 107
4.10.3 เงื่อนไขขอบเขต Conductor – Free Space 111
แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 4 114
บทที่ 5 ปัญหาค่าขอบเขตในสนามไฟฟ้าสถิต 115
5.1 บทนำ 115
5.2 สมการของ Poisson และ สมการของ Laplace 115
5.3 ความต้านทานและความจุไฟฟ้า 126
5.3.1 ความต้านทานไฟฟ้า 126
5.3.2 ความจุไฟฟ้า 127
5.4 วิธีการของรูป 139
แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 5 141
บทที่ 6 สนามแม่เหล็กสถิต 144
6.1 บทนำ 144
6.2 กฎของ Biot-Savart 145
6.3 กฎวงจรของแอมแปร์ 156
6.4 การประยุกต์กฎวงจรของแอมแปร์ 158
6.4.1 กระแสเส้นอนันต์ 158
6.4.2 กระแสแผ่นอนันต์ 159
6.4.3 สายส่งแกนร่วมเส้นยาวอนันต์ 161

6.5 ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก 169
6.6 สมการของ Maxwell สำหรับสนามสถิต 171
6.7 ศักย์สเกลาห์และเวคเตอร์แม่เหล็ก 172
6.8 อนุพันธ์ของกฎของ Biot-Savart และ กฎวงจรของแอมแปร์ 177
แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 6 178

บทที่ 7 แรง วัสดุ และ อุปกรณ์แม่เหล็ก 181
7.1 บทนำ 181
7.2 แรงเนื่องมาจากสนามแม่เหล็ก 181
7.2.1 แรงบนอนุภาคประจุ 181
7.2.2 แรงบนองค์ประกอบกระแส 183
7.2.3 แรงระหว่าง 2 องค์ประกอบกระแส 184
7.3 ทอร์คและ โมเมนต์แม่เหล็ก 190
7.4 ไดโพลแม่เหล็ก 193
7.5 อำนาจแม่เหล็กในวัสดุ 196
7.6 การจำแนกประเภทของวัสดุแม่เหล็ก 198
7.7 เงื่อนไขขอบเขตแม่เหล็ก 200
7.8 ตัวเหนี่ยวนำ และความเหนี่ยวนำ 206
7.9 พลังงานแม่เหล็ก 211
7.10 วงจรแม่เหล็ก 215
7.11 แรงบนวัสดุแม่เหล็ก 218
แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 7 225

บทที่ 8 สมการของแมกซ์เวลล์ 229
8.1 บทนำ 229
8.2 กฎของฟาราเดย์ 229
8.3 แรงปรับไฟฟ้า และแรงเคลื่อนไฟฟ้าเคลื่อนไหว 231
8.3.1 บ่วงอยู่กับที่ในบริเวณที่สนามแม่เหล็กเปลี่ยนตามเวลา 232
8.3.2 บ่วงเปลี่ยนแปลงตามเวลาในบริเวณสนามแม่เหล็กสถิต 233
8.3.3 บ่วงและสนามแม่เหล็กเปลี่ยนตามเวลา 235
8.4 กระแสการกระจัด 240
8.5 สมการของแมกซ์เวลล์ในรูปสมบูรณ์ 243
8.6 ศักย์ที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา 245
8.7 สนาม Time-Harmonic 247
แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 8 254

บทที่ 9 การแพร่กระจายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า 255

9.1 บทนำ 255

9.2 คลื่นโดยทั่วไป 256

9.3 การแพร่การจายของคลื่น 263

9.3.1 การแพร่กระจายของคลื่นในวัสดุไดอิเล็กตริกที่มีการสูญเสีย 263

9.3.2 การแพร่กระจายของคลื่นในวัสดุไดอิเล็กตริกที่ไม่มีการสูญเสีย 268

9.3.3 การแพร่กระจายของคลื่นในอวกาศว่าง 269

9.3.4 การแพร่กระจายของคลื่นในตัวนำที่ดี 270

9.4 กำลังและเวคเตอร์ของพอยน์ติง 277

9.5 การสะท้อนของคลื่นระนาบที่ตกกระทบด้วยมุมฉาก 282

9.6 การสะท้อนของคลื่นระนาบที่มุมเอียง 293

9.6.1 การโพลาไรซ์แบบขนาน 296

9.6.2 การโพลาไรซ์แบบตั้งฉาก 297

แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 9 299

บรรณานุกรม 301

ประวัติผู้เขียน 302

สารบัญตาราง

ตารางที่ 4.1	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและความเข้มแข็งไดอิเล็กตริกของวัสดุ	95
ตารางที่ 6.1	สมการของ Maxwell สำหรับสนามสถิต	171
ตารางที่ 7.1	แรงไฟฟ้า $\vec{F}_e$ และแรงแม่เหล็ก $\vec{F}_m$	183
ตารางที่ 7.2	โมโนโพลและไดโพล ทางไฟฟ้าและแม่เหล็ก	194
ตารางที่ 7.3	ความเหนี่ยวนำในองค์ประกอบพื้นฐานรูปทรงต่างๆ	211
ตารางที่ 7.4	การวิเคราะห์เปรียบเทียบวงจรไฟฟ้าและวงจรแม่เหล็ก	216
ตารางที่ 8.1	สมการของ Maxwell	244
ตารางที่ 8.2	สมการของ Maxwell ในรูป Time Harmonic เมื่อมีเฟคเตอร์ $e^{j\omega t}$	248
ตารางที่ 9.1	สเปกตรัมของแม่เหล็กไฟฟ้า	260
ตารางที่ 9.2	Skin Depth ในทองแดง	271

สารบัญรูป

รูปที่ 1.1	(ก) เครือข่ายอุปกรณ์ไร้สาย และ (ข) เรดาร์	1
รูปที่ 1.2	คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่ต่างๆ	2
รูปที่ 2.1	ระบบพิกัดคาร์ทีเซียน: (ก) ตัวแปรพิกัด และ (ข) ระนาบคงที่ของตัวแปรพิกัด	5
รูปที่ 2.2	ระบบพิกัดทรงกระบอก: (ก) ตัวแปรพิกัด และ (ข) ระนาบคงที่ของตัวแปรพิกัด	6
รูปที่ 2.3	ระบบพิกัดทรงกลม: (ก) ตัวแปรพิกัด และ (ข) ระนาบคงที่ของตัวแปรพิกัด	8
รูปที่ 2.4	ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรพิกัดในระบบพิกัดทั้ง 3 ระบบพิกัด	8
รูปที่ 2.5	(ก) องค์ประกอบอนุพันธ์ และ (ข) พื้นที่ตั้งฉากอนุพันธ์ ในระบบพิกัดคาร์ทีเซียน	12
รูปที่ 2.6	(ก) องค์ประกอบอนุพันธ์ และ (ข) พื้นที่ตั้งฉากอนุพันธ์ ในระบบพิกัดทรงกระบอก	12
รูปที่ 2.7	(ก) องค์ประกอบอนุพันธ์ และ (ข) พื้นที่ตั้งฉากอนุพันธ์ ในระบบพิกัดทรงกลม	13
รูปที่ 2.8	เกรเดียนต์ (ก) 2 มิติ และ (ข) 3 มิติ	14
รูปที่ 2.9	(ก) ไดเวอร์เจนซ์ค่าบวก (ข) ไดเวอร์เจนซ์ค่าลบ (ค) ไดเวอร์เจนซ์เท่ากับศูนย์ และ (ง) ไดเวอร์เจนซ์แสดงแหล่งจ่ายทรงกระบอก	15
รูปที่ 2.10	(ก) เคิร์ลค่าบวก (ข) เคิร์ลค่าบวก และ (ค) เคิร์ลเท่ากับศูนย์	16
รูปที่ 3.1	อุปกรณ์การพ่นสี ที่ใช้หลักการสนามไฟฟ้าสถิต	20
รูปที่ 3.2	แรงระหว่างประจุไฟฟ้า 2 ประจุ	21
รูปที่ 3.3	แรงผลรวมอันเนื่องมากจากประจุไฟฟ้า N ประจุ	23
รูปที่ 3.4	ประจุแบบจุดและการจัดเรียงประจุทั้งสามแบบ	25
รูปที่ 3.5	ภาพแสดงการวิเคราะห์สนามไฟฟ้าสถิตอันเนื่องมาจากประจุแบบเส้น	27
รูปที่ 3.6	การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าสถิตอันเนื่องมาจากประจุแบบพื้นผิว	30
รูปที่ 3.7	สนามไฟฟ้าใน Parallel Plate Capacitor	33
รูปที่ 3.8	การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าสถิตอันเนื่องมาจากประจุแบบปริมาตร	34
รูปที่ 3.9	วงแหวนวงกลม	37
รูปที่ 3.10	การจัดเรียงตัวประจุที่ระนาบ $x=2$ และ $y=-3$ และเส้น $x=0,\ z=2$ พร้อมทั้งพิกัด P ที่ต้องการหาค่าสนามไฟฟ้า	42
รูปที่ 3.11	ประจุและเส้นฟลักซ์ไฟฟ้า ประเภท (ก-ข) ประจุบวกเดี่ยว (Isolated Positive Charge) (ค-ง) ประจุบวกและประจุลบ (Positive and Negative Charges) (จ-ฉ) ประจุบวกคู่ (Two Positive Charges) และ (ช-ซ) ระนาบขนานที่มีค่าประจุต่างเครื่องหมาย (Oppositely Charged Parallel Planes)	45
รูปที่ 3.12	ปริมาตร v_1 และ v_2 และ ประจุไฟฟ้า	49
รูปที่ 3.13	แผนผังแสดงขั้นตอนการใช้กฎของเกาส์ในการคำนวณหาค่า $\vec{D}$	50
รูปที่ 3.14	ประจุแบบจุด หรือ Point Charge	51

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ 3.15	พื้นผิวทรงกลม หรือ Spherical Surface	52
รูปที่ 3.16	ประจุเส้น หรือ Line Charge ρ_L C/m	53
รูปที่ 3.17	พื้นผิวทรงกระบอก หรือ Cylindrical Surface	54
รูปที่ 3.18	ประจุแผ่นอนันต์	55
รูปที่ 3.19	พื้นผิว Cartesian	56
รูปที่ 3.20	ทรงกลมประจุสม่ำเสมอ	57
รูปที่ 3.21	การเปลี่ยนตำแหน่งของประจุจุด	59
รูปที่ 3.22	ศักย์ไฟฟ้า	61
รูปที่ 3.23	สนามไฟฟ้าสถิตในบริเวณเส้นทางปิด A-B	64
รูปที่ 3.24	ไดโพลไฟฟ้า	68
รูปที่ 3.25	ไดโพลไฟฟ้าเมื่อประจุอยู่ในตำแหน่งที่ต่างกัน	70
รูปที่ 3.26	พื้นผิว Equipotential	72
รูปที่ 3.27	การสร้างประจุ	74
รูปที่ 4.1	ความสามารถในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในวัสดุประเภท (ก) ตัวนำ (ข) กึ่งตัวนำ และ (ค) ฉนวน	81
รูปที่ 4.2	สภาพการนำ σ กับ ความลึกพื้นผิว	82
รูปที่ 4.3	กระแสการพาใน Filament	84
รูปที่ 4.4	พฤติกรรมของการจัดเรียงประจุและสนามไฟฟ้าในวัสดุตัวนำ (ก) เมื่อใส่สนามไฟฟ้าจากภายนอก และ (ข) หลังจากการหักล้างระหว่างภายนอก และสนามเหนี่ยวนำภายใน	87
รูปที่ 4.5	การใส่สนามไฟฟ้าให้กับตัวนำไฟฟ้าที่มีพื้นที่หน้าตัดคงที่	88
รูปที่ 4.6	สนามไฟฟ้ากับวัสดุไดอิเล็กตริก	91
รูปที่ 4.7	บล็อคของวัสดุไดอิเล็กตริกที่มีโมเมนต์ไดโพล	92
รูปที่ 4.8	การแตกหักไดอิเล็กตริก	96
รูปที่ 4.9	ทิศทางของสนามไฟฟ้าเมื่อเคลื่อนที่ผ่าน (ก) ตัวกลางประเภทเดียวกัน และ (ข) ตัวกลางต่างประเภทกัน	101
รูปที่ 4.10	การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าเมื่อเคลื่อนที่จากตัวกลางที่ 2 ซึ่งเป็นวัสดุไดอิเล็กตริก (ε_{r_2}) เข้าสู่ ตัวกลางที่ 1 ซึ่งเป็นวัสดุไดอิเล็กตริก (ε_{r_1})	102

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ 4.11	การวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้าจากตัวกลางที่ 2 ซึ่งเป็นวัสดุไดอิเล็กตริก (ε_{r_2}) เข้าสู่ ตัวกลางที่ 1 ซึ่งเป็นวัสดุไดอิเล็กตริก (ε_{r_1})	104
รูปที่ 4.12	การวิเคราะห์ทิศทางของสนามไฟฟ้าและความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้าในตัวกลางที่ 2 ซึ่งเป็นวัสดุไดอิเล็กตริก (ε_{r_2}) เข้าสู่ ตัวกลางที่ 1 ซึ่งเป็นวัสดุไดอิเล็กตริก	105
รูปที่ 4.13	การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าเมื่อเคลื่อนที่จากตัวกลางที่ 2 ซึ่งเป็นวัสดุตัวนำ เข้าสู่ ตัวกลางที่ 1 ซึ่งเป็นวัสดุไดอิเล็กตริก (ε_r)	108
รูปที่ 4.14	การวิเคราะห์ความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้าเมื่อเคลื่อนที่จากตัวกลางที่ 2 ซึ่งเป็นวัสดุตัวนำ เข้าสู่ตัวกลางที่ 1 ซึ่งเป็นวัสดุไดอิเล็กตริก	109
รูปที่ 4.15	การคุมสนามไฟฟ้าในสาย Coaxial	110
รูปที่ 4.16	การวิเคราะห์สนามไฟฟ้าและความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้า เมื่อเคลื่อนที่จากตัวกลางที่ 2 ซึ่งเป็นวัสดุตัวนำ เข้าสู่ตัวกลางที่ 1 ซึ่งเป็น Free Space	111
รูปที่ 4.17	สนามไฟฟ้าเมื่อเคลื่อนที่จากตัวกลางที่ 1 เข้าสู่ตัวกลางที่ 2 เมื่อ (ก) ตัวกลางทั้งสองมีประเภทเดียวกัน และ (ข) ตัวกลางทั้งสองต่างประเภทกัน	112
รูปที่ 4.18	ตำแหน่ง A ในวัสดุตัวนำ และ ตำแหน่ง B ในวัสดุไดอิเล็กตริก	112
รูปที่ 5.1	ปั๊มไฟฟ้าของไหล	118
รูปที่ 5.2	วัสดุกรวยตัวนำ 2 ชั้น เมื่อ $\theta_1 = \pi/10$ **และ** $\theta_2 = \pi/6$	122
รูปที่ 5.3	ตัวเก็บประจุไฟฟ้า	127
รูปที่ 5.4	ทิศทางของสนามไฟฟ้าในตัวเก็บประจุ	129
รูปที่ 5.5	ทิศทางของฟลักซ์ไฟฟ้าในตัวเก็บประจุ	129
รูปที่ 5.6	ตัวเก็บประจุแกนร่วม	131
รูปที่ 5.7	ตัวเก็บประจุทรงกลม	132
รูปที่ 5.8	เปลือกตัวนำทรงกลม	133
รูปที่ 5.9	กรวยตัวนำ ใช้ในแบบฝึกหัดที่ 5.1	137
รูปที่ 5.10	ตัวเก็บประจุไฟฟ้า 3 ชั้น	138
รูปที่ 5.11	ตัวเก็บประจุไฟฟ้า (A) แบบอนุกรม และ (B) แบบขนาน	138
รูปที่ 5.12	วงจรแสดงตัวเก็บประจุไฟฟ้า (A) แบบอนุกรม และ (B) แบบขนาน	139
รูปที่ 5.13	วิธีการของภาพเหนือตัวนำสมบูรณ์แบบ ซึ่งเสมือนกับการเกิดภาพเสมือนด้านล่างพื้นผิวศักย์เท่าเทียม	140

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ 6.1	สนามแม่เหล็ก $d\vec{H}$ ที่จุด P อันเนื่องมาจากองค์ประกอบกระแส $Id\vec{l}$	145
รูปที่ 6.2	กฎมือขวา	146
รูปที่ 6.3	องค์ประกอบกระแส	146
รูปที่ 6.4	สนามแม่เหล็กจากกระแสในตัวนำเส้นตรง	147
รูปที่ 6.5	สนามแม่เหล็กจากกระแสในเส้นลวดความยาวกึ่งอนันต์	149
รูปที่ 6.6	สนามแม่เหล็กจากกระแสในเส้นลวดความยาวกึ่งอนันต์	150
รูปที่ 6.7	ลวดตัวนำรูปวงสามเหลี่ยม	151
รูปที่ 6.8	การวิเคราะห์โจทย์ตัวอย่างที่ 6.1 บนระนาบ xz	151
รูปที่ 6.9	กระแสในตัวอย่างที่ 6.2	153
รูปที่ 6.10	การวิเคราะห์ทิศทางในตัวอย่างที่ 6.2	154
รูปที่ 6.11	ทิศของสนามแม่เหล็ก	154
รูปที่ 6.12	วิเคราะห์กฎวงจรของแอมแปร์	157
รูปที่ 6.13	การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสเส้นอนันต์	158
รูปที่ 6.14	การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสแผ่นอนันต์	160
รูปที่ 6.15	อนุพันธ์สนามแม่เหล็ก $d\vec{H}$ บนระนาบ xz	160
รูปที่ 6.16	การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายส่งแกนร่วมเส้นยาวอนันต์	162
รูปที่ 6.17	กราฟแสดงสนามแม่เหล็กที่เกิดจากสายส่งแกนร่วมเส้นยาวอนันต์	165
รูปที่ 6.18	กระแสระนาบในตัวอย่างที่ 6.3	166
รูปที่ 6.19	ทิศทางของกระแสในระนาบ	166
รูปที่ 6.20	ขนาดของสนามแม่เหล็กเทียบกับแกน z	168
รูปที่ 6.21	เส้นฟลักซ์แม่เหล็ก	169
รูปที่ 6.22	(ก) ฟลักซ์แม่เหล็กจากประจุไฟฟ้าโดเดี่ยว และ (ข) ฟลักซ์แม่เหล็กจากประจุแม่เหล็กที่ออกจากพื้นผิวปิด	170
รูปที่ 6.23	พื้นผิวในพิกัด $\phi = \pi/2$, $1 \le \rho \le 2$ m และ $0 \le z \le 5$ m	174
รูปที่ 6.24	ฟลักซ์แม่เหล็กตามเส้นทางปิด	175
รูปที่ 7.1	แรงระหว่าง 2 บ่วงกระแส	185
รูปที่ 7.2	ตัวกรองความเร็ว	187
รูปที่ 7.3	การจัดเรียงตัวของกระแสในตัวอย่างที่ 7.2	188
รูปที่ 7.4	(ก) แรงของด้านที่ 1 และ 3 (ข) แรงของด้านที่ 2 และ 4	189

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ 7.5	ทอร์คบนบ่วงสี่เหลี่ยม	191
รูปที่ 7.6	แรงบนบ่วง	192
รูปที่ 7.7	ทิศของแรง	192
รูปที่ 7.8	(ก) โมเมนต์ไดโพลแม่เหล็กก่อนใส่ $\vec{B}$ และ (ข) หลังใส่ $\vec{B}$	197
รูปที่ 7.9	กราฟอำนวจแม่เหล็ก B-H	199
รูปที่ 7.10	เงื่อนไขขอบเขตระหว่าง 2 ตัวกลางแม่เหล็กสำหรับวิเคราะห์ $\vec{B}$	201
รูปที่ 7.11	เงื่อนไขขอบเขตระหว่าง 2 ตัวกลางแม่เหล็กสำหรับวิเคราะห์ $\vec{H}$	202
รูปที่ 7.12	เงื่อนไขขอบเขตระหว่าง 2 ตัวกลางแม่เหล็ก ของตัวอย่างที่ 7.5	203
รูปที่ 7.13	ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก $\vec{B}$ ที่ถูกสร้างจากวงจร	206
รูปที่ 7.14	การกระทำระหว่างกันของแม่เหล็กใน 2 วงจร	208
รูปที่ 7.15	ปริมาตรเชิงอนุพันธ์ในสนามแม่เหล็ก	212
รูปที่ 7.16	Two coaxial circular wires	213
รูปที่ 7.17	บ่วงวงกลม	214
รูปที่ 7.18	การเปรียบเทียบวงจรไฟฟ้า กับวงจรแม่เหล็ก	216
รูปที่ 7.19	แม่เหล็กไฟฟ้า	218
รูปที่ 7.20	วงจรแม่เหล็ก ของตัวอย่าง 7.7	220
รูปที่ 7.21	วงจรไฟฟ้าเปรียบเทียบของตัวอย่าง 7.7	221
รูปที่ 7.22	ทอรอยด์ ของแบบฝึกหัด 7.6	222
รูปที่ 7.23	แม่เหล็กไฟฟ้ารูปตัว U ของตัวอย่าง 7.8	222
รูปที่ 7.24	วงจรไฟฟ้า	223
รูปที่ 8.1	วงจรที่แสดงสนาม emf $\vec{E}_f$ และสนามไฟฟ้าสถิต $\vec{E}_e$	230
รูปที่ 8.2	แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induced emf) อันเนื่องมาจากบ่วงอยู่กับที่ในบริเวณที่สนามแม่เหล็ก $\vec{B}$ เปลี่ยนตามเวลา	232
รูปที่ 8.3	เครื่องกล 2 โพลกระแสตรง	234
รูปที่ 8.4	แรงนำไฟฟ้าเหนี่ยวนำ (Induced emf) อันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของบ่วงในสนามแม่เหล็กสถิต $\vec{B}$	234
รูปที่ 8.5	บ่วงเคลื่อนที่ ในตัวอย่างที่ 8.2	236
รูปที่ 8.6	วงจรแม่เหล็ก ในตัวอย่างที่ 8.3	239
รูปที่ 8.7	วงจรแม่เหล็ก ของแบบฝึกหัดที่ 8.3	240
รูปที่ 8.8	ตัวอย่างที่ 8.4 Parallel Plate Capacitor	242

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ 9.1	กราฟของ $E = A\sin(\omega t - \beta z)$ เมื่อ (ก) เวลา t คงที่ และ (ข) ตำแหน่ง z คงที่	257
รูปที่ 9.2	กราฟของ $E = A\sin(\omega t - \beta z)$ เมื่อ (ก) เวลา $t = 0$ $t = T/4$ และ $t = T/4$ สังเกตุตำแหน่ง P จะเคลื่อนที่ตามทิศทาง $+z$ ด้วยความเร็ว u	259
รูปที่ 9.3	การเคลื่อนที่ของคลื่น	262
รูปที่ 9.4	สนามไฟฟ้าที่เวลาใดๆ	267
รูปที่ 9.5	ความลึกผิว	271
รูปที่ 9.6	ความสมดุลของกำลังในสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	278
รูปที่ 9.7	คลื่นตกกระทบ คลื่นส่ง และ คลื่นสะท้อน ในตัวกลาง 2 ประเภท เมื่อคลื่นตกกระทบด้วยมุมตั้งฉากกับพื้นผิวรอยต่อ	283
รูปที่ 9.8	พฤติกรรมของคลื่นเมื่อเคลื่อนที่ผ่านวัสดุ	286
รูปที่ 9.9	กรณีศึกษาคลื่นในรอยต่อระหว่างวัสดุไดอิเล็กตริกสมบูรณ์แบบ และตัวนำสมบูรณ์แบบ	287
รูปที่ 9.10	คลื่นนิ่ง $\vec{E}_1 = 2E_{i0}\sin\beta_1 z \sin\omega t\ \vec{a}_x$	288
รูปที่ 9.11	คลื่นนิ่งอันเนื่องมาจากการสะท้อนของคลื่น ที่รอยต่อระหว่างตัวกลางที่ไม่มีการสูญเสีย	288
รูปที่ 9.12	รอยต่อระหว่างตัวกลาง 2 ประเภทในตัวอย่างที่ 9.3	290
รูปที่ 9.13	รอยต่อระหว่างตัวกลาง 2 ประเภท ที่คลื่นตกกระทบจะสะท้อนกลับหมด	292
รูปที่ 9.14	สนามไฟฟ้า $\vec{E}$ สนามแม่เหล็ก $\vec{H}$ และ เวคเตอร์เลขคลื่น $\vec{k}$ ในวัสดุตัวกลางที่ไม่มีการสูญเสีย	294
รูปที่ 9.15	การตกกระทบของคลื่นด้วยมุมเอียงที่บริเวณรอยต่อของตัวกลาง 2 ประเภท	295
รูปที่ 9.16	คลื่นตกกระทบ คลื่นส่ง และคลื่นสะท้อน ที่ตกกระทบด้วยมุมเอียง และมีการโพลาไรซ์แบบขนาน	296
รูปที่ 9.17	คลื่นตกกระทบ คลื่นส่ง และ คลื่นสะท้อน ที่ตกกระทบด้วยมุมเอียง และมีการโพลาไรซ์แบบตั้งฉาก	297