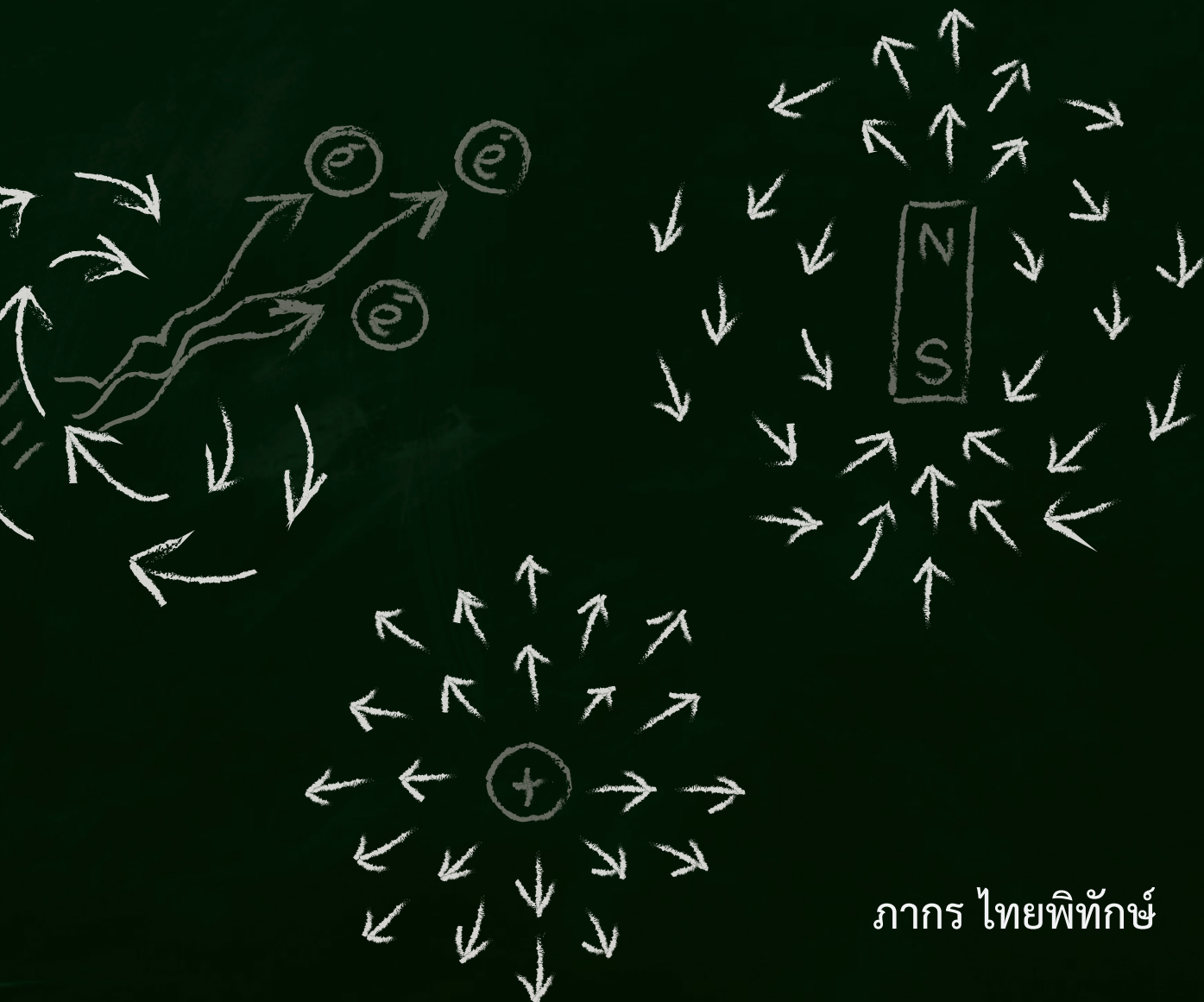


ชั้นเรียนแรกใน

ทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า

ระดับมหาวิทยาลัย



ภากร ไทยพิทักษ์

ชั้นเรียนแรกในทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้าระดับมหาวิทยาลัย

ชั้นเรียนแรกในทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้าระดับมหาวิทยาลัย

ภากร ไทยพิทักษ์

 **สำนักพิมพ์**
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2565

360.-

ภากร ไทยพิทักษ์

ชั้นเรียนแรกในทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้าระดับมหาวิทยาลัย / ภากร ไทยพิทักษ์

1. ทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า 2. คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ISBN (e-book) 978-974-03-4110-9

สพจ. 2554



สสคุณคำวิชาการ ผู้สังคม

Knowledge to All

www.cupress.chula.ac.th

สิทธิในการผลิตและพิมพ์หนังสือเล่มนี้เป็นของสำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยแต่ผู้เดียว

การผลิตและการลอกเลียนหนังสือเล่มนี้ไม่ว่ารูปแบบใดทั้งสิ้น

ต้องได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากสำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จัดทำโดย สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ครั้งที่ 1 พ.ศ. 2565

www.cupress.chula.ac.th [CUB 6503-002]

โทร. 0-2218-3562-3

บรรณาธิการอำนวยการ : นางอรทัย นันทนาคิตย์ รองศาสตราจารย์ ดร.อรรณู หาญสืบสาย

กองบรรณาธิการฝ่ายวิชาการ : ศาสตราจารย์กิตติคุณ ดร.ปิยนารถ บุนนาค รองศาสตราจารย์ ดร.พิมพ์พันธ์ เดชะคุปต์

รองศาสตราจารย์ นายแพทย์ชิษณุ พันธุ์เจริญ รองศาสตราจารย์ ดร.วิมลวรรณ พิมพ์พันธ์

ผู้ประสานงาน : วาสนา ชำชื่น

พิสูจน์อักษร : โซมิตา วัชรโรทัย

ออกแบบปก : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ออกแบบรูปเล่ม : ภากร ไทยพิทักษ์

ผู้จัดจำหน่าย : ศูนย์หนังสือแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

โทร. 0-2218-9872 โทรสาร 0-2254-9495

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

ร้านค้าติดต่อ : แผนกขายส่ง สาขาหัวหมาก โทร. 0-2374-1375-6 โทรสาร 0-2374-1374

customer@chulabook.chula.ac.th, info@chulabook.chula.ac.th

Apps: CU-eBook Store

คำนำ

ตำราชั้นเรียนแรกในทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้าระดับมหาวิทยาลัยเป็นตำราที่รวบรวมเนื้อหาในส่วนของไฟฟ้า และแม่เหล็กจากการเรียนการสอนวิชาฟิสิกส์ 2 ซึ่งเป็นวิชาสำหรับนักศึกษา คณะวิทยาศาสตร์บัณฑิต วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ครุศาสตรบัณฑิตสาขาฟิสิกส์ และผู้ที่มีความสนใจในทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า เนื้อหาของตำรานี้ถูกแบ่งออกเป็น 5 บท รวมทั้งสิ้น 18 หัวข้อ แจกแจงออกเป็น บทที่ 1 จะประกอบด้วยหัวข้อ 1.1 ประจุไฟฟ้า และแรงทางไฟฟ้า 1.2 สนามไฟฟ้า 1.3 การหาสนามไฟฟ้าจากวัตถุที่มีรูปร่าง และ 1.4 กฎของเกาส์ ในบทที่ 2 ประกอบด้วยหัวข้อ 2.1 ศักย์ไฟฟ้า และพลังงานศักย์ไฟฟ้า 2.2 การหาศักย์ไฟฟ้าจากวัตถุที่มีรูปร่าง 2.3 ความจุประจุของตัวเก็บประจุ 2.4 กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า ถัดไปคือบทที่ 3 ประกอบด้วยหัวข้อ 3.1 อำนาจแม่เหล็ก และสนามแม่เหล็ก 3.2 แรงแม่เหล็กที่กระทำต่อประจุ 3.3 แรงแม่เหล็กบนตัวนำที่มีกระแส และ 3.4 พลังงานศักย์แม่เหล็ก ในบทที่ 4 ประกอบด้วยหัวข้อ 4.1 กฎของบีโอด-ซาวาร์ต 4.2 กฎของแอมแปร์ 4.3 กฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ และค่าความเหนี่ยวนำแม่เหล็ก และ 4.4 วัสดุแม่เหล็ก ที่กล่าวถึงแรงแม่เหล็กที่เกิดขึ้นได้เมื่อนำสารมาวางไว้ใกล้กับแท่งแม่เหล็ก และบทที่ 5 เป็นบทสุดท้าย ประกอบด้วยหัวข้อ 5.1 สมการแมกซ์เวลล์ และ 5.2 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และโฟตอน ซึ่งเชื่อมโยงไปถึงวิชาฟิสิกส์ยุคใหม่ ส่วนท้ายของแต่ละบทมีแบบฝึกหัด บทละ 20 ข้อ ประกอบด้วยโจทย์แบบปรนัย 10 ข้อ เพื่อทดสอบความรู้ความเข้าใจในเนื้อหา และโจทย์แบบอัตนัยอีก 10 ข้อ เพื่อฝึกฝนการบูรณาการทักษะการคำนวณ และความรู้มาแก้โจทย์ปัญหา

เนื้อหาที่ไม่กล่าวถึงในตำราเล่มนี้คือเนื้อหาเกี่ยวกับการวิเคราะห์วงจรไฟฟ้าทั้งวงจรไฟฟ้ากระแสตรง และวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ ผู้เขียนได้แยกเนื้อหาส่วนนี้ออกไปเพราะต้องการเน้นเนื้อหาไปที่ส่วนของแม่เหล็กไฟฟ้าเท่านั้น

ผู้เรียนที่ใช้ตำรานี้ควรมีพื้นฐานจากวิชาแคลคูลัส 1 ในระดับที่สามารถคำนวณอนุพันธ์ และปริพันธ์ (หรืออินทิเกรต) ของฟังก์ชันเบื้องต้นได้ และควรมีพื้นฐานจากวิชาฟิสิกส์ 1 ในเรื่อง

เวกเตอร์ กฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน งานพลังงาน และโมเมนตัม จากพื้นฐานเหล่านี้ ผู้เขียนหวังว่า ตำราเล่มนี้จะเป็นการต่อยอด และเพิ่มพูนความรู้ในทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า เกี่ยวกับสนามไฟฟ้าและศักย์ไฟฟ้าจากวัตถุที่มีประจุที่มีรูปร่าง พลังงานศักย์ไฟฟ้า สนามแม่เหล็กจากเส้นลวดที่มีกระแส สารไดอิเล็กทริก วัสดุแม่เหล็ก พลังงานศักย์แม่เหล็ก สมการแมกซ์เวลล์ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โฟตอน เป็นต้น อีกทั้งยังส่งเสริมทักษะทางคณิตศาสตร์ ในเรื่องของ การแยกองค์ประกอบเวกเตอร์ การใช้ระบบพิกัดทรงกระบอก ระบบพิกัดทรงกลม การทำปริพันธ์ตามเส้น ปริพันธ์พื้นที่ และปริพันธ์ปริมาตร เป็นต้น โดยในตำรานี้จะอธิบายเนื้อหาแม่เหล็กไฟฟ้าไปพร้อมกับแสดงวิธีคำนวณปริมาณที่เกี่ยวข้องโดยใช้หน่วยมาตรฐานสากล อย่างเป็นขั้นเป็นตอน พร้อมกับรูปประกอบที่ผู้เขียนได้วาดขึ้นเอง (จึงขอละการอ้างอิงถึงที่มาของรูป) จึงมั่นใจว่ารูปที่ใช้ในตำราทุกรูป นี้ได้รับการออกแบบเป็นอย่างดี ให้มีความชัดเจน และสอดคล้องกับแนวทางการอธิบายให้มากที่สุด จากที่กล่าวมานี้ ผู้เขียนเชื่อว่าจะเป็นประโยชน์ต่อผู้เรียนวิชาฟิสิกส์ 2 และต่อผู้เรียนที่ต้องการใช้ประกอบการเรียนวิชาแม่เหล็กไฟฟ้าชั้นสูงต่อไป

สุดท้ายนี้ผู้เขียนขอขอบคุณคณาจารย์คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี ที่มีส่วนให้กำลังใจในการทำงานทั้งยังให้คำปรึกษาตลอดช่วงเวลาการเขียนตำรานี้ และขอขอบคุณนักศึกษาทุกคนที่เข้ามาเรียนวิชาของสาขาวิชานี้ ทำให้ผู้เขียนได้มีโอกาสนับหน้าตาที่เป็นผู้สอนที่ต้องฝึกฝนทบทวน จนความรู้เพียงพอที่จะเขียนตำราเล่มนี้ได้สำเร็จ

ภากร ไทยพิทักษ์

กันยายน 2560

สารบัญ

บทที่ 1 ไฟฟ้าสถิต	1
1.1 ประจุไฟฟ้า และแรงทางไฟฟ้า	2
1.1.1 ประจุไฟฟ้า	2
1.1.2 กฎของคูลอมบ์	3
1.2 สนามไฟฟ้า	9
1.2.1 ความหมายของสนามไฟฟ้า	9
1.2.2 ขนาด และทิศทางของสนามไฟฟ้า	10
1.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างสนามไฟฟ้ากับแรงทางไฟฟ้า	12
1.3 การหาสนามไฟฟ้าจากวัตถุที่มีรูปร่าง	18
1.3.1 หลักการ และแนวทางการคำนวณ	18
1.3.2 สนามไฟฟ้าจากลวดตรงที่มีประจุ	19
1.3.3 สนามไฟฟ้าจากวัตถุรูปจานที่มีประจุ	25
1.4 กฎของเกาส์	37
1.4.1 ฟลักซ์ของเวกเตอร์	37
1.4.2 กฎของเกาส์สำหรับสนามไฟฟ้า	39
1.4.3 สนามไฟฟ้าภายนอกวัตถุทรงกลมที่มีประจุ	41
1.4.4 หลักการหาสนามไฟฟ้าภายในวัตถุที่มีประจุรูปร่างต่าง ๆ	44
1.4.5 สนามไฟฟ้าภายในวัตถุทรงกลมที่มีประจุ	46
1.4.6 สนามไฟฟ้าภายนอกวัตถุทรงกระบอกยาวมากที่มีประจุ	48
1.4.7 สนามไฟฟ้าภายในวัตถุทรงกระบอกยาวมากที่มีประจุ	51
1.4.8 สนามไฟฟ้าจากแผ่นราบขนาดใหญ่มากที่มีประจุ	53
สรุปเนื้อหาบทที่ 1	63
แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 1	64

สารบัญ(ต่อ)

บทที่ 2 ศักย์ไฟฟ้า และความจุของตัวเก็บประจุ	71
2.1 ศักย์ไฟฟ้า และพลังงานศักย์ไฟฟ้า	72
2.1.1 ความหมายของศักย์ไฟฟ้า	72
2.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ไฟฟ้า และพลังงานศักย์ไฟฟ้า	74
2.1.3 ศักย์ไฟฟ้า และงานต่อประจุ	76
2.1.4 คณิตศาสตร์ และความเชื่อมโยงของปริมาณทั้งสอง	81
2.2 การหาศักย์ไฟฟ้าจากวัตถุที่มีรูปร่าง	89
2.2.1 หลักการ และแนวทางการคำนวณ	89
2.2.2 ศักย์ไฟฟ้าจากลวดตรงที่มีประจุ	90
2.2.3 ศักย์ไฟฟ้าภายนอก และภายในทรงกลมตันที่มีประจุ	93
2.2.4 ศักย์ไฟฟ้าภายในตัวนำทรงกลม และทรงกลมกลวงผิวบางที่มีประจุ	97
2.3 ความจุประจุของตัวเก็บประจุ	105
2.3.1 หลักการของตัวเก็บประจุ และค่าความจุประจุ	105
2.3.2 การหาค่าความจุสำหรับระบบแผ่นตัวนำคู่ขนาน	108
2.3.3 การหาค่าความจุสำหรับระบบตัวนำทรงกระบอกซ้อนกัน	110
2.3.4 การหาค่าความจุสำหรับระบบตัวนำทรงกลมซ้อนกัน	111
2.3.5 สารไดอิเล็กทริก	113
2.4 กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้า	123
2.4.1 นิยามของกระแสไฟฟ้า	123
2.4.2 แบบจำลองการเคลื่อนที่ของพาหะไฟฟ้า	124
2.4.3 กระแสไฟฟ้าที่ผ่านความต่างศักย์	127
2.4.4 ความต้านทานในเนื้อวัสดุ	130
2.4.5 กฎของโอห์ม	133
สรุปเนื้อหาบทที่ 2	137
แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 2	139

สารบัญ(ต่อ)

บทที่ 3 แม่เหล็กสถิต	145
3.1 อำนาจแม่เหล็ก และสนามแม่เหล็ก	146
3.1.1 ขั้วแม่เหล็ก และความหมายของสนามแม่เหล็ก	146
3.1.2 กฎของเกาส์สำหรับสนามแม่เหล็ก	150
3.2 แรงจากสนามแม่เหล็กที่กระทำต่อประจุ	154
3.2.1 แรงลอเรนตซ์	154
3.2.2 การเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีประจุภายใต้แรงลอเรนตซ์	157
3.2.3 รั้งสี่แคโทด และการค้นพบอิเล็กตรอน	160
3.2.4 การเคลื่อนที่รูปวงกลมของอนุภาคที่มีประจุภายใต้สนามแม่เหล็ก	162
3.2.5 การเคลื่อนที่รูปเกลียวของอนุภาคที่มีประจุภายใต้สนามแม่เหล็ก	164
3.3 แรงแม่เหล็กบนตัวนำที่มีกระแส	171
3.3.1 แรงแม่เหล็กที่กระทำต่อเส้นลวดที่มีกระแส	171
3.3.2 ทอร์กของแรงแม่เหล็กที่กระทำต่อวงลวด หรือขดลวดที่มีกระแส	181
3.3.3 ปรากฏการณ์ฮอลล์	187
3.4 พลังงานศักย์แม่เหล็ก	194
3.4.1 แนวคิดของการคำนวณหาพลังงานศักย์	194
3.4.2 พลังงานศักย์ของอนุภาคในสนามเหล็ก	195
3.4.3 พลังงานศักย์จากทอร์กของแรงแม่เหล็ก	195
3.4.4 พลังงานศักย์วางนัยทั่วไปของแรงลอเรนตซ์	199
3.4.5 อภิปรายผลการคำนวณพลังงานศักย์วางนัยทั่วไปของแรงลอเรนตซ์	204
สรุปเนื้อหาท้ายบทที่ 3	208
แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 3	210

สารบัญ(ต่อ)

บทที่ 4 แม่เหล็กไฟฟ้า	217
4.1 กฎของบิโอต์-ซาวาร์ต	218
4.1.1 หลักการของกฎของบิโอต์-ซาวาร์ต	218
4.1.2 สนามแม่เหล็กจากลวดตรงที่มีกระแส	220
4.1.3 สนามแม่เหล็กจากขดลวดวงกลมที่มีกระแส	223
4.2 กฎของแอมแปร์	230
4.2.1 หลักการของกฎของแอมแปร์	230
4.2.2 สนามแม่เหล็กจากลวดตรงยาวมากที่มีกระแส	233
4.2.3 สนามแม่เหล็กจากขดลวดโซลินอยด์ที่มีกระแส	235
4.2.4 สนามแม่เหล็กจากขดลวดทอรรอยด์ที่มีกระแส	237
4.3 กฎการเหนี่ยวนำของฟาราเดย์ และค่าความเหนี่ยวนำแม่เหล็ก	241
4.3.1 การเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ	241
4.3.2 การคำนวณแรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำ และการระบุขั้ว	242
4.3.3 ความเหนี่ยวนำ และตัวเหนี่ยวนำ	247
4.4 วัสดุแม่เหล็ก	254
4.4.1 แหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กจากระดับอะตอม	254
4.4.2 วัสดุเฟอร์โรแมกเนติก และวัสดุพาราแมกเนติก	257
4.4.3 วัสดุไดอะแมกเนติก	259
4.4.4 วัสดุแม่เหล็กกับแท่งแม่เหล็กถาวร	261
สรุปเนื้อหาบทที่ 4	263
แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 4	265

สารบัญ(ต่อ)

บทที่ 5 สมการแมกซ์เวลล์ และคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	273
5.1 สมการแมกซ์เวลล์	274
5.1.1 การรวมกฎทางไฟฟ้า และกฎทางแม่เหล็ก	274
5.1.2 กฎของฟาราเดย์สำหรับการเหนี่ยวนำสนามไฟฟ้า	275
5.1.3 กระแสกระจัด	277
5.1.4 ชุดสมการแมกซ์เวลล์	280
5.2 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และโฟตอน	287
5.2.1 ประวัติศาสตร์ของแสง	287
5.2.2 สมบัติความเป็นคลื่นของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	288
5.2.3 การส่งผ่านพลังงานโดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	293
5.2.4 การส่งผ่านโมเมนตัมโดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	298
5.2.5 สมบัติความเป็นอนุภาคของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	302
สรุปเนื้อหาบทที่ 5	309
แบบฝึกหัดท้ายบทที่ 5	311
ภาคผนวก	317
ภาคผนวก ก ค่าคงตัว	319
ภาคผนวก ข ตารางปริมาณที่เป็นสมบัติเฉพาะตัวของสสาร	321
ภาคผนวก ค แคลคูลัสสำหรับวิชาแม่เหล็กไฟฟ้า	325
ภาคผนวก ง เฉลยแบบฝึกหัดท้ายบท	329
บรรณานุกรม	347
ดัชนี	349
ประวัติผู้เขียน	357

บทที่ 1

ไฟฟ้าสถิต

บทนำ

ในเนื้อหาวิชาฟิสิกส์ สิ่งที่เราได้เรียนรู้มาคือ แรงเป็นสิ่งที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่ หากสังเกตรอบ ๆ ตัวจะพบว่าในธรรมชาติมีแรงเกิดขึ้นมากมาย ก่อให้เกิดการเคลื่อนที่ของวัตถุทั้งหลายซึ่งปรากฏให้เห็นในชีวิตประจำวัน ยกตัวอย่างเช่น แรงผลัก แรงดัน แรงโน้มถ่วง แรงแม่เหล็ก และแรงอื่น ๆ อย่างไรก็ตาม นักฟิสิกส์ได้ศึกษาแรงต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในธรรมชาติ และได้แบ่งแรงทั้งหลายออกเป็นแรงพื้นฐานในธรรมชาติสี่ชนิด แรงชนิดแรกคือ แรงโน้มถ่วง ซึ่งเป็นแรงที่ทำให้วัตถุติดอยู่บนพื้นโลก และทำให้วัตถุตกลงสู่พื้น แรงชนิดที่สองคือ แรงทางไฟฟ้า และแรงทางแม่เหล็ก เกี่ยวข้องกับแรงดูด หรือผลักระหว่างประจุไฟฟ้า และแรงดูด หรือผลักระหว่างขั้วแม่เหล็ก แรงนี้คือแรงที่ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่รอบนิวเคลียส เกิดเป็นอะตอม ชนิดที่สามคือแรงนิวเคลียร์อย่างอ่อน คือแรงที่เกี่ยวข้องกับการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสี และชนิดที่สี่แรงนิวเคลียร์อย่างเข้มคือแรงที่ยึดเหนี่ยวระหว่างควาร์กในโปรตอนและนิวตรอน ทั้งยังเป็นแรงที่ทำให้โปรตอนยึดเหนี่ยวกับนิวตรอนในนิวเคลียสของอะตอม

ในบทที่ 1 เป็นเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับแรงทางไฟฟ้าซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของแรงพื้นฐานในธรรมชาติ ในบทนี้ประกอบด้วยสี่หัวข้อ ได้แก่หัวข้อที่ 1.1 มีเนื้อหาเกี่ยวข้องกับขั้วไฟฟ้า และการคำนวณหาแรงทางไฟฟ้า ในหัวข้อที่ 1.2 จะเป็นการคำนวณสนามไฟฟ้าจากจุดประจุ และแรงเมื่อจุดประจูกถูกนำไปอยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า ในหัวข้อที่ 1.3 จะเป็นกระบวนการที่ใช้ในการคำนวณหาสนามไฟฟ้าที่เกิดจากประจุไฟฟ้าที่มีรูปร่าง และในหัวข้อที่ 1.4 จะเป็นการใช้กฎของเกาส์ซึ่งเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่ใช้คำนวณหาสนามไฟฟ้าสำหรับประจุที่มีรูปร่าง

1.1 ประจุไฟฟ้า และแรงทางไฟฟ้า

1.1.1 ประจุไฟฟ้า

แรงทางไฟฟ้าคือแรงที่เกิดขึ้นกับวัตถุที่มีประจุไฟฟ้า และจะสามารถทำให้วัตถุนั้นเกิด ความเร่งได้ตามกฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตัน แต่แรงทางไฟฟ้าต่างจากแรงโน้มถ่วง โดยแรง โน้มถ่วงเป็นแรงดึงดูดเพียงอย่างเดียว แต่แรงทางไฟฟ้ามีทั้งแรงดูด และแรงผลักขึ้นอยู่กับ *ประจุ ไฟฟ้า (electric charges)* ที่เกี่ยวข้อง ประจุไฟฟ้ามีสองชนิดคือ ประจุบวก และประจุลบ แต่ การมีประจุในสสาร หรืออนุภาคสามารถจัดได้เป็นสี่กลุ่ม ได้แก่ มีประจุบวก มีประจุลบ เป็นกลาง ทางไฟฟ้า และไม่มีประจุ สำหรับการมีประจุบวก และลบ หากวัตถุที่มีประจุเหมือนกันถูกจับมา วางอยู่ใกล้กัน แรงไฟฟ้าที่เกิดจะเป็นแรงผลัก เช่น ลูกโป่งที่มีประจุบวกผลักกับกระดาษที่มีประจุ บวก ฯลฯ ถ้าวัตถุมีประจุต่างกันมาวางอยู่ใกล้กัน แรงทางไฟฟ้าที่เกิดจะเป็นแรงดูด เช่น ยางที่มี ประจุบวกดูดกับเส้นผมที่มีประจุลบ ฯลฯ วัตถุที่เป็นกลางคือวัตถุที่มีจำนวนประจุบวกเท่ากับ จำนวนประจุลบ วัตถุที่เป็นกลางจึงแทบไม่ตอบสนองต่อแรงทางไฟฟ้าเลย วัตถุส่วนใหญ่โดยปกติ จะอยู่ในสภาพที่เป็นกลางทางไฟฟ้า ส่วนสิ่งที่ไม่ประจุ คือสิ่งที่ไม่รู้ และไม่ค่อยสนใจใด ๆ ต่อ แรงทางไฟฟ้าเลย ตัวอย่างเช่น นิวตริโน (*neutrinos*) และโฟตอน (*photon*)

ในระดับอะตอม อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าจะได้แก่ อิเล็กตรอน ที่มีประจุชนิดลบ และ โปรตอน ที่มีประจุไฟฟ้าชนิดบวก อะตอมโดยปกติจะมีสภาพเป็นกลางทางไฟฟ้า คือมีจำนวน อิเล็กตรอน เท่ากับจำนวนโปรตอน หากอะตอมถูกกระตุ้นจนอิเล็กตรอนหลุดออกไป อะตอมนั้น จะมีประจุบวก เรียกว่าไอออนบวก สสารที่มีไอออนบวกอยู่มากก็จะกลายเป็นวัตถุที่มีประจุบวก ในทางตรงข้าม หากอะตอมรับอิเล็กตรอนมาเพิ่ม ก็จะทำให้อะตอมมีจำนวนอิเล็กตรอนมากกว่า จำนวนโปรตอน เกิดเป็นอะตอมที่มีประจุลบ เรียกว่าไอออนลบ สสารที่มีไอออนลบอยู่มากก็จะ กลายเป็นวัตถุที่มีประจุลบนั่นเอง

ภายในอะตอม อิเล็กตรอนคืออนุภาคมูลฐานที่มีประจุไฟฟ้าชนิดลบ และมีค่าประจุเป็น $e = 1.602 \times 10^{-19}$ C หรือเขียนเป็นตัวแปร $-e$ นิวตรอนไม่ใช่อนุภาคมูลฐาน ในปัจจุบันมี

แบบจำลองมาตรฐานที่อธิบายว่านิวตรอนประกอบขึ้นจากอนุภาคมูลฐานที่มีประจุไฟฟ้าในกลุ่มของ *ควาร์ก (quarks)* จำนวน 3 ตัว คือ *ควาร์กอัพ (up quark)* 1 ตัว มีประจุ $+2e/3$ และ *ควาร์กดาวน์ (down quark)* 2 ตัว แต่ละตัวมีประจุ $-e/3$ ประจุไฟฟ้าของควาร์กทุกตัวรวมกันเป็น $+2e/3 - e/3 - e/3 = 0$ จึงสอดคล้องกับหลักเกณฑ์ว่านิวตรอนมีประจุบวกเท่ากับประจุลบ จึงถือว่าเป็น กลางทางไฟฟ้า (ไม่ใช่ไม่มีประจุ) สำหรับโปรตอนก็ยังไม่ใช่อนุภาคมูลฐานเช่นเดียวกับนิวตรอน แบบจำลองมาตรฐานอธิบายว่าโปรตอนประกอบขึ้นจากควาร์ก จำนวน 3 ตัว คือ *ควาร์กอัพ* 2 ตัว และ *ควาร์กดาวน์* 1 ตัว ประจุไฟฟ้ารวมสำหรับโปรตอนจึงเป็น $+2e/3 + 2e/3 - e/3 = +1e$ ทำให้โปรตอนมีประจุชนิดบวก และมีค่าประจุเท่ากับค่าประจุของอิเล็กตรอน (วีระศักดิ์, 2559, หน้า 273)

ตาราง แสดงประจุของอนุภาคประกอบบะตอม

อนุภาค	ประจุ
อิเล็กตรอน	$-1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ หรือ ประมาณ $-1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$
โปรตอน	$+1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ หรือ ประมาณ $+1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$
นิวตรอน	0 C

ที่มา ผู้เขียน, 2560

1.1.2 กฎของคูลอมบ์

หลังจากที่กล่าวถึงชนิดของประจุ และชนิดของแรงที่เกิดขึ้นแล้ว ต่อไปจะเป็นการคำนวณหาแรง (ทั้งขนาด และทิศทาง) หากนำวัตถุที่มีประจุไฟฟ้า (หรือเรียกสั้น ๆ ว่า ประจุ) ตั้งแต่สองประจุขึ้นไปมาวางไว้ แรงทางไฟฟ้าสามารถคำนวณได้ โดยใช้ *กฎของคูลอมบ์ (Coulomb's law)* โดย นักฟิสิกส์ และวิศวกรชาวฝรั่งเศสชื่อ *ชาร์ล-โอกุสต์แต็ง เดอ กูลง (Charles-Augustin de Coulomb)* ที่สรุปว่า ขนาดของแรงทางไฟฟ้าระหว่างจุดประจุคือ

$$F = \frac{kq_1q_2}{r^2} \quad (1.1)$$

โดย q_1 และ q_2 คือค่าประจุไฟฟ้าในหน่วย คูลอมบ์ C โดยให้แทนค่าตัวเลขของประจุ ไม่ต้องสนใจแทนเครื่องหมายของประจุ ค่า r คือระยะห่างระหว่างประจุในหน่วย เมตร m ส่วน k คือค่าคงตัวของคูลอมบ์ (Coulomb's constant) เป็นค่าที่ขึ้นกับบริเวณที่ประจุทั้งสองตั้งอยู่ ถ้าบริเวณนั้นเป็นสุญญากาศ จะได้ $k = 8.988 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2$ (โดยในการคำนวณโจทย์ จะขอใช้ $k = 9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2$) และเป็นค่าที่มากที่สุด หากประจุทั้งสองถูกวางในตัวกลางอื่น เช่น ถูกวางในน้ำ หรือถูกฝังไว้ในพลาสติก ค่า k จะถูกแทนด้วยค่าคงตัวใหม่สำหรับตัวกลางนั้น ซึ่งจะมีค่าลดลง รายละเอียดในส่วนนี้จะกล่าวถึงในหัวข้อที่ 2.3 หน้า 105

มีบ่อยครั้งที่ k จะถูกแทนด้วย $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ C}^2 / \text{N} \cdot \text{m}^2$ คือ *สภาพยอมของสุญญากาศ (permittivity of free space)* ที่สัมพันธ์กันโดย

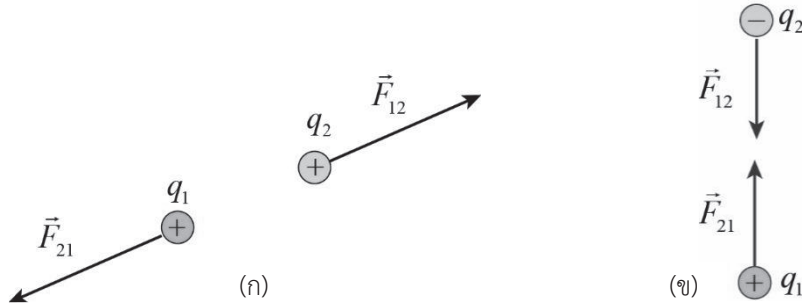
$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \quad (1.2)$$

สภาพยอมโดยทั่วไปจะใช้ตัวแปร ϵ คือปริมาณที่เป็นลักษณะเฉพาะของตัวกลาง และเป็นค่าที่บอกว่าในตัวกลางนั้น (เช่น สุญญากาศ น้ำ แก้ว ฯลฯ) มีการส่งผ่านแรงทางไฟฟ้าได้มากหรือน้อย ในตัวกลางที่มีค่า ϵ น้อย จะมีขนาดแรงระหว่างประจุมาก ในสุญญากาศมีค่า $\epsilon = \epsilon_0$ ซึ่งเป็นค่าน้อยที่สุด แรงทางไฟฟ้าจึงมีขนาดมากที่สุดในสุญญากาศ ส่วนตัวกลางอื่น ๆ จะมีค่า ϵ ที่เพิ่มมากขึ้นจึงทำให้แรงระหว่างประจุในตัวกลางนั้นมีค่าลดลง

กฎของคูลอมบ์ตามสมการ (1.1) มีข้อจำกัดที่ใช้ได้กับจุดประจุ (หรือภายนอกวัตถุรูปทรงกลมที่ประจุกระจายตัวอย่างมีสมมาตรทรงกลม) เท่านั้น หากประจุมีรูปร่างอื่นที่ไม่ใช่จุด (หรือไม่ใช่วัตถุรูปทรงกลมดังกล่าว) จะใช้สมการนี้คำนวณหาขนาดแรงไม่ได้

แรงเป็นปริมาณเวกเตอร์จึงมีทั้งขนาด และทิศทาง การระบุทิศทางของแรงขอให้ยึดหลักการว่า สำหรับประจุชนิดเดียวกัน ทิศของแรงจะเป็นในลักษณะของแรงผลัก สำหรับประจุต่างชนิดกัน ทิศของแรงจะเป็นในลักษณะของแรงดูดในรูป 1.1 (ก) คือกรณีของแรงทางไฟฟ้า

ระหว่างประจุบวก q_1 และประจุบวก q_2 วัตถุทั้งสองมีประจุบวกเหมือนกัน รูป 1.1 (ก) แสดงให้เห็นว่าแรง $\vec{F}_{21}$ คือแรงที่ประจุ 2 กระทำต่อประจุ 1 จะมีทิศในลักษณะเฉียงลงทางซ้าย (เพราะเป็นทิศที่สอดคล้องกับการผลักกัน) ส่วน $\vec{F}_{12}$ คือแรงที่ประจุ 1 กระทำต่อประจุ 2 มีทิศในลักษณะเฉียงขึ้นทางขวา (เพราะเป็นทิศที่สอดคล้องกับการผลักกัน)



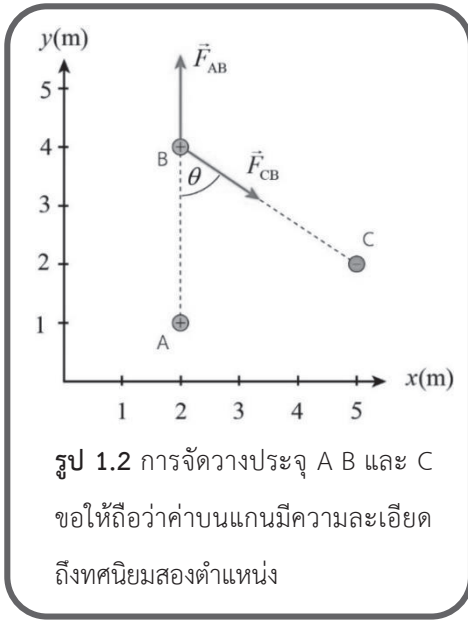
รูป 1.1 (ก) แสดงแรงผลักระหว่างประจุ และ (ข) แสดงแรงดูดระหว่างประจุ รูป (ก) และรูป (ข) ไม่มีความเกี่ยวข้องกัน

ส่วนในรูป 1.1 (ข) คือกรณีของแรงทางไฟฟ้าระหว่างประจุบวก q_1 และประจุลบ q_2 วัตถุทั้งสองมีชนิดประจุต่างกัน แรง $\vec{F}_{21}$ มีทิศขึ้น (เพราะเป็นทิศที่สอดคล้องกับการดูดกัน) ส่วน $\vec{F}_{12}$ มีทิศลง (เพราะเป็นทิศที่สอดคล้องกับการดูดกัน)

ไม่ว่าจะเป็นกรณีตามรูป 1.1 (ก) หรือ 1.1 (ข) แรง $\vec{F}_{21}$ และ $\vec{F}_{12}$ สัมพันธ์กันโดย

$$\vec{F}_{21} = -\vec{F}_{12} \quad (1.3)$$

ซึ่งหมายความว่าแรงทั้งสองมีขนาดของแรงเท่ากันแต่มีทิศตรงกันข้าม ความจริงแล้ว $\vec{F}_{21}$ และ $\vec{F}_{12}$ คือแรงคู่ กิริยาปฏิกิริยา ตามกฎการเคลื่อนที่ข้อที่สามของนิวตัน



ตัวอย่างที่ 1.1 มีประจุอยู่สามประจุถูกวางตรึงอยู่ในพิกัด x, y ดังรูป 1.2 ประจุ A เป็นชนิดบวก ขนาด $3 \mu\text{C}$ ประจุ B เป็นประจุบวกขนาด $7 \mu\text{C}$ ส่วนประจุ C เป็นประจุลบขนาด $5 \mu\text{C}$ จงหาแรงลัพธ์ที่กระทำต่อประจุ B

วิธีทำ

แรง $\vec{F}_{AB}$ เป็นแรงผลัก ส่วน $\vec{F}_{CB}$ เป็นแรงดูด คำนวณหาขนาดของแรงทั้งสองได้โดยใช้สมการ (1.1)

$$F_{AB} = \frac{(9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2)(3 \times 10^{-6} \text{ C})(7 \times 10^{-6} \text{ C})}{(3 \text{ m})^2} = 2.1 \times 10^{-2} \text{ N}$$

$$\text{และ } F_{CB} = \frac{(9 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2)(5 \times 10^{-6} \text{ C})(7 \times 10^{-6} \text{ C})}{(3 \text{ m})^2 + (2 \text{ m})^2} = 2.42 \times 10^{-2} \text{ N}$$

โดยระยะระหว่างประจุ C และ B ต้องคำนวณด้วยหลัก *พีทาโกรัส* แรงลัพธ์ที่กระทำต่อประจุ B คือการรวมแรงทั้งสองแบบเวกเตอร์ ดำรานี้แนะนำให้ผู้เรียนใช้วิธี *แยกองค์ประกอบเวกเตอร์* (ถัดจากนี้จะเขียนโดยย่อว่า *แยกเวกเตอร์* เพื่อความกระชับ) ให้อยู่ในรูปทิศ $\hat{i}, \hat{j}, \hat{k}$ สำหรับ $\vec{F}_{AB}$ ทำได้โดยง่าย คือ $\vec{F}_{AB} = (2.1 \times 10^{-2}) \hat{j} \text{ N}$ แต่กับ $\vec{F}_{CB}$ ต้องใช้การแยกเวกเตอร์แรง

$$F_{CB,x} = (2.42 \times 10^{-2} \text{ N}) \sin \theta = (2.42 \times 10^{-2} \text{ N}) \frac{3}{\sqrt{9+4}} = 2.01 \times 10^{-2} \text{ N}$$

$$F_{CB,y} = (2.42 \times 10^{-2} \text{ N}) \cos \theta = (2.42 \times 10^{-2} \text{ N}) \frac{2}{\sqrt{9+4}} = 1.34 \times 10^{-2} \text{ N}$$

จากรูป จะวิเคราะห์ได้ว่าองค์ประกอบ $F_{CB,x}$ มีทิศชี้ไปทาง $+x$ การใส่ทิศทางจะใช้สัญลักษณ์ $\hat{i}$ ส่วน $F_{CB,y}$ มีทิศชี้ไปทาง $-y$ การใส่ทิศทางจึงใช้ $-\hat{j}$ จึงสามารถเขียนเวกเตอร์ $\vec{F}_{CB}$ เป็น

$$\vec{F}_{CB} = (2.01 \times 10^{-2})\hat{i} - (1.34 \times 10^{-2})\hat{j} \text{ N}$$

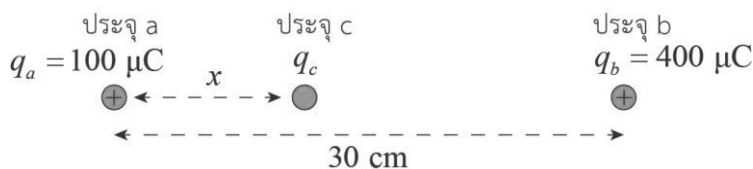
หาแรงลัพธ์ได้เป็น $\vec{F}_B = \vec{F}_{AB} + \vec{F}_{CB} = (2.01 \times 10^{-2})\hat{i} + (0.76 \times 10^{-2})\hat{j} \text{ N}$

ซึ่งมีขนาด $F_B = \sqrt{(2.01 \times 10^{-2} \text{ N})^2 + (0.76 \times 10^{-2} \text{ N})^2} = 2.15 \times 10^{-2} \text{ N}$

ตัวอย่างที่ 1.2 ถ้ามีประจุ a $+100 \mu\text{C}$ และประจุ b $+400 \mu\text{C}$ จัดให้ประจุทั้งสองตรึงอยู่กับที่ ห่างกันเป็นระยะ 30 cm ต้องการนำประจุ c ที่ไม่เจาะจงชนิดประจุ และมีขนาดประจุไม่เท่ากับ ศูนย์มาวาง (ไม่ตรึง) อยู่ระหว่างประจุ a กับ b จะต้องวางที่ระยะห่างจากประจุ a เท่าใด ประจุ c จึงจะมีแรงลัพธ์เป็นศูนย์ และอยู่นิ่งได้

วิธีทำ

จากข้อมูลโจทย์ ให้สมมติว่าประจุ c คือ q_c ถูกวางอยู่ที่ระยะ x จากประจุ a การวาดรูปควรเป็นตามที่แสดงในรูป 1.3



รูป 1.3 การจัดวางประจุทั้งสาม โดยได้สมมติให้ประจุ c ถูกวางอยู่ระหว่างประจุ a และประจุ b

ประจุ c ถูก แรง $\vec{F}_{ac}$ และ $\vec{F}_{bc}$ กระทำ แต่ทิศของแรงทั้งสองจะเสริมกัน หรือหักล้างกัน ก็ขึ้นกับตำแหน่งที่วาง หากวางประจุ c ไว้ทางซ้ายของประจุ a หรือ ไว้ทางขวาของประจุ c แรงทั้งสองจะเสริมกัน ทำให้ประจุ c ไม่มีโอกาสอยู่นิ่ง แต่ถ้าวางประจุ c อยู่ระหว่างประจุทั้งสองตาม รูป 1.3 การวางนี้จะทำให้แรงทั้งสองนี้หักล้างกัน ไม่ว่า q_c จะเป็นบวก หรือลบก็ตาม จากที่

โจทย์ต้องการให้ประจุ c อยู่นิ่ง หมายความว่า จะต้องเขียนสมการโดยกำหนดให้แรงที่กระทำมีความสมดุล นั่นคือ $F_{ab} = F_{bc}$ จากนั้นแก้สมการหา x โดย

$$\frac{kq_a q_c}{x^2} = \frac{kq_b q_c}{[(30 \text{ cm}) - x]^2}$$

แทนค่า q_a และ q_b แล้วถอดรากที่สอง ได้

$$\frac{1}{x} = \frac{2}{(30 \text{ cm}) - x}$$

ซึ่งแก้สมการได้เป็น $x = 10 \text{ cm}$ จึงสรุปเป็นคำตอบว่า ต้องวางประจุ c ที่ห่างจากประจุ a เป็นระยะ 10 cm จึงจะทำให้ประจุ c อยู่นิ่ง
