

$$E = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

$$E = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

$$E - Li = - \frac{d\Phi}{dt}$$

$$E = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

ELI the ICE man

$$E = -N_k \frac{d\Phi}{dt}$$

ฟิสิกส์ไร้พ่าย 3

มหาคัมภีร์ไฟฟ้าและแม่เหล็ก

ผศ.ดร.วัชรินทร์ เมขลา

เครื่องสอบ

สอบ. / A-Level
ฟิสิกส์โอลิมปิก

คำนำ (Preface)

ในโลกของฟิสิกส์ หากกลศาสตร์คือ "วิชากระบวนท่า" ที่เราสามารถมองเห็นการเคลื่อนไหว การชน และการตกอย่างอิสระได้ด้วยตาเปล่า วิชาแม่เหล็กไฟฟ้าก็เปรียบเสมือน "ลมปราณ" ที่ไร้รูปร่าง จับต้องไม่ได้ แต่มองเห็นได้ผ่านอนุภาพที่ทรงพลังและขับเคลื่อนจักรวาลนี้อยู่เบื้องหลัง

จอมยุทธ์น้อยหลายคนมักถวิลใฝ่เมื่อก้าวเข้าสู่สมรภูมิของไฟฟ้าและแม่เหล็ก เพราะความไร้รูปร่างของมันทำให้เราหลงทางอยู่ในเขาวงกตของสมการและสูตรที่ซับซ้อน "ฟิสิกส์ไร้พ่าย เล่ม ๓" (มหาคัมภีร์ไฟฟ้าและแม่เหล็ก) เล่มนี้ จึงถูกร้อยเรียงขึ้นมาเพื่อทลายกำแพงความกลัวเหล่านั้น และเปลี่ยนนามธรรมที่จับต้องไม่ได้ ให้กลายเป็นภาพเวกเตอร์ที่ชัดเจนในห้วงความคิด

ตลอดเส้นทางการถ่ายทอดวิชาและขัดเกลาลูกศิษย์มากกว่า ๒๐ ปี ผมพบว่าความพ่ายแพ้ในห้องสอบ ไม่ได้เกิดจากการจำสูตรไม่ได้ แต่เกิดจากการมองไม่เห็น "สัจธรรม" ที่ซ่อนอยู่ในโจทย์ คัมภีร์เล่มนี้จึงไม่ใช่แค่การรวบรวมทฤษฎีที่ถูกต้องตามหลักฟิสิกส์ ๑๐๐% แต่ยังเป็นการตีอาวุธทางความคิด ผ่านเทคนิค "The First ๑๐ Seconds" การสแกนโจทย์ด้วยวิสามาร และ "Pro's Hacks" ที่ช่วยปลดล็อกค่ายกลข้อสอบระดับประเทศ ไม่ว่าจะเป็น สอน., A-Level หรือโอลิมปิกวิชาการ ให้คลี่คลายลงได้ในเสี้ยววินาที

จากไฟฟ้าสถิตที่หยุดนิ่ง สู่กระแสไฟฟ้าที่ไหลเชี่ยว จนถึงการสั่นพ้องของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและการส่งกำลังไฟฟ้าระยะทางไกล ทุกบทเรียนถูกออกแบบมาเพื่อรีดเค้นศักยภาพสูงสุดของผู้ฝึกฝน

ขอให้จอมยุทธ์น้อยทุกท่านพึงระลึกไว้เสมอว่า ข้อสอบที่ยากคือธรรมชาติที่กำลังใช้ "แรงต้าน" เพื่อทดสอบความมุ่งมั่น จงใช้ความพยายามสวนกระแสกลับไป แล้วเปลี่ยนแรงต้านนั้นให้กลายเป็นพลังงานที่แข็งแกร่งตั้งสัจธรรมของกฎของเลนซ์ (Lenz's Law)

เมื่อใดที่ท่านมองเห็นลมปราณแห่งไฟฟ้าและแม่เหล็กได้อย่างถ่องแท้ เมื่อนั้น... จะไม่มีสมรภูมิสอบใดที่ท่านพิชิตไม่ได้

ขอเจริญรอยตามสัจธรรมแห่งจักรวาล และประสบความสำเร็จในทุกสนามสอบครับ

ผศ.ดร. วชิรกร เมฆลา

ผู้เขียนและผู้ถ่ายทอดวิชา

สำนักพิมพ์สัจจะญาณ

กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements)

มหาคัมภีร์ "พิลึกส์ไร้พ่าย เล่ม ๓" สำเร็จลุล่วงและออกมาเป็นรูปเล่มที่สมบูรณ์ได้นั้น เกิดจากแรงสนับสนุนและแรงบันดาลใจจากหลายภาคส่วนที่ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณและขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณครอบครัวและครูบาอาจารย์ในสายวิชาพิลึกส์ทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชา วารสารฐานทางปัญญา และหล่อหลอมจิตวิญญาณความเป็นนักวิทยาศาสตร์ให้แก่ข้าพเจ้า จนสามารถนำความรู้และประสบการณ์มาถ่ายทอดร้อยเรียงเป็นตัวอักษรเพื่อส่งต่อสู่รุ่นต่อไปได้อย่างเต็มภาคภูมิ

ขอขอบคุณเหล่านักเรียนและเยาวชนทุกคนที่เป็นแรงบันดาลใจสำคัญในการสร้างสรรค์ผลงานชิ้นนี้ ความกระหายในความรู้และคำถามที่ท้าทายของพวกเขา คือแรงผลักดันที่ทำให้ข้าพเจ้ามุ่งมั่นที่จะย่อเยื่อหาทางพิลึกส์ที่ซับซ้อนให้กลายเป็นเรื่องที่เข้าใจง่ายและนำไปใช้ได้จริงในทุกสมรภูมิสอบ

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าหวังเป็นอย่างยิ่งว่า มหาคัมภีร์เล่มนี้จะเป็นแสงสว่างนำทางและเป็นส่วนหนึ่งในการสร้างบุคลากรสายวิทยาศาสตร์ที่แข็งแกร่งให้แก่ประเทศชาติสืบไป

ผศ.ดร. วัชรินทร์ เมฆลา

พฤษภาคม ๒๕๖๙

อภิธานศัพท์ (Glossary) พจนานุกรมฉบับมหาคัมภีร์ฟิสิกส์ไร้พายุ

เพื่อให้ผู้อรรถรสในการอ่านและการฝึกฝนวิชาฟิสิกส์ในหนังสือเล่มนี้เป็นไปอย่างลื่นไหลและทรงพลัง ขอให้จอมยุทธ์น้อยทุกท่านทำความเข้าใจ "ศัพท์เฉพาะ" ที่ถูกบัญญัติขึ้นเพื่อใช้เป็นกุญแจไขความลับของจักรวาลทางฟิสิกส์ ดังต่อไปนี้ครับ

๑. สัจธรรม (The Ultimate Truth / Core Physics Concept)

ความหมายในคัมภีร์ กฎเกณฑ์ที่อยู่เหนือสรรพสิ่ง เป็นความจริงแท้ของธรรมชาติที่ไม่มีวันเปลี่ยนแปลง ไม่ว่าโจทก์จะพลิกแพลงไปกี่ที่ลบ หากผู้ฝึกฝนยึดมั่นในสัจธรรม จะไม่มีวันหลงทาง

ความหมายทางฟิสิกส์ กฎพื้นฐานทางฟิสิกส์ (Fundamental Laws) เช่น กฎการอนุรักษ์พลังงาน, กฎของโอห์ม, กฎของฟาราเดย์ หรือนิยามตั้งต้นของสูตรต่าง ๆ ที่ห้ามละเมิดเด็ดขาด

๒. วิชามาร (Pro's Hack / Shortcut)

ความหมายในคัมภีร์ เคล็ดลับลับหรือทางลัดที่ใช้สยบข้อสอบ หลายกรอบการคิดแบบเดิมๆ ที่ต้องทดเลขยาวเหยียด เป็นวิชาที่เน้นความเด็ดขาด รวดเร็ว และจบการต่อสู้ได้ในพริบตา

ความหมายทางฟิสิกส์ เทคนิคลัด สูตรลัดที่ผ่านการจัดรูปมาแล้ว หรือมุมมองการแก้โจทย์ปัญหาแบบพลิกแพลงที่ช่วยลดเวลาในการคำนวณลงอย่างมหาศาล (เช่น การใช้สัดส่วน การสแกนตัดข้อยล์)

๓. จอมยุทธ์น้อย (The Young Martial Artist)

ความหมายในคัมภีร์ ตัวแทนของผู้เรียน นักเรียน หรือผู้อ่านทุกคนที่กำลังฝึกฝนวิชาความรู้ ดังจอมยุทธ์ที่กำลังสะสมลมปราณเพื่อเตรียมตัวลงสู่สมรภูมิ

ความหมายทางฟิสิกส์ นักเรียนที่เตรียมตัวสอบแข่งขันในสนามต่างๆ (สอวน., A-Level, โควตา ฯลฯ)

๔. ค่ายกล (The Matrix / Complex Circuit)

ความหมายในคัมภีร์ ด่านทดสอบหรือภาพลวงตาที่ศัตรู (ผู้ออกข้อสอบ) สร้างขึ้นเพื่อให้จอมยุทธ์น้อยสับสน หลงทิศทาง และสูญเสียพลังงาน

ความหมายทางฟิสิกส์ วงจรไฟฟ้าที่ดูซับซ้อน (เช่น วงจรบริดจ์ วงจรอนันต์ วงจรพัสสมมาตร) หรือโจทย์ที่มีตัวแปรขยะให้มาเพื่อหลอกล่อให้คิดผิดทาง

๕. เนตรสแกนกรรม / การสแกนกรรม (Pattern Recognition / The First ๑๐ Seconds)

ความหมายในคัมภีร์ ดวงตาที่สามารถมองเห็นรูปลักษณ์นอกของกายกล เห็นถึงโครงสร้างที่แท้จริงของปัญหาตั้งแต่แรกเห็น เป็นวิชาที่ต้องใช้ภายใน ๑๐ วินาทีแรกที่มองโจทย์

ความหมายทางฟิสิกส์ ทักษะการวิเคราะห์กราฟ การหาจุดวิกฤต (เช่น จุดเรโซแนนซ์ หรือ จุดสมดุล) หรือการจับคีย์เวิร์ดสำคัญในโจทย์ (เช่น คำว่า "อุดมคติ" หรือ "ลอยนิ่ง" หรือ "อินเฟส") ก่อนที่จะเริ่มลงมือเขียนสมการ

๖. ลมปราณ / พลังวัตร (Qi / Energy & Power)

ความหมายในคัมภีร์ พลังขับเคลื่อนที่ไหลเวียนอยู่ภายในกาย หรือพลังที่ถูกปลดปล่อยออกมาเพื่อกระทำต่อสิ่งรอบข้าง

ความหมายทางฟิสิกส์ กระแสไฟฟ้า (I) พลังงานไฟฟ้า (W) กำลังไฟฟ้า (P) หรือแรงเคลื่อนไฟฟ้า (E) ที่หมุนเวียนอยู่ในวงจร

๗. จุดดักความตาย / จุดดักควาย (The Fatal Trap)

ความหมายในคัมภีร์ หลุมพรางอาบยาพิษที่ผู้ออกข้อสอบขุดล่อไว้ ซึ่งร้อยทั้งร้อยของคนที่ไม่รู้สังขาร มักจะตกลงไปตายอย่างน่าเสียดาย

ความหมายทางฟิสิกส์ ข้อยส์หลอกยอติต หรือจุดผิดพลาดทางคณิตศาสตร์/ฟิสิกส์ที่นักเรียนมักจะเผลอทำบ่อย ๆ (เช่น การสลับยกกำลังสอง หรือ การใช้เครื่องหมายผิดในเวกเตอร์ หรือ การคิดว่าตัวเก็บประจุมีกระแสไหลผ่านในไฟฟ้ากระแสตรงสภาวะคงตัว)

๘. มหาคัมภีร์ (The Great Scripture)

ความหมายในคัมภีร์ สุดยอดตำราที่รวบรวมแก่นวิชาทั้งสังขารและวิชามารเข้าไว้ด้วยกันอย่างสมบูรณ์

ความหมายทางฟิสิกส์ หนังสือ "ฟิสิกส์ไร้พ่าย" เล่มนี้ ที่ถูกกลั่นกรองและร้อยเรียงมาเพื่อให้ผู้อ่านนำไปใช้ประโยชน์สูงสุดในการสอบ

สารบัญ

บทที่	หัวข้อย่อย (Subtopics)	หน้า
1	ไฟฟ้าสถิต แรง และสนามไฟฟ้า	1
	1.1 ประจุไฟฟ้าและแรงคูลอมบ์ การรวมแรงแบบเวกเตอร์	2
	1.2 สนามไฟฟ้า (Electric Field) จากจุดประจุและแผ่นคู่ขนาน	9
	1.3 จุดสะเทิน (Neutral Point) ของสนามไฟฟ้าและแรงลัพธ์	15
	1.4 การเคลื่อนที่ของประจุในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (ฟิซชันโปรเจกไทล์)	19
	1.5 The First 10 Seconds การสแกนเครื่องหมายประจุเพื่อกำหนดทิศทางเวกเตอร์	19
	1.6 Pro's Hack รวมเทคนิคจัดการหาจุดสะเทินและแรงลัพธ์ในใจ	21
2	ศักย์ไฟฟ้าและพลังงานไฟฟ้า	27
	2.1 พลังงานศักย์ไฟฟ้า และศักย์ไฟฟ้า ปริมาณสเกลาร์มหากั	21
	2.2 งานในการเคลื่อนย้ายประจุ	30
	2.3 ศักย์ไฟฟ้าบนตัวนำทรงกลมและเส้นแรงไฟฟ้า	32
	2.4 The First 10 Seconds การใส่เครื่องหมายประจุในสมการสเกลาร์ (จุดสลับ)	41
	2.5 Pro's Hack รวมเทคนิคจัดการหาศักย์ไฟฟ้าที่จุดศูนย์กลางรูปทรงสมมาตร	48
3	ตัวเก็บประจุและความจุไฟฟ้า (Capacitors)	49
	3.1 นิยาม และพลังงานสะสม	52
	3.2 การต่อตัวเก็บประจุ	53
	3.3 ไดอิเล็กทริกและการเปลี่ยนระยะห่าง	55
	3.4 The First 10 Seconds การเช็คปริมาณที่ "คงที่" (Q หรือ V) เมื่อดึงถ่านออก	57

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หัวข้อย่อย (Subtopics)	หน้า
3	3.5 Pro's Hack เทคนิคลัด	59
	3.6 ตัวอย่างโจทย์ประยุกต์	61
4	ไฟฟ้ากระแสตรง 1 (DC Circuits - Fundamentals)	63
	4.1 กระแสไฟฟ้าในตัวนำและความเร็วลอยเลื่อน	63
	4.2 กฎของโอห์มและความต้านทาน	67
	4.3 สภาพต้านทานและการรีดลวดโลหะ	70
	4.4 The First 10 Seconds การอ่านรหัสสีตัวต้านทานและการสแกนหน่วย Omega	74
	4.5 Pro's Hack รวมเทคนิคลัดหาความต้านทานใหม่หลังดัด/รีดลวดใน 3 วินาที	76
5	ไฟฟ้ากระแสตรง 2 (วงจรซับซ้อนและเครือข่าย)	79
	5.1 การต่อความต้านทานแบบอนุกรม ขนาน และวงจรบริดจ์	79
	5.2 กฎของเคอร์ชอฟฟ์ สำหรับวงจรหลาย Loop	86
	5.3 อาวุธลับของนักเรียนไฟฟ้า ทฤษฎีเทเวนิน	91
	5.4 วงจรแบ่งแรงดัน และการลัดวงจร	94
	5.5 The First 10 Seconds การหา "จุดที่มีศักย์เท่ากัน" เพื่อตัดตัวต้านทานทิ้ง	96
	5.6 การยุบวงจรอนันต์	98
	5.7 Pro's คัมภีร์เทพยุบวงจร	100
	5.8 ตัวอย่างโจทย์เทพ	102
	5.9 Summary คัมภีร์ปราบเซียน	104

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หัวข้อย่อย (Subtopics)	หน้า
6	พลังงานและเครื่องมือวัดไฟฟ้า (Power & Instruments)	105
	6.1 พลังงานและกำลังไฟฟ้า หลอดไฟดวงไหนสว่างที่สุด?	105
	6.2 การดัดแปลงแอมมิเตอร์และโวลต์มิเตอร์ (Shunt & Multiplier)	109
	6.3 โพรเทกซ์โอมิเตอร์และวีตสโตนบริดจ์	113
	6.4 The First 10 Seconds การเช็คสถานะ "สมดุล" ของสะพานเครื่องมือวัด	117
	6.5 Pro's Hack รวมเทคนิคการเปลี่ยนกัลวานมิเตอร์ให้วัดค่าได้ตามต้องการ	118
7	แม่เหล็กไฟฟ้า 1 (Magnetic Force)	123
	7.1 แรงแม่เหล็กกระทำต่อประจุ และรัศมีการโค้ง	124
	7.2 แรงกระทำต่อลวดที่มีกระแสและโมเมนต์ของแรงคู่ควบ	127
	7.3 สนามแม่เหล็กจากกระแสไฟฟ้า (กฎของแอมแปร์และโซเลนอยด์)	130
	7.4 The First 10 Seconds การใช้ "กฎมือขวาไม่หลงทิศ" (ไม่ต้องหมุนกระดาษ)	133
	7.5 Pro's Hack รวมเทคนิคค้นหาแรงและทิศทางในสนามแม่เหล็ก 3 มิติ	134
8	แม่เหล็กไฟฟ้า 2 (Electromagnetic Induction)	137
	8.1 ฟลักซ์แม่เหล็กและกฎของฟาราเดย์	138
	8.2 กฎของเลนซ์ (Lenz's Law) - กฎแห่งกรรมของฟิสิกส์	140
	8.3 แรงเคลื่อนไฟฟ้าเหนี่ยวนำในแท่งโลหะวิ่งตัดสนาม (Motional EMF)	142
	8.4 The First 10 Seconds การระบุทิศกระแสเหนี่ยวนำด้วยนิ้วมือใน 3 วินาที	144
	8.5 Pro's Hack รวมเทคนิคคำนวณการเปลี่ยนแปลงฟลักซ์และแรงต้านแม่เหล็ก	147

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หัวข้อย่อย (Subtopics)	หน้า
9	ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Circuits)	149
	9.1 ค่า RMS และความแตกต่างจากค่าสูงสุด	149
	9.2 ความต้านทานเชิงซ้อน ของวงจร R-L-C	152
	9.3 แผนภาพเฟเซอร์ (Phasor Diagram) และการหาเฟสต่าง	155
	9.4 The First 10 Seconds การเช็ค "L นำ C ตาม" (ELI the ICE man)	158
	9.5 Pro's Hack รวมเทคนิคการบวกเฟเซอร์ด้วยพีทาโกรัสแทนตรีโกณศ้อน	161
10	เรโซแนนซ์และทัศนอุปกรณ์ไฟฟ้า (Advanced Electromagnetism)	165
	10.1 ปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ในวงจรไฟฟ้า (Resonance)	165
	10.2 หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformers) และการส่งกำลังไฟฟ้าทางไกล	170
	10.3 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและสมบัติการโพลาไรเซชัน	174
	10.4 The First 10 Seconds การเช็คจุดพีคของกระแสที่ความถี่เรโซแนนซ์	178
	10.5 Pro's Hack รวมเทคนิคการคำนวณหม้อแปลงและการสูญเสียพลังงาน	180
ภาคผนวก	ตัวอย่างข้อสอบ สอน.	
ก	ตัวอย่างข้อสอบ สอน. บทที่ 1-3 ไฟฟ้าสถิต (Electrostatics) 30 ข้อ	185
ข	ตัวอย่างข้อสอบ สอน. 4-6 ไฟฟ้ากระแสตรง (DC Circuits) 30 ข้อ	198
ค	ตัวอย่างข้อสอบ สอน. 7-8 แม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetism & Induction) 30 ข้อ	213
ง	ตัวอย่างข้อสอบ สอน. 9-10 ไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Circuits) 30 ข้อ	222

บทที่1

ไฟฟ้าสถิต แรง และสนามไฟฟ้า

เวลาพูดถึง "ไฟฟ้าสถิต" น้อย ๆ หลายคนอาจจะนึกถึงตอนที่โดนรถเข็นในห้างสรรพสินค้า ช็อค หรือการเอาไม้บรรทัดมาถูผมแล้วดูดเศษกระดาษได้ ในวิชาฟิสิกส์ (ภาค 1) เราเรียนเรื่องการชนของวัตถุที่เรามองเห็นได้ด้วยตา แต่ในบทนี้ ธรรมชาติกำลังท้าทายเราด้วย "แรงที่ส่งผ่านความว่างเปล่า" ซึ่งบ่งการโครงสร้างของอะตอมไปจนถึงสมดุลของจักรวาลครับ

สัจธรรมของฟิสิกส์คือ "แรงไม่มีทางเกิดขึ้นเองโดยปราศจากต้นเหตุ (ทั้งนี้ต้นเหตุคือประจุอื่น)" ประจุไฟฟ้าที่อยู่นิ่ง ๆ ในบทนี้ไม่ได้หยุดนิ่งอย่างไร้ความหมาย แต่มันคือการกักเก็บพลังงานศักย์มหาศาลที่พร้อมจะปลดปล่อยออกมา และตรงคำว่า "สมดุลแห่งแรง" นี่แหละครับ คือจุดที่คนออกข้อสอบ A-Level และ สอน. ใช้เป็นสมรภูมิในการคัดคนเก่งออกจากคนท่องจำสูตร

แล้วหัวใจของไฟฟ้าสถิตคืออะไร? ให้ลองปรับ Mindset ใหม่ครับ จินตนาการว่าประจุไฟฟ้าไม่ได้มีไว้แค่ให้เราหาค่า $\vec{F}, F$ หรือ $\vec{E}, E$ แต่มันคือ "แหล่งกำเนิดสนามพลัง"



เมื่อประจุมาเจอกัน มันคือการปะทะกันของสนามพลังจนเกิดเป็น แรง



เมื่อประจุวางตัวในที่ว่าง มันคือการสร้าง ศักย์ ที่รอการเคลื่อนที่



ถ้าประจุไฟฟ้าคือ "จอมยุทธ์" แรงคูลอมบ์ก็คือ "กระบวรท่า" ที่ใช้เข้าจู่โจมกันนั่นเองครับ

ในบทนี้ อาจารย์จะพาเด็ก ๆ ไป "สแกนกรรม" โจทย์ไฟฟ้าสถิตที่ดูเหมือนยากให้กลายเป็นเรื่องง่าย ด้วยปลายนิ้วครับ!

1.1 ประจุไฟฟ้าและแรงคูลอมบ์ การรวมแรงแบบเวกเตอร์

ก่อนจะไปลุยโจทย์ ขอให้จำคอนเซปต์สั้น ๆ ไว้แค่นี้เลยครับ ประจุไฟฟ้า (q) คือ "ตัวต้นเหตุ" ส่วนแรงคูลอมบ์ ($\vec{F}$) คือ "ผลลัพธ์จากการปะทะ" ถ้าเราแยก "ขนาด" ออกจาก "ทิศทาง" ได้ บทนี้ก็กินหมูแล้วครับ!

1. แรงคูลอมบ์ (Coulomb's Law; $\vec{F}$)

ความแรงของแรงไฟฟ้าไม่ได้ขึ้นอยู่กับมวลเหมือนแรงโน้มถ่วง แต่ขึ้นอยู่กับ "ความเข้มข้นของประจุ" และ "ระยะห่าง" สมการทั่วไป ขนาดของแรงไฟฟ้าหาได้จากสมการ

$$F = \frac{kq_1q_2}{r^2}$$

โดย F คือ แรง (N) k คือ ค่าคงที่ ($k \approx 9 \times 10^9$) q_1, q_2 คือ ประจุที่กระทำต่อกัน มีหน่วยเป็นคูลอมบ์ (C) และ r คือ ระยะห่างระหว่างประจุทั้งสอง (m)

****ความรู้เพิ่มเติม r หมายถึง "ระยะห่างระหว่างจุดประจุ (Point Charges)" สองจุด โดยวัดความเป็นเส้นตรงที่เชื่อมต่อกันระหว่างจุดศูนย์กลางของประจุทั้งสอง กรณีวัตถุที่มีขนาด (Extended Bodies) หากประจุไม่ได้อยู่ในรูปของจุดประจุ (เช่น ทรงกลมที่มีประจุกระจายตัว) นิยามของ r จะเปลี่ยนไปตามลักษณะของวัตถุ

-  ทรงกลมที่มีประจุสมมาตร r คือระยะที่วัดจาก จุดศูนย์กลาง (Center) ของทรงกลมหนึ่งไปยังจุดศูนย์กลางของอีกทรงกลมหนึ่ง (ไม่ใช่ระยะห่างระหว่างผิววัตถุ)
-  วัตถุรูปทรงอิสระ การคำนวณ r จะมีความซับซ้อนขึ้น โดยต้องพิจารณาผ่านการอินทิเกรตระยะห่างระหว่างประจุย่อย ๆ ของวัตถุทั้งสองขึ้น

ข้อควรระวังในการใช้งาน

-  หน่วยในระบบ SI r ต้องมีหน่วยเป็น เมตร (m) เสมอในการคำนวณร่วมกับค่าคงที่ $k \approx 8.99 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2$
-  ระยะห่างต้องไม่เป็นศูนย์ ตามสมการ r อยู่ในตัวหาร ดังนั้น r ไม่สามารถเป็น 0 ได้ เพราะจะทำให้แรงมีค่าเป็นอนันต์ (Infinity) ซึ่งในทางฟิสิกส์ควอนตัมจะมีแรงประเพทอื่นเข้ามาเกี่ยวข้องแทน
-  ทิศทางของแรง แรงจะกระทำในแนวเส้นตรงที่ลากเชื่อมระยะ r นี้เสมอ (Radial direction)

สรุปสั้นๆ r คือระยะทางที่สั้นที่สุด (เส้นตรง) ที่วัดจากจุดศูนย์กลางของประจุหนึ่งไปยังจุดศูนย์กลางของอีกประจุหนึ่งครับ

✓ เทคนิคการดูทิศทางแรง (สไตส์จอมยุทธ์สแกนกรรม)

อย่าเพิ่งรีบจับตัวเลขใส่สูตรทันทีนะครับ! กฎเหล็กคือ "ห้ามใส่เครื่องหมาย +/- ของประจุลงในสูตร" ให้ใช้เครื่องหมายเพื่อหาทิศทางก่อนเท่านั้นครับ

-  ประจุเหมือนกัน (บวก-บวก / ลบ-ลบ) ผลักกัน (พุ่งออก)
-  ประจุต่างกัน (บวก-ลบ) ดึงดูดกัน (พุ่งเข้า)



2. การรวมแรงแบบเวกเตอร์ (Vector Summation)

เมื่อประจุถูกรุมด้วยแรงหลายทิศทาง ทริคคือห้ามบวกเลขดี้อะไร แต่ต้องรวมแบบ "ซิด cos ห่าง sin" หรือใช้ "พีทาโกรัส" เข้าช่วยครับ

✔ ทริคกันพลาด (Trick & Trap) ที่คนออกข้อสอบชอบเอามาแกง!

👤 กับดักที่ 1 หน่วยมรณะ ($\mu C, cm$)

โจทย์ชอบให้ประจุเป็น "ไมโคร" (μC) และระยะเป็น "เซนติเมตร" (cm)

👤 วิชามาร สแกนหน่วยปั๊บ ต้องแก้เป็น $\times 10^{-6}$ และ $\times 10^{-2}$ ทันทีในใจ
 👤 กับดักที่ 2 วางประจุเป็นรูปเรขาคณิต

ถ้าประจุวางเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าหรือสี่เหลี่ยมจัตุรัส

👤 วิชามาร ใช้กฎ "สมมาตร" ถ้าประจุมีขนาดเท่ากัน แรงจะหักล้างกันในบางแนวเสมอ ช่วยลดการคำนวณลง 50%

ตัวอย่างโจทย์คอมโบสยบมาร

โจทย์ ประจุ $+4 \mu C$ และ $+1 \mu C$ วางห่างกัน 3 cm จงหาแรงที่กระทำต่อประจุ $+2 \mu C$ ที่วางไว้กึ่งกลาง

วิธีคิดแบบ First 10 Seconds

1. สแกนทิต ประจุซ้ายผลักไปขวา ประจุขวาผลักไปซ้าย (แรงหักล้างกัน)
2. สแกนขนาด แรงจากประจุ $+4 \mu C$ ย่อมชนะ $+1 \mu C$ เพราะประจุใหญ่กว่า
3. วิชามาร (Ratio Slasher) ระยะห่างเท่ากัน r^2 ตัดทิ้ง ค่า k ตัดทิ้ง

👤 แรงลัพธ์ $\propto (4 \times 2) - (1 \times 2) = 6$

👤 แล้วค่อยเอาไปคูณค่า k และหาร r^2 ที่เหลือทีเดียว!

โจทย์ หาแรงลัพธ์ที่กึ่งกลาง

ภาพโจทย์ (Problem Visualization)

การวิเคราะห์แรง (Force Analysis)

วิเคราะห์แรงลัพธ์ต่อ $+2Q$

$\vec{F}_1 = \frac{k|(+4q_1)(+2Q)|}{(1.5)^2}$ ทิศขวา

$\vec{F}_2 = \frac{k|(+1q_2)(+2Q)|}{(1.5)^2}$ ทิศซ้าย

หลักการคำนวณ

หาขนาดของแรงแยกกัน โดยใช้ $\frac{k|q_1q_2|}{r^2}$ (ถอดเครื่องหมาย +/-)

กำหนดทิศทางของแรง (ผลักออกจากกันเพราะเป็นประจุบวกเหมือนกัน)

นำขนาดของแรงมาลบกัน เพื่อหาขนาดและทิศทางของแรงลัพธ์ ($\vec{F}_{\text{Net}} = \vec{F}_1 - \vec{F}_2$)

จมยู่ทส์แกนกรรรม

จากการวิเคราะห์ผ่านสายตาและคลุกคลีกับข้อสอบมานับทศวรรษ อาจารย์พบว่าหัวข้อ **1.1 แรงคูลอมบ์และการรวมเวกเตอร์** คือด่านแรกที่คัดคนออกจากสนามสอบ ปัญหาที่นักเรียนมัก "ติดกับ" จนทำข้อสอบไม่ทันหรือผิดพลาด แบ่งออกเป็น 3 ประเด็นหลักดังนี้ครับ

รวมเทคนิคคิดในการทำข้อสอบ (Pro's Hack)

👤 **เทคนิคจุดสะเทิน (Zero Force Point)** เมื่อประจุชนิดเดียวกันวางห่างกัน จุดที่แรงลัพธ์เป็นศูนย์จะอยู่ระหว่างกลางและ "ใกล้ประจุตัวที่น้อยกว่า" เสมอ

👤 **สูตรลัดระยะจุดสะเทิน** $x = \frac{\sqrt{q_{\text{small}}}}{\sqrt{q_{\text{big}}} + \sqrt{q_{\text{small}}}} \times L$ (ไม่ต้องตั้งสมการ $F_1 = F_2$ ให้เสียเวลา)

*** สำหรับเทคนิค Zero Force Point หรือ จุดสะเทินไฟฟ้า เป็นจุดที่สนามไฟฟ้าลัพธ์เป็นศูนย์ ($\vec{E}_{net} = 0$) หรือเมื่อนำประจุทดสอบไปวางแล้วจะไม่เกิดแรงกระทำ ($\vec{F}_{net} = 0$) ซึ่งเป็นหัวข้อที่ออกข้อสอบบ่อยมากครับ และนี่คือสูตรลัดและตัวอย่างการนำไปใช้ให้เร็วที่สุดครับ

สูตรลัด (Pro's Hack)

เมื่อมีประจุ q_1 และ q_2 วางห่างกันเป็นระยะ L หากต้องการหาระยะจากประจุ q_1 ไปยังจุดสะเทิน (x)

$$x = \frac{\sqrt{q_1}}{\sqrt{q_1} + \sqrt{q_2}} \cdot L$$

 **เงื่อนไข** ใช้เครื่องหมาย "+" เมื่อประจุทั้งสองเป็น **ชนิดเดียวกัน** (จุดสะเทินอยู่ระหว่างกลาง)

 **เงื่อนไข** ใช้เครื่องหมาย "-" เมื่อประจุทั้งสองเป็น **ชนิดต่างกัน** (จุดสะเทินอยู่ด้านนอก ผังประจุน้อย)

 **Trick** เอาประจุตัวที่จะวัดระยะเป็นตัวตั้ง ($\sqrt{q_{\text{ตั้งทาง}}}$) ไว้ข้างบนเสมอ ใช้ได้เมื่อหาระยะจุดสะเทินของสนามไฟฟ้า $E = 0$ เท่านั้น

 ใช้ได้กับ **สนามไฟฟ้า** ไม่ใช่แรงลัพธ์บนประจุที่วางตรงนั้น

ตัวอย่างโจทย์

โจทย์ ประจุ $+1 \mu C$ และ $+9 \mu C$ วางห่างกัน 20 เซนติเมตร จงหาว่าจุดสะเทินอยู่ห่างจากประจุ $+1 \mu C$ เป็นระยะเท่าใด

วิธีคิดแบบปกติ

ต้องตั้งสมการ $k \frac{q_1}{x^2} = k \frac{q_2}{(20-x)^2}$ แล้วถอดรากที่สอง ซึ่งกินเวลา

วิธีใช้สูตรลัด (Hack)

1. ให้ $q_1 = 1$ และ $q_2 = 9$ (ไม่ต้องใส่หน่วย μC เพราะหน่วยเหมือนกันหมด)
2. ระยะห่าง $L = 20$ (ไม่แปลงหน่วยเพราะเราจะตอบหน่วยเดิม ยกเว้นโจทย์ถามหาหน่วยเป็นเมตร)
3. แทนค่าหา x จาก q_1

$$x = \frac{\sqrt{1}}{\sqrt{1} + \sqrt{9}} \cdot 20 = \left(\frac{1}{1+3}\right) \cdot 20 = 5$$

คำตอบ $x = 5$ เซนติเมตร จากประจุ $+1 \mu C$



เทคนิคเพิ่มเติมเพื่อความเร็ว (Exam Tips)

1. กฎของสัดส่วน (Ratio Hack)

หากนักเรียนเห็นว่าประจุตัวใหญ่เป็นกี่เท่าของตัวเล็ก เช่น $9 \mu C$ เป็น **9 เท่า** ของ $1 \mu C$



ให้ถอดรากจำนวนเท่านั้น $\sqrt{9} = 3$



หมายความว่า ระยะห่างจากประจุใหญ่จะเป็น **3 เท่า** ของระยะจากประจุเล็ก



แบ่งระยะทั้งหมด (20 ซม.) เป็น $1 + 3 = 4$ ส่วน



$20 / 4 = 5$ ซม. ต่อส่วน



ประจุเล็กเอาไป 1 ส่วน = **5 ซม.** (จบในใจไม่ต้องเขียนสูตร)

2. การเช็คตำแหน่ง



ประจุเหมือน จุดสะเทินอยู่ "ระหว่าง" ประจุทั้งสอง



ประจุต่าง จุดสะเทินอยู่ "ภายนอก" และต้องอยู่ฝั่งประจุที่มี "ขนาดน้อยกว่า"

เสมอ

3. ถ้าประจุเท่ากัน

จุดสะเทินจะอยู่ "กึ่งกลาง" พอดีเสมอ ($L/2$) ไม่ต้องคำนวณครับ

วิเคราะห์ 3 จุดตายที่ทำให้นักเรียน "พังในห้องสอบ" ในหัวข้อ 1.1

1. การแยก "ขนาด" และ "ทิศทาง" ไม่ออก (Vector Confusion) นักเรียนหลายคนพยายามใส่เครื่องหมายประจุ (+/-) ลงในสมการคำนวณแรง ทำให้ผลลัพธ์ออกมาติดลบแล้วสับสนทิศทาง



แก้ เครื่องหมายประจุมีหน้าที่บอกแค่ "ผลัก" หรือ "ดึงดูด" เพื่อกำหนดลูกศรเวกเตอร์เท่านั้น ส่วนการคำนวณขนาดแรงต้องใช้ค่าสัมบูรณ์เสมอ

2. นรกของหน่วย Prefix และเลขยกกำลัง โจทย์ระดับแข่งขันมักให้ประจุเป็น nC (10^{-9}) หรือ μC (10^{-6}) และระยะห่างเป็น mm (10^{-3})



แก้ นักเรียนมักลืมยกกำลังสองที่ตัว r หรือคูณเลขยกกำลังผิด ทำให้คำตอบเพี้ยนไปหลายหลักสิบ

3. การติดหล่ม "สมการถึก" (Algebraic Trap) เมื่อเจอโจทย์กำหนดให้ประจุ 3-4 ตัว นักเรียนจะรีบตั้งสมการ $F = \frac{kq_1q_2}{r^2}$ แยกทุกคู่แล้วนั่งคูณเลขทศนิยมทีละตัว



แก้ ข้อสอบไม่ได้วัดทักษะการคูณเลข แต่วัดการมอง "สัดส่วน" (Ratio) และ "สมมาตร" (Symmetry)

🤖 3 ยอดโจทย์ปราบเซียน (ฆ่าเหล่าด้วยวิชามาร) 🤖

ข้อที่ 1 การหาสัดส่วนแรง (Ratio Hack)

โจทย์ ประจุ A และ B ห่างกันระยะ R มีแรงกระทำต่อกัน 16 N หากเลื่อนประจุทั้งสองให้ห่างกันเป็น $4R$ และเพิ่มขนาดประจุ A เป็น 2 เท่า แรงระหว่างประจุคู่เดิมจะกลายเป็นกี่นิวตัน?

🤖 จุดที่เด็กตาย นั่งแทนค่า $16 = \frac{kq_1q_2}{r^2}$ แล้วตั้งสมการใหม่เพื่อแก้หาตัวแปรที่ละตัว

🤖 วิชามารสแกนแกรม ใช้หลักการแปรผัน $F \propto \frac{q_A q_B}{r^2}$

1. ประจุ A เพิ่ม 2 เท่า $\rightarrow$ แรงเพิ่ม 2 เท่า
2. ระยะห่างเพิ่ม 4 เท่า $\rightarrow$ แรงลดลง $4^2 = 16$ เท่า
3. คิดในใจ $16 \times (2/16) = 2\text{ N}$

🤖 ตอบ 2 N (ใช้เวลา 5 วินาทีจบ)

ข้อที่ 2 จุดสะเทินและตำแหน่งลง (Positioning Hack)

โจทย์ วางประจุ $Q_1 = +9\text{ }\mu\text{C}$ และ $Q_2 = +1\text{ }\mu\text{C}$ ห่างกัน 12 cm ต้องวางประจุ q ไว้ที่ตำแหน่งใด แรงลัพธ์ที่กระทำต่อประจุ q จึงจะเป็นศูนย์?

🤖 จุดที่เด็กตาย คาท้องสอบ คือตั้งสมการ $F_1 = F_2$ แล้วติดรูปหรือแก้พหุนามกำลังสอง เสียเวลา 2-3 นาที

🤖 วิชามารสแกนแกรม ใช้สูตรลัดระยะจุดสะเทินจากประจุเล็ก (x)

$$1. \quad x = \frac{\sqrt{q_{\text{small}}}}{\sqrt{q_{\text{big}}} + \sqrt{q_{\text{small}}}} \times L \quad \text{ถอดรูปประจุในใจ } \sqrt{9} = 3 \text{ และ } \sqrt{1} = 1$$

$$2. \quad \text{เข้าสูตร } x = \frac{\sqrt{1}}{\sqrt{1} + \sqrt{9}} \cdot 12 = \left(\frac{1}{1+3}\right) \cdot 12 = 3$$

🤖 ตอบ ห่างจากประจุ $+1\text{ }\mu\text{C}$ เป็นระยะ 3 cm (อยู่ระหว่างประจุทั้งสอง)

ข้อที่ 3 แรงลัพธ์บนรูปทรงสมมาตร (Symmetry Hack)

โจทย์ วางประจุ $+q$ ไว้ที่มุมทั้งสามของสามเหลี่ยมด้านเท่าที่มีด้านยาว a จงหาขนาดของแรงลัพธ์ที่กระทำต่อประจุที่มุมยอด?

🤖 จุดที่เด็กตาย คำนวณแรง 2 แรง แล้วพยายามใช้สูตร $\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_1 F_2 \cos 60^\circ}$ ซึ่งคิดเลขยาก



วิชามารสแกนกรรม

1. เนื่องจากประจุและระยะห่างเท่ากัน แรงทั้งสองฝั่งย่อมเท่ากัน ($F_1 = F_2 = F$)
2. มุมของสามเหลี่ยมด้านเท่าคือ 60° แรงผลักทำมุมกัน 60°
3. สูตรลัดเวกเตอร์พิกัด แรงลัพธ์ของเวกเตอร์ที่เท่ากันทำมุม 60° คือ $F_{net} = \sqrt{3}F$



ตอบ $F_{net} = \sqrt{3} \frac{kq^2}{a^2}$ (ตอบติดตัวแปรได้ทันทีโดยไม่ต้องวาดรูปแตกแรงให้ยุ่งวาย)

สรุปหัวใจบทเรียน (Professor's Key Note)

"การทำข้อสอบไฟฟ้าสถิตให้ทันเวลา ไม่ใช่การเป็นเครื่องคิดเลขเดินได้ แต่คือการเป็น จอมยุทธ์ที่มองหาความสัมพันธ์ ก่อนจะจรดปากกาเขียนสูตรครับ"

สรุปหัวใจบทเรียน (Asst.Prof. Dr. Choke)

มุงแน่นแต่ตัวเลข

67.43 + 21 = 88.63
89 * 11 = 979
67.43 * 2 = 134.86
89 / 11 = 8.09

มุงแน่นแต่ตัวเลข

จรดปากกาเขียนสูตรเมื่อเข้าใจ

Relationship Scan

ระยะห่าง $\frac{1}{r^2}$

สัดส่วน $1/r^2$

แรง F ผลัก

มองหาความสัมพันธ์ก่อน

Direction Scan

$F = k \frac{|Q_1 Q_2|}{r^2}$

1. ไม่ใช่การเป็นเครื่องคิดเลขเดินได้

2. แต่คือการเป็น จอมยุทธ์ที่มองหาความสัมพันธ์ก่อน

เคล็ดวิชาพิชิตข้อสอบ

1. สแกนความสัมพันธ์ (Relations Scan)

2. จรดปากกาเขียนสูตร (Write Formula)

จอมยุทธ์สแกนกรรม

ให้นักเรียนลองทำความเข้าใจในตัวข้อ 1.1 ผ่านภาพและในภาพต้องการสื่อให้นักเรียนมองเห็น

การดึงดูดและผลัก (Attraction & Repulsion) การใช้จิมจอมยุทธ์สองสี (น้ำเงิน-แดง) จะทำให้นักเรียนแยกแยะประจุบวกและลบได้โดยสัญชาตญาณ และลูกศรทองคำ 'F' จะช่วยย้ำเตือนเรื่องทิศทางเวกเตอร์ที่เด็กมักจะลืม

การวางตัวเป็นรูปสามเหลี่ยม (Geometric Layout) การใส่ภาพซ้อน (Overlay) รูปสามเหลี่ยมเข้าไปในฉาก จะช่วยให้นักเรียนฝึก "สแกน" มิติสัมพันธ์ของแรงลัพธ์ก่อนที่จะเริ่มคำนวณจริง

มโนภาพของแรง (Visualization) เส้นแสง Flux Lines จะช่วยให้เด็กเห็นภาพว่าแรงคูลอมบ์ไม่ใช่แค่ตัวเลขในสมการ แต่คืออำนาจที่แผ่ออกมาปะทะกันจริง ๆ



1.2 สนามไฟฟ้า (Electric Field) จากจุดประจุและแผ่นคู่ขนาน

นักเรียนส่วนใหญ่มักมองว่าสนามไฟฟ้าเป็นเรื่องไกลตัว แต่ในเชิงปรัชญาฟิสิกส์ "สนามไฟฟ้าคืออำนาจที่แผ่ขยาย" ครับ มันเหมือนกับรัศมีของจอมยุทธ์ที่แผ่ออกมา แม้ยังไม่ได้ขยับมือ แต่ใครที่ก้าวเข้ามาในระยะย่อมได้รับผลกระทบ โจทย์ในบทนี้จะวัดกันที่ว่า นักเรียนสามารถ "มองเห็น" เส้นแรงที่ล่องหนเหล่านี้ได้หรือไม่ครับ

1. สนามไฟฟ้าจากจุดประจุ (Field from a Point Charge)

สนามไฟฟ้าที่จุดใด ๆ คือแรงที่กระทำต่อประจุบวก 1 คูลอมบ์ที่นำไปวางไว้ที่จุดนั้น

 สูตรหรือสมการทั่วไปคือ $E = \frac{kQ}{r^2}$ มีหน่วยเป็น N/C

 แก่นแท้ของทิศทาง สนามไฟฟ้าพุ่ง "ออกจากบวก" และพุ่ง "เข้าหาลบ" เสมอ

 กฎเหล็ก ในการคำนวณขนาด E ห้ามใส่เครื่องหมายประจุลงในสูตร เพราะเครื่องหมายนั้นเราใช้กำหนดทิศทางของลูกศรเวกเตอร์ไปเรียบร้อยแล้วครับ

2. สนามไฟฟ้าจากแผ่นคู่ขนาน (Field between Parallel Plates)

เมื่อนำแผ่นโลหะสองแผ่นที่มีประจุต่างชนิดกันมาวางขนานกัน จะเกิดสิ่งที่เรียกว่า "สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ" ขึ้นระหว่างแผ่น



แก่นแท้ สนามไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากันทุกจุดระหว่างแผ่น (ไม่ขึ้นกับระยะห่าง r เหมือนจุดประจุ)***



สูตรหรือสมการทั่วไปคือ $E = \frac{V}{d}$

(เมื่อ V คือความต่างศักย์ระหว่างแผ่น และ d คือระยะห่างระหว่างแผ่น)

*****อธิบายเพิ่มเติม** เพื่อให้เห็นภาพชัดเจนและลึกซึ้งขึ้น ผมขอวิเคราะห์เจาะลึกแก่นแท้ของปรากฏการณ์นี้ใน 3 แง่มุมครับ เมื่อพิจารณาถึงแก่นแท้ทางคณิตศาสตร์ (ทำไมถึงไม่ขึ้นกับระยะทาง?) ตามกฎของเกาส์ (Gauss's Law) หากเราพิจารณาแผ่นตัวนำระนาบที่มีพื้นที่ขนาดใหญ่มาก (Infinite sheet) สนามไฟฟ้า (E) ที่เกิดขึ้นจะมีสูตรคือ

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \text{ โดยที่ } \sigma \text{ คือ ความหนาแน่นประจุต่อพื้นที่ (Q/A) และ } \epsilon_0 \text{ คือค่าคงที่ของสุญญากาศ}$$

จะสังเกตได้ว่าในตัวแปรของสมการ **ไม่มีค่า r (ระยะห่าง) ปรากฏอยู่เลย** ซึ่งต่างจากจุดประจุ ($E = \frac{kQ}{r^2}$) นี่คือเหตุผลว่าทำไมสนามไฟฟ้าจึงมีค่าคงที่ ไม่ว่านักเรียนจะขยับเข้าไปใกล้แผ่นบวกหรือแผ่นลบมากขึ้นตรงใดที่ยังอยู่ระหว่างแผ่นทั้งสอง

หากทำการวิเคราะห์ทางกายภาพ (Vector Superposition) สาเหตุที่สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอเกิดจากการ "หักล้างและเสริมกัน" ของเวกเตอร์สนามไฟฟ้า **ทิศทาง** สนามไฟฟ้าจากแผ่นบวกพุ่งออก และแผ่นลบพุ่งเข้า ทำให้ระหว่างแผ่นมีทิศไปทางเดียวกันเสมอ (จากบวกไปลบ) **ความเข้ม** เมื่อเราขยับเข้าไปใกล้แผ่นบวกมากขึ้น แรงผลักจากแผ่นบวกจะมากขึ้น แต่ในขณะเดียวกันเราก็ขยับห่างจากแผ่นลบมากขึ้น ทำให้แรงดึงดูดจากแผ่นลบลดลง ผลรวมของแรงจากทั้งสองแผ่นจึงหักล้างกันจนคงที่พอดี

และข้อจำกัดในโลกความเป็นจริง (The "Fringing Effect" Caveat) แม้ในทางทฤษฎีจะบอกว่าสม่ำเสมอทุกจุด แต่ในทางปฏิบัติมีข้อยกเว้นที่น่าสนใจซึ่งข้อสอบมักจะหลอกครับ

1. **บริเวณขอบแผ่น (Edges)** สนามไฟฟ้าจะไม่สม่ำเสมอ โดยจะมีความโค้งออกด้านนอก เรียกว่า **Edge Effect** หรือ **Fringing Field**
2. **ระยะห่าง เทียบกับ ขนาดแผ่น** นิยามนี้จะเป็นจริงก็ต่อเมื่อ **ระยะห่างระหว่างแผ่น (d) มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับขนาดความกว้างของแผ่น** หากแผ่นอยู่ห่างกันมากเกินไป สนามไฟฟ้าจะไม่เป็นเส้นตรงขนานกันอีกต่อไป

✔️ ทริคกันพลาด (Trick & Trap) ดักทางข้อสอบ 10 ปี!

 **กั้บดั้กที่ 1 "ทิศทางการ" โจทย์ขอลถามว่า "ถ้าปล่อยประจุลบในสนามไฟฟ้า มันจะเคลื่อนที่อย่างไร?"**

 **วิชามารสแกนกรรม** ประจุบวกเคลื่อนที่ **ตาม** สนาม (E) ประจุลบเคลื่อนที่ **สวน** สนามไฟฟ้า (E) เสมอครับ!

 **กั้บดั้กที่ 2 "เส้นแรงไฟฟ้า (Electric Field Lines)" โจทย์ทฤษฎีขอลถามสมบัติของเส้นแรง**

 **วิชามารสแกนกรรม** เส้นแรงไฟฟ้า **ห้ามตัดกันเด็ดขาด** และต้องตั้งฉากกับผิวของตัวนำเสมอครับ

🤖 3 ยอดโจทย์ดักทาง (The Exam Scanner) 🤖

ข้อที่ 1 การรวมสนามไฟฟ้าแบบมุมฉาก (Vector Scan)

โจทย์ จุด P อยู่ห่างจากประจุ $+Q$ และ $-Q$ เป็นระยะ r เท่ากัน โดยแนวเส้นตรงที่ลากจากประจุทั้งสองมายังจุด P ตั้งฉากกันพอดี สนามไฟฟ้าลัพธ์ที่จุด P มีค่าเท่าใด?

 **จุดที่เด็กไปต่อไม่ได้แทบจะเรียกว่าตายในห้องสอบคือ** นั่งแตกแรง $\sin, \cos$ วุ่นวาย

 **วิชามาร** เนื่องจากขนาด E จากทั้งสองประจุเท่ากัน ($E_1 = E_2 = E$) และทำมุม 90° กัน ใช้พีทาโกรัสแบบไว $E_{net} = \sqrt{E^2 + E^2} = \sqrt{2}E$

 **ตอบ** $E_{net} = \sqrt{2} \frac{kQ}{r^2}$ (ใช้เวลา 10 วินาทีจบ)

ข้อที่ 2 ประจุลอยนิ่งระหว่างแผ่นคู่ขนาน (Balance Scan)

โจทย์ หยดนํ้ามันมวล m มีประจุ $-q$ ลอยนิ่งอยู่ระหว่างแผ่นคู่ขนานที่มีสนามไฟฟ้า E ทิศทางของสนามไฟฟ้าต้องพุ่งไปทางใด และมีขนาดเท่าใด?

 **จุดที่เด็กตาย** สับสนเรื่องทิศทางของแรงไฟฟ้ากับสนามไฟฟ้า

 **วิชามาร**

1. ลอยนิ่งแปลว่าแรงขึ้น = แรงลง ($F_E = mg$)
2. เนื่องจากเป็นประจุลบ แรงไฟฟ้า (F_E) ต้องมีทิศ **สวน** กับสนามไฟฟ้า (E)
3. เพื่อให้ลอยนิ่ง F_E ต้องพุ่งขึ้น $\rightarrow$ ดังนั้นสนาม E ต้องพุ่งลง

 **ตอบ** $Eq = mg \therefore E = \frac{mg}{q}$ ทิศพุ่งลง

ข้อที่ 3 การเปรียบเทียบสนามไฟฟ้า (Ratio Scan)

โจทย์ ที่ระยะห่าง R จากจุดประจุมีสนามไฟฟ้า E ถ้าขยับไปที่ระยะ $3R$ สนามไฟฟ้าจะเปลี่ยนเป็นกี่เท่าของเดิม?

 จุดที่เด็กตายคือ ตั้งสมการหารกันยาวเหยียด

 วิชามาร $E \propto \frac{1}{r^2}$ ระยะห่างเพิ่ม 3 เท่า $\rightarrow$ สนามลดลง $3^2 = 9$ เท่า

 ตอบ $\frac{1}{9} E$

1.2 รวมเทคนิคคิดในการทำข้อสอบ (Pro's Hack)

 สูตรลัดโปรเจกไทล์ไฟฟ้า เมื่อประจุ q วิ่งเข้าหาแผ่นคู่ขนานด้วยความเร็ว u จะเกิดความเร่ง $a = \frac{Eq}{m}$ หรือ $a = \frac{Vq}{dm}$ นักเรียนสามารถใช้สูตรการเคลื่อนที่ 5 สูตรหลักมาตอบแบบชีว ๆ ได้ทันทีครับ!

 เทคนิคมองกราฟ กราฟ E กับ r ของจุดประจุจะเป็นรูปโค้งไฮเพอร์โบลา ($E \propto \frac{1}{r^2}$) แต่ถ้าเป็นแผ่นคู่ขนาน กราฟ E กับ r จะเป็นเส้นตรงแนวนอน (เพราะค่าคงที่)

ตัวอย่าง 1 โจทย์โปรเจกไทล์ไฟฟ้า (Electric Projectile)

โจทย์ อิเล็กตรอน (มวล m ประจุ e) ถูกยิงเข้าไปในแนวขนานระหว่างแผ่นคู่ขนานที่ห่างกัน d และมีความต่างศักย์ V ด้วยความเร็วต้น u ในแนวราบ เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านแผ่นโลหะที่ยาว L ออกไปพอดี จงหาค่าการเบี่ยงเบนในแนวแกน y (ระยะ s_y)

Pro's Hack การมองแบบ "แยกมิติ"

ในพื้นที่สนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ E

1. แนวราบ (แกน x) ความเร็วคงที่เสมอ $s_x = ut$ (ดังนั้น $t = \frac{L}{u}$)
2. แนวตั้ง (แกน y) มีความเร่งคงที่ $a = \frac{F_E}{m} = \frac{Eq}{m}$ หรือเปลี่ยน E เป็น $E = \frac{V}{d}$ จะได้

$$a = \frac{Ve}{dm}$$

ใช้สูตรการเคลื่อนที่ 5 สูตรหลัก (ในที่นี้ใช้ $u_y = 0$) และใช้สมการ $s_y = u_y t + \frac{1}{2} at^2$ แทนค่าจะได้

$$s_y = \frac{Ve}{2dm} t^2 \therefore t = \frac{L}{u} \rightarrow s_y = \frac{Ve}{2dm} \left(\frac{L}{u} \right)^2 \text{ คำตอบ } s_y = \frac{eVL^2}{2mdu^2}$$

Check-in Tip ถ้าโจทย์ถามมุมที่เบี่ยงเบนไป (θ) ให้ใช้ $\tan \theta = \frac{v_y}{v_x}$ โดยที่ $v_y = at = \frac{eVL}{dmu}$

และ $v_x = u$ ครับ ดังนั้น $\theta = \tan^{-1} \left(\frac{eVL}{dmu^2} \right)$ (e คือขนาดประจุ (ไม่ใช่เครื่องหมายลบ) เพื่อไม่ให้สับสน)



ตัวอย่าง 2 เทคนิคมองกราฟ (Graph Logic)

ในข้อสอบมักจะให้กราฟมา 4-5 รูป แล้วถามว่ารูปไหนแสดงความสัมพันธ์ได้ถูกต้องระหว่าง E กับ r หรือ V กับ r

1. กรณี "จุดประจุ" (Point Charge)

$$\text{นิยาม } E = \frac{kQ}{r^2} \text{ และ } V = \frac{kQ}{r}$$

ลักษณะกราฟ ทั้งคู่จะเป็น โค้งไฮเพอร์โบลา ($\frac{1}{r}$ และ $\frac{1}{r^2}$)

จุดสังเกต กราฟ E จะ "ตกลง" เร็วกว่ากราฟ V เสมอเมื่อ r เพิ่มขึ้น (เพราะ E แปรผกผันกับ r ยกกำลังสอง)

2. กรณี "แผ่นคู่ขนาน" (Parallel Plates)

$$\text{นิยาม } E = \text{คงที่} \text{ และ } V = Ed \text{ (หรือ } V \propto d \text{)}$$

ลักษณะกราฟ

กราฟ E กับ r จะเป็น "เส้นตรงแนวนอน" (Horizontal Line) เพราะไม่ว่าห่างเท่าไรค่า E ก็ไม่เปลี่ยน

กราฟ V กับ r จะเป็น "เส้นตรงเอียงขึ้น/ลง" (Linear) เพราะศักย์ไฟฟ้าจะเปลี่ยนไปตามระยะทางอย่างสม่ำเสมอ

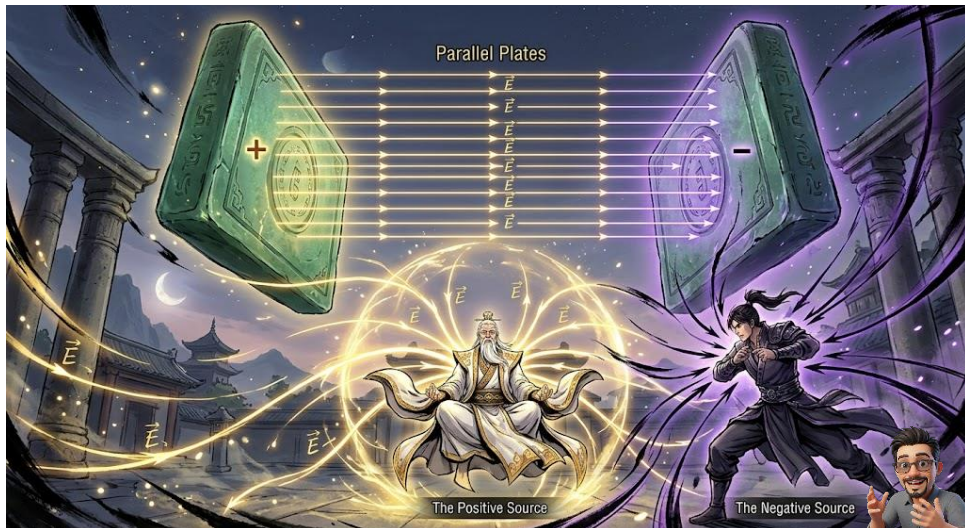


สรุปตารางเปรียบเทียบ (Quick Review Table)

ตัวแปร	จุดประจุ (Point Charge)	แผ่นคู่ขนาน (Parallel Plates)
สนามไฟฟ้า (E)	แปรผกผัน $\frac{1}{r^2}$ (กราฟโค้ง)	คงตัว (กราฟเส้นตรงแนวนอน)
ศักย์ไฟฟ้า (V)	แปรผกผัน $\frac{1}{r}$ (กราฟโค้ง)	แปรผันตรงกับระยะห่าง (กราฟเส้นตรงเอียง)

ความเร่ง (a)	ไม่คงที่ (เปลี่ยนตาม r)	คงที่ (ใช้ 5 สูตรการเคลื่อนที่ได้)
------------------	----------------------------	------------------------------------

Pro's Tip เวลาทำข้อสอบ ถ้าเจอคำว่า "แผ่นคู่ขนาน" ให้ลบภาพ $\frac{1}{r^2}$ ออกจากหัวไปเลยครับ แล้วใช้ $V = Ed$ กับ 5 สูตรการเคลื่อนที่แทน จะประหยัดเวลาไปได้เยอะมาก!



ภาพนี้ต้องการสื่อสารให้นักเรียนเห็นว่า

ทิศทางที่ชัดเจน (Directional Flow) ที่ปรากฏในภาพนี้จะช่วยให้นักเรียนจำได้ทันทีว่า สนามไฟฟ้าพุ่ง "ออกจากบวก-เข้าหาลบ" ผ่านการแสดงออกของตัวละครจอมยุทธ์ครับ

สนามสม่ำเสมอ (Uniform Field) การใช้ "ตารางพลังงาน" (Energy Grid) ระหว่างแผ่นหยกขนานจะให้นักเรียนเข้าใจว่าในแผ่นคู่ขนาน สนามไฟฟ้ามีค่าเท่ากันทุกจุด ไม่ว่าจะอยู่ตรงไหนก็ตาม

มโนภาพสู่สมการ เมื่อเด็ก ๆ เห็นเส้นที่พุ่งจากแผ่นหยกหนึ่งไปอีกแผ่นหนึ่ง จะนึกถึงสูตร $E = \frac{V}{d}$ ได้ง่ายขึ้น เพราะเห็นระยะห่าง d และความต่างศักย์ V ที่ถูกถ่ายทอดผ่านสีของพลังงานครับ

1.3 จุดสะเทิน (Neutral Point) ของสนามไฟฟ้าและแรงลัพธ์

ในโลกของไฟฟ้าสถิต "จุดสะเทิน" คือจุดยุทธศาสตร์ที่น่าอัศจรรย์ครับ มันคือตำแหน่งในอวกาศที่อำนาจจากประจุต่าง ๆ แผ่มาถึง แต่กลับหักล้างกันจนหมดสิ้นพอดี เปรียบเสมือนจุดที่จอมยุทธ์สองฝ่ายปล่อยพลังวรัถรอกมาต้านกันจนอากาศหยุดนิ่ง

1. นิยามของจุดสะเทิน

 **ทางสนามไฟฟ้า ($\vec{E}$)** คือจุดที่ผลรวมเวกเตอร์ของสนามไฟฟ้าจากประจุทุกตัวเป็นศูนย์ ($\sum \vec{E} = 0$)

 **ทางแรงลัพธ์ ($\vec{F}$)** คือจุดที่เมื่อนำประจุใด ๆ ไปวางไว้ จะไม่มีแรงไฟฟ้ามากระทำต่อประจุนั้นเลย ($\sum \vec{F} = 0$)

2. หลักการค้นหาตำแหน่ง (The Placement Logic)

การจะหาจุดสะเทิน นักเรียนต้องมอง "ทิศทาง" ให้ขาดก่อนใช้คณิตศาสตร์ครับ

 **กรณีประจุชนิดเดียวกัน (+ กับ + หรือ - กับ -)** สนามไฟฟ้าจากทั้งสองจะพุ่งสวนทางกันที่ "บริเวณระหว่างประจุ" ดังนั้นจุดสะเทินจะอยู่ข้างในเสมอ

 **กรณีประจุต่างชนิดกัน (+ กับ -)** สนามไฟฟ้าจะพุ่งไปทางเดียวกันที่บริเวณระหว่างประจุ (บวกผลัก-ลบดึง) แต่จะสวนทางกันที่ "บริเวณด้านนอก" ดังนั้นจุดสะเทินจะอยู่ข้างนอกเสมอ

