

บทที่ 4 พลังงานและศักย์ไฟฟ้า

ในบทเรียนจะประกอบด้วยหัวข้อดังนี้

- 4.1 งานที่ใช้ในการเคลื่อนย้ายจุดประจุในสนามไฟฟ้า
- 4.2 พลังงานศักย์ไฟฟ้าของประจุไฟฟ้าในสนามไฟฟ้า
- 4.3 คำจำกัดความของศักย์ไฟฟ้า
- 4.4 เปรียบเทียบงานที่กระทำโดยวัตถุมวล (m) กับ ประจุไฟฟ้า (q)
- 4.5 ศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากประจุกระจายสม่ำเสมอ

จุดประสงค์เชิงพฤติกรรม หลังจากที่คุณเรียนได้ทำการศึกษาเรื่องนี้จะสามารถ

1. อธิบายงานที่ใช้ในการเคลื่อนย้ายจุดประจุในสนามไฟฟ้าได้อย่างถูกต้อง
2. อธิบายพลังงานศักย์ไฟฟ้าของประจุไฟฟ้าในสนามไฟฟ้าได้อย่างถูกต้อง
3. อธิบายคำจำกัดความของศักย์ไฟฟ้าได้อย่างถูกต้อง
4. อธิบายเปรียบเทียบงานที่กระทำโดยวัตถุมวล (m) กับ ประจุไฟฟ้า (q) ได้อย่างถูกต้อง
5. อธิบายศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากประจุกระจายสม่ำเสมอได้อย่างถูกต้อง

4.1 งานที่ใช้ในการเคลื่อนย้ายจุดประจุในสนามไฟฟ้า

1. ที่หน้าจอหลักคลิกที่ “งานที่ใช้ในการเคลื่อนย้ายจุดประจุในสนามไฟฟ้า” จะปรากฏหน้าจอดังรูป

บทที่ 4 พลังงานและศักย์ไฟฟ้า

4.1 งานที่ใช้ในการเคลื่อนย้ายจุดประจุในสนามไฟฟ้า

เมื่อนำประจุดสอบ q' วางในสนามไฟฟ้า \vec{E} มีทิศทาง ดังรูปที่ 4.1 จะเกิดแรงกระทำบนประจุ q' เคลื่อนที่จาก a ไป b ดังนั้นงานในการเคลื่อนที่ประจุ W_{ab} ที่กระทำโดยแรง \vec{F} คือ

รูปที่ 4.1

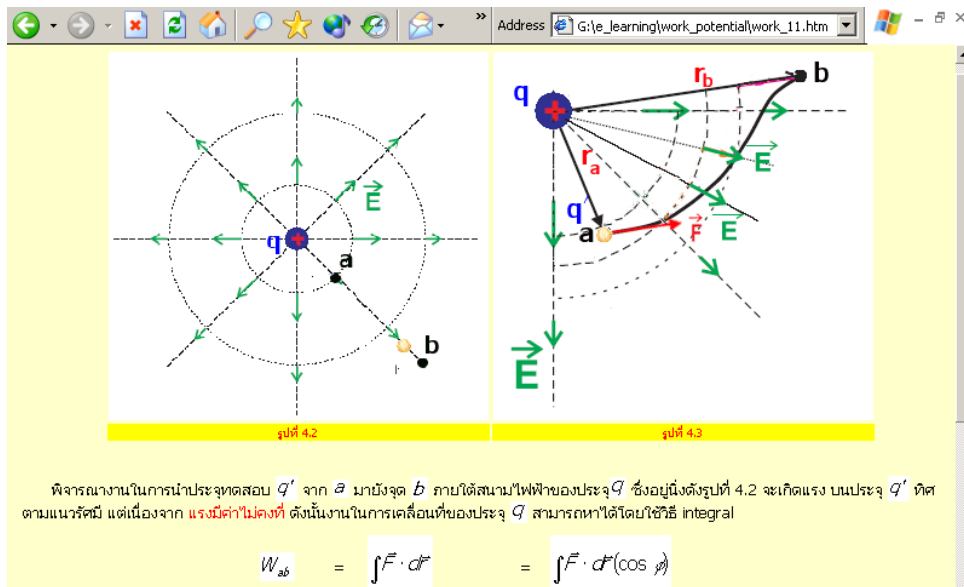
$$W_{ab} = \vec{F} \cdot \vec{d} = Fd \cos 0^\circ$$

แต่ \vec{F} คือแรงไฟฟ้าซึ่งเกิดจากประจุเคลื่อนที่ภายในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ (\vec{E} คงที่) จะได้ $\vec{F} = q'\vec{E}$

$$W_{ab} = \vec{F} = q'\vec{E} = q'Ed \cos 0^\circ$$

ในกรณีที่ q' เป็นประจุลบ งานในการเคลื่อนประจุจาก a ไป b คือ $W_{ab} = -\vec{F} = q'\vec{E}$ นั่นคือ ต้องใช้แรงงานนอกกระทำ

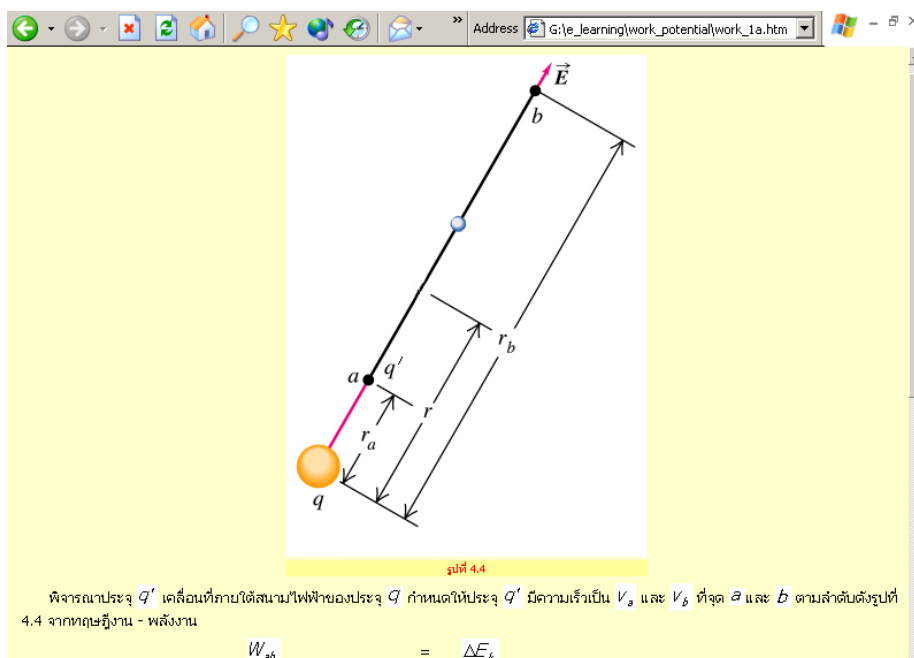
- จากภาพหน้าจอแสดงการหางานในการเคลื่อนย้ายประจุในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ
- คลิกที่ [หน้าต่อไป](#) จะพบหน้าจอแสดงการหางานในการเคลื่อนย้ายประจุในสนามไม่สม่ำเสมอ



พิจารณางานในการนำประจุทดสอบ q' จาก a มาถึงจุด b ภายใต้สนามไฟฟ้าของประจุ Q ซึ่งอยู่ในรูปที่ 4.2 จะเกิดแรง บนประจุ q' ทิศตามแนวรัศมี แต่เนื่องจาก **แรงมีค่าไม่คงที่** ดังนั้นงานในการเคลื่อนที่ของประจุ q' สามารถหาได้โดยใช้วิธี integral

$$W_{ab} = \int \vec{F} \cdot d\vec{r} = \int F \cdot dr (\cos \theta)$$

- คลิกที่ [หน้าต่อไป](#) จะพบหน้าจอแสดงการหาความสัมพันธ์ระหว่างงานและพลังงานในการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าซึ่งจะแสดงดังรูป



พิจารณาระเบิด q' เคลื่อนที่ภายใต้สนามไฟฟ้าของประจุ Q กำหนดให้ประจุ q' มีความเร็วเป็น V_a และ V_b ที่จุด a และ b ตามลำดับดังรูปที่ 4.4 จากทฤษฎีงาน - พลังงาน

$$W_{ab} = \Delta E_k$$

4.2 พลังงานศักย์ไฟฟ้าของประจุไฟฟ้าในสนามไฟฟ้า

คลิกที่ [หน้าต่อไป](#) จะพบหน้าจอแสดงพลังงานศักย์ของวัตถุในสนามโน้มถ่วงเปรียบเทียบกับพลังงานศักย์ของประจุในสนามไฟฟ้า

รูปที่ 4.5 ก

รูปที่ 4.5 ข

จากรูปที่ 4.5 ก. และ 4.5 ข. พิจารณามวล m เคลื่อนที่ภายใต้แรงโน้มถ่วงจากความสูง a ลงมาสู่ความสูง b พลังงานศักย์โน้มถ่วง ($(E_p)_g$)

$$W_{ab} = -(E_p)_g$$

รูปที่ 4.6

ในทำนองเดียวกันจากรูปที่ 4.6 พิจารณาประจุทดสอบ q' เคลื่อนที่ภายใต้สนามไฟฟ้า \vec{E} ซึ่งเกิดจากประจุ q ด้วยแรงไฟฟ้า \vec{F}_E เนื่องจากแรงไฟฟ้าเป็นแรงอนุรักษ์ ดังนั้น

$$W_{ab} = -\Delta E_p = (E_p)_a - (E_p)_b$$

จะได้พลังงานศักย์ไฟฟ้าคือ

- จากภาพหน้าจอให้เลื่อนหน้าจอลง จะพบปุ่ม ตัวอย่างที่ 4.2 ให้คลิกที่ปุ่มนี้เพื่อแสดงตัวอย่าง

$$-(\Delta E_p)_E = W_{ab} = \int \vec{F}_E \cdot d\vec{r} = \int q\vec{E} \cdot d\vec{r}$$

$$-(E_p)_{Eb} - (E_p)_{Ea} = \int_a^b \frac{kqQ}{r^2} dr = \frac{kqQ}{r_a} - \frac{kqQ}{r_b}$$

$$(E_p)_{Ea} - (E_p)_{Eb} = \frac{kqQ}{r_a} - \frac{kqQ}{r_b}$$

เมื่อ $(E_p)_{Ea} = \frac{kqQ}{r_a}$ คือพลังงานศักย์ไฟฟ้าที่จุด a
 $(E_p)_{Eb} = \frac{kqQ}{r_b}$ คือพลังงานศักย์ไฟฟ้าที่จุด b

จะได้พลังงานศักย์ไฟฟ้าบนประจุทดสอบ q' เนื่องจากสนามของประจุ Q ที่ระยะ r ใด ๆ คือ

$$E_p = \frac{kqQq'}{r}$$

ถ้าให้ r_a หรือ r_b อยู่ที่ยอดมันต์จะได้ $E_p = \frac{kqQq'}{r}$ นั่นคือพลังงานศักย์ไฟฟ้าของประจุทดสอบ q' ที่ระยะใด ๆ ภายใต้สนามไฟฟ้า Q คืองานในการเคลื่อนที่ของประจุทดสอบ จากระยะนั้นไปยังระยะอนันต์ หรืองานในการเคลื่อนที่ประจุทดสอบจากระยะอนันต์ มาไว้ ณ ตำแหน่งนั้น เนื่องจากพลังงานศักย์ไฟฟ้าเป็นปริมาณสเกลาร์ทุกครั้งที่คำนวณให้แทนเครื่องหมายของประจุ

ตัวอย่างที่ 4.2 คลิกเพื่อแสดงตัวอย่าง

- คลิกที่ปุ่ม สีเขียวด้านบนมุมซ้าย จะกลับไปหน้าจอก่อนหน้านี้
- ภาพหน้าจอแสดงตัวอย่างที่ 4.2 ดังรูป

ตัวอย่างที่ 4.2 ประจุไฟฟ้า $7 \mu C$ วางอยู่ระหว่างแผ่นประจุขนานซึ่งมีสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ $\vec{E} = 50\hat{j} \frac{N}{C}$ เดิมประจุ $0 m$ จงหาความเร็วของประจุไฟฟ้าเมื่อประจุเคลื่อนที่ได้ระยะทาง $0.04 m$ (*ไม่คิดแรงโน้มถ่วง*)

คลิกเพื่อกลับไปหน้าจอก่อนหน้านี้

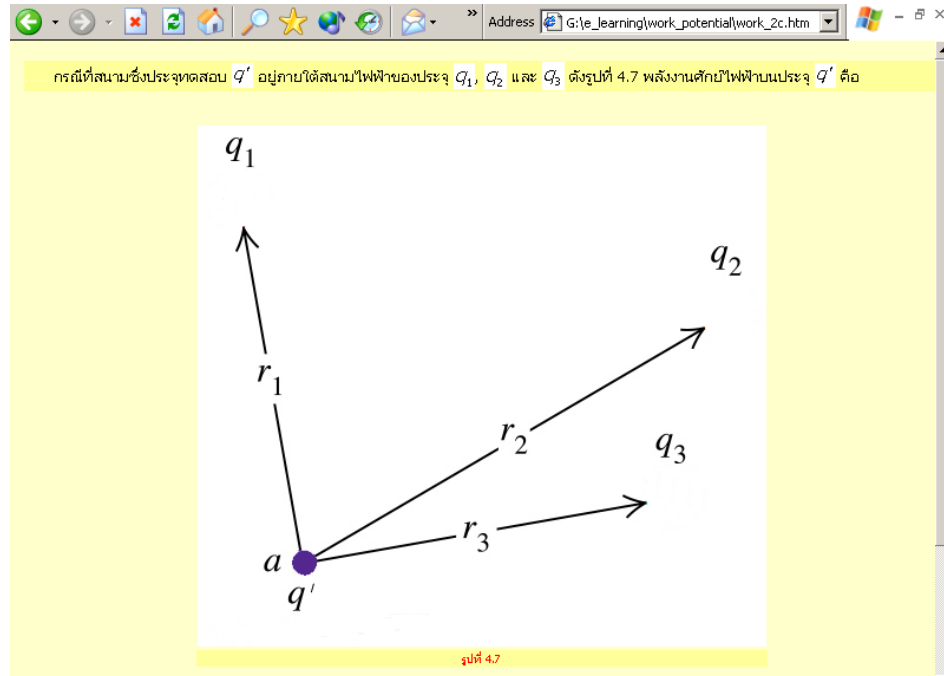
วิธีทำ ประจุทดสอบเป็นประจุบวกทำให้เคลื่อนที่ตามแกน Y จากหลักการอนุรักษ์พลังงานจะได้ว่า

$$(E_p + E_k)_A = (E_p + E_k)_B \dots\dots\dots (1)$$

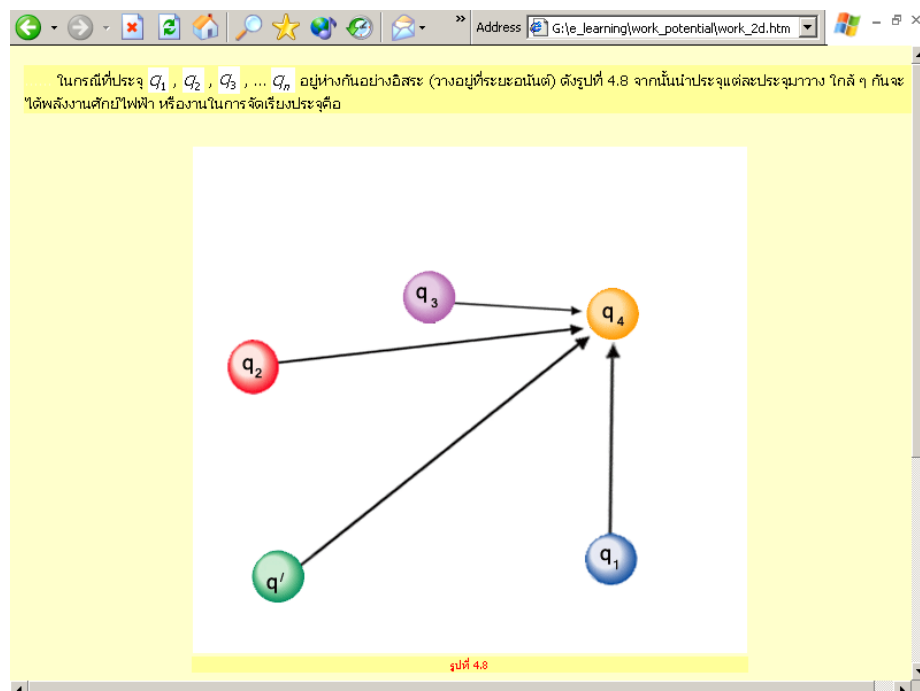
จาก $W_{AB} = F_{AB}d_{AB} = qEd_{AB}$
 แต่ $-W_{AB} = E_{p(B)} - E_{p(A)} = -qEd_{AB}$

ให้ A เป็นจุดอ้างอิง $E_{p(A)} = 0$ จะได้ $E_{p(B)} = -qEd_{AB}$ และ $E_{k(A)} = 0$ เนื่องจากประจุอยู่นิ่ง แทนค่าต่าง ๆ ลงในสมการที่ (1)

4. กรณีที่สนามซึ่งประจุทดสอบ q_1 อยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าของประจุ q_1 , q_2 และ q_3 ดังรูปที่ 4.7 พลังงานศักย์ไฟฟ้าบนประจุ q' เป็นดังตัวอย่างภาพหน้าจอ



5. ในกรณีที่ประจุ $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$ อยู่ห่างกันอย่างอิสระ (วางอยู่ที่ระยะอนันต์) ดังรูปที่ 4.8 จากนั้นนำประจุแต่ละประจุมาวาง ใกล้ ๆ กันจะได้พลังงานศักย์ไฟฟ้า หรืองานในการจัดเรียงประจุเป็นดังรูป



6. จากภาพหน้าจอให้เลื่อนหน้าจอลง จะพบปุ่มตัวอย่างที่ 4.3 คลิกที่ปุ่มนี้จะแสดงตัวอย่างที่ 4.3 ดังรูป

ตัวอย่างที่ 4.3 จงหางานในการนำประจุ Q และ $-Q$ จากระยะอนันต์ มาวางไว้ ณ. ตำแหน่งดังรูป จากนั้นนำประจุ Q จากระยะตั้ง กล้ามมาวางไว้ที่ ตำแหน่ง x ดังรูป

วิธีทำ

$$(E_p) = U = k \sum \frac{q_i q_j}{r_{ij}}$$

ครั้งแรกนำประจุ Q มาวางไว้ ณ. ตำแหน่ง a ใดๆไม่ต้องใช้พลังงานภายใต้สมมติไฟฟ้าเนื่องจากไม่มีประจุอะไรตั้งอยู่ ($\Delta V = 0$) จากนั้นนำประจุ $-Q$ และ Q มาวางภายใต้สมมติไฟฟ้าของ Q และ $-Q$ ตามลำดับ จะได้

$$U = k \left[\frac{-qQ}{2a} + \frac{qQ}{x-a} - \frac{qQ}{x+a} \right]$$

$$= kq \left[\frac{Q}{x-a} - \frac{Q}{x+a} - \frac{q}{2a} \right]$$

$$= kq \left[\frac{2Qa}{x^2 - a^2} - \frac{q}{2a} \right]$$

ถ้า $x \gg a$ จะได้

$$U = kq \left[\frac{2Qa}{x^2} - \frac{q}{2a} \right]$$

7. คลิกที่ปุ่ม สีเขียวด้านบนมุมซ้าย จะกลับไปหน้าจอก่อนหน้านี้

4.3 คำจำกัดความของศักย์ไฟฟ้า

คลิกที่ [หน้าต่อไป](#) จะพบหน้าจอแสดงคำจำกัดความของศักย์ไฟฟ้า

4.3 คำจำกัดความของศักย์ไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.9 ประจุทดสอบ q' (ประจุที่เคลื่อนที่) เคลื่อนที่จากระยะอนันต์ มาวางอยู่ห่างจากประจุ q เป็นระยะทาง r ใดๆ พลังงานศักย์ไฟฟ้า E_p บนประจุ q' คือ $E_p = k \frac{qq'}{r}$

รูปที่ 4.9

ศักย์ไฟฟ้า (V) คือพลังงานศักย์ไฟฟ้า E_p ต่อหนึ่งหน่วยประจุทดสอบ q'

$$V = \frac{E_p}{q'}$$

1. จากภาพหน้าจอแสดงประจุทดสอบ q' (ประจุที่เคลื่อนที่) เคลื่อนที่จากระยะอนันต์ มาวางอยู่ห่างจากประจุ q เป็นระยะทาง r
2. เมื่อเลื่อนหน้าจอจะพบภาพเคลื่อนไหวของศักย์ไฟฟ้าของประจุในรูปแบบที่ 4.10 ,4.11 และ 4.12 ตามลำดับ

รูปที่ 4.10 ศักย์ไฟฟ้าคืองานที่ใช้ในการเคลื่อนที่ประจุ (สีแดง) มายังตำแหน่งใด ๆ ต่อประจุนั้น (สีแดง) $V = \frac{W_{\text{ในการเคลื่อนที่ประจุ}}}{q_{\text{เคลื่อนที่}}}$ งานที่ใช้ในการเคลื่อนที่ประจุ 1 C (สีแดง) มีค่า 10 J จะได้ศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 10 (J/C) หรือ 10 V

รูปที่ 4.11 เมื่อเคลื่อนที่ประจุ 1C รอบประจุลบ สีดำ ที่ระยะห่างเท่ากันศักย์ไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากัน เรียกเส้นทางที่ใช้เคลื่อน ประจุ 1C ว่าเส้นสมศักย์ (equipotential line)

รูปที่ 4.12 ศักย์ไฟฟ้าจะมีค่าต่างกันเมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างประจุทั้งสอง และผลต่างของศักย์ไฟฟ้าระหว่างจุด 2 จุด เรียกว่า ความต่างศักย์ ในกรณีนี้ตำแหน่งที่ต้องการหาศักย์ไฟฟ้านั้นอยู่ในสนามไฟฟ้าที่เกิดจากประจุหลายตัว ศักย์ไฟฟ้า ณ. ตำแหน่งนั้นคือ

$$V = \frac{E_p}{q'} = k \sum \frac{q_i}{r_i}$$

เมื่อ E_p คือพลังงานศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากกลุ่มประจุ

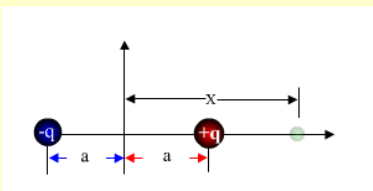
ตัวอย่างที่ 4.4 ตัวอย่างที่ 4.5

คลิกเพื่อดูตัวอย่าง

3. จากรูปที่ 4.10 แสดงศักย์ไฟฟ้าคืองานที่ใช้ในการเคลื่อนที่ประจุ (สีแดง) มายังตำแหน่งใด ๆ ต่อประจุนั้น (สีแดง)
รูปที่ 4.11 เมื่อเคลื่อนที่ประจุ 1C รอบประจุลบ สีดำ ที่ระยะห่างเท่ากันศักย์ไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากัน เรียกเส้นทางที่ใช้เคลื่อน ประจุ 1C ว่าเส้นสมศักย์
รูปที่ 4.12 ศักย์ไฟฟ้าจะมีค่าต่างกันเมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างประจุทั้งสอง และผลต่างของศักย์ไฟฟ้าระหว่างจุด 2 จุด เรียกว่า ความต่างศักย์
4. คลิกที่ปุ่ม ตัวอย่างที่ 4.4 และ 4.5 เพื่อศึกษาตัวอย่างทั้งสอง ซึ่งหลังจากที่คลิกแล้วหน้าจอจะปรากฏผังรูป

ตัวอย่างที่ 4.4

ตัวอย่างที่ 4.4 จงหาศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากไดโพลซึ่งวางห่างกัน $2a$ ที่ระยะ x ดังรูป



วิธีทำ

$$V = k \sum \frac{q_i}{r_i} = \left(\frac{kq}{x-a} \right) + \left(\frac{-kq}{x+a} \right)$$

$$= kq \left[\frac{1}{x-a} - \frac{1}{x+a} \right]$$

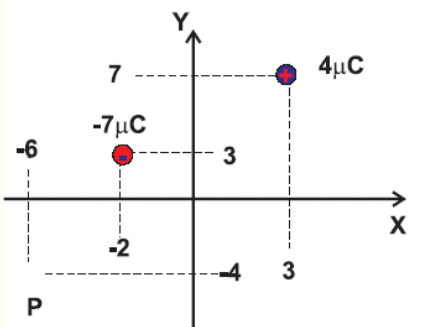
$$= \frac{2kqa}{x^2 - a^2} = \frac{kp}{x^2 - a^2}$$

เมื่อ $p = 2qa$ คือไดโพลโมเมนต์ ถ้า $x \gg a$ จะได้

$$V = \frac{kp}{x^2}$$

ตัวอย่างที่ 4.5

ตัวอย่างที่ 4.5 ประจุไฟฟ้า $4 \mu\text{C}$ วางอยู่ที่ตำแหน่ง $\vec{r}_1 = (3\vec{i} + 7\vec{j}) \text{ m}$ และประจุ $-7 \mu\text{C}$ วางอยู่ที่ตำแหน่ง $\vec{r}_2 = (-2\vec{i} + 3\vec{j}) \text{ m}$ จงหาศักย์ไฟฟ้าที่จุด P ซึ่งอยู่ที่ตำแหน่ง $\vec{r}_0 = (-6\vec{i} - 4\vec{j}) \text{ m}$ ดังรูป



วิธีทำ


$$V = k \sum \frac{q_i}{r_i}$$

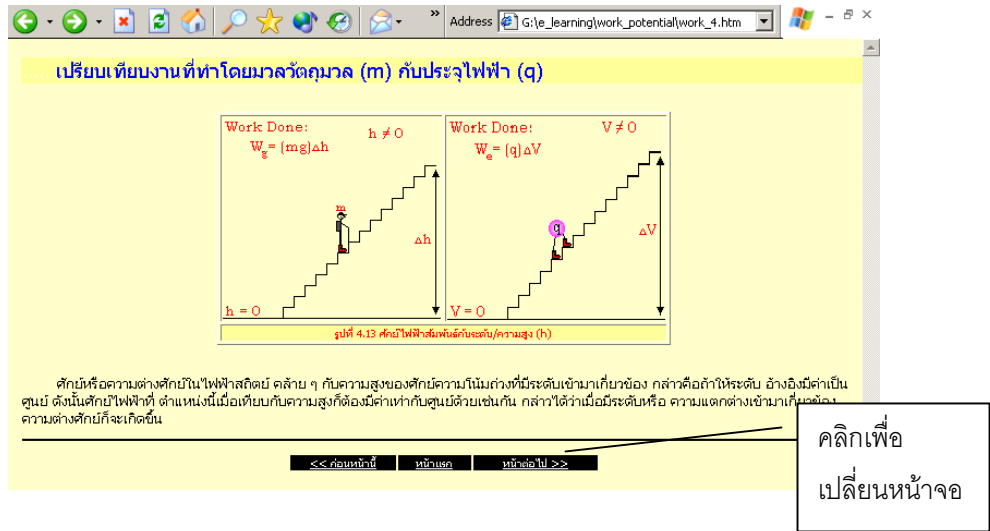
$$= k \left[\frac{q_1}{r_{10}} + \frac{q_2}{r_{20}} \right]$$

ให้ $q_1 = 4 \mu\text{C}$; $q_2 = -7 \mu\text{C}$

\vec{r}_{10} คือการกระจัดจากตำแหน่ง \vec{r}_1 ไปยังตำแหน่ง \vec{r}_0 ; $\vec{r}_{10} = \vec{r}_0 - \vec{r}_1$

\vec{r}_{20} คือการกระจัดจากตำแหน่ง \vec{r}_2 ไปยังตำแหน่ง \vec{r}_0 ; $\vec{r}_{20} = \vec{r}_0 - \vec{r}_2$

5. คลิกที่ปุ่ม  สีเขียวด้านบนมุมซ้าย จะกลับไปหน้าจอก่อนหน้านี้
6. คลิกที่ หน้าต่อไป จะพบหน้าจอแสดงเปรียบเทียบงานที่ทำโดยมวลวัตถุมวล (m) กับ ประจุไฟฟ้า (q)



เปรียบเทียบงานที่ทำโดยมวลวัตถุมวล (m) กับประจุไฟฟ้า (q)

Work Done: $W_g = (mg)\Delta h$ $h \neq 0$

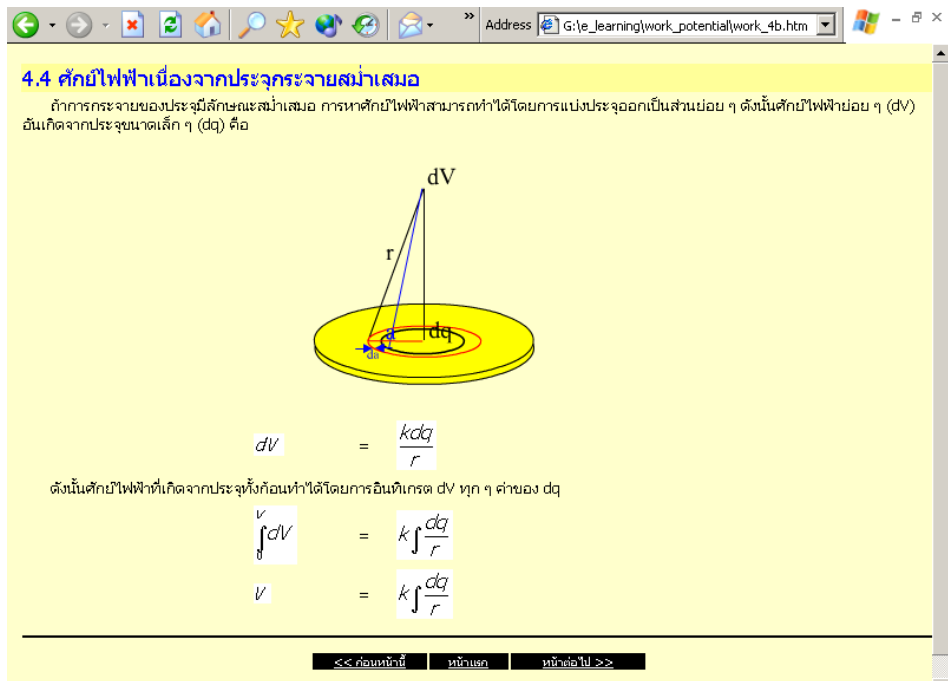
Work Done: $W_e = (q)\Delta V$ $V \neq 0$

รูปที่ 4.13 ค่ายไฟฟ้าสัมพันธ์กับระดับ/ความสูง (h)

ศึกษาหรือความต่างศักย์ไฟฟ้าสถิตมี คล้าย ๆ กับความสูงของตึกยกความโน้มถ่วงที่มีระดับเข้ามาเกี่ยวข้อง กล่าวคือถ้าให้ระดับ อ้างอิงมีค่าเป็น ศูนย์ ดังนั้นศักย์ไฟฟ้าที่ ตำแหน่งนี้เมื่อเทียบกับความสูงก็ดูจะมีค่าเท่ากับศูนย์ด้วยเช่นกัน กล่าวได้ว่าเมื่อมีระดับหรือ ความแตกต่างเข้ามาเกี่ยวข้อง ความต่างศักย์ก็จะเกิดขึ้น

คลิกเพื่อเปลี่ยนหน้าจอ

7. คลิกที่ หน้าต่อไป จะพบหน้าจอการหาค่าศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากประจุกระจายสม่ำเสมอ โดยแนวทางการอินทิเกรตเป็นดังภาพเคลื่อนไหว ดังรูป



4.4 ศักย์ไฟฟ้าเนื่องจากประจุกระจายสม่ำเสมอ

ถ้าการกระจายของประจุมีลักษณะสม่ำเสมอ การหาศักย์ไฟฟ้าสามารถทำได้โดยการแบ่งประจุออกเป็นส่วนย่อย ๆ ดังนั้นศักย์ไฟฟ้าย่อย ๆ (dV) อันเกิดจากประจุขนาดเล็ก ๆ (dq) คือ

$dV = \frac{k dq}{r}$

ดังนั้นศักย์ไฟฟ้าที่เกิดจากประจุทั้งหมดทำได้โดยการอินทิเกรต dV ทุก ๆ ค่าของ dq

$V = \int dV = k \int \frac{dq}{r}$

$V = k \int \frac{dq}{r}$