เอกสารอ้างอิง

1. Singer, H., Steinbigler, H., and Weiss, P., "A Charge Simulation Method for the Calculation of High Voltage Fields", IEEE PES, Winter Meeting, New York, Jan. 27 - Feb. 1, 1974

2. P.P. Silvester & R.L. Ferrari, Finite Elements for Electrical Engineers , Cambridge University Press, 1983

3. L.B. Loeb, J.H. Parker, E.E. Dodd, and W.N. English, "The choice of suitable gap forms for the study of corona breakdown and the field along the axis of a hemispherically capped cylindrical point to plane gap", Rev. Sci-Instr. vol 21, p.p. 42 - 47, 1950

4. L.B. Loeb, Electrical Coronas, Berkely, Calief : University of California Press, 1965

5. M.S. Abou-Seada and E. Nasser, "Digital computer calculation of the potential and its gradient of twin cylindrical conductors", IEEE TRANS. PAS - 88 p. 1802 - 1814, 1969

6. M.S. Abou-Seada, and E. Nasser, "Calculation of the potential gradient of twin-cylindrical bipolar conductors with various geometrical parameters", IEEE TRANS. PAS - 90 p.p. 1822 - 1829, 1971

7. M.S. Abou-Seada, and E. Nasser, "Digital computer calculation of streamer threshold of bundle conductor", IEEE PES. Winter Meeting, New York, N.Y. Jan 28 - Feb 2, 1973

8. H. Parekh, E. Nasser "Computation of Electric Field and Potential for Split-Bundle Transmission lines" Project 962 (101) IOWA State University, April 1974

9. M. Khaled "Computation of corona onset using the ring-charge method", PROC. IEEE. Vol 122, No. 1 Jan 1975

10. T. Takuma, T. Kawamoto (Japan) "Field calculation including surface resistance by charge simulation method", 3rd international Symposium on high voltage engineering MILAN 28 - 31 Aug. 1979

11. S. Sato, S. Menju, T. Sakakibara, K. Aoyagi, M. Honda (Japan) "Electric field calculation by charge simulation method using Axi-shperioidal charge, 3rd international Symposium on high voltage engineering MILAN 28 - 31 Aug., 1979

12. H. Singer (Federal Republic of Germany) "Computation of optimized electrode geometriec", 3rd international Symposium on high voltage engineering MILAN 28 - 31 Aug. 1979

13. E. KUFFEL, W.S. ZAENGL, High-Voltage Engineering Fundamentals , Pergamon Press 1984.

14. สำรวย สังข์สะอาด, วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2527

15. J.M. Meek and J.D. Craggs, Electrical Breakdown of Gases OXFORD, 1953

16. Rather, H., Electron Avalanches and Breakdown in Gases , Butterworths, London, (1964)

17. Sangkasaad Samruay, "Dielectric Strength of compressed SF_6 in Nonuniform Fields", Doctor Dissertation, ETH NO. 5738, Zurich 1976

18. M. Khaled, "Computation of Breakdown Phenomena in Nonuniform Air Gaps", Doctor Disseration, ETH NO. 5527, Zurice 1975

19. James L. Kuester and Joe H. Mize , Optimization Techniques with Fortran , Mc. Graw - Hill 1973

20. Samuel Seely, Ph.D., Introduction to electromagnetic fields , Mc. Graw - Hill, 1958

21. M.S. Abou-Seada and E. Nasser, "Digital computer calculation of the electric potential and field of a rod gap", IEEE PROC., Vol.56, P.P. 813 - 820, 1968

22. Stagg and El-Abiad, Computer Methods in Power System Analysis , Mc. Graw - Hill, 1968

23. Work, C.N., and Daikin, T.W., "Dielectric Breakdown of SF_6 in Nouniform Fields", Trans A.I.E.E. p.p. 682 - 688 (1953)

24. Berger Siegbert Knut, "Der Einfluss Von Elektrodenoberflächen-störunger Auf. Dielektrishe Festigkeit Von Luft", Doctor Dissertation, ETH. NO. 6124, Zurich

25. Berger, S. "Onset or breakdown Voltage reduction by electrode surface roughness in air and SF_6 paper No. F76 058-8, IEEE PES Winter Meeting, New York, January 25 - 30, 1976

26. Kraus, John D. and Carver, Keith R., Electromagnetics , Mc. Graw - Hill, 1973

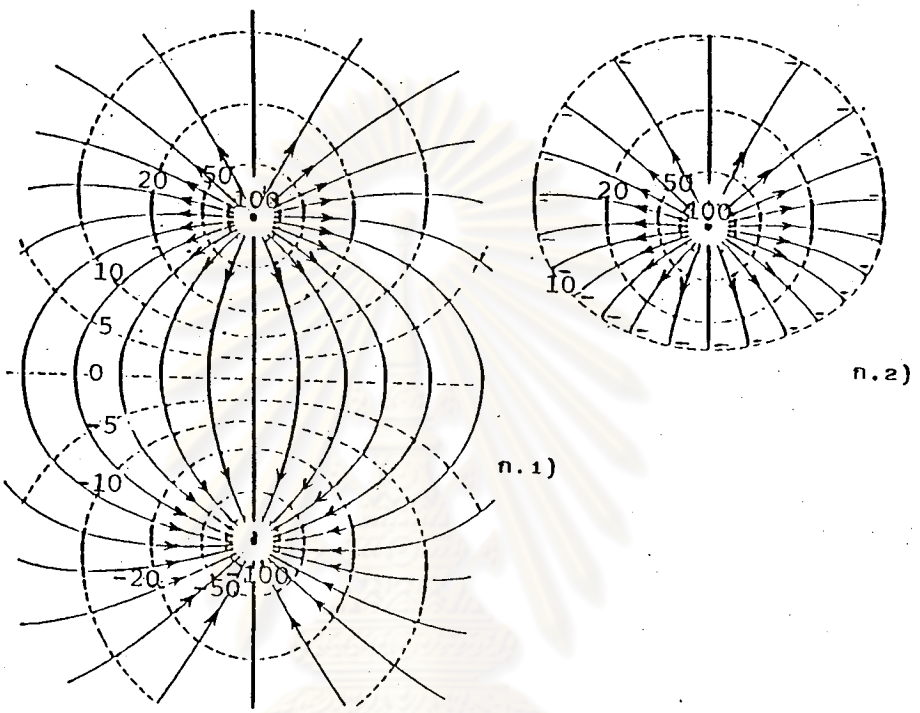
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

1. ทฤษฎีภาพเงา (The theory of image) [26]

ทฤษฎีนี้กล่าวถึงการทดแทนผลของขอบเขต (boundary) ที่มีต่อสนามไฟฟ้า ด้วยการสมมติให้มีประจุอยู่ด้านหลังเส้นขอบเขต เสมือนหนึ่งเป็นเงาของประจุจริงโดยที่ขอบเขตนั้นเป็นระนาบกระจกเงา ฉะนั้นผลลัพธ์ของสนามไฟฟ้าจะได้จากผลรวมของสนามไฟฟ้าจากประจุจริงและประจุภาพเงา ซึ่งหาได้โดยวิธีซูเปอร์โพซิชัน (Super position) ดังในรูป ก.1) แสดงการกระจายสนามไฟฟ้าเนื่องจากประจุไดโพล และถ้าพิจารณาเฉพาะสนามไฟฟ้าที่อยู่ในปริมาตร V ที่ครอบคลุมด้วยผิวสมศักย์ u = 10 โวลต์ สนามไฟฟ้าในปริมาตร V นี้ เป็นผลจากประจุทั้งที่อยู่ภายในและภายนอกปริมาตร V ที่รวมกันโดยวิธีซูเปอร์โพซิชัน ถ้าหากย้ายประจุภายนอกปริมาตร V ออกไปและจะให้ผิวสมศักย์ u = 10 โวลต์ คงสภาพเดิมอยู่ได้ก็ต่อเมื่อมีประจุกระจายอยู่บนผิวสมศักย์ u = 10 โวลต์ เท่าเดิม ดังในรูป ก.2) ฉะนั้นในทางกลับกันถ้าหากมีผิวสมศักย์ของปริมาตร V ที่มีประจุกระจายอยู่บนผิวสมศักย์ ประจุบนผิวสมศักย์นี้สามารถทดแทนได้ด้วยประจุที่มีค่าเท่ากัน อยู่ภายนอกปริมาตร V โดยที่ประจุที่อยู่นอกปริมาตร V นี้ ทำให้สนามไฟฟ้าภายในปริมาตร V มีสภาพคงเดิม ประจุที่อยู่ภายนอกปริมาตร V นี้ เราจัดว่าเป็นประจุภาพเงา ดังในรูป ก.1) ประจุ - Q จะเป็นประจุภาพเงาของประจุ + Q

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ก.1)

ก.2)

รูปที่ ผ1.1 แสดงสนามไฟฟ้าเนื่องจากประจุไดโพล

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2. ผลลัพธ์การคำนวณศักย์และสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดแท่งกลมวางขนานกับพื้นระนาบด้วยวิธีจำลองแบบประจุ

2.1 กำหนดให้ R_1 = 1.0 cm., R_2 = 0.5 cm., H = 101.0 cm., ROW = 1.0 cm.

ดังนั้นคำตอบที่ได้เมื่อกำหนดค่าของ ALPHA จะเป็นดังนี้

ALPHA (Radians.)	POTENTIAL (Volts)	E_r (Volts/cm.)	E_z (Volts/cm.)
0.00000	1.00000	0.00000	0.18649
0.261799	1.00021	0.04581	0.17958
0.52359	1.00111	0.09127	0.16569
0.78539	1.00165	0.13614	0.13558
1.04719	1.00099	0.16569	0.09130
1.30899	1.00017	0.18075	0.04651
1.57079	1.00000	0.18836	0.00000
1.83259	0.99982	0.18312	-0.05100
2.09439	0.99901	0.16049	-0.09691
2.35619	0.99842	0.13067	-0.13070
2.61799	0.99901	0.09723	-0.16107
2.87979	0.99982	0.05138	-0.18442
3.14159	1.00000	0.00000	-0.19030
3.40339	1.00018	-0.04713	-0.18313
3.66519	1.00095	-0.09307	-0.16795
3.92699	1.00145	-0.13752	-0.13713
4.18879	1.00087	-0.16694	-0.09251
4.45059	1.00015	-0.18178	-0.04703
4.71239	1.00000	-0.18840	0.00000
4.97419	0.99985	-0.18222	0.05052
5.23559	0.99911	-0.15935	0.09597
5.49779	0.99847	-0.12865	0.12934
5.75959	0.99894	-0.09519	0.15797
6.02139	0.99979	-0.05070	0.18076

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2 กำหนดให้ R_1 = 1.0 cm., R_2 = 0.5 cm., H = 101.0 cm.,
ALPHA = 3.14159 Radians.

ดังนั้นคำตอบที่ได้เมื่อกำหนดค่าของ ROW จะเป็นดังนี้

ROW (cm.)	PONTENTIAL (VOLTS)	E_r (Volts/cm.)	E_z (Volts/cm.)
11.0	0.53780	0.00000	-0.01812
21.0	0.40582	0.00000	-0.01001
31.0	0.32173	0.00000	-0.00718
41.0	0.25770	0.00000	-0.00577
51.0	0.20450	0.00000	-0.00494
61.0	0.15785	0.00000	-0.00442
71.0	0.11540	0.00000	-0.00409
81.0	0.07561	0.00000	-0.00388
91.0	0.03743	0.00000	-0.00377
101.0	0.00000	0.00000	-0.00373

2.3 กำหนดให้ R_1 = 1.0 cm., R_2 = 0.5 cm., H = 101.0 cm.,
ROW = 1.41420 cm., ALPHA = 2.35619 Radians

จะได้คำตอบดังนี้ PONTENTAIL = 0.93362 Volts

E_r = 0.09392 Volts/cm.

E_z = -0.09440 Volts/cm.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

๓. ผลลัพธ์การคำนวณศักย์และสนามไฟฟ้าของอิเล็กโทรดแท่งกลมวางขนานกับพื้นระนาบด้วยวิธี-คณิตศาสตร์วิเคราะห์

๓.๑ กำหนดให้ R_1 = 1.0 cm., R_2 = 0.5 cm., H = 101.0 cm., ALPHA = 3.14159 Radians.

ดังนั้น a จะมีค่า 100.995 และ K จะมีค่า 0.18839 และคำตอบที่ได้เมื่อกำหนดค่าของ ROW จะเป็นดังนี้

ROW (cm.)	ค่า (X; Y)	POTENTIAL (Volts)	E_r (Volts/cm.)	E_z (Volts/cm.)
11.00	0 ; 90.0	0.537817	0.0000	-0.0181205
21.00	0 ; 80.0	0.4058269	0.0000	-0.0100139
31.00	0 ; 70.0	0.321734	0.0000	-0.0071798
41.00	0 ; 60.0	0.257703	0.0000	-0.0057655
51.00	0 ; 50.0	0.2045009	0.0000	-0.0049419
61.00	0 ; 40.0	0.1578581	0.0000	-0.0044247
71.00	0 ; 30.0	0.1153982	0.0000	-0.0040917
81.00	0 ; 20.0	0.0756125	0.0000	-0.0038829
91.00	0 ; 10.0	0.0374294	0.0000	-0.0037676
101.00	0 ; 0.0	0.00000	0.0000	-0.0037306

๓.๒ กำหนดให้ R_1 = 1.0 cm., R_2 = 0.5 cm., H = 101.0 cm., ROW = 1.41420 cm., ALPHA = 2.35619 Radians.

ซึ่งมีค่าของ X และ Y เป็น (1.0 ; 100.0)

ค่าที่คำนวนได้จะมีค่าดังนี้

POTENTIAL = 0.93426 Volts

E_r = 0.0946534 Volts/cm.

E_z = -0.0951315 Volts/cm.

4. การคำนวณอนุพันธ์ที่ 2 และที่ 4 ของอิเล็กโทรดแท่งกลมวางขนานกับระนาบ

จากหัวข้อ 3.2.1 สมการที่ (3.8) และ (3.9) แสดงค่า $\frac{d}{dc}\phi(c)\Big|_{c=c_i}$

ดังนั้นค่าของ $\frac{d^2}{dc^2}\phi(c)\Big|_{c=c_i}$ จะมีค่าดังนี้

จากสมการ (3.8)

$$\therefore \quad \frac{d^2}{dc^2}\phi(c)\Big|_{c=c_i} = -\sum_{j=1}^{N} q_j \frac{d}{dc}[AA + BB] \qquad (ผ.4.1)$$

โดยที่ $$AA = \frac{R_1R_2 \sin (c_i - b_j)}{(R_2 \sin b_j - R_1 \sin c_i)^2 + (R_2 \cos b_j - R_1 \cos c_i)^2}$$

$$BB = \frac{2HR_1 \sin c_i + R_1R_2 \sin (b_j + c_i)}{(R_2 \sin b_j - R_1 \sin c_i)^2 + (2H + R_2 \cos b_j + R_1 \cos c_i)^2}$$

ดังนั้นค่าของ $$\frac{d}{dc} AA = \frac{R_1R_2 \cos (b_j - c_i)}{(R_2 \sin b_j - R_2 \sin c_i)^2 + (R_2 \cos b_j - R_1 \cos c_i)^2}$$

$$-(2)\frac{[R_1R_2 \sin (c_i - b_j)]^2}{[(R_2 \sin b_j - R_1 \sin c_i)^2 + (R_2 \cos b_j - R_1 \cos c_i)^2]^2}$$

(ผ.4.2)

และ $$\frac{d}{dc} BB = \frac{2HR_1 \cos c_i + R_1R_2 \cos (b_j + c_i)}{(R_2 \sin b_j - R_1 \sin c_i)^2 + (2H + R_2 \cos b_j + R_1 \cos c_i)^2}$$

$$+(2)\frac{2HR_1 \sin c_i + R_1R_2 \sin (b_j + c_i)]^2}{[(R_2 \sin b_j - R_1 \sin c_i)^2 + (2H + R_2 \cos b_j + R_1 \cos c_i)^2]^2}$$

(ผ.4.3)

จากสมการที่ (ผ.4.1), (ผ.4.2) และ (ผ.4.3) จะสามารถหาค่าอนุพันธ์ที่ 2 ได้ คือ

$$\left.\frac{d^2}{dc^2}\phi(c)\right|_{c=c_i} = -\sum_{j=1}^{N} q_j \left[\frac{R_1R_2\cos(b_j - c_i)}{(R_2\sin b_j - R_1\sin c_i)^2 + (R_2\,\text{soc}\, b_j - R_1\cos c_i)^2}\right.$$

$$-(2)\frac{[R_1R_2\sin(c_i - b_j)]^2}{[(R_2\sin b_j - R_1\sin c_i)^2 + (R_2\cos b_j - R_1\cos c_i)^2]^2}$$

$$+\frac{2HR_1\cos c_i + R_1R_2\cos(b_j + c_i)}{(R_2\sin b_j - R_1\sin c_i)^2 + (2H + R_2\cos b_j + R_1\cos c_i)^2}$$

$$\left.+(2)\frac{[2HR_1\sin c_i + R_1R_2\sin(b_j + c_i)]^2}{[(R_2\sin b_j - R_1\sin c_i)^2 + (2H + R_2\cos b_j + R_1\cos c_i)^2]^2}\right] \qquad \text{(ผ.4.4)}$$

$$= -\sum_{j=1}^{N} q_j\left[\frac{D}{R+S} - \frac{2(TT)^2}{(R+S)^2} + \frac{U+W}{R+Z} + \frac{2(X+Y)^2}{(R+Z)^2}\right] \qquad \text{(ผ.4.5)}$$

โดยที่ R, S, TT, Z, X, Y มีค่าตามสมการที่ (3.7) และ (3.9)

$$D = R_1R_2\cos(b_j - c_i)$$

$$U = 2HR_1\cos c_i$$

$$W = R_1R_2\cos(b_j + c_i)$$

ค่าอนุพันธ์ที่ 2 ตามสมการที่ (ผ.4.5) จะปรากฏในบทที่ 3 สมการที่ (3.10)

หาค่าของ $\left.\frac{d^3}{dc^3}\phi(c)\right|_{c=c_i} = -\sum_{j=1}^{N} q_j \frac{d}{dc}[DD - EE + FF + GG$ (ผ.4.4)

โดยที่ $$DD = \frac{R_1R_2\cos(b_j - c_i)}{(R_2\sin b_j - R_1\sin c_i)^2 + (R_2\cos b_j - R_1\cos c_i)^2}$$

$$EE = \frac{(2)[R_1R_2\sin(c_i - b_j)]^2}{[(R_2\sin b_j - R_1\sin c_i)^2 + (R_2\cos b_j - R_1\cos c_i)^2]^2}$$

$$FF = \frac{2HR_1 \cos c_i + R_1R_2 \cos (b_j + c_i)}{(R_2 \sin b_j - R_1 \sin c_i)^2 + (2H + R_2 \cos b_j + R_1 \cos c_i)^2}$$

$$GG = \frac{(2)[2HR_1 \sin c_i + R_1R_2 \sin (b_j + c_i)]^2}{[(R_2 \sin b_j - R_1 \sin c_i)^2 + (2H + R_2 \cos b_j + R_1 \cos c_i)^2]^2}$$

ดังนั้นค่าของ $\frac{d}{dc} DD = \frac{R_1R_2 \sin (b_j - c_i)}{(R_2 \sin b_j - R_1 \sin c_i)^2 + (R_2 \cos b_j - R_1 \cos c_i)^2}$

$$- \frac{(2)[R_1R_2 \cos (b_j - c_i)][R_1R_2 \sin (c_i - b_j)]}{[(R_2 \sin b_j - R_1 \sin c_i)^2 + (R_2 \cos b_j - R_1 \cos c_i)^2]^2} \frac{c_i - b_j)]}{}$$

(ผ.4.7)

และ $\frac{d}{dc} EE = \frac{(4)[R_1R_2 \sin (c_i - b_j)][R_1R_2 \cos (b_j - c_i)]}{[(R_2 \sin b_j - R_1 \sin c_i)^2 + (R_2 \cos b_j - R_1 \cos c_i)^2]^2}$

$$- \frac{(8)[R_1R_2 \sin (c_i - b_j)]^3}{[(R_2 \sin b_j - R_1 \sin c_i)^2 + (R_2 \cos b_j - R_1 \cos c_i)^2]^3}$$

(ผ.4.8)

และ $\frac{d}{dc} FF = \frac{2HR_1 \sin c_i + R_1R_2 \sin (b_j + c_i)}{(R_2 \sin b_j - R_1 \sin c_i)^2 + (2H + R_2 \cos b_j - R_1 \cos c_i)^2}$

$$+ \frac{(2)[2HR_1 \cos c_i + R_1R_2 \cos (b_j + c_i)][2HR_1 \sin c_i + R_1R_2}{[(R_2 \sin b_j - R_1 \sin c_i)^2 + (2H + R_2 \cos b_j + R_1 \cos c_i)^2]^2}$$

$$\frac{\sin (b_j + c_i)]}{}$$

(ผ.4.9)

และ $\frac{d}{dc} GG = \frac{(4)[2HR_1 \sin c_i + R_1R_2 \sin (b_j + c_i)][2HR_1 \cos c_i}{[R_2 \sin b_j - R_1 \sin c_i)^2 + (2H + R_2 \cos b_j + R_1 \cos c_i)^2]^2}$

$$\frac{+ R_1R_2 \cos (b_j + c_i)]}{}$$

$$+\frac{(8)[2HR_1 \sin c_i + R_1R_2 \sin (b_j + c_i)]^3}{[(R_2 \sin b_j - R_1 \sin c_i)^2 + (2H + R_2 \cos b_j + R_1 \cos c_i)^2]^3}$$

(ผ.4.10)

จากสมการที่ (ผ.4.6) ถึงสมการที่ (ผ.4.10) จะสามารถหาค่าอนุพันธ์ที่ 3 ได้ คือ

$$\frac{d^3}{dc^3}\phi(c)\Big|_{c=c_i} = -\sum_{j=1}^{N} q_j \Bigg[\frac{R_1R_2 \sin (b_j - c_i)}{(R_2 \sin b_j - R_1 \sin c_i)^2 + (R_2 \cos b_j - R_1 \cos c_i)^2}$$

$$-\frac{(6)[R_1R_2 \sin (c_i - b_j)][R_1R_2 \cos (b_j - c_i)]}{[(R_2 \sin b_j - R_1 \sin c_i)^2 + (R_2 \cos b_j - R_1 \cos c_i)^2]^2}$$

$$+\frac{(8)[R_1R_2 \sin (c_i - b_j)]^3}{[(R_2 \sin b_j - R_1 \sin c_i)^2 + (R_2 \cos b_j - R_1 \cos c_i)^2]^3}$$

$$-\frac{2HR_1 \sin c_i + R_1R_2 \sin (b_j + c_i)}{[(R_2 \sin b_j - R_1 \sin c_i)^2 + (2H + R_2 \cos b_j + R_1 \cos c_i)]^2}$$

$$+\frac{(6)[2HR_1 \sin c_i + R_1R_2 \sin (b_j + c_i)][2HR_1 \cos c_i +}{[(R_2 \sin b_j - R_1 \sin c_i)^2 + (2H + R_2 \cos b_j + R_1 \cos c_i)^2]^2}$$

$$\underline{R_1R_2 \cos (b_j + c_i)]}$$

$$+\frac{(8)[2HR_1 \sin c_i + R_1R_2 \sin (b_j + c_i)]^3}{[R_2 \sin b_j - R_1 \sin c_i)^2 + (2H + R_2 \cos b_j + R_1 \cos c_i)^2]^3}$$

(ผ.4.11)

หาค่าของ $\frac{d^4}{dc^4}\phi(c)\Big|_{c=c_i}$ จากสมการ (ผ.4.11)

$$\therefore \left.\frac{d^4}{dc^4}\phi(c)\right|_{c=c_i} = -\sum_{j=1}^{N} q_j \frac{d}{dc}[HH - II + JJ - KK + LL + MM] \qquad (ผ.4.12)$$

โดย

$$HH = \frac{R_1R_2 \sin (b_j - c_i)}{(R_2 \sin b_j - R_1 \sin c_i)^2 + (R_2 \cos b_j - R_1 \cos c_i)^2}$$

$$II = \frac{(6)[R_1R_2 \sin (c_i - b_j)][R_1R_2 \cos (b_j - c_i)]}{[(R_2 \sin b_j - R_1 \sin c_i)^2 + (R_2 \cos b_j - R_1 \cos c_i)^2]^2}$$

$$JJ = \frac{(8)[R_1R_2 \sin (c_i - b_j)]^3}{[(R_2 \sin b_j - R_1 \sin c_i)^2 + (R_2 \cos b_j - R_1 \cos c_i)^2]^3}$$

$$KK = \frac{2HR_1 \sin c_i + R_1R_2 \sin (b_j + c_i)}{(R_2 \sin b_j - R_1 \sin c_i)^2 + (2H + R_2 \cos b_j + R_1 \cos c_i)^2}$$

$$LL = \frac{(6)[2HR_1 \sin c_i + R_1R_2 \sin (b_j + c_i)]\ [2HR_1 \cos c_i + R_1R_2 \cos (b_j + c_i)]}{[(R_2 \sin b_j - R_1 \sin c_i)^2 + (2H + R_2 \cos b_j + R_1 \cos c_i)^2]^2}$$

$$MM = \frac{2HR_1 \sin c_i + R_1R_2 \sin (b_j + c_i)^3]}{[R_2 \sin b_j - R_1 \sin c_i)^2 + (2H + R_2 \cos b_j + R_1 \cos c_i)^2]^3}$$

ดังนั้นค่าของ

$$\frac{d}{dc} HH = \frac{-R_1R_2 \cos (b_j - c_i)}{(R_2 \sin b_j - R_1 \sin c_i)^2 + (R_2 \cos b_j - R_2 \cos c_i)^2} + \frac{(2)[R_1R_2 \sin (b_j - c_i)]^2}{[(R_2 \sin b_j - R_1 \sin c_i)^2 + (R_2 \cos b_j - R_1 \cos c_i)^2]^2}$$

(ผ.4.13)

และ

$$\frac{d}{dc} II = \frac{(6)[R_1R_2 \cos (b_j - c_i)]^2 - [R_2R_2 \sin (c_i - b_j)]^2}{[(R_2 \sin b_j - R_1 \sin c_i)^2 + (R_2 \cos b_j - R_1 \cos c_i)^2]^2} - \frac{(24)[R_1R_2 \cos (b_j - c_i)][R_1R_2 \sin (c_i - b_j)]^2}{[(R_2 \sin b_j - R_1 \sin c_i)^2 + (R_2 \cos b_j - R_1 \cos c_i)^2]^3}$$

(ผ.4.14)

และ
$$\frac{d}{dc} JJ = \frac{24[R_1R_2 \cos (b_j - c_i)][R_1R_2 \sin (c_i - b_j)]^2}{[R_2 \sin b_j - R_1 \sin c_i)^2 + (R_2 \cos b_j - R_1 \cos c_i)^2]^3}$$

$$- \frac{(48)[R_1R_2 \sin (c_i - b_j)]^4}{[(R_2 \sin b_j - R_1 \sin c_i)^2 + (R_2 \cos b_j - R_1 \cos c_i)^2]^4}$$

(ฆ.4.15)

และ
$$\frac{d}{dc} KK = \frac{2HR_1 \cos c_i + R_1R_2 \cos (b_j + c_i)}{(R_2 \sin b_j - R_1 \sin c_i)^2 + (2H + R_2 \cos b_j + R_1 \cos c_i)^2}$$

$$+ \frac{(2)[2HR_1 \sin c_i + R_1R_2 \sin (b_j + c_i)]^2}{[(R_2 \sin b_j - R_1 \sin c_i)^2 + (2H + R_2 \cos b_j + R_1 \cos c_i)^2]^2}$$

(ฆ.4.16)

และ
$$\frac{d}{dc} LL = \frac{(6)[2HR_1 \cos c_i + R_1R_2 \cos (b_j + c_i)]^2 - [2HR_1 \sin c_i}{[(R_2 \sin b_j - R_1 \sin c_i)^2 + (2H + R_2 \cos b_j + R_1 \cos c_i)^2]^2}$$

$$\underline{+ R_1R_2 \sin (b_j + c_i)]^2}$$

$$+ \frac{(24)[2HR_1 \cos c_i + R_1R_2 \cos (b_j + c_i)][2HR_1 \sin c_i +}{[R_2 \sin b_j - R_1 \sin c_i)^2 + (2H + R_2 \cos b_j + R_1 \cos c_i)^2]^3}$$

$$\underline{+ R_1R_2 \sin (b_j + c_i)]^2}$$

(ฆ.4.17)

และ
$$\frac{d}{dc} MM = \frac{(24)[2HR_1 \cos c_i + R_1R_2 \cos (b_j + c_i)][2HR_1 \sin c_i +}{[(R_2 \sin b_j - R_1 \sin c_i)^2 + (2H + R_2 \cos b_j + R_1 \cos c_i)^2]^3}$$

$$+ R_1R_2 \sin (b_j + c_i)]^2$$

$$+ \frac{(48)[2HR_1 \sin c_i + R_1R_2 \sin (b_j + c_i)]^4}{[(R_2 \sin b_j - R_1 \sin c_i)^2 + (2H + R_2 \cos b_j + R_1 \cos c_i)^2]^4}$$

(ฆ.4.18)

จากสมการที่ (ผ.4.12) ถึงสมการที่ (ผ.4.18) จะสามารถหาค่าของอนุพันธ์ที่ 4 ได้ คือ

$$\left.\frac{d^4}{dc^4}\phi(c)\right|_{c=c_i} = -\sum_{j=1}^{N} q_j \left[\frac{-R_1R_2\cos(b_j - c_i)}{(R_2\sin b_j - R_1\sin c_i)^2 + (R_2\cos b_j - R_1\cos c_i)^2} \right.$$

$$- \frac{(6)(R_1R_2\cos(b_j - c_i))^2 - (8)[R_1R_2\sin(b_j - c_i)]^2}{[(R_2\sin b_j - R_1\sin c_i)^2 + (R_2\cos b_j - R_1\cos c_i)^2]^2}$$

$$+ \frac{(48)[R_1R_2\cos(b_j - c_i)][R_1R_2\sin(c_i - b_j)]^2}{[R_2\sin b_j - R_1\sin c_i)^2 + (R_2\cos b_j - R_1\cos c_i)^2]^3}$$

$$- \frac{(48)[R_1R_2\sin(c_i - b_j)]^4}{[(R_2\sin b_j - R_1\sin c_i)^2 + (R_2\cos b_j - R_1\cos c_i)^2]^4}$$

$$- \frac{2HR_1\cos c_i + R_1R_2\cos(b_j + c_i)}{(R_2\sin b_j - R_1\sin c_i)^2 + (2H + R_2\cos b_j + R_1\cos c_i)^2}$$

$$+ \frac{(6)[2HR_1\cos c_i + R_1R_2\cos(b_j + c_i)]^2 - (8)[2HR_1\sin c_i}{[(R_2\sin b_j - R_1\sin c_i)^2 + (2H + R_2\cos b_j + R_1\cos c_i)^2]^2}$$

$$\underline{+ R_1R_2 + \sin(b_j + c_i)]^2}$$

$$+ \frac{(48)[2HR_1\cos c_i + R_1R_2\cos(b_j + c_i)]\ [2HR_1\sin c_i}{[(R_2\sin b_j - R_1\sin c_i)^2 + (2H + R_2\cos b_j + R_1\cos c_i)^2]^3}$$

$$\underline{+ R_1R_2\sin(b_j + c_i)]^2}$$

$$\left. + \frac{(48)[2HR_1\sin c_i + R_1R_2\sin(b_j + c_i)]^4}{[(R_2\sin b_j - R_1\sin c_i)^2 + (2H + R_2\cos b_j + R_1\cos c_i)^2]^4} \right] \qquad \text{(ผ.4.19)}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ดังนั้น $\left.\frac{d^4}{dc^4}\phi(c)\right|_{c=c_i} = -\sum_{j=1}^{N} q_j\left[-\frac{D}{R+S} - \frac{6D^2 - 8T^2}{(R+S)} + \frac{(48D)(TT)^2}{(R+X)^3} - \frac{48(TT)^4}{(R+S)^4}\right.$

$$- \frac{U+W}{R+Z} + \frac{6(U+W)^2 - 8(X+Y)^2}{(R+Z)^2} + \frac{48(U+W)(X+Y)^2}{(R+Z)^3}$$

$$\left. + \frac{48(X+Y)^4}{(R+Z)^4}\right] \qquad \text{(ผ.4.20)}$$

โดยที่ D, R, S, TT, U, W, Z, X, Y มีค่าตามสมการที่ (3.7), (3.9) และ (ผ.4.5) และ $T = R_1R_2 \sin(b_j - c_i)$

ค่าอนุพันธ์ที่ 4 ตามสมการที่ (ผ.4.20) จะปรากฏในบทที่ 3 สมการที่ (3.11)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5. <u>การคำนวณอนุพันธ์ที่ 2 และ 4 ของอิเล็กโทรดแท่งกลมปลายมนกับระนาบ</u>

จากหัวข้อ 3.4 สมการที่ (3.33)

$$\left.\frac{d^n}{dc^n}\phi(c)\right|_{c=c_i} = \frac{d^n}{dc^n}S(c) + \frac{d^n}{dc^n}W(c, A) \; ; \; n = 2, 4 \qquad (3.33)$$

โดยที่ $S(c) = \frac{1}{R} - \frac{1}{[R^2 \sin^2 c + [2(G + R) - R \cos c]^2]^{1/2}}$

และ $W(c, A) =$

$$\ln\left|\frac{A + G + R - R\cos c + [R^2 \sin^2 c + (A + G + R - R\cos c)^2]^{1/2}}{A - G - R + R\cos c + [R^2 \sin^2 c + (A - G - R + R\cos c)^2]^{1/2}}\right|$$

กำหนดให้เงื่อนไขขอบเขต คือ ผลของอนุพันธ์ที่ 2 และ 4 มีค่าเท่ากับศูนย์ นั่นคือ

$$\left.\frac{d^n}{dc^n}\phi(c)\right|_{c=c_i} = 0 \; ; \; n = 2, 4 \qquad (ผ.5.1)$$

ดังนั้น จะหาค่าอนุพันธ์ที่ 2 และ 4 ได้ดังนี้ คือ

$$\frac{d}{dc}S(c) = \frac{1}{2}[R^2 \sin^2 c + [2(G + R) - R\cos c]^2]^{-3/2}$$

$$[2R^2 \sin c \cos c + 2[2(G + R) - R\cos c][R \sin c]]$$

$$= [R^2 \sin^2 c + [2(G + R) - R\cos c]^2]^{-3/2}[2(G + R)$$

$$R \sin c]$$

ให้ $c = 0$

ดังนั้น $\left.\frac{d}{dc}S(c)\right|_{c=0} = 0$

หาค่าอนุพันธ์ที่ 2 ของ S(c) จะได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$\frac{d^2}{dc^2}S(c) = -\frac{3}{2}[R^2 \sin^2 c + [2(G + R) - R \cos c]^2]^{-5/2}[2R^2 \sin c \cos c$$

$$+ 2[(G + R) - R \cos c][R \sin c]][2(G + R) R \sin c] +$$

$$[R^2 \sin^2 c + [2(G + R) - R \cos c]^2]^{-3/2}[2R(G + R) \cos c]$$

$$= -12[R^2 \sin^2 c + [2(G + R) - R \cos]^2]^{-5/2}[R(G + R) \sin c]^2$$

$$+ 2[R^2 \sin^2 c + [2(G + R) - R \cos c]^2]^{-3/2}[R(G + R) \cos c]$$

ให้ $c = 0$

ดังนั้น $$\left.\frac{d^2}{dc^2}S(c)\right|_{c=0} = 2[(0) + [2(G + R) - R]^2]^{-3/2}[R(G + R)]$$

$$= \frac{2R(G + R)}{(2G + R)^3} \qquad (ผ.5.2)$$

หาค่าอนุพันธ์ที่ 3 ของ $S(c)$ จะได้

$$\frac{d^3}{dc^3}S(c) = 30[R^2 \sin^2 c + [2(G + R) - R \cos c]^2]^{-7/2}[2R^2 \sin c \cos c$$

$$+ 2[2(G + R) - R \cos c][R \sin c]][R(G + R) \sin c]^2$$

$$- 12[R^2 \sin^2 c + [2(G + R) - R \cos c]^2]^{-5/2} 2[R (G + R)$$

$$\sin c][R(G + R) \cos c] - 3 [R^2 \sin^2 c + [2(G + R) - R$$

$$\cos c]^2]^{-5/2}[2R^2 \sin c \cos c + 2[2(G + R) - R \cos c]$$

$$[R \sin c][R(G + R) \cos c] + 2[R^2 \sin^2 c + [2(G + R)- R$$

$$\cos c]^2]^{-3/2}[R(G + R) (-\sin c)]$$

$$= 120[R^2 \sin^2 c + [2(G + R) - R \cos c]^2]^{-7/2}[R(G + R) \sin c]^3$$

$$- 18(R^2 \sin^2 c + [2(G + R) - R \cos c]^2]^{-5/2}[R^2(G + R)^2$$

$$\sin 2c] - 2[R^2 \sin^2 c + [2(G + R) - R \cos c]^2]^{-3/2}$$

$$[R(G + R) \sin c]$$

หาค่าอนุพันธ์ที่ 4 ของ S(c) จะได้

$$\therefore \frac{d^4}{dc^4}S(c) = -420[R^2 \sin^2 c + [2(G + R) - R \cos c]^2]^{-9/2}$$
$$[2R^2 \sin c \cos c + 2[2(G + R) - R \cos c][R \sin c]]$$
$$[R(G + R) \sin c]^3$$
$$+ 120[R^2 \sin^2 c + [2(G + R) - R \cos c]^2]^{-7/2}$$
$$3[R(G + R) \sin c]^2[R(G + R) \cos c]$$
$$+ 45[R^2 \sin^2 c + [2(G + R) - R \cos c]^2]^{-7/2}$$
$$[2R^2 \sin c \cos c + 2[2(G + R) - R \cos c][R \sin c]]$$
$$[R^2(G + R)^2 \sin 2c]$$
$$- 18[R^2 \sin^2 c + [2(G + R) - R \cos c]^2]^{-5/2}$$
$$[2R^2(G + R)^2 \cos 2c]$$
$$+ 3[R^2 \sin^2 c + [2(G + R) - R \cos c]^2]^{-5/2}$$
$$[2R^2 \sin c \cos c + 2[2(G + R) - R \cos c][R \sin c]]$$
$$[R(G + R) \sin c]$$
$$- 2[R^2 \sin^2 c + [2(G + R) - R \cos c]^2]^{-3/2}$$
$$[R(G + R) \cos c]$$
$$= -1680[R^2 \sin^2 c + [2(G + R) - R \cos c]^2]^{-9/2}$$
$$[R(G + R) \sin c]^4$$
$$+ 720[R^2 \sin^2 c + [2(G + R) - R \cos c]^2]^{-7/2}$$
$$[R^3(G + R)^3 \sin^2 c \cos c]$$
$$+ 12[R^2 \sin^2 c + [2(G + R) - R \cos c]^2]^{-5/2}$$
$$[R^2(G + R)^2][\sin^2 c - 3 \cos 2c]]$$

$$- 2[R^2 \sin^2 c + [2(G + R) - R \cos c]^2]^{-3/2}$$

$$[R(G + R) \cos c]$$

ให้ $c = 0$

ดังนั้น $$\frac{d^4}{dc^4}S(c)\Big|_{c=0} = -36[2(G + R) - R]^{-5}[R^2(G + R)^2]$$

$$- 2[2(G + R) - R]^{-3}[R(G + R)]$$

$$= - 36[R^2(G + R)^2][2(G + R) - R]^{-5}$$

$$- 2[R(G + R)][2(G + R) - R]^{-3} \quad \text{ฝ.5.3}$$

จากสมการที่ (3.33) กำหนดให้ $W(c, A)$ มีค่าในเทอมของ V_1 และ V_2 ดังนี้ คือ

$$V_1 = A + G + R - R \cos c + [R^2 + (A + G + R)^2$$

$$- 2R(A + G + R) \cos c]^{1/2}$$

และ $$V_2 = A - G - R + R \cos c + [R^2 + (A - G - R)^2$$

$$+ 2R(A - G - R) \cos c]^{1/2}$$

ดังนั้น $\frac{d}{dc}W(c, A) = \frac{d}{dc}[\ln V_1 - \ln V_2]$

หาค่าของ $\frac{d}{dc}\ln V_1$

จะได้ $$\frac{d}{dc}\ln V_1 = \frac{d}{dc}\ln[A + G + R - R \cos c + [R^2 +$$

$$(A + G + R)^2 - 2R(A + G + R) \cos c]^{1/2}]$$

$$= \frac{R \sin c + [R^2 + (A + G + R)^2 - 2R(A + G + R) \cos c]^{-1/2}}{A + G + R - R \cos c + [R^2 + (A + G + R)^2 - 2R(A + G + R) \cos c]^{1/2}}$$

$$[R(A + G + R) \sin c]$$

และหาค่าของ $\frac{d}{dc}\ln V_2$

จะได้ $\frac{d}{dc}\ln V_2 = \frac{d}{dc}\ln[A - G - R + R\cos c + [R^2 + (A - G - R)^2 + 2R(A - G - R)\cos c]^{1/2}]$

$$= \frac{-R\sin c - [R^2 + (A - G - R)^2 + 2R(A - G - R)\cos c]^{-1/2}}{A - G - R + R\cos c + [R^2 + (A - G - R)^2 + 2R(A - G - R)\cos c]^{1/2}}$$

$$[R(A - G - R)\sin c]$$

ดังนั้นค่าของอนุพันธ์ที่ 1 ของ $W(c, A)$ ที่ $c = 0$ มีค่า ดังนี้

$$\frac{d}{dc}W(c, A)\Big|_{c=0} = 0$$

หาค่าของอนุพันธ์ที่ 2 ของ $W(c, A)$ จะได้

$$\therefore \frac{d^2}{dc^2}W(c, A) =$$

$$\frac{R\cos c + [R(A + G + R)\cos c][R^2 + (A + G + R)^2 - 2R(A + G + R)\cos c]^{-1/2}}{A + G + R - R\cos c + [R^2 + (A + G + R)^2 - 2R(A + G + R)\cos c]^{1/2}}$$

$$- \frac{[R(A + G + R)\sin c]^2[R^2 + (A + G + R)^2 - 2R(A + G + R)\cos c]^{-3/2}}{A + G + R - R\cos c + [R^2 + (A + G + R)^2 - 2R(A + G + R)\cos c]^{1/2}}$$

$$- [\frac{R\sin c + [R(A + G + R)\sin c][R^2 + (A + G + R)^2 - 2R(A + G + R)\cos c]^{-1/2}}{A + G + R - R\cos c + [R^2 + (A + G + R)^2 - 2R(A + G + R)\cos c]^{1/2}}$$

$$+ \frac{R\cos c + [R(A - G - R)\cos c][R^2 + (A - G - R)^2 + 2R(A - G - R)\cos c]^{-1/2}}{A - G - R + R\cos c + [R^2 + (A - G - R)^2 + 2R(A - G - R)\cos c]^{1/2}}$$

$$+ \frac{[R(A - G - R)\sin c]^2[R^2 + (A - G - R)^2 + 2R(A - G - R)\cos c]^{-3/2}}{A - G - R + R\cos c + [R^2 - (A - G - R)^2 + 2R(A - G - R)\cos c]^{1/2}}$$

$$+ [\frac{R\sin c + [R(A - G - R)\sin c][R^2 + (A - G - R)^2 + 2R(A - G - R)\cos c]^{-1/2}}{A - G - R + R\cos c + [R^2 + (A - G - R)^2 + 2R(A - G - R)\cos c]^{1/2}}$$

(ผ.5.4)

ค่าของอนุพันธ์ที่ 2 ของ W(c, A) ที่ c = 0 มีค่าดังนี้

$$\left.\frac{d^2}{dc^2}W(c, A)\right|_{c=0} =$$

$$\frac{R + [R(A + G + R)]/(A + G)}{2(A + G)} + \frac{R + [R(A - G - R)]/(A - G)}{2(A - G)}$$

$$= \frac{R(A + G) + R(A + G + R)}{2(A + G)^2} + \frac{R(A - G) + R(A - G - R)}{2(A - G)^2} \qquad (ผ.5.5)$$

หาค่าของอนุพันธ์ที่ 3 ของ W(c, A) โดยกำหนดให้ค่าต่าง ๆ ในสมการที่ (ผ.5.4) มีค่าดังนี้ คือ

$$U = R^2 + (A + G + R)^2 - 2R(A + G + R)\cos c \qquad (ผ.5.6)$$

$$V = R^2 + (A - G - R)^2 + 2R(A - G - R)\cos \qquad (ผ.5.7)$$

$$K = \frac{R\cos c + [R(A + G + R)\cos c]\,U^{-1/2} - [R(A + G + R)\sin c]^2 U^{-3/2}}{A + G + R - R\cos c + U^{1/2}}$$

$$L = \left[\frac{R\sin c + [R(A + G + R)\sin c]U^{-1/2}}{A + G + R - R\cos c + U^{1/2}}\right]^2$$

$$M = \frac{R\cos c + [R(A - G - R)\cos c]V^{-1/2} + [R(A - G - R)\sin c]^2 V^{-3/2}}{A - G - R + R\cos c + V^{1/2}}$$

$$N = \left[\frac{R\sin c + [R(A - G - R)\sin c]V^{-1/2}}{A - G - R + R\cos c + V^{1/2}}\right]^2$$

ดังนั้นสมการที่ (ผ.5.4) จะเขียนใหม่ได้ดังนี้ คือ

$$\frac{d^3}{dc^3}W(c, A) = \frac{d}{dc}[K - L + M + N]$$

ค่าอนุพันธ์ของ K, L, M, N จะได้ดังนี้

$$\frac{d}{dc}K = \frac{-R\sin c - 3[R(A+G+R)]^2 \sin c\cos c\,[U]^{-3/2}}{-[R(A+G+R)\sin c]U^{-1/2} + 3[R(A+G+R)\sin c]^3 U^{-5/3}}{A+G+R-R\cos c+U^{1/2}}$$

$$-\left[\frac{R^2\cos c\sin c + 2R^2(A+G+R)\cos c\sin c[U]^{-1/2} - R^3}{(A+G+R)^2\sin^3 c\,[U]^{-3/2} - [R(A+G+R)\sin c]^3 U^{-2}}{[A+G+R-R\cos c+U^{1/2}]^2}\right.$$

$$\left.+\frac{[R(A+G+R)]^2\sin c\cos c\,[U]^{-1}}{}\right]$$

และ $$\frac{d}{dc}L = -2\frac{[R\sin c + [R(A+G+R)\sin c]U^{-1/2}]^3}{[A+G+R-R\cos c+U^{1/2}]^3}$$

$$+2\left[\frac{R^2\sin c\cos c - R^3(A+G+R)^2\sin^3 c\,[U]^{-3/2} + 2R^2}{\sin c\cos c\,(A+G+R)\,U^{-1/2} - R^3(A+G+R)^3\sin^3 c\,[U]^{-2}}{[A+G+R-R\cos c+V^{1/2}]^2}\right.$$

$$\left.+\frac{R^2(A+G+R)^2\sin c\cos c\,[U]^{-1}}{}\right]$$

และ $$\frac{d}{dc}M = \frac{-R\sin c + 3[R^2(A-G-R)^2\sin c\cos c\,[V]^{-3/2}]}{-R(A-G-R)\sin c\,[V]^{-1/2} + 3[R(A-G-R)\sin c]^3]^{-5/2}}{A-G-R+R\cos c+V^{1/2}}$$

$$+\frac{R^2\sin c\cos c + 2R^2(A-G-R)\sin c\cos c\,[V]^{-1/2} + R^3}{(A-G-R)^2\sin^3 c\,[V]^{-3/2}}$$

$$+[R(A - G - R)\ \sin c]^3\ V^{-2} + R^2(A - G - R)^2\ \sin c\ \cos c\ [V]^{-1}$$

$$[A - G - R + R\ \cos c + V^{1/2}]^2$$

และ $\frac{d}{dc} N = 2[\frac{[R \sin c + [R(A - G - R)\ \sin c]\ V^{-1/2}]^3}{[A - G - R + R\ \cos c + V^{1/2}]^3}]$

$$+ 2[\frac{R^2\ \sin c\ \cos c + R^3\ (A - G - R)^2\ \sin^3 c\ [V]^{-3/2} + 2R^2}$$

$$\frac{(A - G - R)\ \sin c\ \cos c\ [V]^{-1/2} + R^3(A - G - R)\ \sin^3 c\ [V]^{-2}}{[A - G - R + R\ \cos c + V^{1/2}]^2}$$

$$+ R^2(A - G - R)^2\ \sin c\ \cos c[V]^{-1}]$$

โดยที่ $\frac{dU}{dc} = 2R(A + G + R)\ \sin c$

$\frac{dV}{dc} = - 2R(A - G - R)\ \sin c$

จากค่าอนุพันธ์ของ K, L, M, N ทำให้สามารถหาค่าอนุพันธ์ที่ 3 ของ W(c, A) ได้ คือ

$$\frac{d^3}{dc^3}W(c, A) = \frac{- R \sin c - 3[R(A + G + R)]^2\ \sin c\ \cos c\ [U]^{-3/2}}$$

$$\frac{- [R(A + G + R)\ \sin c]\ U^{-1/2} + 3[R(A + G + R)\ \sin c]^3\ U^{-5/2}}{A + G + R - R\ \cos c + U^{1/2}}$$

$$- 3[\frac{R^2\ \cos c\ \sin c + 2R^2(A + G + R)\ \cos c\ \sin c\ [U]^{-1/2} - R^3}$$

$$\frac{(A + G + R)^2\ \sin^3 c\ [U]^{-3/2} - [R(A + G + R)\ \sin c]^3\ U^{-2}}{[A + G + R - R\ \cos c + U^{1/2}]^2}$$

$$+ [R(A + G + R)]^2\ \sin c\ \cos c\ [U]^{-1}$$

$$+ 2[\frac{R \sin c + R(A + G + R)\ \sin c[U]^{-1/2}}{A + G + R - R\ \cos c + U^{1/2}}]^3$$

$$+ \frac{-R \sin c + 3(R^2(A - G - R)^2 \sin c \cos c[V]^{-3/2}]}{}$$

$$\frac{- [R(A - G - R) \sin c [V]^{-1/2} + 3[R(A - G - R) \sin c]^3 V^{-5/2}}{A - G - R + R \cos c + V^{1/2}}$$

$$+ 3[\frac{R^2 \sin c \cos c + 2R^2(A - G - R) \sin c \cos c [V]^{-1/2} + R^3}{}$$

$$\frac{(A - G - R)^2 \sin^3 c [V]^{-3/2} + R^3(A - G - R)^3 \sin c [V]^{-2}}{[A - G - R + R \cos c + V^{1/2}]^2}$$

$$\frac{+ R^2 (A - G - R)^2 \sin c \cos c [V]^{-1}]}{}$$

$$+ 2[\frac{R \sin c + R(A - G - R) \sin c [V]^{-1/2}}{A - G - R + R \cos c + V^{1/2}}]^3$$

ค่าของอนุพันธ์ที่ 4 ของ $W(c, A)$ ที่ $c = 0$ จะมีค่าดังนี้

$$\frac{d^4}{dc^4} W(c, A) \Big|_{c=0} =$$

$$[\frac{- R - 3R^2(A + G + R)^2 U^{-3/2} - R(A + G + R) U^{-1/2}}{A + G + U^{1/2}}]$$

$$- 3[\frac{R^2 + 2R^2(A + G + R) U^{-1/2} + R^2(A + G + R)^2 U^{-1}}{[A + G + U^{1/2}]^2}]$$

$$+ 2[3[\frac{R \sin c + [R(A + G + R) \sin c]U^{-1/2}}{A + G + R - R \cos c + U^{1/2}}]^2 [. . . . .]$$

$$+ [\frac{- R + 3[R^2(A - G - R)^2 V^{-3/2}] - [R(A - G - R) V^{-1/2}]}{A - G + V^{1/2}}]$$

$$+ 3[\frac{R^2 + 2R^2(A - G - R)V^{-1/2} + R^2(A - G - R)^2 V^{-1}}{[A - G + V^{1/2}]^2}]$$

$$+ 6[\quad\quad]^2 [. . . . .] \qquad \text{(ผ.5.8)}$$

จากสมการที่ (ผ.5.6) แทนค่า c = 0 จะหาค่า U ได้ดังนี้

$$U\Big|_{c=0} = (A + G)^2$$

และจากสมการ (ผ.5.6) แทนค่า c = 0 จะหาค่า V ได้ดังนี้

$$V\Big|_{c=0} = (A - G)^2$$

แทนค่า U และ V ที่ c = 0 ลงในสมการ (ผ.5.8) จะทำให้ค่าอนุพันธ์ที่ 4 ของ W(c, A) ที่ c = 0 ได้ดังนี้

$$\frac{d^4}{dc^4}W(c, A)\Big|_{c=0} = \frac{-R}{2(A+G)} - \frac{3R^2 + 2R(A+G+R)}{4(A+G)^2}$$

$$- \frac{6R^2(A+G+R)}{4(A+G)^3} - \frac{9R^2(A+G+R)^2}{4(A+G)^3} + \frac{-R}{2(A-G)}$$

$$+ \frac{3R^2 - 2R(A-G-R)}{4(A+G)^2} + \frac{6R^2(A-G-R)}{4(A-G)^3}$$

$$+ \frac{9R^2(A-G-R)^2}{4(A-G)^4} \qquad \text{(ผ.5.9)}$$

โดยอาศัยสมการที่ (3.33), (ผ.5.2) และ (ผ.5.5) จะหาค่าอนุพันธ์ที่ 2 ได้มีค่าดังนี้ คือ

$$\frac{d^2}{dc^2}\emptyset(c)\Big|_{c=0} = \frac{2R(G+R)}{(2G+R)^3} + \frac{R(A+G) + R(A+G+R)}{2(A+G)^2}$$

$$+ \frac{R(A-G) + R(A-G-R)}{2(A-G)^2}$$

ดังเช่นสมการที่ปรากฏในบทที่ 3 สมการที่ (3.34)

ทำนองเดียวกันโดยอาศัยสมการที่ (3.33), (ผ5.3) และ (ผ.5.9) จะหาค่าอนุพันธ์ที่ 4 ได้ มีค่าดังนี้ คือ

$$\left.\frac{d^4}{dc^4}\phi(c)\right|_{c=0} = -\frac{36[R^2(G+R)^2]}{[2(G+R)-R]^5} - \frac{2[R(G+R)]}{[2(G+R)-R]^3} - \frac{R}{2(A+G)}$$

$$- \frac{3R^2 + 2R(A+G+R)}{4(A+G)^2} - \frac{6R^2(A+G+R)}{4(A+G)^3}$$

$$- \frac{9R^2(A+G+R)^2}{4(A+G)^4} - \frac{R}{2(A-G)} + \frac{3R^2 - 2R(A-G-R)}{4(A-G)^2}$$

$$+ \frac{6R^2(A-G-R}{4(A-G)^3} + \frac{9R^2(A-G-R)}{4(A-G)^4}$$

ดังเช่นปรากฏในบทที่ 3 สมการที่ (3.35)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

๖. ตารางแสดงผลการคำนวณของอิเล็กโทรดแท่งกลมปลายมนกับระนาบในอากาศด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์

ตารางที่ ๖.๑ AIR : Pressure = 0.2 Bar.

Rod dia. (mm.)	Gap (mm.)	Initial (kV.)	U_b or U_i (kV.)	x_c (cm.)	E_i (kV./cm.)	E_i/P (kV/cm-bar)	η^* %
10	5	5.0	5.1640	0.5000	18.0450	90.2249	57.23
	10	5.0	7.3752	0.6864	18.7508	93.7539	39.33
	20	9.0	9.2548	0.5609	18.9602	94.8011	24.41
	40	10.0	10.8220	0.5395	19.0206	95.1028	14.22
20	5	5.0	5.4106	0.5000	14.6646	73.3229	73.79
	10	8.0	8.5319	1.0000	14.9174	74.5870	57.19
	20	12.0	12.0878	0.9686	15.3915	76.9577	39.27
	40	15.0	15.1637	0.8733	15.5046	77.5230	24.45
40	5	5.0	5.4814	0.5000	12.9085	64.5432	84.93
	10	9.0	9.0135	1.0000	12.2874	61.4368	73.36
	20	14.0	14.4220	2.0000	12.6416	63.2080	57.04
	40	20.0	20.2332	1.4586	12.8907	64.4537	39.24
80	5	5.0	5.5026	0.5000	11.9624	59.8122	92.00
	10	9.0	9.1660	1.0000	10.7838	53.9190	85.00
	20	15.0	15.4670	2.0000	10.5293	52.6464	73.45
	40	24.0	24.8510	2.8196	10.8855	54.4274	57.07
100	5	1.0	5.5052	0.5000	11.7725	58.8623	93.53
	10	9.0	9.1855	1.0000	10.4744	52.3720	87.69
	20	15.0	15.6156	2.0000	10.0411	50.2057	77.76
	40	25.0	25.9199	4.0000	10.3241	51.6206	62.77

ตารางที่ ๖.๒

AIR : Pressure = 1.0 Bar.

Rod dia. (mm.)	Gap (mm.)	Initial (kV.)	U_b or U_i (kV.)	x_c (cm.)	E_i (kV./cm.)	E_i/P (kV/cm-bar)	η^* %
10	5	15.0	17.1913	0.5000	60.0728	60.0728	57.23
	10	20.0	24.0403	0.3350	61.1199	61.1199	39.33
	20	25.0	29.9720	0.3155	61.4032	61.4032	24.41
	40	30.0	34.9866	0.3102	61.4921	61.4921	14.22
20	5	15.0	18.5312	0.5000	50.2262	50.2262	73.79
	10	25.0	29.7455	0.6245	52.0079	52.0079	57.19
	20	40.0	41.2836	0.5179	52.5670	52.5670	39.27
	40	50.0	51.5706	0.4978	52.7300	52.7300	24.45
40	5	15.0	18.9120	0.5000	44.5372	44.5372	84.93
	10	30.0	32.8188	1.0000	44.7390	44.7390	73.36
	20	50.0	52.2850	0.8988	45.8302	45.8302	57.04
	40	70.0	72.3998	0.8087	46.1266	46.1266	39.24
80	5	15.0	19.0259	0.5000	41.3612	41.3612	92.00
	10	30.0	33.7672	1.0000	39.7273	39.7273	85.00
	20	55.0	59.4226	2.0000	40.4525	40.4525	73.45
	40	90.0	93.7182	1.3643	41.0514	41.0514	57.07
100	5	15.0	19.0393	0.5000	40.7141	40.7141	93.53
	10	15.0	33.8875	1.0000	38.6425	38.6435	87.69
	20	60.0	60.5174	2.0000	38.9140	38.9140	77.76
	40	99.0	99.5883	1.6443	39.6669	39.6669	62.77

ตารางที่ ๔.๓

AIR : Pressure = 2.0 Bar.

Rod dia. (mm.)	Gap (mm.)	Initial (kV.)	U_b or U_i (kV.)	x_c (cm.)	E_i (kV/cm.)	E_i/P (kV/cm-bar)	η^* %
10	5	25.0	29.7735	0.3134	104.0395	52.0197	57.23
	10	40.0	41.3556	0.2587	105.1424	52.5712	39.33
	20	50.0	51.4831	0.2482	105.4728	52.7364	24.41
	40	60.0	60.0714	0.2452	105.5809	52.7905	14.22
20	5	30.0	32.8899	0.5000	89.1434	44.5717	73.79
	10	50.0	52.3878	0.4519	91.5963	45.7981	57.19
	20	60.0	72.4376	0.4046	92.2360	46.1180	39.27
	40	80.0	90.3977	0.3932	92.4299	46.2149	24.45
40	5	30.0	33.7631	0.5000	79.5109	39.7555	84.93
	10	55.0	59.3824	1.0000	80.9510	40.4755	73.36
	20	90.0	93.6730	0.6809	82.1088	41.0544	57.04
	40	120.0	129.4267	0.6347	82.4590	41.2295	39.24
80	5	30.0	34.0193	0.5000	73.9559	36.9780	92.00
	10	50.0	61.7159	1.0000	72.6092	36.3046	85.00
	20	90.0	108.9129	1.3032	74.1435	37.0717	73.45
	40	150.0	170.6855	1.0527	74.7653	37.3827	57.07
100	5	30.0	34.0508	0.5000	72.8150	36.4075	93.53
	10	55.0	62.0037	1.0000	70.7040	35.3520	87.69
	20	100.0	111.8214	2.0000	71.9036	35.9518	77.76
	40	150.0	182.4369	1.2525	72.6663	36.3332	62.77

ตารางที่ 6.4

AIR : Pressure = 3.0 Bar.

Rod dia. (mm.)	Gap (mm.)	Initial (kV.)	U_b or U_i (kV.)	x_c (cm.)	E_i (kV/cm.)	E_i/P (kV/cm-bar)	η^* %
10	5	40.0	41.3725	0.2566	144.5709	48.1903	57.23
	10	55.0	57.3239	0.2237	145.7400	48.5800	39.33
	20	70.0	71.3183	0.2162	146.1089	48.7030	24.41
	40	80.0	83.2043	0.2141	146.2390	48.7463	14.22
20	5	40.0	46.4565	0.5000	125.9139	41.9713	73.79
	10	60.0	73.5400	0.3830	128.5794	42.8598	57.19
	20	100.0	101.5341	0.3507	129.2850	43.0950	39.27
	40	120.0	126.6556	0.3425	129.5028	43.1676	24.45
40	5	45.0	47.9179	0.5000	112.8451	37.6150	84.93
	10	80.0	84.5180	0.7799	115.2161	38.4054	73.36
	20	130.0	132.7677	0.5844	116.3772	38.7924	57.04
	40	180.0	183.2639	0.5520	116.7593	38.9198	39.24
80	5	40.0	48.3445	0.5000	105.0982	35.0327	92.00
	10	70.0	88.6268	1.0000	104.2700	34.7567	85.00
	20	120.0	156.0813	1.0587	106.2538	35.4179	73.45
	40	200.0	244.0873	0.9084	106.9175	35.6392	57.07
100	5	40.0	48.3979	0.5000	103.4951	34.4984	93.53
	10	80.0	89.1201	1.0000	101.6252	33.8751	87.69
	20	120.0	160.8651	1.3548	103.4398	34.4799	77.76
	40	220.0	261.6802	1.0763	104.2297	34.7432	62.77

ตารางที่ 6.5

AIR : Pressure = 4.0 Bar.

Rod dia. (mm.)	Gap (mm.)	Initial (kV.)	U_b or U_i (kV.)	x_c (cm.)	E_i (kV/cm.)	E_i/P (kV/cm-bar)	η^* %
10	5	50.0	52.4358	0.2257	183.2298	45.8075	57.23
	10	70.0	72.5605	0.2021	184.4775	46.1194	39.33
	20	90.0	90.2397	0.1962	184.8729	46.2182	24.41
	40	100.0	105.2719	0.1944	185.0248	46.2562	14.22
20	5	59.0	59.5621	0.5000	161.4349	40.3587	73.79
	10	90.0	93.8779	0.3418	164.1387	41.0347	57.19
	20	125.0	129.5038	0.3174	164.8991	41.2248	39.27
	40	160.0	161.4893	0.3108	165.1196	41.2799	24.45
40	5	60.0	61.7053	0.5000	145.3140	36.3285	84.93
	10	105.0	108.8200	0.6463	148.3450	37.0862	73.36
	20	170.0	170.6000	0.5256	149.5390	37.3848	57.04
	40	230.0	235.3747	0.4998	149.9596	37.4899	39.24
80	5	60.0	62.3184	0.5000	135.4767	33.8692	92.00
	10	110.0	114.9727	1.0000	135.2661	33.8165	85.00
	20	200.0	201.9793	0.9297	137.4993	34.3748	73.45
	40	310.0	315.5287	0.8198	138.2110	34.5527	57.07
100	5	60.0	62.3933	0.5000	133.4232	33.3558	93.53
	10	115.0	115.7013	1.0000	131.9362	32.9841	87.69
	20	205.0	208.6573	1.1563	134.1712	33.5428	77.76
	40	335.0	338.9297	0.9682	134.9989	33.7497	62.77

ตารางที่ ๖.๖

AIR : Pressure = 5.0 Bar.

Rod dia (mm.)	Gap (mm.)	Initial (kV.)	U_b or U_i (kV.)	x_c (cm.)	E_i (kV/cm.)	E_i/P (kV/cm-bar)	η^* %
10	5	55.0	63.1598	0.2058	220.7034	44.1407	57.23
	10	70.0	87.3142	0.1864	221.9873	44.3975	39.33
	20	90.0	108.5572	0.1815	222.3998	44.4800	24.41
	40	120.0	126.6169	0.1800	222.5404	44.5084	14.22
20	5	70.0	72.3383	0.5000	196.0629	39.2126	73.79
	10	100.0	113.6699	0.3139	198.7437	39.7487	57.19
	20	155.0	156.7159	0.2939	199.5487	39.9097	39.27
	40	190.0	195.3965	0.2883	199.7891	39.9578	24.45
40	5	75.0	75.2461	0.5000	177.2021	35.4404	84.93
	10	130.0	132.5710	0.5746	180.7226	36.1445	73.36
	20	200.0	207.5817	0.4846	181.9552	36.3910	57.04
	40	280.0	286.3154	0.4632	182.4144	36.4829	39.24
80	5	75.0	76.0695	0.5000	165.3708	33.0742	92.00
	10	135.0	140.9228	1.0000	165.7966	33.1593	85.00
	20	245.0	247.0410	0.8453	168.1755	33.6351	73.45
	40	380.0	385.6332	0.7574	168.9188	33.7838	57.07
100	5	75.0	76.1750	0.5000	162.8943	32.5789	93.53
	10	140.0	141.9250	1.0000	161.8396	32.3679	87.69
	20	250.0	255.6418	1.0381	164.3833	32.8767	77.76
	40	410.0	414.8374	0.8930	165.2336	33.0467	62.77

7. ตารางแสดงผลการคำนวณของอิเล็กโทรดแท่งกลมปลายมนกับระนาบใน SF_6 ด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์

ตารางที่ 7.1 SF_6 : Pressure = 0.2 Bar.

Rod dia. (mm.)	Gap (mm.)	Initial (kV.)	U_b or U_i (kV.)	x_c (cm.)	E_i (kV/cm.)	E_i/P (kV/cm-bar)	η^* %
10	5	1.0	8.0533	0.1507	28.1412	140.7062	57.23
	10	1.0	11.1570	0.1432	28.3656	141.8281	39.33
	20	10.0	13.8909	0.1412	28.4581	142.2907	24.41
	40	15.0	16.1991	0.1403	28.4713	142.3564	14.22
20	5	5.0	9.0532	0.2306	24.5374	122.6868	73.79
	10	12.0	14.2170	0.2065	24.8575	124.2873	57.19
	20	15.0	19.6134	0.2003	24.9741	124.8703	39.27
	40	20.0	24.4503	0.1981	24.9999	124.9997	24.45
40	5	5.0	9.4178	0.3794	22.1786	110.8930	84.93
	10	1.0	16.5151	0.3020	22.5136	112.5682	73.36
	20	15.0	25.8238	0.2862	22.6353	113.1790	57.04
	40	25.0	35.5961	0.2807	22.6786	113.3930	39.24
80	5	9.0	9.4387	0.5000	20.5192	102.5960	92.00
	10	15.0	17.7621	0.4575	20.8972	104.4862	85.00
	20	30.0	30.8974	0.4142	21.0337	105.1683	73.45
	40	45.0	48.1582	0.4004	21.0947	105.4737	57.07
100	5	9.0	9.4408	0.5000	20.1884	100.9420	93.53
	10	15.0	17.9718	0.5304	20.4936	102.4679	87.69
	20	30.0	32.0896	0.4680	20.6343	103.1717	77.76
	40	50.0	51.9531	0.4491	20.6934	103.4669	62.77

ตารางที่ 7.2

SF_6 : Pressure = 1.0 Bar.

Rod dia. (mm.)	Gap (mm.)	Initial (kV.)	U_b or U_i (kV.)	x_c (cm.)	E_i (kV/cm.)	E_i/P (kV/cm-bar)	η^* %
10	5	30.0	31.6220	0.0642	110.4991	110.4991	57.23
	10	40.0	43.5089	0.0629	110.6170	110.6170	39.33
	20	50.0	54.0096	0.0624	110.6487	110.6487	24.41
	40	60.0	63.0000	0.0625	110.7281	110.7281	14.22
20	5	30.0	38.1042	0.0926	103.2761	103.2761	73.79
	10	40.0	59.1926	0.0892	103.4941	103.4941	57.19
	20	50.0	81.2821	0.0876	103.4978	103.4978	39.27
	40	60.0	101.2911	0.0875	103.5681	103.5681	24.45
40	5	40.0	41.8386	0.1348	98.5285	98.5285	84.93
	10	50.0	72.3786	0.1275	98.6675	98.6675	73.36
	20	100.0	112.6149	0.1244	98.7123	98.7123	57.04
	40	150.0	155.0356	0.1238	98.7747	98.7747	39.24
80	5	40.0	43.7298	0.2002	95.0661	95.0661	92.00
	10	50.0	81.0277	0.1844	95.3296	95.3296	85.00
	20	100.0	140.1754	0.1786	95.4257	95.4257	73.45
	40	200.0	217.9411	0.1759	95.4647	95.4647	57.07
100	5	40.0	44.0688	0.2318	94.2376	94.2376	93.53
	10	50.0	82.8380	0.2073	94.4616	94.4616	87.69
	20	100.0	147.1881	0.2023	94.6451	94.6451	77.76
	40	200.0	237.7384	0.1990	94.6934	94.6934	62.77

ตารางที่ 7.3

SF_6 : Pressure = 2.0 Bar.

Rod dia. (mm.)	Gap (mm.)	Initial (kV.)	U_b or U_i (kV.)	x_c (cm.)	E_i (kV/cm.)	E_i/P (kV/cm-bar)	η^* %
10	5	20.0	59.1464	0.0441	206.6793	103.3396	57.23
	10	40.0	81.5405	0.0442	207.3084	103.6542	39.33
	20	50.0	101.1241	0.0438	207.1716	103.5858	24.41
	40	60.0	118.1057	0.0443	207.5812	103.7906	14.22
20	5	20.0	72.8123	0.0643	197.3475	98.6738	73.79
	10	50.0	112.8174	0.0618	197.2532	98.6266	57.19
	20	70.0	155.0332	0.0615	197.4062	98.7031	39.27
	40	100.0	193.0288	0.0612	197.3681	98.6841	24.45
40	5	40.0	80.9891	0.0924	190.7267	95.3634	84.93
	10	100.0	139.9347	0.0886	190.7609	95.3805	73.36
	20	100.0	217.9799	0.0887	191.0697	95.5349	57.04
	40	200.0	299.9419	0.0882	191.0960	95.5480	39.24
80	5	40.0	85.4917	0.1328	185.8541	92.9271	92.00
	10	100.0	158.2149	0.1273	186.1408	93.0704	85.00
	20	150.0	273.6990	0.1257	186.3231	93.1616	73.45
	40	400.0	425.4200	0.1242	186.3466	93.1733	57.07
100	5	40.0	86.3524	0.1503	184.6579	92.3290	93.53
	10	150.0	162.3849	0.1463	185.1704	92.5852	87.69
	20	150.0	288.1381	0.1429	185.2790	92.6395	77.76
	40	400.0	465.1900	0.1408	185.2895	92.6448	62.77

ตารางที่ 7.4

SF_6 : Pressure = 3.0 Bar.

Rod dia. (mm.)	Gap (mm.)	Initial (kV.)	U_b or U_i (kV.)	x_c (cm.)	E_i (kV/cm.)	E_i/P (kV/cm-bar)	η^* %
10	5	50.0	86.3762	0.0365	301.8303	100.6101	57.23
	10	100.0	118.7422	0.0360	301.8898	100.6299	39.33
	20	100.0	146.9811	0.0352	301.1183	100.3728	24.41
	40	150.0	171.4328	0.0353	301.3084	100.4361	14.22
20	5	50.0	106.9112	0.0517	287.7679	96.5893	73.79
	10	150.0	165.7069	0.0503	289.7267	96.5756	57.19
	20	150.0	227.8612	0.0506	290.1392	96.7131	39.27
	40	200.0	283.9312	0.0507	290.3141	96.7714	24.45
40	5	50.0	119.5388	0.0730	281.5099	93.8366	84.93
	10	200.0	206.6062	0.0712	281.6485	93.8828	73.36
	20	200.0	322.1020	0.0727	282.3376	94.1125	57.04
	40	400.0	442.9000	0.0716	282.1760	94.0587	39.24
80	5	50.0	127.0086	0.1077	276.1094	92.0365	92.00
	10	200.0	234.7829	0.1028	276.2235	92.0745	85.00
	20	200.0	405.5335	0.1000	276.0707	92.0236	73.45
	40	600.0	631.5000	0.1023	276.6158	92.2053	57.07
100	5	50.0	128.3386	0.1191	274.4420	91.4807	93.53
	10	200.0	240.9168	0.1147	274.7217	91.5739	87.69
	20	200.0	427.3188	0.1122	274.7753	91.5918	77.76
	40	600.0	689.9425	0.1111	274.8106	91.6035	62.77

ตารางที่ 7.5

SF_6 : Pressure = 4.0 Bar.

Rod dia. (mm.)	Gap (mm.)	Initial (kV.)	U_b or U_i (kV.)	x_c (cm.)	E_i (kV/cm.)	E_i/P (kV/cm-bar)	η^* %
10	5	50.0	112.7415	0.0305	393.9604	98.4901	57.23
	10	150.0	155.6333	0.0313	395.6816	98.9204	39.33
	20	150.0	192.5770	0.0304	394.5301	98.6325	24.41
	40	200.0	224.2177	0.0301	394.0826	98.5206	14.22
20	5	50.0	140.4952	0.0435	380.7927	95.1982	73.79
	10	200.0	217.9411	0.0429	381.0544	95.2636	57.19
	20	200.0	300.1020	0.0440	382.1245	95.5311	39.27
	40	300.0	373.0780	0.0430	381.4649	95.3662	24.45
40	5	50.0	158.2988	0.0651	372.7884	93.1971	84.93
	10	250.0	272.9154	0.0610	372.0421	93.0105	73.36
	20	250.0	424.8238	0.0612	372.3781	93.0945	57.04
	40	500.0	584.9525	0.0617	372.6791	93.1698	39.24
80	5	50.0	168.4438	0.0944	366.1872	91.5468	92.00
	10	300.0	310.9398	0.0879	365.8226	91.4556	85.00
	20	300.0	537.4834	0.0866	365.8968	91.4742	73.45
	40	800.0	835.4246	0.0860	365.9409	91.4852	57.07
100	5	50.0	170.1514	0.1011	363.8554	90.9639	93.53
	10	300.0	319.6118	0.1006	364.4590	91.1147	87.69
	20	500.0	566.4803	0.0968	364.2591	91.0648	77.76
	40	900.0	915.7692	0.0994	364.7595	91.1899	62.77

ตารางที่ 7.6

SF_6 : Pressure = 5.0 Bar.

Rod dia. (mm.)	Gap (mm.)	Initial (kV.)	U_b or U_i (kV.)	x_c (cm.)	E_i (kV/cm.)	E_i/P (kV/cm-bar)	η^* %
10	5	200.0	139.7900	0.0283	488.4777	97.6955	57.23
	10	200.0	191.9670	0.0278	488.0563	97.6113	39.33
	20	200.0	238.9743	0.0285	489.5836	97.9167	24.41
	40	200.0	276.8251	0.0268	486.5448	97.3090	14.22
20	5	200.0	174.3483	0.0394	472.5469	94.5094	73.79
	10	200.0	270.6522	0.0394	473.2160	94.6432	57.19
	20	300.0	371.7896	0.0393	473.4054	94.6811	39.27
	40	300.0	461.7082	0.0377	472.0875	94.4175	24.45
40	5	300.0	196.3044	0.0560	462.2903	92.4581	84.93
	10	300.0	339.2301	0.0550	462.4433	92.4887	73.36
	20	300.0	527.4395	0.0541	462.3257	92.4651	57.04
	40	500.0	725.8841	0.0542	462.4680	92.4936	39.24
80	5	300.0	209.6325	0.0838	455.7290	91.1458	92.00
	10	300.0	387.3918	0.0806	455.7688	91.1538	85.00
	20	500.0	668.8275	0.0771	455.3105	91.0621	73.45
	40	900.0	1039.5000	0.0765	455.3320	91.0664	57.07
100	5	300.0	212.3378	0.0960	454.0677	90.8135	93.53
	10	300.0	397.5163	0.0868	453.2949	90.6590	87.69
	20	500.0	705.0973	0.0856	453.3929	90.6786	77.76
	40	900.0	1138.4052	0.0851	453.4375	90.6875	62.77

8. ตารางแสดงผลการทดลองของอิเล็กโทรดแท่งกลมปลายมนระนาบ

8.1 ที่ความดันอากาศและแฟกเตอร์สนามไฟฟ้าต่าง ๆ เมื่อตัวจ่ายแรงดันเป็นแรงดันกระแสตรงขั้วลบ

8.1.1 เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งกลมปลายมน 10 มิลลิเมตร
และระยะห่างจากปลายมนถึงระนาบ 5 มิลลิเมตร

ความดันอากาศ (บาร์)	แรงดันเบรคดาวน์โดยตรง (เควี)	แรงดันโคโรนาเริ่มเกิด (เควี)	แรงดันโคโรนาเบรคดาวน์ (เควี)
0.2	4.52	-	-
0.6	10.35	-	-
1.0	15.99	-	-
1.5	20.97	-	-
2.0	27.29	-	-
2.5	31.59	-	-
3.0	35.74	-	-
3.5	39.89	-	-
4.0	45.02	-	-
4.5	48.78	-	-
5.0	52.85	-	-

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

8.1.2 เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งกลมปลายมน 10 มิลลิเมตร

และระยะห่างจากปลายมนถึงระนาบ 10 มิลลิเมตร

ความดันอากาศ (บาร์)	แรงดันเบรคดาวน์โดยตรง (เควี)	แรงดันโคโรนาเริ่มเกิด (เควี)	แรงดันโคโรนาเบรคดาวน์ (เควี)
0.2	6.64	-	-
0.6	14.72	-	-
1.0	20.76	-	-
1.5	28.04	-	-
2.0	34.55	-	-
2.5	40.99	-	-
3.0	47.44	-	-
3.5	53.75	-	-
3.8	57.39	-	-
4.0	59.21	-	-
4.5	65.74	-	-
5.0	71.16	-	-

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

8.1.3 เมื่อขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางปลายมน 10 มิลลิเมตร

และระยะห่างจากปลายมนถึงระนาบ 20 มิลลิเมตร

ความดันอากาศ (บาร์)	แรงดันเบรคดาวน์โดยตรง (เควี)	แรงดันไคโรนาเริ่มเกิด (เควี)	แรงดันไคโรนาเบรคดาวน์ (เควี)
0.2	8.89	-	-
*0.5	16.63	-	-
0.6	-	17.40	20.49
0.8	-	20.40	24.13
1.0	-	27.46	34.00
1.5	-	36.09	40.60
2.0	-	44.08	48.30
2.5	-	54.52	56.07
3.0	-	62.26	66.13
3.5	-	66.51	71.54
4.0	-	77.34	78.11
4.3	-	80.05	80.82
*4.5	83.99	-	-
4.8	87.70	-	-
5.0	90.87	-	-

* คือ ความดันอากาศวิกฤต P_c

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

8.1.4 เมื่อขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางปลายมน 10 มิลลิเมตร

และระยะห่างจากปลายมนถึงระนาบ 40 มิลลิเมตร

ความดันอากาศ (บาร์)	แรงดันเบรคดาวน์โดยตรง (เควี)	แรงดันโคโรนาเริ่มเกิด (เควี)	แรงดันโคโรนาเบรคดาวน์ (เควี)
0.2	-	9.40	12.00
0.6	-	19.70	44.86
1.0	-	34.50	53.60
1.5	-	49.50	65.00
2.0	-	60.00	78.81
2.5	-	70.00	88.38
3.0	-	80.00	93.79
3.5	-	88.00	104.20
4.0	-	99.00	112.60
4.5	-	108.00	120.00
5.0	-	116.00	128.00

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

8.1.5 เมื่อขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางปลายมน 20 มิลลิเมตร

และระยะห่างจากปลายมนถึงระนาบ 5 มิลลิเมตร

ความดันอากาศ (บาร์)	แรงดันเบรคดาวน์โดยตรง (เควี)	แรงดันไคโรนาเริ่มเกิด (เควี)	แรงดันไคโรนาเบรคดาวน์ (เควี)
0.2	4.83	-	-
1.0	19.92	-	-
2.0	31.91	-	-
3.0	41.22	-	-
4.0	52.63	-	-
5.0	63.77	-	-

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

8.1.6 เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งกลมปลายมน 20 มิลลิเมตร

และระยะห่างจากปลายมนถึงระนาบ 10 มิลลิเมตร

ความดันอากาศ (บาร์)	แรงดันเบรคดาวน์โดยตรง (เควี)	แรงดันโคโรนาเริ่มเกิด (เควี)	แรงดันโคโรนาเบรคดาวน์ (เควี)
0.2	7.20	-	-
0.6	16.00	-	-
1.0	25.20	-	-
1.5	36.28	-	-
2.0	45.40	-	-
2.5	56.14	-	-
3.0	63.00	-	-
3.5	72.00	-	-
4.0	79.00	-	-
4.5	88.00	-	-
5.0	94.00	-	-

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

8.1.7 เมื่อขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร

และระยะห่างจากปลายมนถึงระนาบ 20 มิลลิเมตร

ความดันอากาศ (บาร์)	แรงดันเบรคดาวน์โดยตรง (เควี)	แรงดันโคโรนาเริ่มเกิด (เควี)	แรงดันโคโรนาเบรคดาวน์ (เควี)
0.2	11.99	-	-
0.6	25.53	-	-
1.0	37.04	-	-
1.5	50.83	-	-
2.0	61.73	-	-
2.5	76.96	-	-
3.0	89.85	-	-
3.5	101.32	-	-
4.0	113.69	-	-
4.2	118.33	-	-
4.4	123.74	-	-
4.5	126.45	-	-
5.0	137.67	-	-

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

8.1.8 เมื่อขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางปลายมน 20 มิลลิเมตร

และระยะห่างจากปลายมนถึงระนาบ 40 มิลลิเมตร

ความดันอากาศ (บาร์)	แรงดันเบรคดาวน์โดยตรง (เควี)	แรงดันไดโรนาเริ่มเกิด (เควี)	แรงดันไดโรนาเบรคดาวน์ (เควี)
*0.2	15.08	-	-
0.3	-	20.11	20.49
0.4	-	25.14	31.32
0.6	-	32.10	42.54
1.0	-	50.27	58.78
1.5	-	71.15	73.86
2.0	-	88.94	92.81
2.5	-	108.64	112.14
3.0	-	121.04	129.54
3.5	-	140.76	143.85
4.0	-	154.29	161.64
*4.5	175.18	-	-
4.6	178.27	-	-
4.7	182.52	-	-
4.8	187.16	-	-
5.0	192.58	-	-

* คือความดันอากาศวิกฤต P_c

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ง.1.9 เมื่อขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางปลายมน 40 มิลลิเมตร

และระยะห่างจากปลายมนถึงระนาบ 5 มิลลิเมตร

ความดันอากาศ (บาร์)	แรงดันเบรคดาวน์โดยตรง (เควี)	แรงดันโคโรนาเริ่มเกิด (เควี)	แรงดันโคโรนาเบรคดาวน์ (เควี)
0.2	5.11	-	-
1.0	18.90	-	-
2.0	32.17	-	-
3.0	43.91	-	-
4.0	56.54	-	-
5.0	69.00	-	-

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

8.1.10 เมื่อขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางปลายมน 40 มิลลิเมตร

และระยะห่างจากปลายมนถึงระนาบ 10 มิลลิเมตร

ความดันอากาศ (บาร์)	แรงดันเบรคดาวน์โดยตรง (เควี)	แรงดันโคโรนาเริ่มเกิด (เควี)	แรงดันโคโรนาเบรคดาวน์ (เควี)
0.2	8.89	-	-
1.0	32.48	-	-
2.0	55.69	-	-
3.0	75.02	-	-
4.0	95.52	-	-
5.0	116.01	-	-

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

8.1.11 เมื่อขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางปลายบน 40 มิลลิเมตร

และระยะห่างจากปลายบนถึงระนาบ 20 มิลลิเมตร

ความดันอากาศ (บาร์)	แรงดันเบรคดาวน์โดยตรง (เควี)	แรงดันโคโรนาเริ่มเกิด (เควี)	แรงดันโคโรนาเบรคดาวน์ (เควี)
0.2	14.37	-	-
1.0	48.34	-	-
2.0	84.07	-	-
3.0	117.17	-	-
4.0	150.47	-	-
5.0	182.14	-	-

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

8.1.12 เมื่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งกลมปลายมน 40 มิลลิเมตร

และระยะห่างจากปลายมนถึงระนาบ 40 มิลลิเมตร

ความดันอากาศ (บาร์)	แรงดันเบรคดาวน์โดยตรง (เควี)	แรงดันโคโรนาเริ่มเกิด (เควี)	แรงดันโคโรนาเบรคดาวน์ (เควี)
0.2	20.11	-	-
0.6	50.66	-	-
0.9	69.55	-	-
*1.0	70.77	-	-
1.4	-	92.03	106.69
1.8	-	110.21	117.21
2.0	-	125.29	127.61
2.4	-	138.83	145.94
2.8	-	158.93	163.69
3.0	-	167.44	168.71
3.2	-	182.52	183.76
*3.3	190.64	-	-
3.4	195.28	-	-
3.8	207.66	-	-
4.0	222.35	-	-
4.5	242.85	-	-
5.0	275.64	-	-

* ความดันอากาศวิกฤต P_c

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

8.2 เมื่อตัวจ่ายแรงดันเป็นแรงดันกระแสตรงขั้วบวก ขั้วลบ และกระแสสลับ

8.2.1 เมื่อชนิดของขั้วแรงดันเป็นแรงดันกระแสตรงขั้วบวก

และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งกลมปลายมน 10 มิลลิเมตร

ที่ระยะห่างจากปลายมนถึงระนาบ 40 มิลลิเมตร

ความดันของอากาศ (บาร์)	แรงดันเบรคดาวน์โดยตรง (เควี)	แรงดันโคโรนาเริ่มเกิด (เควี)	แรงดันโคโรนาเบรคดาวน์ (เควี)
0.2	-	10.00	23.00 **
0.6	-	22.00	56.00 **
0.7	-	25.00	57.50 **
0.8	-	28.00	62.00 **
0.9	31.60	-	-
1.0	37.20	-	-
1.5	52.20	-	-
2.0	66.00	-	-
2.5	75.00	-	-
3.0	86.84	-	-
3.5	96.36	-	-
4.0	107.00	-	-
4.5	111.60	-	-
5.0	132.45	-	-

** เกิดเบรคดาวน์ไม่แน่นอน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ง.2.2 เมื่อชนิดของขั้วแรงดันเป็นแรงดันกระแสสลับ 50 แฮร์ตซ์

และขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางปลายมน 10 มิลลิเมตร

ที่ระยะห่างจากปลายมนถึงระนาบ 40 มิลลิเมตร

ความดันอากาศ (บาร์)	แรงดันเบรคดาวน์โดยตรง (เควี)	แรงดันโคโรนาเริ่มเกิด (เควี)		แรงดันโคโรนาเบรคดาวน์ (เควี)
		ขั้วลบ	ขั้วบวก	
0.2	-	10.00	9.48	10.56
0.6	-	24.12	21.46	25.77
0.7	-	27.08	24.01	27.68
0.8	-	28.00	-	29.75
0.9	-	31.08	-	35.61
1.0	-	35.82	-	45.35
1.5	-	51.95	-	60.55
2.0	-	61.86	-	76.84
2.5	-	68.97	-	95.12
3.0	-	77.16	-	97.38
3.5	-	85.39	-	112.77
4.0	-	94.42	-	120.96
4.5	-	103.59	-	135.60
5.0	-	111.74	-	140.59

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

๘.๒.๓ เมื่อชนิดของขั้วแรงดัน เป็นแรงดันกระแสตรงขั้วลบ

และขนาดของ เส้นผ่านศูนย์กลางปลายมน 10 มิลลิ เมตร

ที่ระยะห่างจากปลายมนถึงระนาบ 40 มิลลิ เมตร

ความดันอากาศ (บาร์)	แรงดัน เบรคดาวน์โดยตรง (เควี)	แรงดันโคโรนา เริ่ม เกิด (เควี)	แรงดันโคโรนา เบรคดาวน์ (เควี)
0.2	-	9.40	12.00
0.6	-	19.70	44.86
1.0	-	34.50	53.60
1.5	-	49.50	65.00
2.0	-	60.00	78.81
2.5	-	70.00	88.38
3.0	-	80.00	93.79
3.5	-	88.00	104.20
4.0	-	99.00	112.60
4.5	-	108.00	120.00
5.0	-	116.00	128.00

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

8.2.4 เมื่อชนิดของขั้วแรงดัน เป็นแรงดันกระแสตรงขั้วบวก

และขนาด เส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งกลม 20 มิลลิ เมตร

ที่ระยะห่างจากปลายมนถึงระนาบ 10 มิลลิ เมตร

ความดันอากาศ (บาร์)	แรงดัน เบรคดาวน์โดยตรง (เควี)	แรงดันโคโรนา เริ่ม เกิด (เควี)	แรงดันโคโรนา เบรคดาวน์ (เควี)
0.2	-	-	7.50
0.6	-	-	16.50
0.7	20.00	-	-
1.0	27.80	-	-
1.5	40.26	-	-
2.0	50.75	-	-
2.5	60.45	-	-
3.0	72.15	-	-
3.5	78.86	-	-
4.0	87.00	-	-
4.5	92.70	-	-
5.0	99.00	-	-

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

8.2.5 เมื่อชนิดของขั้วแรงดันเป็นแรงดันกระแสสลับ 50 แฮร์ตซ์
และขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางปลายมน 20 มิลลิเมตร
ที่ระยะห่างจากปลายมนถึงระนาบ 10 มิลลิเมตร

ความดันอากาศ (บาร์)	แรงดันเบรคดาวน์โดยตรง (เควี)	แรงดันโคโรนาเริ่มเกิด (เควี)		แรงดันโคโรนาเบรคดาวน์ (เควี)
		ขั้วลบ	ขั้วบวก	
0.2	7.30	-	-	-
0.6	16.37	-	-	-
1.0	27.56	-	-	-
1.5	38.59	-	-	-
2.0	47.86	-	-	-
2.5	58.58	-	-	-
3.0	67.68	-	-	-
3.5	74.38	-	-	-
4.0	83.17	-	-	-
4.5	92.41	-	-	-
5.0	96.19	-	-	-

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

8.2.6 เมื่อชนิดของขั้วแรงดัน เป็นแรงดันกระแสตรงขั้วลบ

และขนาด เส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งกลมปลายมน 20 มิลลิเมตร

มีระยะห่างจากปลายมนถึงระนาบ 10 มิลลิเมตร

ความดันอากาศ (บาร์)	แรงดัน เบรคดาวน์โดยตรง (เควี)	แรงดันโคโรนา เริ่ม เกิด (เควี)	แรงดันโคโรนา เบรคดาวน์ (เควี)
0.2	7.20	-	-
0.6	16.00	-	-
1.0	25.20	-	-
1.5	36.28	-	-
2.0	45.40	-	-
2.5	56.14	-	-
3.0	63.00	-	-
3.5	72.00	-	-
4.0	79.00	-	-
4.5	88.00	-	-
5.0	94.00	-	-

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติการศึกษา

ชื่อ นายเดช สุขะพิริยะ เกิดที่กรุงเทพฯ เมื่อวันที่ 16 สิงหาคม 2501

วุฒิการศึกษา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2523

ตำแหน่งและสถานที่ทำงาน Executive Director

บริษัท ไทยสแตนเลย์การไฟฟ้า จำกัด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย