

รายการอ้างอิง

- [1] Ward, L. Calculation for Breakdown in Air between Spherical Electrodes. IEEE Annual Report – Conference of Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1967.
- [2] Zaengl, W.S., Yimvuthikul, S., and Friedrich, G. The Temperature Dependence of Homogeneous Field Breakdown in Synthetic Air. IEEE Transactions on Electrical Insulation 26, 3 (June 1991).
- [3] Pedersen, A. Calculation of Spark Breakdown or Corona Starting Voltages in Nonuniform Fields. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems PAS-86, 2 (February 1967).
- [4] Petcharaks, K. Applicability of the Streamer Breakdown Criterion to Inhomogeneous Gas Gaps. Diss. ETH No.11192. Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, 1995.
- [5] Patrick Donohoe, J. Physical Characteristic of Criteria Governing the Computation of Air Gap Breakdown Voltages for Slightly Divergent Fields. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation 5, 4 (August 1998).
- [6] Petcharaks, K. A Contribution to the Streamer Breakdown Criterion. High Voltage Engineering Symposium 467 (1999).
- [7] Claus Leth Bak, Birgitte Bak-Jensen, and Jorgen Tolstrup Sorensen. An improved model for the calculation of the electrical onset in gas insulated medium inhomogeneous gaps. Conference Record of the 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (April 7-10, 2002).
- [8] Markus Zahn, Cheung Fung Tsang, and Shing-Ching Poa. Transient electric field and space-charge behavior for unipolar ion conduction. Journal of Applied Physics 45, 6 (June 1974).
- [9] Wen, C., and Wetzer, J.M. Electron Avalanche Influenced by Detachment and Conversion Processes. IEEE Transactions on Electrical Insulation 23, 6 (December 1988).

- [10] Morrow, R. Theory of negative corona in oxygen. Physical Review A 32, 3 (September 1985).
- [11] Morrow, R. Theory of Positive Corona in SF₆ Due to a Voltage Impulse. IEEE Transactions on Plasma Science 19, 2 (April 1991).
- [12] Jing-Ming Guo, and Chwan-Hwa John Wu. Two-Dimension Nonequilibrium Fluid Models for Streamers. IEEE Transactions on Plasma Science 21, 6 (December 1993).
- [13] Jin Myung Park, Yong-Ho Kim, and Sang Hee Hong. Three-Dimensional Numerical Simulations on the Streamer Propagation Characteristics of Pulsed Corona Discharge in a Wire-Cylinder Reactor.
- [14] Kennedy, J.T., Megens, M.G.M., and Wetzer, J.M. Cathode photoelectron emission during a gas discharge in N₂ and dry air. IEEE International Symposium on Electrical Insulation (June 5-8, 1994).
- [15] Yu Babaeva, N., and Naidis, G.V. Two-dimensional modeling of positive streamer dynamics in non-uniform electric fields in air. J. Phys. D: Appl. Phys. 29 (1996): 2423-2431.
- [16] Morrow, R., and Lowke, J.J. Streamer propagation in air. J. Phys. D: Appl. Phys. 30 (1997): 614-627,.
- [17] Kulikovskiy, A.A. The role of photoionization in positive streamer dynamics. J. Phys. D: Appl. Phys. 33 (2000): 1514-1524.
- [18] Woong-Kee Min, Jae Bum Park, Sung-Chun Choi, and Jungwon Kang. Numerical Analysis of Gas Discharge Using FEM-FCT on Unstructured Grid. Journal of the Korean Physical Society 42 (February 2003): S908-S915.
- [19] Alejandro Luque, Carolynne Montijn, Ute Ebert, and Willem Hundsdorfer. Photoionization in negative streamers: fast computations and two propagation modes. Appl. Phys. Lett. 90, 081501 (2007).
- [20] Jianfeng Hui, Zhicheng Guan, Liming Wang, and Qiuwei Li. Variation of the Dynamics of Positive Streamer with Pressure and Humidity in Air. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation 15, 2 (April 2008).

- [21] Xianghan Wang, Feng Wang, Wolfgang Pfeiffer, and Nikolai Kouzichine. Simulation of Two-Dimensional Streamer Discharge in Uniform Field in Low SF6 Content Mixtures. IEEE (2008).
- [22] Ning Lui, Sebastien Celestin, Anne Bourdon, Victor P. PasKo, Pierre Segur, and Emmanuel Marode. Photoionization and Optical Emission Effects of Positive Streamers in Air at Ground Pressure. IEEE Transactions on Plasma Science 36, 4 (August 2008).
- [23] Kuffel, E., and Zaengl, W.S. High voltage engineering fundamentals. Oxford Pergamon, 1984.
- [24] ประโมทย์ อุณหไวทยะ และ จุมพล พรหมพิทักษ์. อิเล็กทรอนิกส์ในก๊าซ. คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2520.
- [25] COMSOL Multiphysics Manual.
- [26] Se-Hee Lee, and others. Finite Element Analysis of Charge Injection and Transport in a Dielectric Liquid. IEEE, Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (2006).
- [27] Se-Hee Lee, Se-Yeon Lee, Young-Ki Chung, and Il-Han Park. Finite-Element Analysis of Corona Discharge Onset in Air with Artificial Diffusion Scheme and Under Fowler–Nordheim Electron Emission. IEEE Transactions on Magnetics 43, 4 (April 2007).
- [28] IEC 60052, Voltage measurement by means of standard air gaps, Geneva, 2002.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

ค่าพารามิเตอร์ของอากาศ ซึ่งได้แก่ สัมประสิทธิ์การเกิดไอออไนเซชัน (α), สัมประสิทธิ์การเกิดไอออนลบ (η), สัมประสิทธิ์การแพร่ของอิเล็กตรอน (D_e), สัมประสิทธิ์การรวมตัวระหว่างอิเล็กตรอนกับไอออนบวก (β_{ep}), สัมประสิทธิ์การรวมตัวระหว่างไอออนบวกกับไอออนลบ (β_{pn}), ความเร็วลอยเลื่อนของอิเล็กตรอน (v_e), ไอออนบวก (v_p) และไอออนลบ (v_n) อ้างอิงมาจากข้อมูลของ Morrow [16] และ Min และคณะวิจัย [18] ส่วนค่าพารามิเตอร์ของการเกิดโฟโตไอออไนเซชันได้มาจากคิดผลของการเกิด 2nd positive system ($C^3\Pi_u - B^3\Pi_g$) ของโมเลกุลของแก๊สไนโตรเจนในอากาศ ซึ่งอ้างอิงมาจากข้อมูลของ Kennedy และคณะวิจัย [14] และ Kulikovsky [17] โดยมีรายละเอียดดังนี้

ก.1 ค่าพารามิเตอร์ของอากาศ

$$\alpha = \begin{cases} 6.619 \times 10^{-17} N \exp\left(-\frac{5.593 \times 10^{-15} N}{|E|}\right) & , \frac{|E|}{N} \leq 1.5 \times 10^{-15} \\ 2 \times 10^{-16} N \exp\left(-\frac{7.248 \times 10^{-15} N}{|E|}\right) & , \frac{|E|}{N} > 1.5 \times 10^{-15} \end{cases} \dots (cm^{-1})$$

$$\eta = \begin{cases} 106.81 & , \frac{|E|}{N} < 1.2 \times 10^{-17} \\ N \left(6.089 \times 10^{-4} \frac{|E|}{N} - 2.893 \times 10^{-19} \right) + N^2 \left[4.7778 \times 10^{-59} \left(\frac{|E|}{N} \right)^{-1.2749} \right] & , 1.2 \times 10^{-17} \leq \frac{|E|}{N} \leq 1.05 \times 10^{-15} \\ N \left(8.889 \times 10^{-5} \frac{|E|}{N} + 2.567 \times 10^{-19} \right) + N^2 \left[4.7778 \times 10^{-59} \left(\frac{|E|}{N} \right)^{-1.2749} \right] & , \frac{|E|}{N} > 1.05 \times 10^{-15} \end{cases} \dots (cm^{-1})$$

$$\begin{aligned}
 v_e &= -\left(\frac{E}{|E|}\right) \left[6.87 \times 10^{22} \left(\frac{|E|}{N}\right) + 3.38 \times 10^4 \right] & , \frac{|E|}{N} \leq 2.6 \times 10^{-17} \\
 & -\left(\frac{E}{|E|}\right) \left[7.2973 \times 10^{21} \left(\frac{|E|}{N}\right) + 1.63 \times 10^6 \right] & , 2.6 \times 10^{-17} < \frac{|E|}{N} \leq 1 \times 10^{-16} \\
 & -\left(\frac{E}{|E|}\right) \left[1.03 \times 10^{22} \left(\frac{|E|}{N}\right) + 1.3 \times 10^6 \right] & , 1 \times 10^{-16} < \frac{|E|}{N} \leq 2 \times 10^{-15} \\
 & -\left(\frac{E}{|E|}\right) \left[7.4 \times 10^{21} \left(\frac{|E|}{N}\right) + 7.1 \times 10^6 \right] & , \frac{|E|}{N} > 2 \times 10^{-15} \\
 & & \dots \left(\frac{cm}{s}\right)
 \end{aligned}$$

$$v_p = 2.43E \frac{P}{P_0} \quad \dots \left(\frac{cm}{s}\right)$$

$$\begin{aligned}
 v_n &= -1.86E \frac{P}{P_0} & , \frac{|E|}{N} \leq 5 \times 10^{-16} \\
 & -2.7E \frac{P}{P_0} & , \frac{|E|}{N} > 5 \times 10^{-16} \\
 & & \dots \left(\frac{cm}{s}\right)
 \end{aligned}$$

$$D_e = \left[0.3341 \times 10^9 \left(\frac{|E|}{N}\right)^{0.54069} \right] \left| \frac{v_e}{E} \right| \quad \dots \left(\frac{cm^2}{s}\right)$$

$$\beta_{ep} = 2 \times 10^{-7} \quad \dots \left(\frac{cm^3}{s}\right)$$

$$\beta_{pn} = 2 \times 10^{-7} \quad \dots \left(\frac{cm^3}{s}\right)$$

เมื่อ N = ความหนาแน่นแก๊สตัวกลาง

$$P_0 = 760 \text{ torr}$$

ก.2 ค่าพารามิเตอร์ของการเกิดโฟโตไอออไนเซชัน

$$\mu_m = 4.6 \quad \dots (cm^{-1})$$

$$\xi = 0.1$$

$$p_q = 30 \quad \dots (\text{torr})$$

ภาคผนวก ข

ฟังก์ชันการลดรูป

เนื้อหาในภาคผนวก ข นี้จะแสดงผลการคำนวณของแบบจำลองเชิงตัวเลข ที่ได้จากการใช้สมการที่ (3.1) ถึงสมการที่ (3.4) และสมการที่ (3.6) ที่ได้จากการใช้ฟังก์ชันการลดรูปที่มีความแตกต่างกัน 3 แบบ โดยรายละเอียดของการคำนวณมีดังนี้

ข.1 เงื่อนไขเริ่มต้นในการคำนวณ

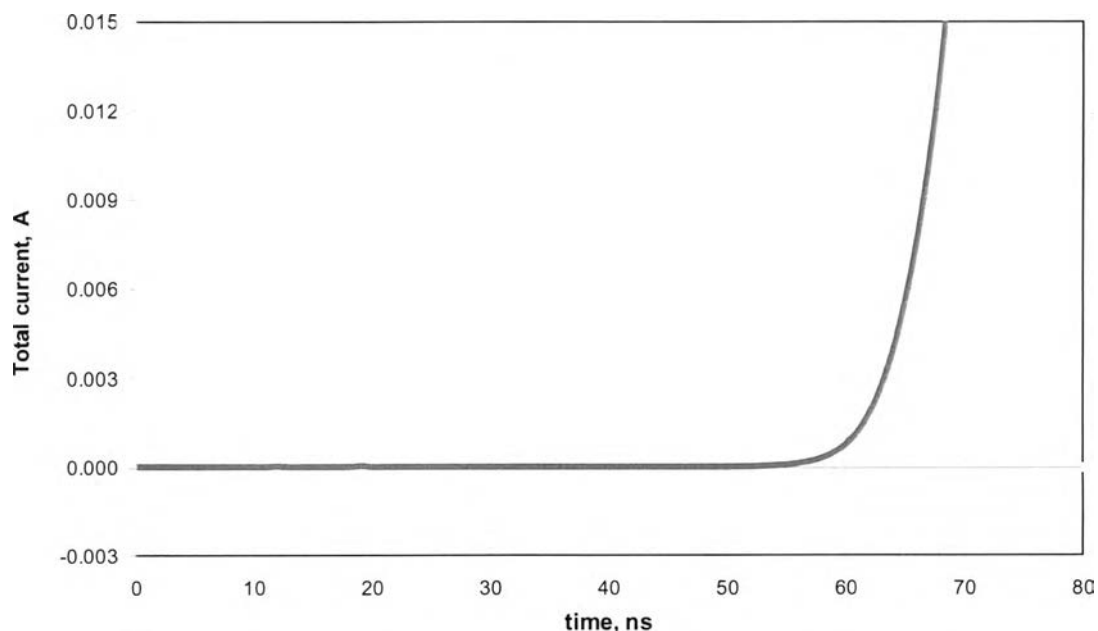
แบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณมีลักษณะเช่นเดียวกับแบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณกรณีที่ 3 ดังที่ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.2 แต่ขนาดของแรงดันป้อนเข้าที่ใช้ในการคำนวณจะมีขนาดต่างกัน 3 ระดับ คือ 0.9 pu 0.95 pu และ 1.0 pu ตามลำดับ

ข.2 การคำนวณ

ข.2.1 ฟังก์ชันการลดรูปมีค่าเท่ากับ 2π

สาเหตุที่ค่าของฟังก์ชันการลดรูปมีค่าเท่ากับ 2π เนื่องมาจากการตั้งสมมติฐานว่าอิเล็กทรอนิกส์มีการกระจายอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งบริเวณที่ทำการคำนวณ

จากผลการคำนวณพบว่าที่ทุกขนาดแรงดันป้อนเข้า จะเกิดการเชื่อมต่อแกประหว่างแอนโอดกับแคโทดเนื่องมาจากกลุ่มอนุภาคที่มีประจุ อีกทั้งขนาดของกระแสดีสชาร์จที่ไหลระหว่างแกปจะมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วหลังจากที่กลุ่มอนุภาคเคลื่อนที่ถึงแอนโอดในทางปฏิบัติเหตุการณ์ดังกล่าวควรเกิดขึ้นเมื่อแรงดันป้อนเข้ามีค่ามากกว่าหรือเท่ากับแรงดันเบรกดาวนซ์ของแกปทรงกลม ซึ่งในที่นี้คือแรงดันป้อนเข้าขนาด 1.0 pu ดังนั้นการกำหนดให้ฟังก์ชันการลดรูปมีค่าเท่ากับ 2π จึงเป็นการชดเชยผลของการลดรูปสมการโฟโตไอออไนเซชันที่มากเกินไป ตัวอย่างผลการคำนวณขนาดกระแสดีสชาร์จในกรณีที่แรงดันป้อนเข้ามีค่าเท่ากับ 1.0 pu ได้แสดงในรูปที่ ข.1

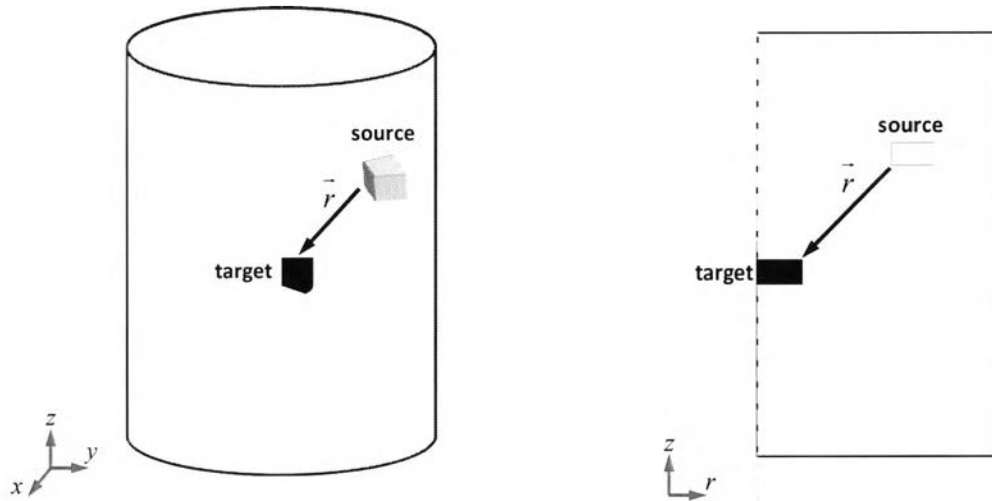


รูปที่ ข.1 ขนาดกระแสดีสชาร์จในกรณีที่แรงดันป้อนเข้ามีค่าเท่ากับ 1.0 pu
เมื่อฟังก์ชันการลดรูปมีค่าเท่ากับ 2π

ข.2.2 ฟังก์ชันการลดรูปมีค่าเท่ากับ 5.06

จากการพิจารณาสมการที่ (3.5) พบว่าพจน์สำคัญที่ทำให้สมการมีความซับซ้อนในการอินทิเกรตคือ พจน์ $\frac{e^{-\mu m|r|}}{|r|^3}$ ทางผู้วิจัยจึงทำการหาอัตราส่วนผลการอินทิเกรตสมการ $\frac{e^{-\mu m|r|}}{|r|^3}$ ในพิกัด 3 มิติกับในพิกัด 2 มิติตามแนวแกน z โดยลักษณะการอินทิเกรตได้แสดงดังในรูปที่ ข.2 และนำค่าอัตราส่วนที่ได้ไปใช้เป็นค่าของฟังก์ชันการลดรูป

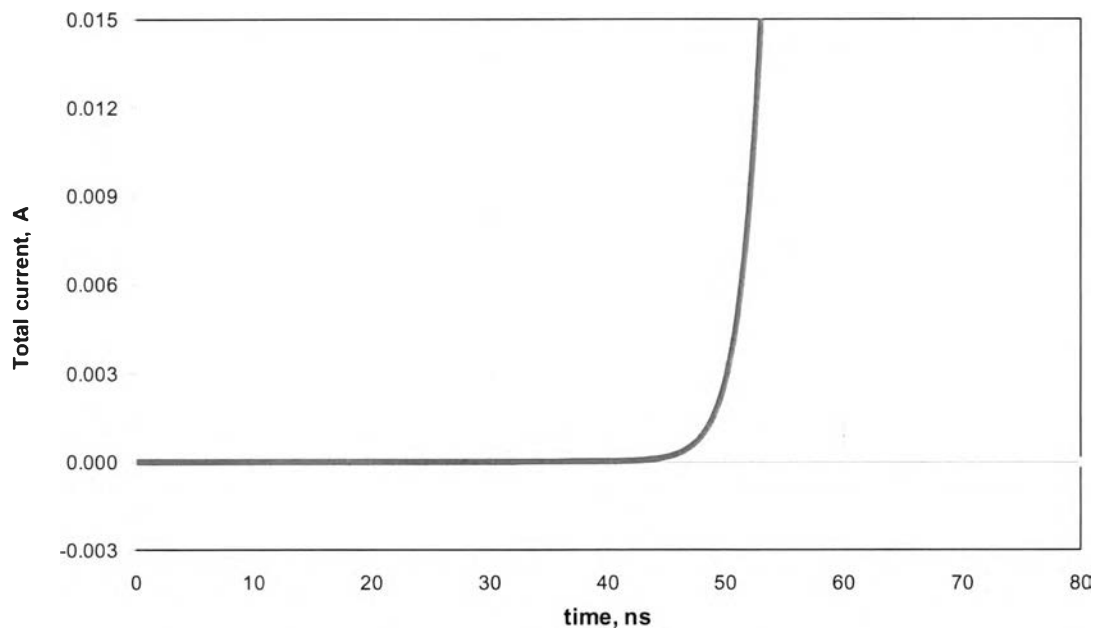
อย่างไรก็ตามผลการคำนวณที่ได้ยังคงมีลักษณะเช่นเดียวกับผลการคำนวณในหัวข้อที่ ข.2.1 คือมีการเชื่อมต่อแก๊สระหว่างแอดกับแคโทดเนื่องจากกลุ่มอนุภาคที่มีประจุ และการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของกระแสดีสชาร์จหลังจากที่กลุ่มอนุภาคเคลื่อนที่ถึงแอดที่ทุกขนาดแรงดันป้อนเข้า ตัวอย่างผลการคำนวณขนาดกระแสดีสชาร์จในกรณีที่แรงดันป้อนเข้ามีค่าเท่ากับ 1.0 pu ในหัวข้อนี้ได้แสดงในรูปที่ ข.3



ก) การอินทิเกรตตามแนวแกน Z ในพิกัด 3 มิติ

ข) การอินทิเกรตตามแนวแกน Z ในพิกัด 2 มิติ

รูปที่ ข.2 การอินทิเกรตสมการ $\frac{e^{-\mu m|r|}}{|r|^3}$

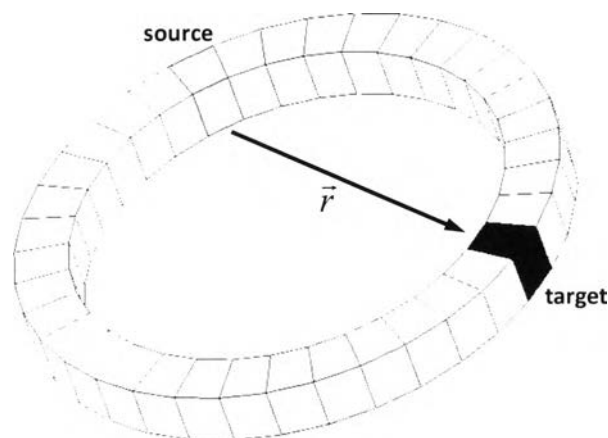


รูปที่ ข.3 ขนาดกระแสดีสชาร์จในกรณีที่แรงดันป้อนเข้ามีค่าเท่ากับ 1.0 pu

เมื่อฟังก์ชันการลดรูปมีค่าเท่ากับ 5.06

ข.2.3 ฟังก์ชันการลดรูปมีค่าเท่ากับ $1.134 \cdot e^{-3.308r}$

เนื่องจากการหาค่าฟังก์ชันการลดรูปในหัวข้อที่ ข.2.2 ไม่ได้คิดผลของการอินทิเกรตสมการ $\frac{e^{-\mu m|r|}}{|r|^3}$ ตามแนว θ ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงได้ทำการปรับปรุงฟังก์ชันการลดรูปใหม่อีกครั้ง โดยการหาอัตราส่วนผลการอินทิเกรตสมการ $\frac{e^{-\mu m|r|}}{|r|^3}$ ตามแนวแกน θ ในพิกัด 3 มิติดังแสดงในรูปที่ ข.4 กับผลการอินทิเกรตสมการ $\frac{e^{-\mu m|r|}}{|r|^3}$ ในพิกัด 2 มิติ และนำผลที่ได้ไปคิดรวมกับผลการหาฟังก์ชันการลดรูปในหัวข้อที่ ข.2.2 ได้ออกมาเป็นฟังก์ชันการลดรูปที่ขึ้นกับค่า r

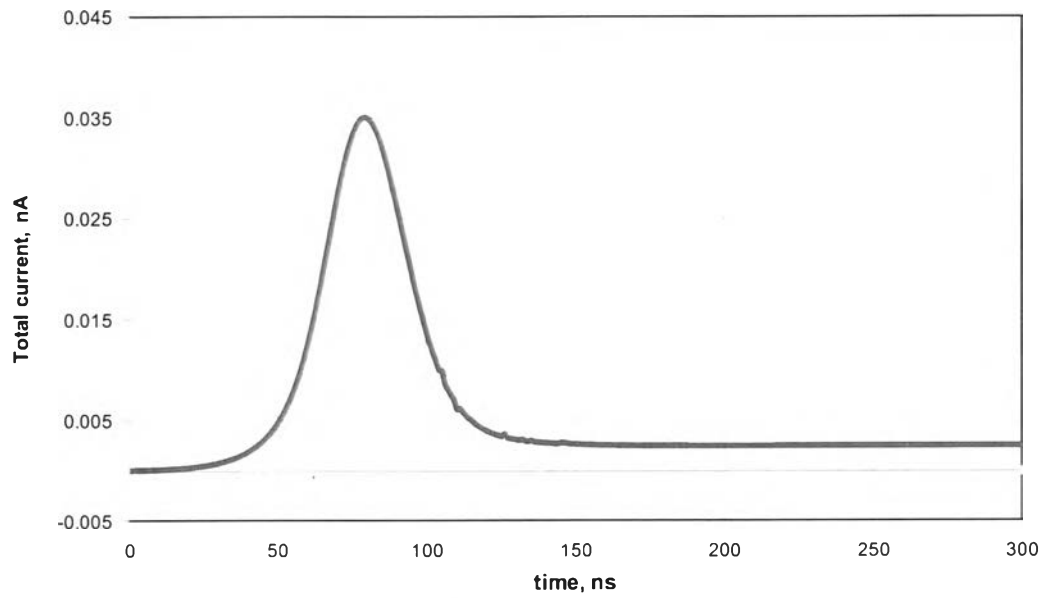


รูปที่ ข.4 การอินทิเกรตสมการ $\frac{e^{-\mu m|r|}}{|r|^3}$ ตามแนวแกน θ ในพิกัด 3 มิติ

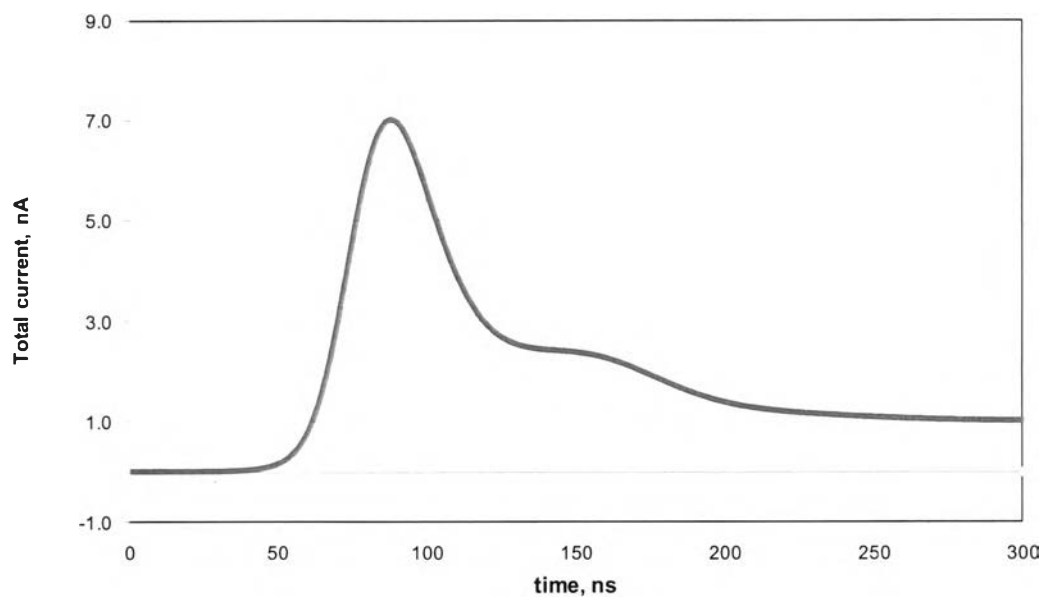
จากผลการคำนวณพบว่าการเชื่อมต่อแก๊สระหว่างแอนโอดกับแคโทดเนื่องจากกลุ่มอนุภาคที่มีประจุ และการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของกระแสดีสชาร์จหลังจากที่กลุ่มอนุภาคเคลื่อนที่ถึงแอนโอด จะเกิดขึ้นเฉพาะในกรณีที่แรงดันป้อนเข้ามีค่าเท่ากับ 1.0 pu เท่านั้น ส่วนที่แรงดันป้อนเข้าค่าอื่น ๆ ขนาดของกระแสดีสชาร์จจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วหลังจากที่กลุ่มอนุภาคเคลื่อนที่ถึงแอนโอด ผลการคำนวณขนาดกระแสดีสชาร์จที่แต่ละขนาดแรงดันป้อนเข้าได้แสดงในรูปที่ ข.5

ข.3 สรุปผลการคำนวณ

จากผลการคำนวณที่ได้จากการปรับค่าฟังก์ชันการลดรูปในหัวข้อที่ผ่านมา จะเห็นว่า มีเพียงฟังก์ชันการลดรูปในหัวข้อที่ ข.2.3 เท่านั้นที่สอดคล้องกับผลในทางปฏิบัติ นอกจากนี้ เมื่อนำผลการคำนวณกระแสดีสชาร์จที่ได้จากการใช้ฟังก์ชันการลดรูปในหัวข้อที่ ข.2.3 ไปเปรียบเทียบกับผลการทดลองวัดค่ากระแสเบรกดาว์นพบว่ามีความใกล้เคียงกัน โดยผลการเปรียบเทียบได้แสดงไว้ในหัวข้อที่ 5.3

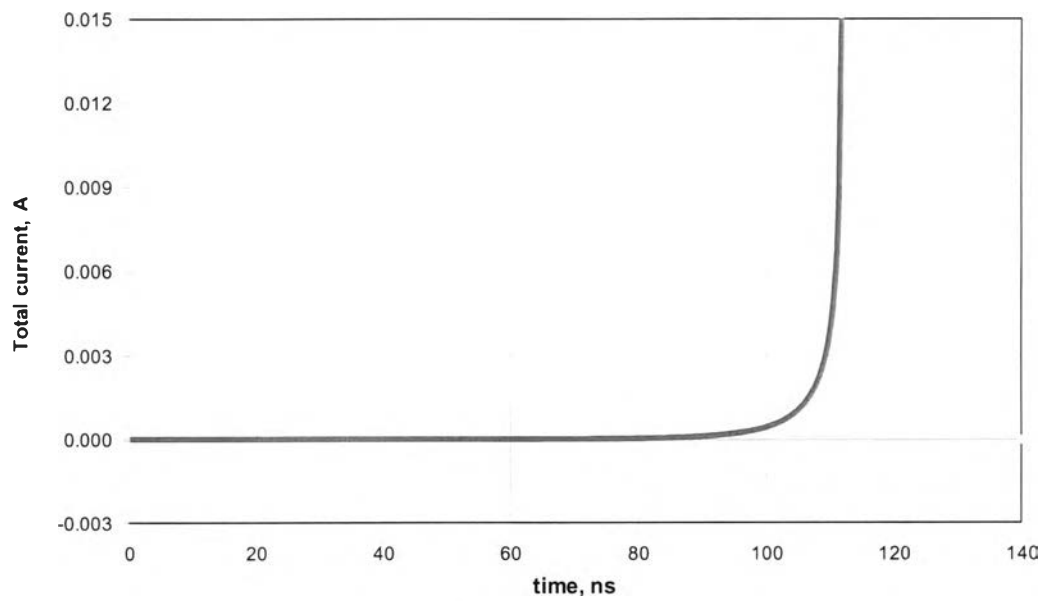


ก) แรงดันป้อนเข้ามีค่าเท่ากับ 0.9 pu



ข) แรงดันป้อนเข้ามีค่าเท่ากับ 0.95 pu

รูปที่ ข.5 ขนาดกระแสดีสชาร์จเมื่อฟังก์ชันการลดรูปมีค่าเท่ากับ $1.134 \cdot e^{-3.308r}$



ค) แรงดันป้อนเข้ามีค่าเท่ากับ 1.0 pu

รูปที่ ข.5 ขนาดกระแสดีสชาร์จเมื่อฟังก์ชันการลดรูปมีค่าเท่ากับ $1.134 \cdot e^{-3.308r}$ (ต่อ)

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงกำหนดให้ฟังก์ชันที่ใช้ในการลดรูปสมการโฟโตไอออนในเซชันจากสมการในพิกัด 3 มิติไปเป็นสมการในพิกัด 2 มิติเป็นไปตามสมการที่ (ข.1)

$$f^n = 1.134 \cdot e^{-3.308r} \quad (\text{ข.1})$$

เมื่อ r คือระยะตามแนวแกน r ในระนาบ $r - z$

ภาคผนวก ค

พฤติกรรมของอนุภาคประจุบวกภายใต้สนามไฟฟ้า

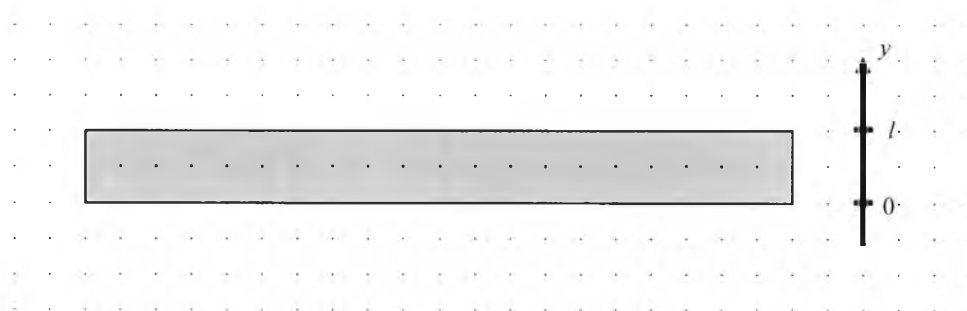
ในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคประจุบวกและการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการป้อนแรงดันไฟฟ้ารูปขั้นระหว่างอิเล็กโทรดแบบระนาบ เพื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขผ่านโปรแกรม COMSOL Multiphysics กับผลการคำนวณที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีเชิงวิเคราะห์

ค.1 แบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณ

แบบจำลองที่ใช้เป็นอิเล็กโทรดแบบระนาบซึ่งแทนด้วยรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าดังแสดงในรูปที่ ค.1 โดยขอบด้านบนและด้านล่างคืออิเล็กโทรดที่มีการป้อนแรงดันรูปขั้นขนาด V_0 ที่มีสมการดังนี้

$$V = V_0 U(t)$$

เมื่อ $U(t)$ คือฟังก์ชันสัญญาณรูปขั้น



รูปที่ ค.1 แบบจำลองของอิเล็กโทรดแบบระนาบที่ใช้ในโปรแกรม COMSOL Multiphysics

ค.2 สมการควบคุมที่ใช้ในแบบจำลอง

สมการที่ใช้ในแบบจำลองคือสมการความต่อเนื่องของอนุภาคที่มีประจุ โดยละเลยผลของการแพร่ของอนุภาคและสมการปัวร์ซองในแบบ 1 มิติ

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{J}) = 0 \quad (\text{ค.1})$$

$$\nabla \cdot (\epsilon \mathbf{E}) = q ; \quad \mathbf{E} = -\nabla V \quad (\text{ค.2})$$

เมื่อ q คือความหนาแน่นของอนุภาคประจุบวก

J คือฟลักซ์เนื่องมาจากเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุบวก มีค่าเท่ากับ $q\mu E$

μ คือสภาพการเคลื่อนที่ของอนุภาคประจุบวก (positive charge mobility)

กำหนดให้ค่า ε และ μ เป็นค่าคงที่ จากนั้นทำการนอร์มัลไลซ์ (normalized) ค่าตัวแปรต่าง ๆ ดังนี้

$$\bar{v} = l\bar{v} \quad , \quad \bar{t} = \frac{t\mu V_0}{l^2} \quad , \quad \bar{V} = \frac{V}{V_0}$$

$$\bar{q} = \frac{ql^2}{\varepsilon V_0} \quad , \quad \bar{J} = \frac{Jl^3}{\varepsilon\mu V_0^2} \quad , \quad \bar{E} = \frac{El}{V_0} \quad , \quad \bar{y} = \frac{y}{l}$$

ดังนั้นสมการที่ (ค.1) และสมการที่ (ค.2) สามารถเขียนในรูปแบบนอร์มัลไลซ์ได้ดังนี้

$$\frac{\partial \bar{q}}{\partial \bar{t}} + \bar{v} \cdot (\bar{q}\bar{E}) = 0 \quad (\text{ค.3})$$

$$\bar{v} \cdot (-\bar{v}\bar{V}) = \bar{q} \quad ; \quad \bar{E} = -\bar{v}\bar{V} \quad (\text{ค.4})$$

ค.3 เงื่อนไขขอบเขตและค่าเริ่มต้น

ค.3.1 เงื่อนไขขอบเขต

กำหนดให้ขอบด้านบนและล่างในแบบจำลองแทนด้วยอิเล็กโทรดที่มีการป้อนแรงดัน โดยอิเล็กโทรดล่างมีแรงดันขนาดเท่ากับ V_0 และอิเล็กโทรดบนมีแรงดันขนาดเท่ากับศูนย์ ซึ่งสามารถเขียนในรูปแบบนอร์มัลไลซ์ได้ดังนี้

$$\bar{V}(\bar{y} = 1) = 1$$

$$\bar{V}(\bar{y} = 0) = 0$$

และกำหนดให้อิเล็กโทรดล่างทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรดที่ทำการปล่อยอนุภาคประจุบวกที่มีลักษณะสม่ำเสมอและมีค่าเป็นจำนวนเท่าของค่าสนามไฟฟ้าที่อิเล็กโทรด และให้อิเล็กโทรดบนทำหน้าที่เป็นตัวรับอนุภาคซึ่งสามารถเขียนในรูปแบบนอร์มัลไลซ์ได้ดังนี้

$$\bar{J}(\bar{y} = 0) = A_s \bar{E}(\bar{y} = 0)$$

$$\bar{q}(\bar{y} = 1) = 0$$

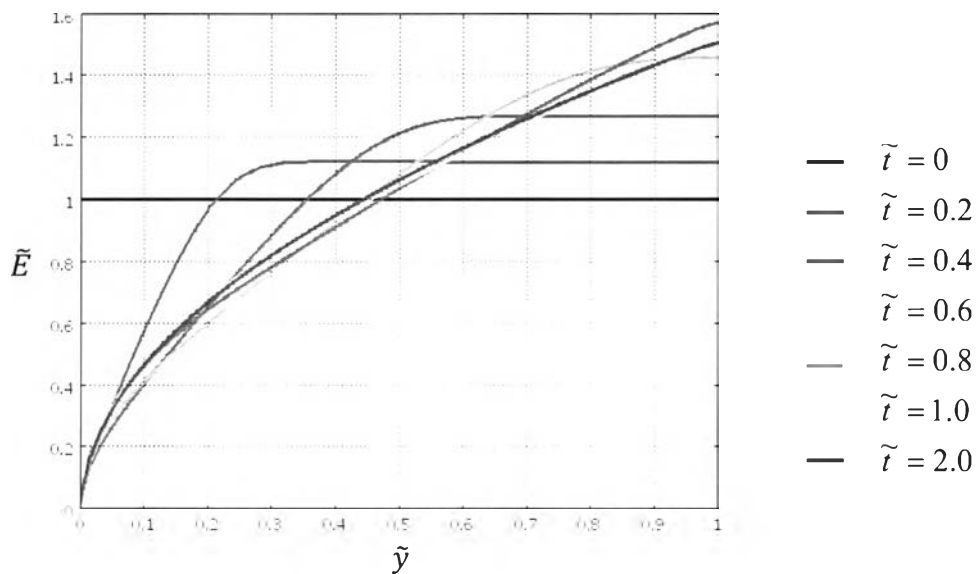
เพื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีเชิงวิเคราะห์ในสภาวะ space charge limited[†] ค่าคงที่ A_s จะต้องมีค่ามาก เนื่องจากตามทฤษฎีการที่สนามไฟฟ้าที่อิเล็กโทรดที่ $y = 0$ จะมีค่าเป็นศูนย์ได้นั้นจำนวนอนุภาคประจุบวกที่บริเวณดังกล่าวจะต้องมีค่าสูงมาก โดยเราจะเลือกใช้ค่า A_s เท่ากับ 100

ค.3.2 ค่าเริ่มต้น

กำหนดให้ค่าความหนาแน่นของอนุภาคประจุบวกก่อนทำการป้อนแรงดันมีค่าเท่ากับศูนย์ และเนื่องจากทำการป้อนแรงดันรูปขั้นให้แก่อิเล็กโทรด ดังนั้นค่าแรงดันเริ่มต้นจึงมีค่าเท่ากับศูนย์

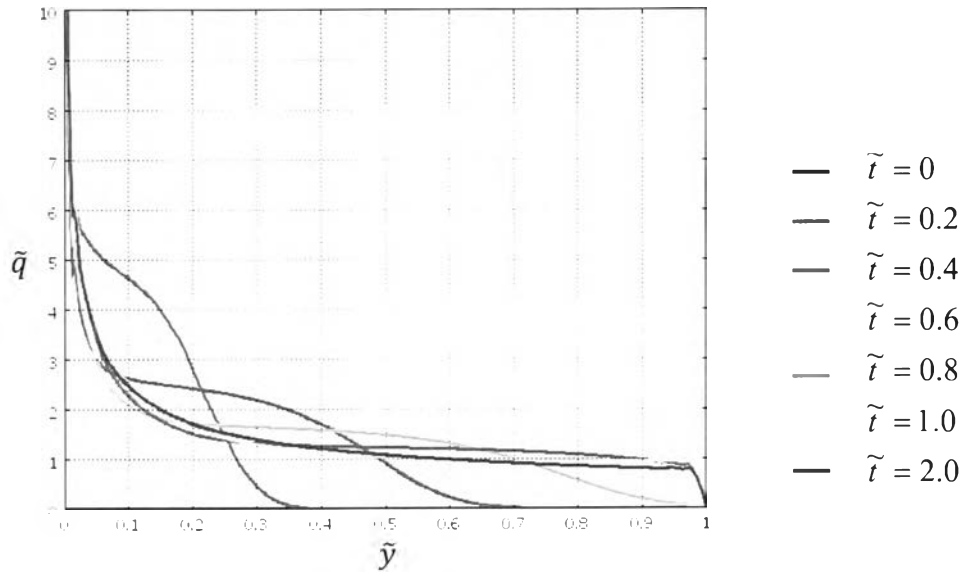
ค.4 ผลการคำนวณ

ผลการคำนวณสนามไฟฟ้าและการกระจายตัวของอนุภาคประจุบวกเนื่องจากการป้อนแรงดันรูปขั้นได้แสดงไว้ในรูปที่ ค.2 และรูปที่ ค.3



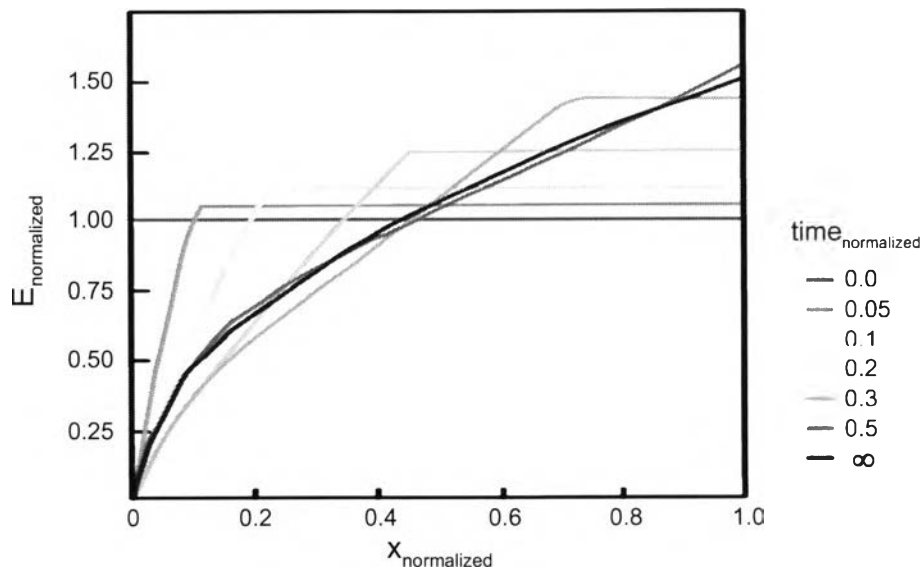
รูปที่ ค.2 ผลการคำนวณการกระจายตัวของอนุภาคประจุบวก

[†] space charge limited คือสภาวะของอิเล็กโทรดที่ทำหน้าที่ปล่อยอิเล็กตรอนมีขนาดสนามไฟฟ้าเท่ากับศูนย์

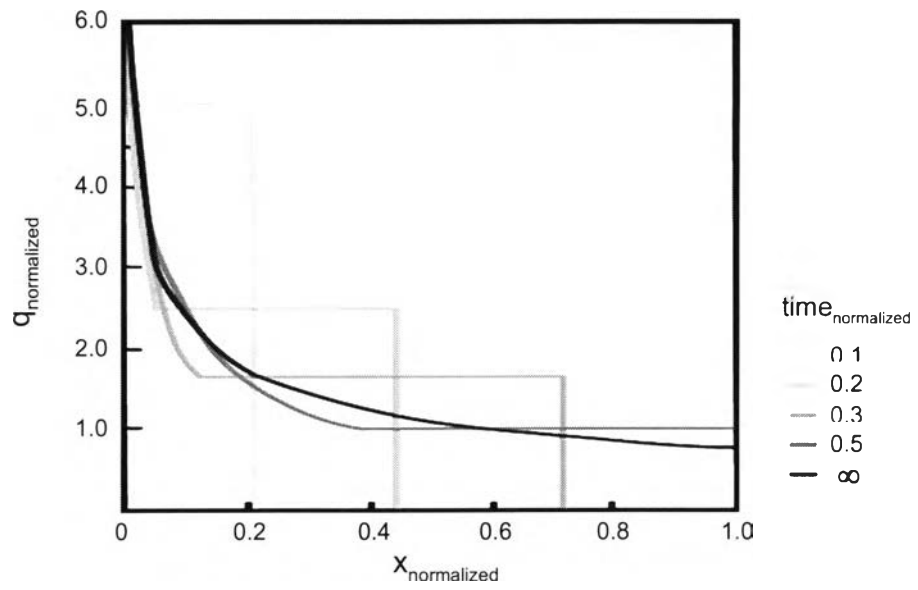


รูปที่ ค.3 ผลการคำนวณการกระจายตัวของสนามไฟฟ้า

จากรูปที่ ค.2 และรูปที่ ค.3 จะเห็นว่าผลการคำนวณที่ได้มีความใกล้เคียงกับผลการคำนวณด้วยวิธีเชิงวิเคราะห์ [8] ดังแสดงในรูปที่ ค.4 และรูปที่ ค.5 ทำให้สรุปได้ว่าโปรแกรม COMSOL Multiphysics มีความสามารถเพียงพอในการแก้ปัญหาในระบบสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่ใช้ในการอธิบายลักษณะการกระจายตัวของอนุภาคที่มีประจุและการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของสนามไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโตรดได้



รูปที่ ค.4 การกระจายตัวของอนุภาคประจุบวกที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีเชิงวิเคราะห์



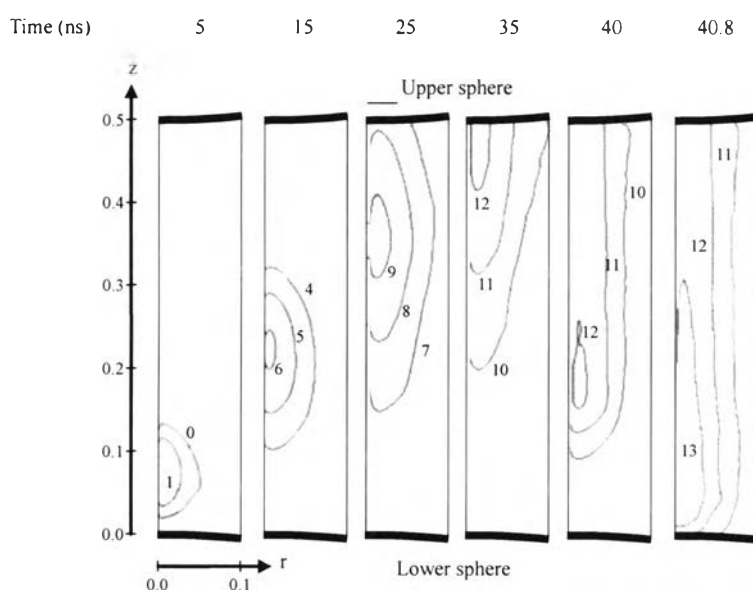
รูปที่ ค.5 การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีเชิงวิเคราะห์

ภาคผนวก ง

ผลการคำนวณจากแบบจำลองเชิงตัวเลข
และผลการทดลองวัดค่ากระแสเบรกดาวน

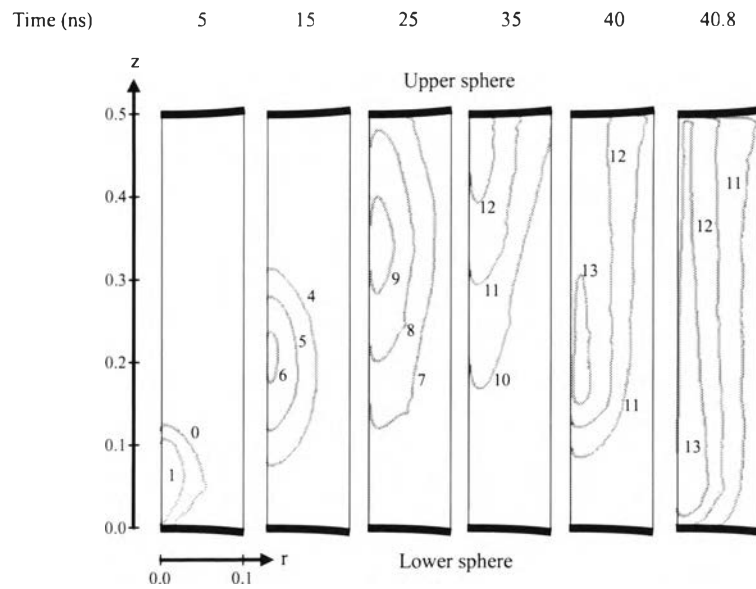
ง.1 ผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองเชิงตัวเลข

ผลการคำนวณการกระจายความหนาแน่นของอิเล็กตรอน ไอออนบวกและไอออนลบ การเปลี่ยนแปลงขนาดของสนามไฟฟ้า และกระแสดีสชาร์จที่ไหลระหว่างแก๊พทรงกลมที่เวลาต่าง ๆ ที่ได้จากกรณีต่าง ๆ ดังที่แสดงในตารางที่ 3.2 ได้แสดงไว้ในรูปที่ ง.1 ถึงรูปที่ ง.7

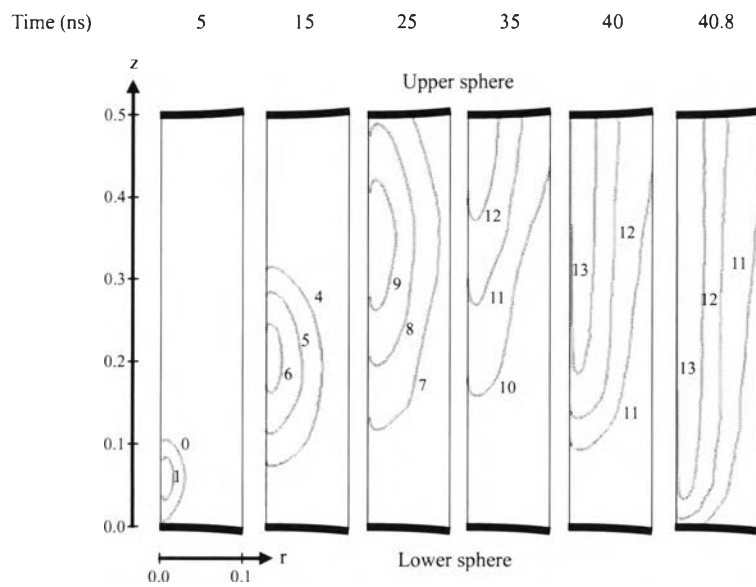


ก) เส้นชั้นความสูงความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

รูปที่ ง.1 ผลการคำนวณในกรณีที่ 1



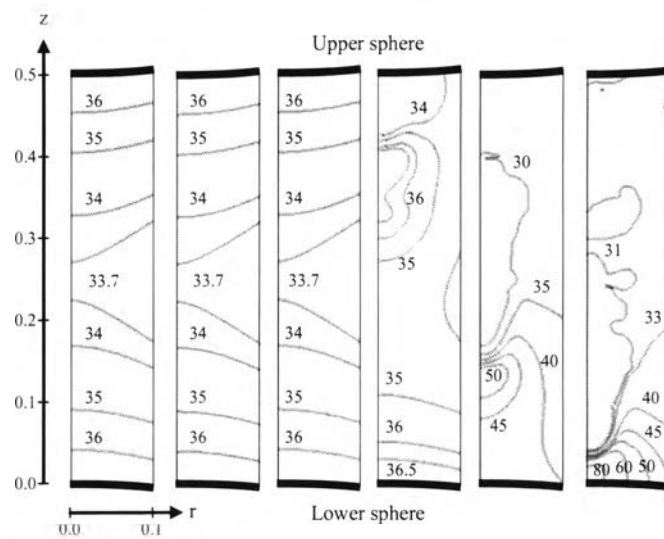
ข) เส้นชั้นความสูงความหนาแน่นของไอออนบวก



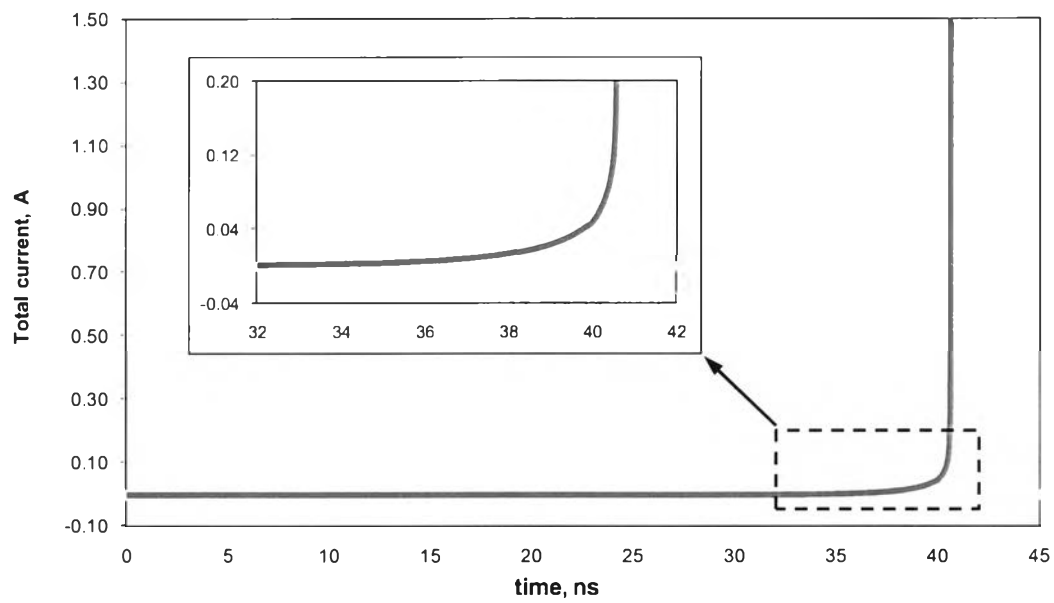
ค) เส้นชั้นความสูงความหนาแน่นของไอออนลบ

รูปที่ ง.1 ผลการคำนวณในกรณีที่ 1 (ต่อ)

Time (ns) 5 15 25 35 40 40.8

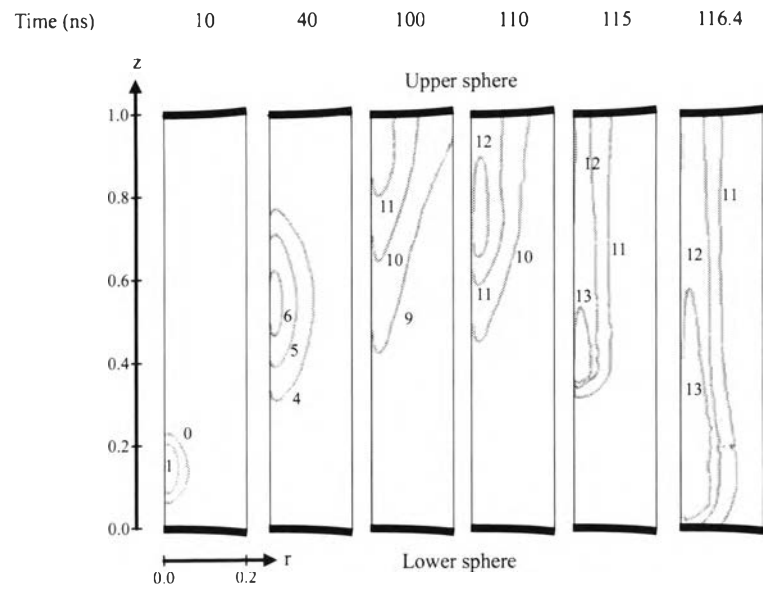


ง) เส้นชั้นความสูงขนาดสนามไฟฟ้า

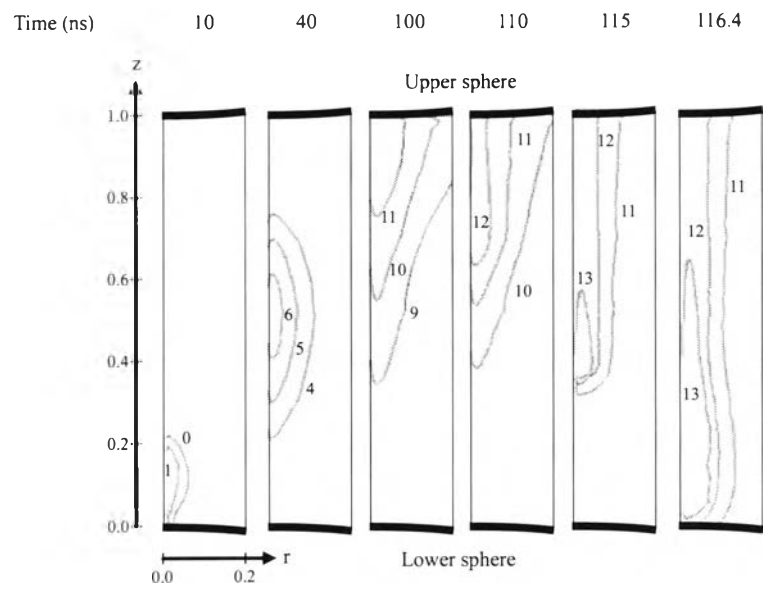


จ) กระแสดีสชาร์จที่ไหลระหว่างแกปทรงกลม

รูปที่ ง.1 ผลการคำนวณในกรณีนี้ที่ 1 (ต่อ)

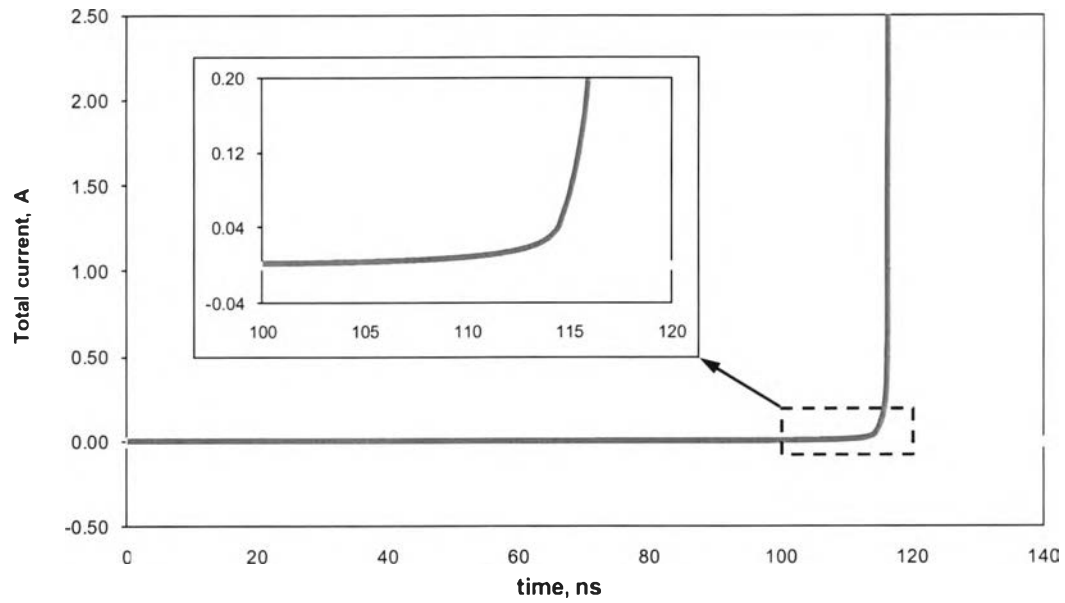


ก) เส้นชั้นความสูงความหนาแน่นของอิเล็กตรอน



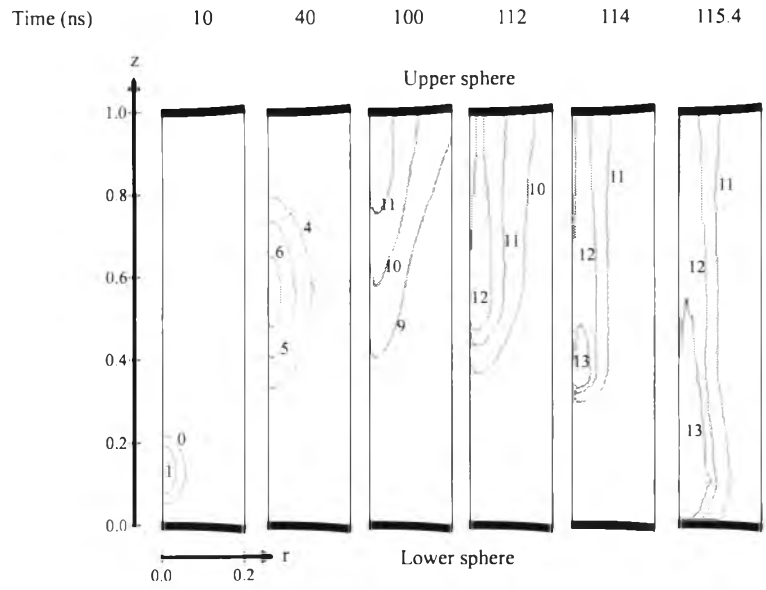
ข) เส้นชั้นความสูงความหนาแน่นของไอออนบวก

รูปที่ ๓.๒ ผลการคำนวณในกรณี ๒

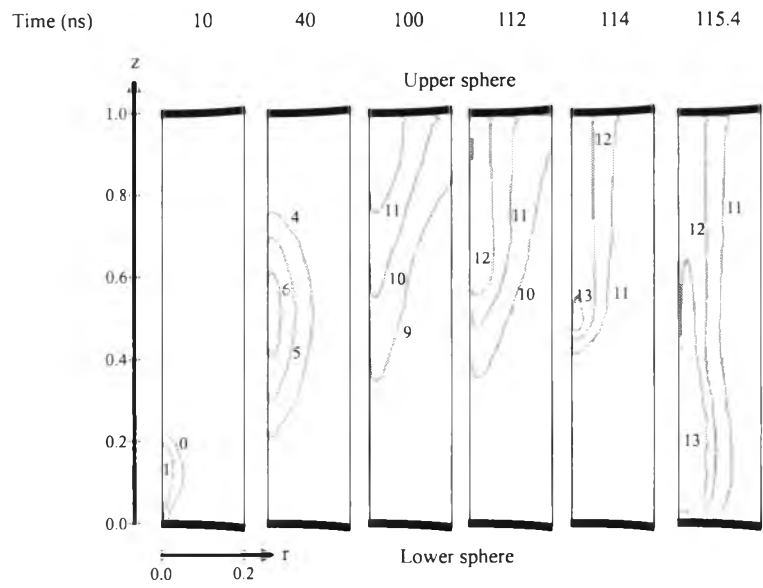


จ) กระแสดีสชาร์จที่ไหลระหว่างแกปทรงกลม

รูปที่ ง.2 ผลการคำนวณในกรณีนี้ 2 (ต่อ)

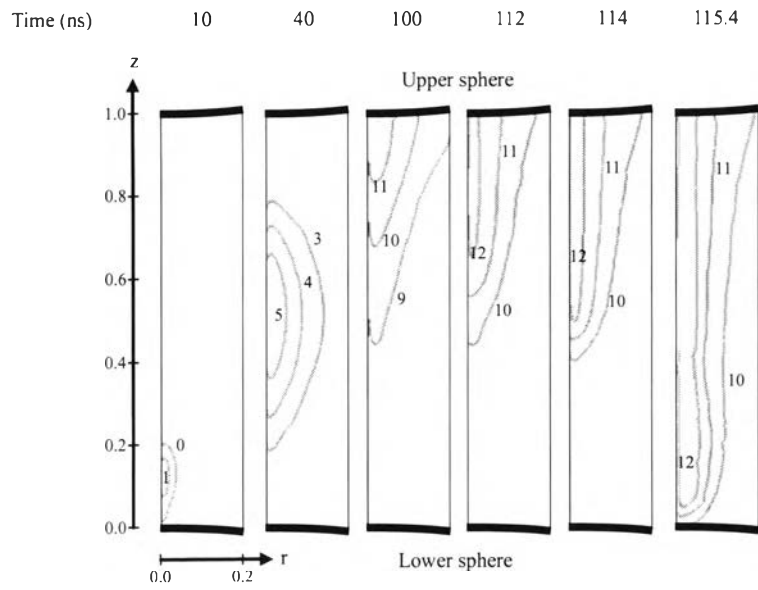


ก) เส้นชั้นความสูงความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

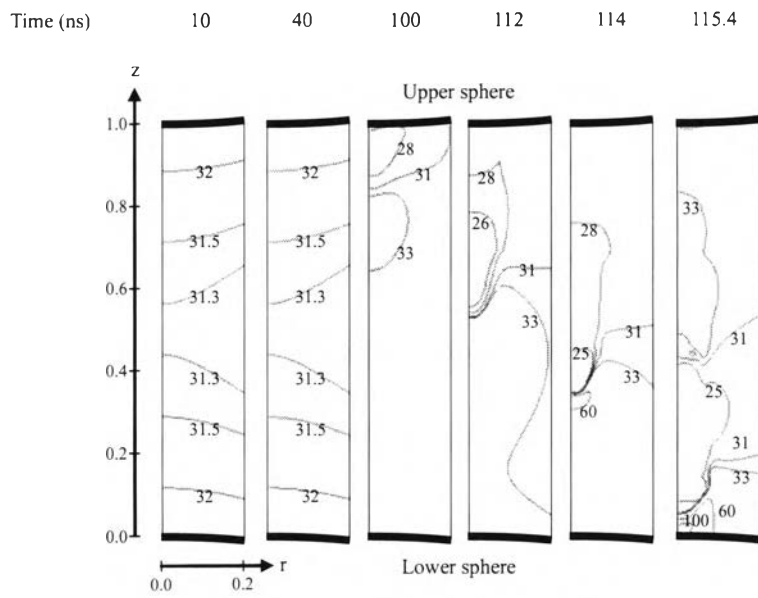


ข) เส้นชั้นความสูงความหนาแน่นของไอออนบวก

รูปที่ 3 ผลการคำนวณในกรณี 3

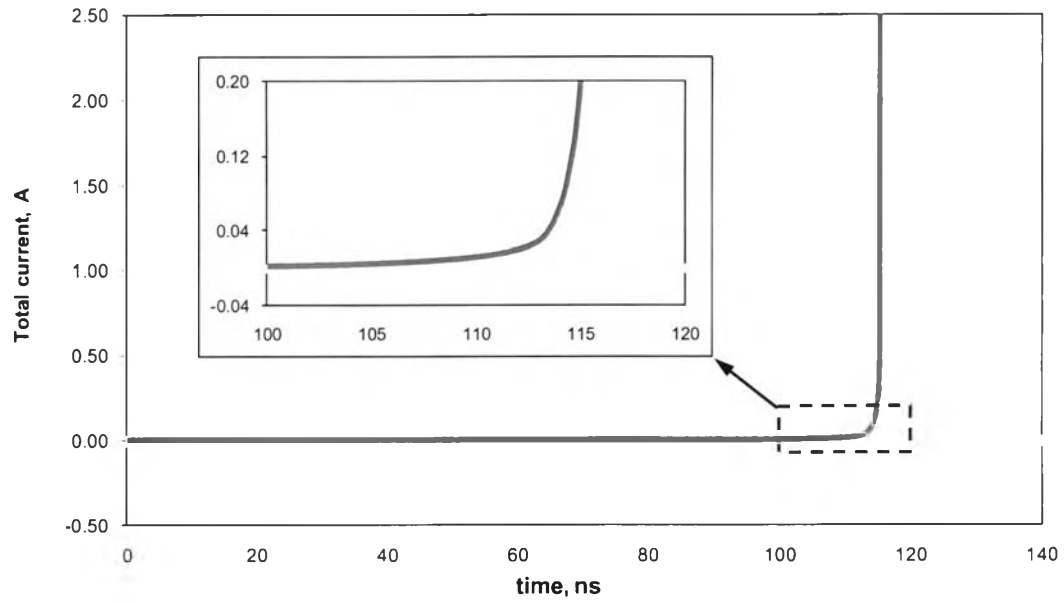


ค) เส้นชั้นความสูงความหนาแน่นของไอออนลบ



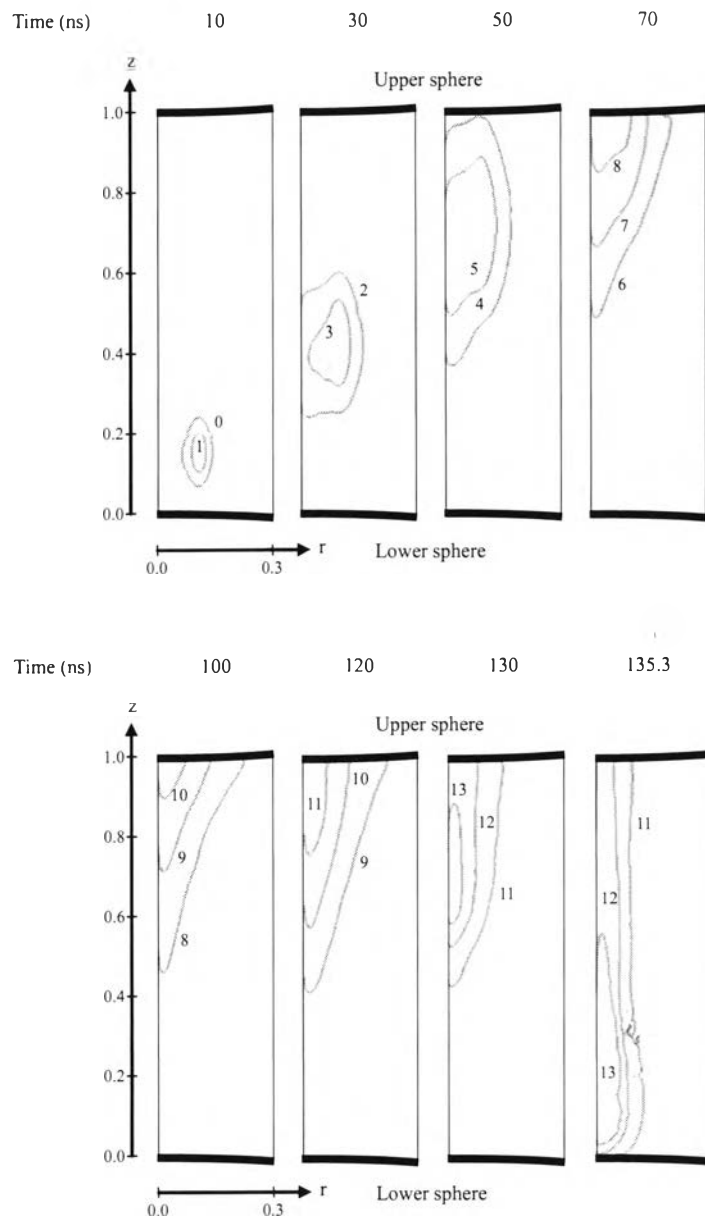
ง) เส้นชั้นความสูงขนาดสนามไฟฟ้า

รูปที่ ง.3 ผลการคำนวณในกรณีที 3 (ต่อ)



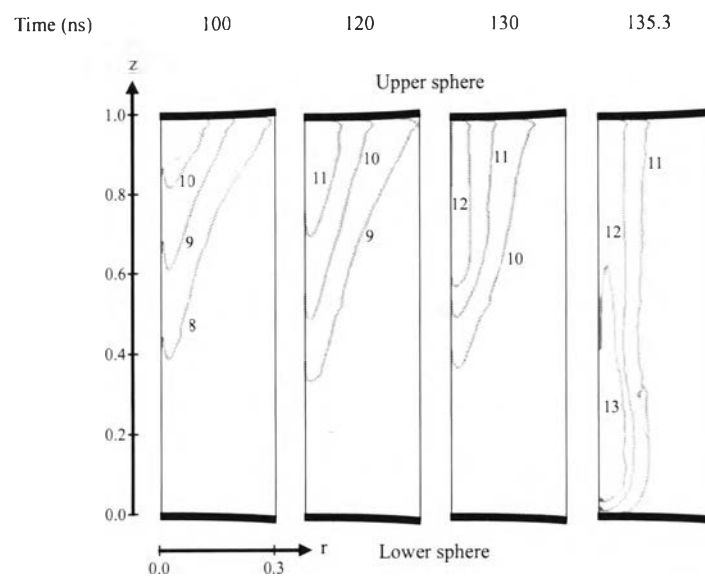
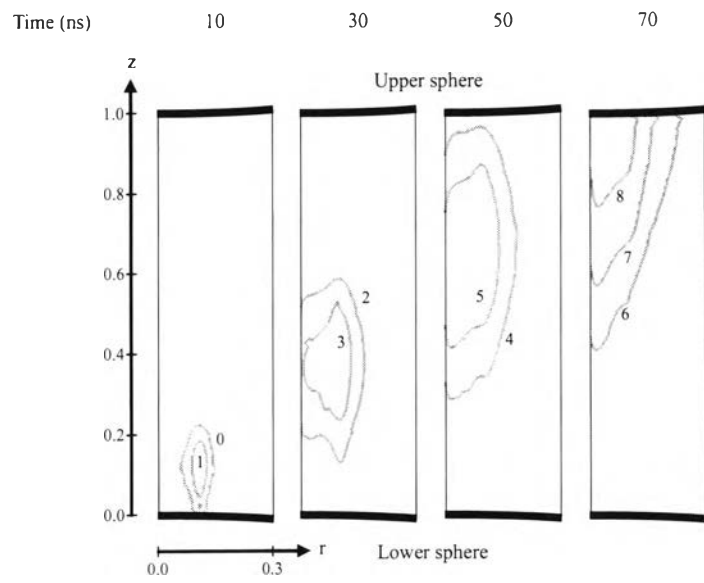
จ) กระแสดีสชาร์จที่ไหลระหว่างแกปทรงกลม

รูปที่ ง.3 ผลการคำนวณในกรณีนี้ที่ 3 (ต่อ)



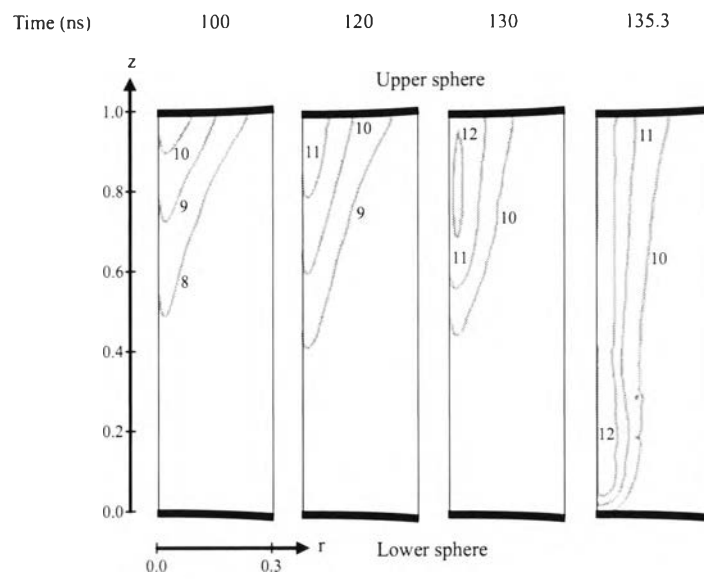
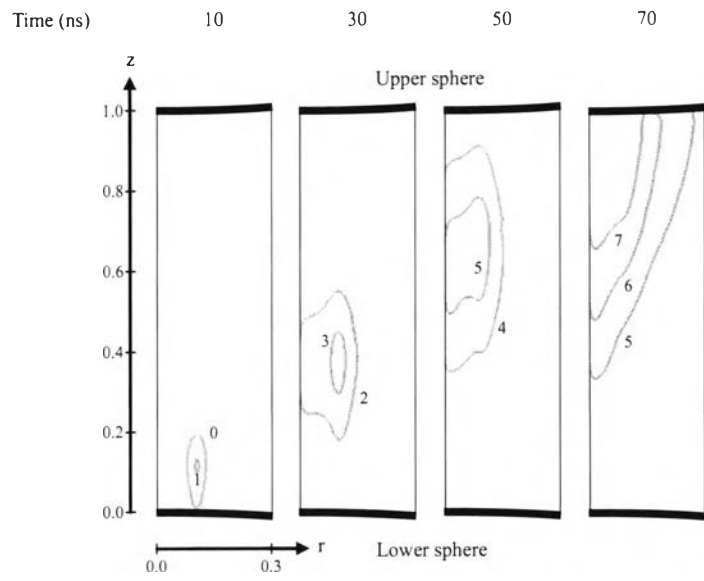
ก) เส้นชั้นความสูงความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

รูปที่ ง.4 ผลการคำนวณในกรณี 4



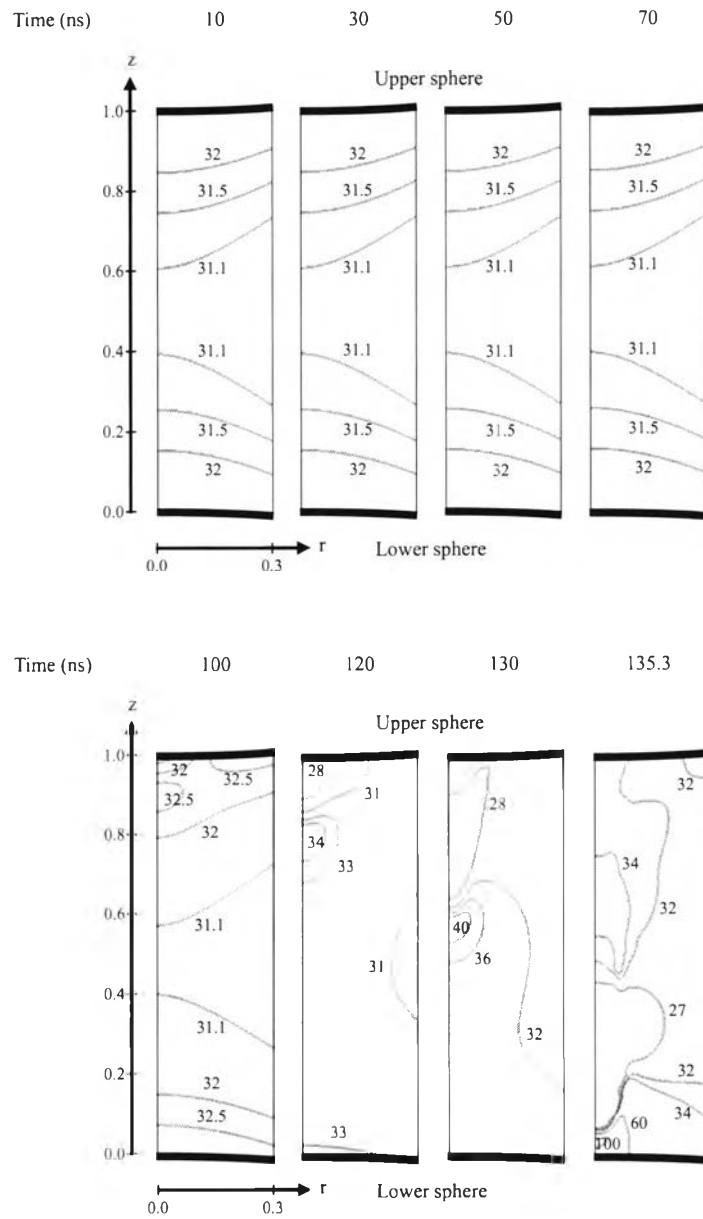
ข) เส้นชั้นความสูงความหนาแน่นของไอออนบวก

รูปที่ ๓.๔ ผลการคำนวณในกรณี ๔ (ต่อ)



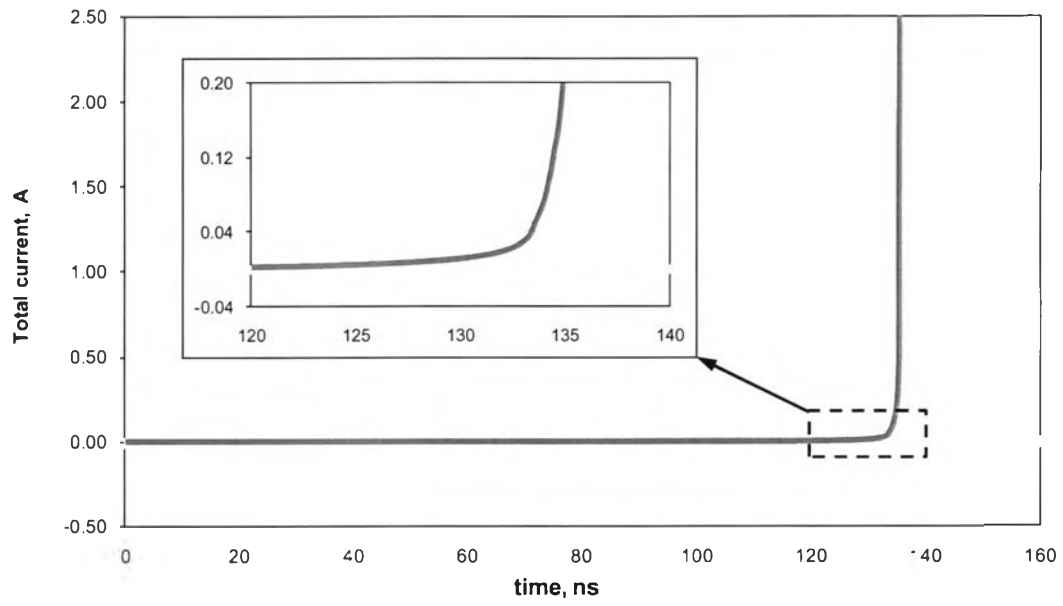
ค) เส้นชั้นความสูงความหนาแน่นของไอออนลบ

รูปที่ ๓.๔ ผลการคำนวณในกรณีนี้ที่ ๔ (ต่อ)



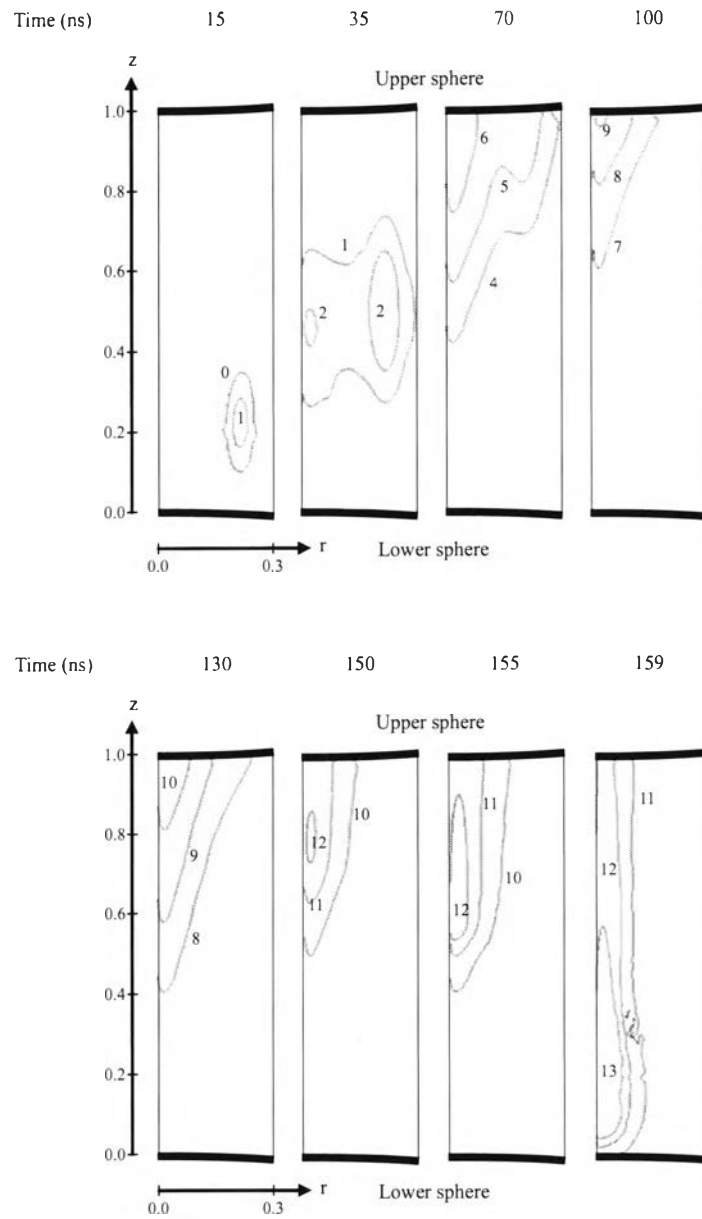
ง) เส้นชั้นความสูงขนาดสนามไฟฟ้า

รูปที่ ง.4 ผลการคำนวณในกรณี 4 (ต่อ)



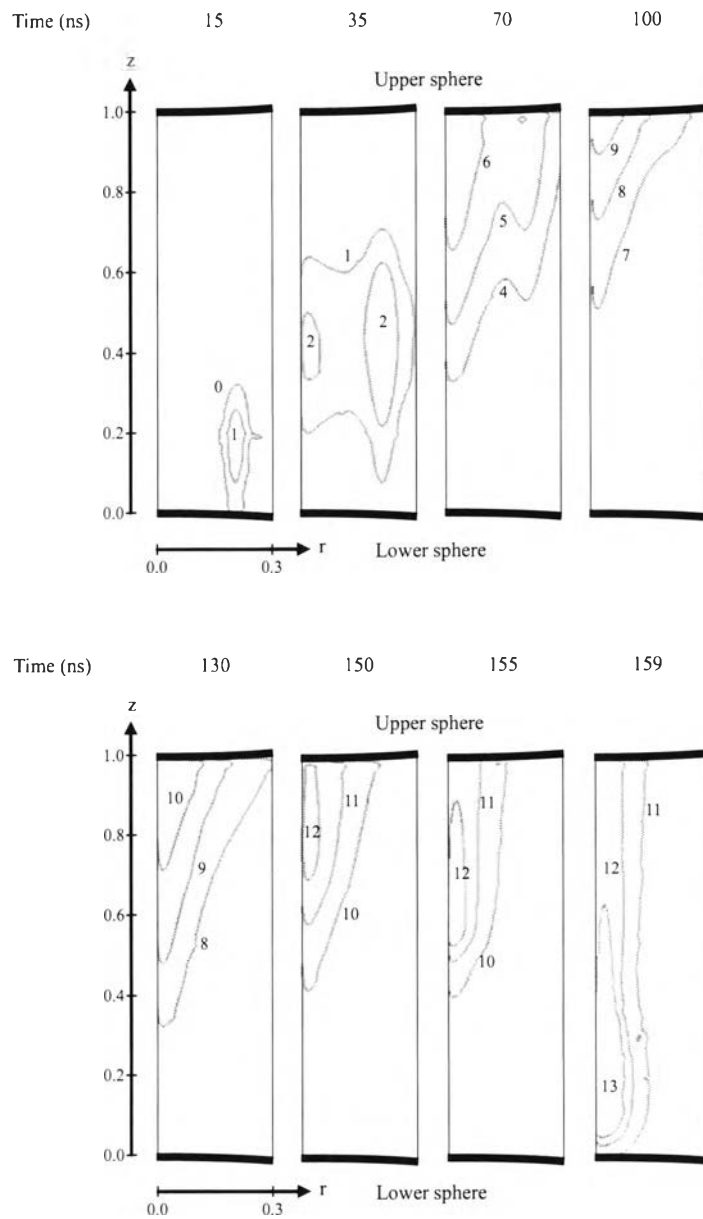
จ) กระแสดีสชาร์จที่ไหลระหว่างแกปทรงกลม

รูปที่ ง.4 ผลการคำนวณในกรณีนี้ 4 (ต่อ)



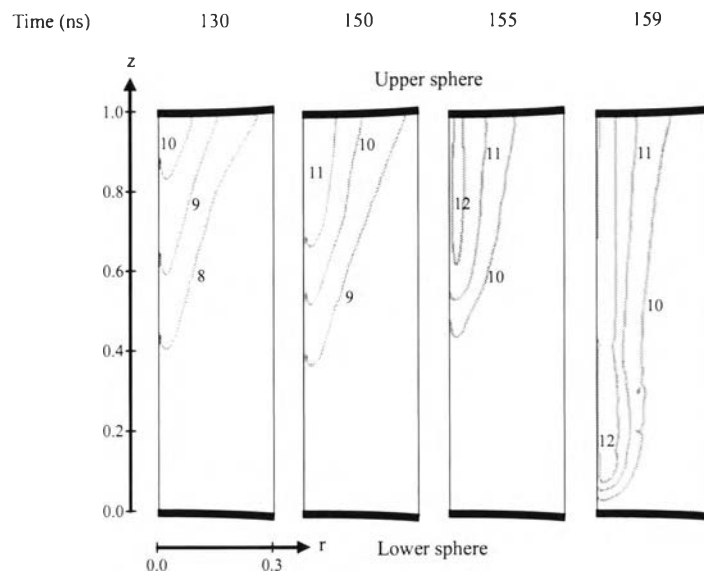
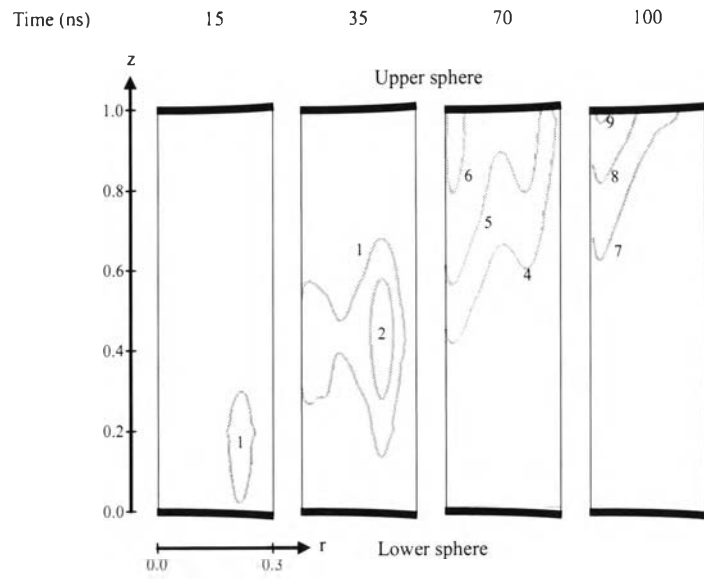
ก) เส้นชั้นความสูงความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

รูปที่ ง.5 ผลการคำนวณในกรณีที่ 5



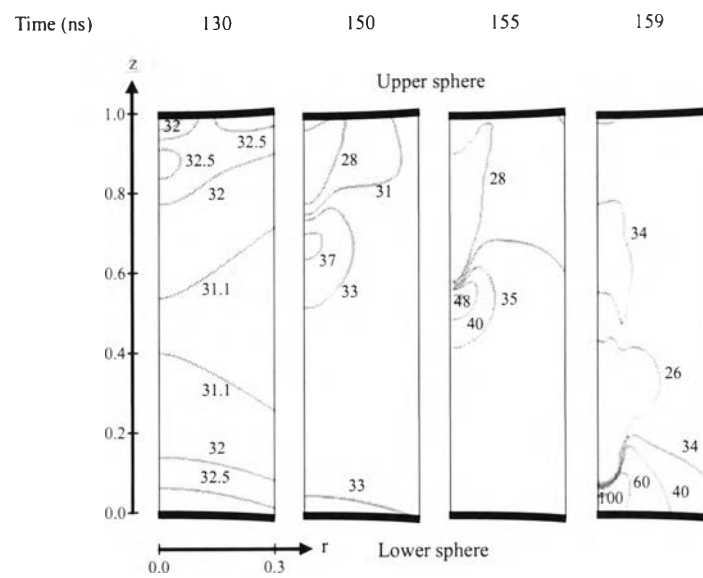
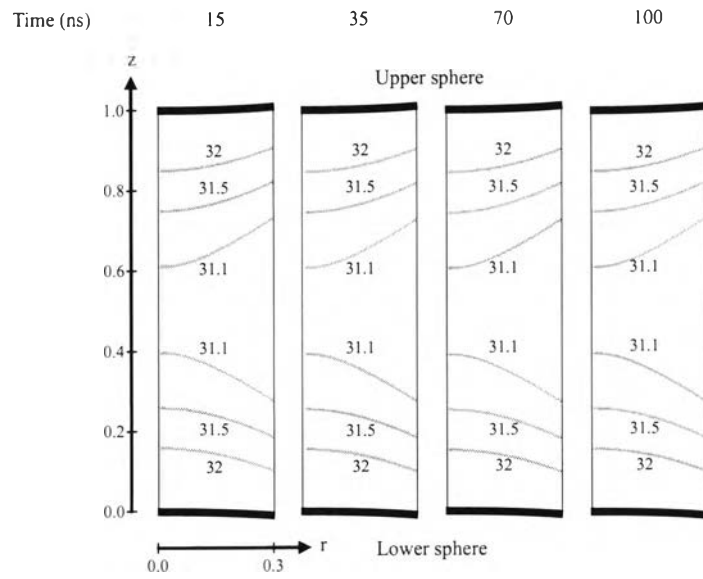
ข) เส้นชั้นความสูงความหนาแน่นของไอออนบวก

รูปที่ 3.5 ผลการคำนวณในกรณี 5 (ต่อ)



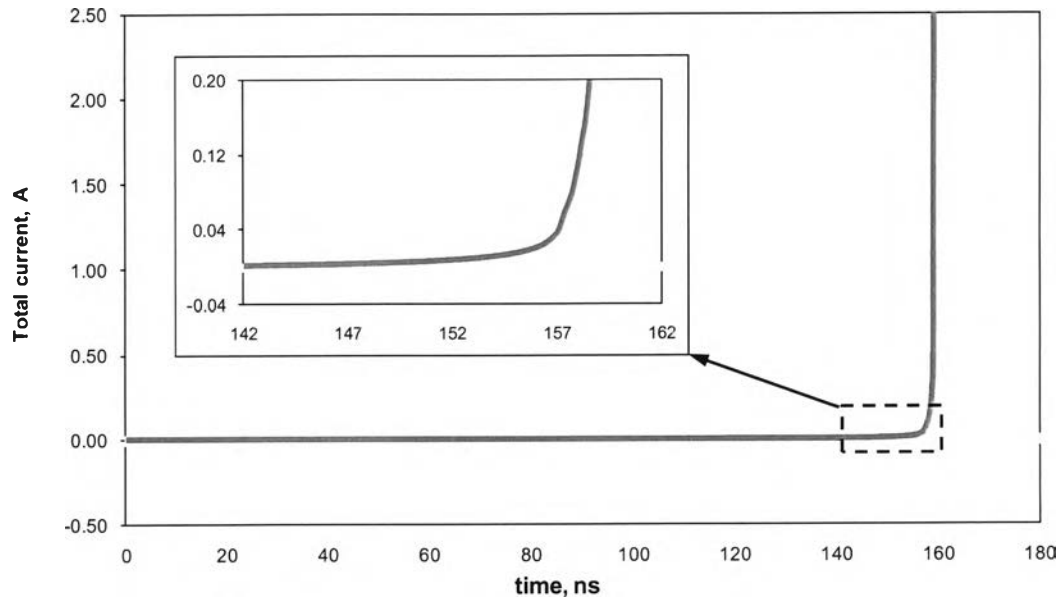
ค) เส้นชั้นความสูงความหนาแน่นของไอออนลบ

รูปที่ ๓.5 ผลการคำนวณในกรณี 5 (ต่อ)



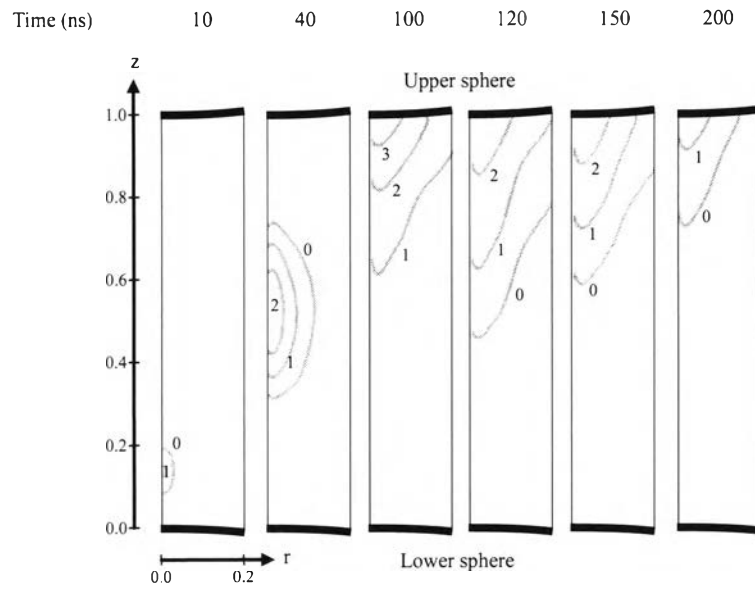
ง) เส้นชั้นความสูงขนาดสนามไฟฟ้า

รูปที่ ง.5 ผลการคำนวณในกรณี 5 (ต่อ)

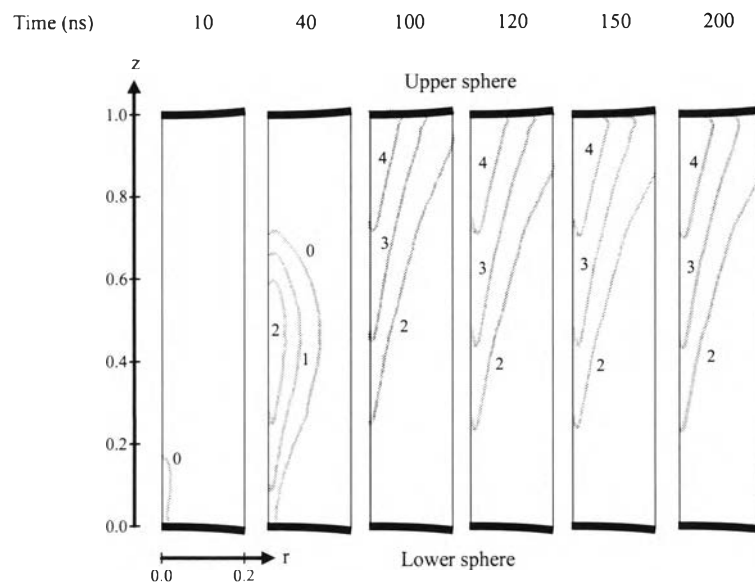


จ) กระแสดีสชาร์จที่ไหลระหว่างแกปทรงกลม

รูปที่ ง.5 ผลการคำนวณในกรณีนี้ 5 (ต่อ)

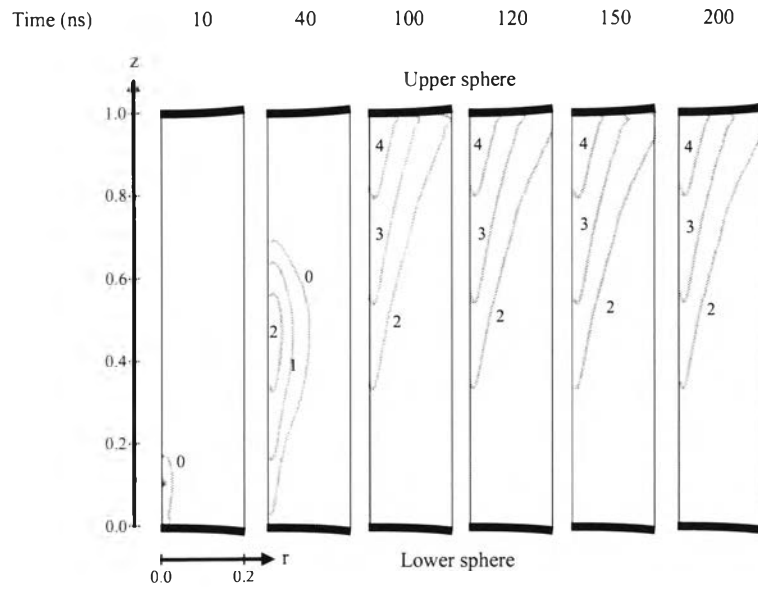


ก) เส้นชั้นความสูงความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

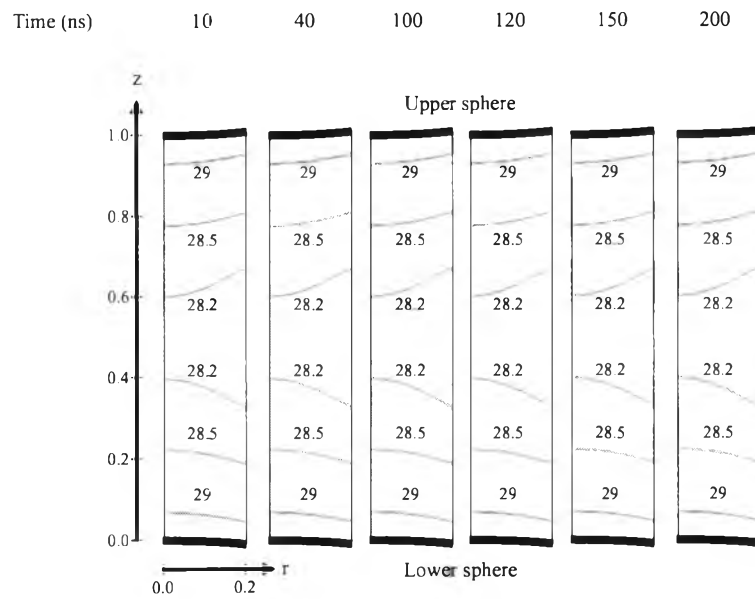


ข) เส้นชั้นความสูงความหนาแน่นของไอออนบวก

รูปที่ ๖.๖ ผลการคำนวณในกรณีที่ ๖

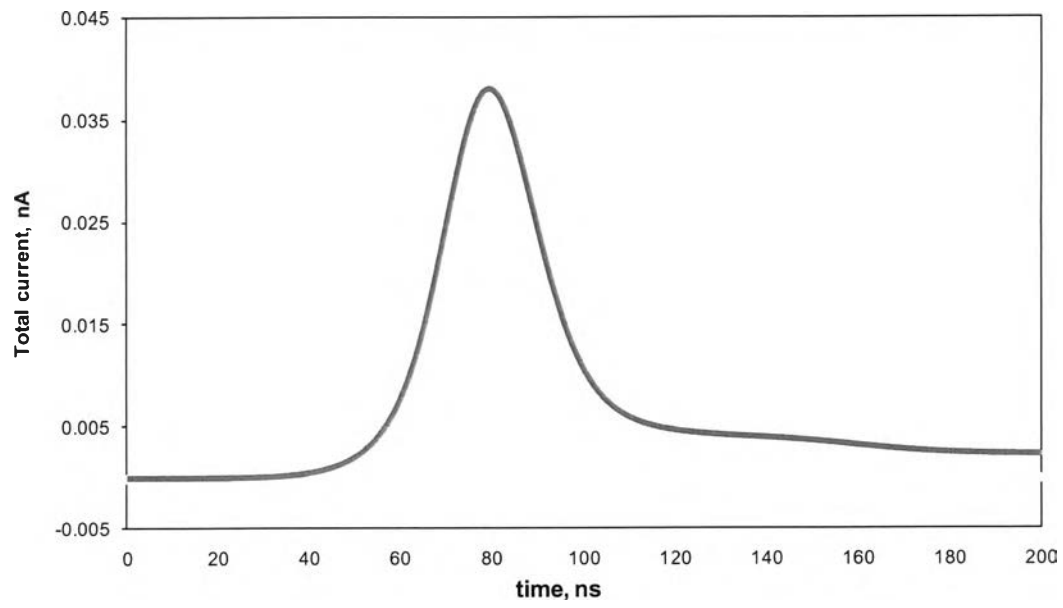


ค) เส้นชั้นความสูงความหนาแน่นของไอออนลบ



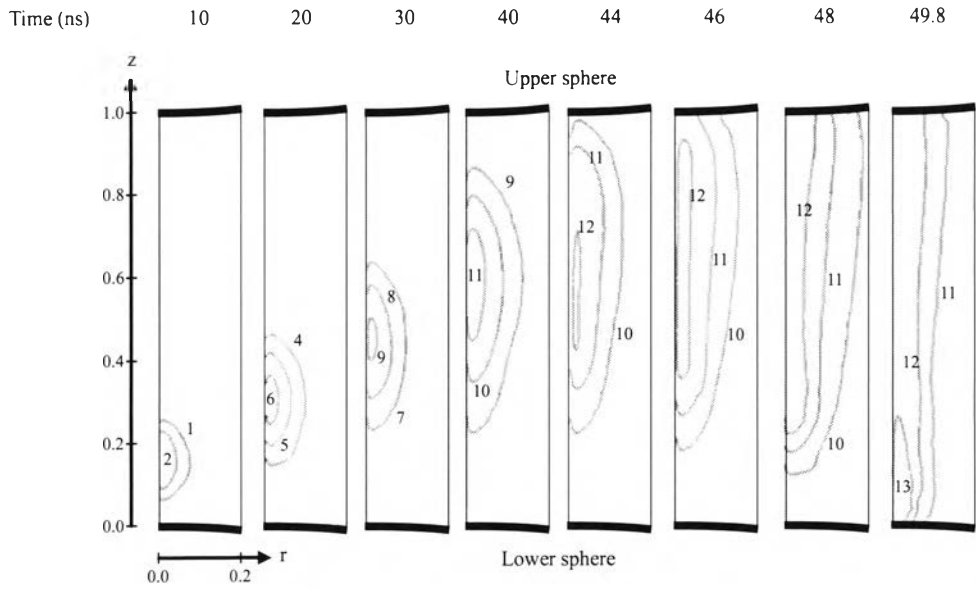
ง) เส้นชั้นความสูงขนาดสนามไฟฟ้า

รูปที่ ๖.6 ผลการคำนวณในกรณีที่ 6 (ต่อ)

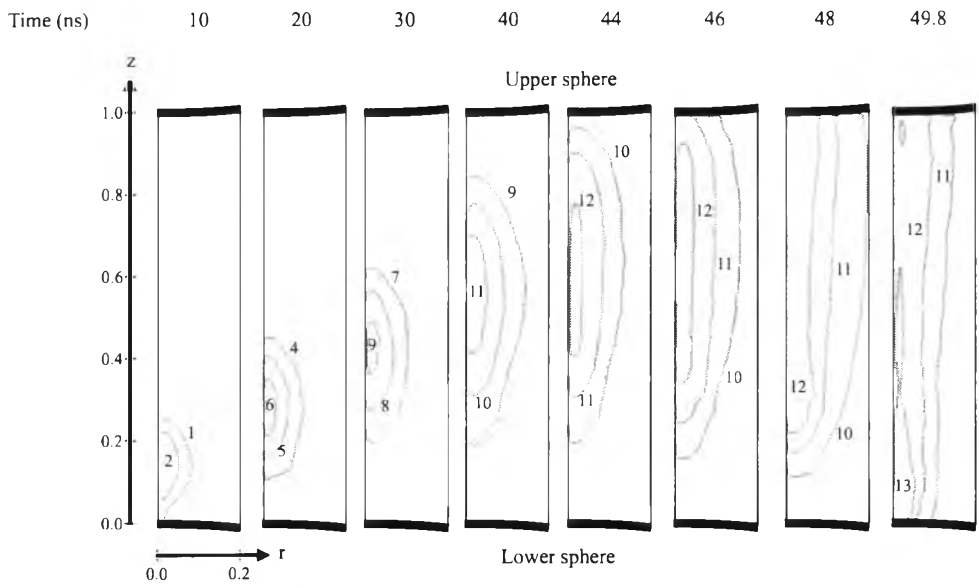


จ) กระแสดีสชาร์จที่ไหลระหว่างแกปทรงกลม

รูปที่ ง.6 ผลการคำนวณในกรณีนี้ 6 (ต่อ)

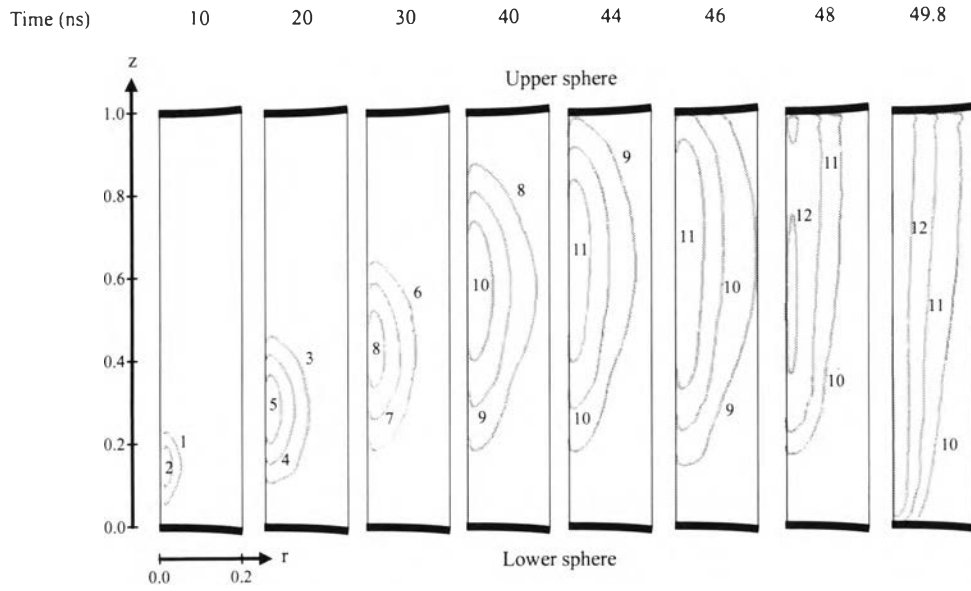


ก) เส้นชั้นความสูงความหนาแน่นของอิเล็กตรอน

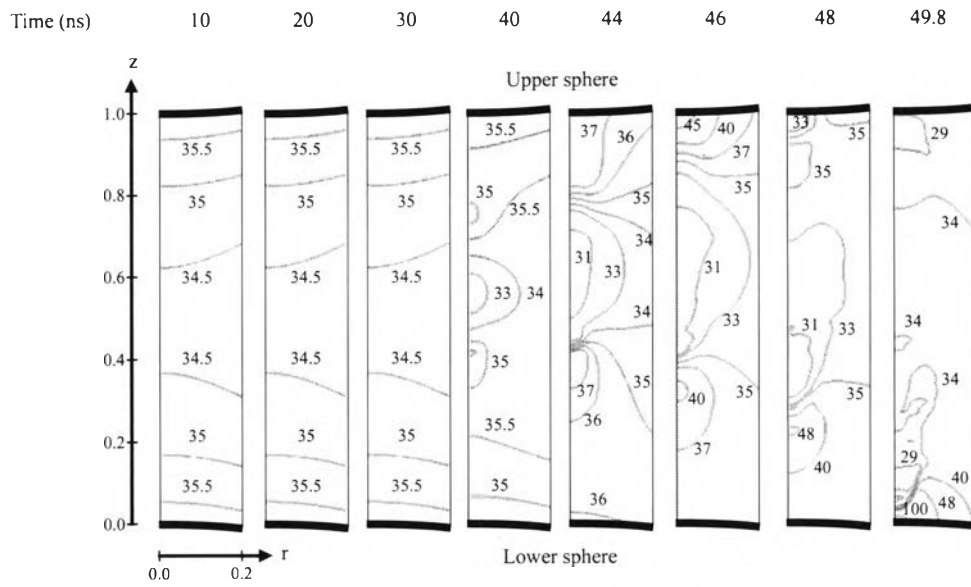


ข) เส้นชั้นความสูงความหนาแน่นของไอออนบวก

รูปที่ ๗.๗ ผลการคำนวณในกรณีนี้ที่ ๗

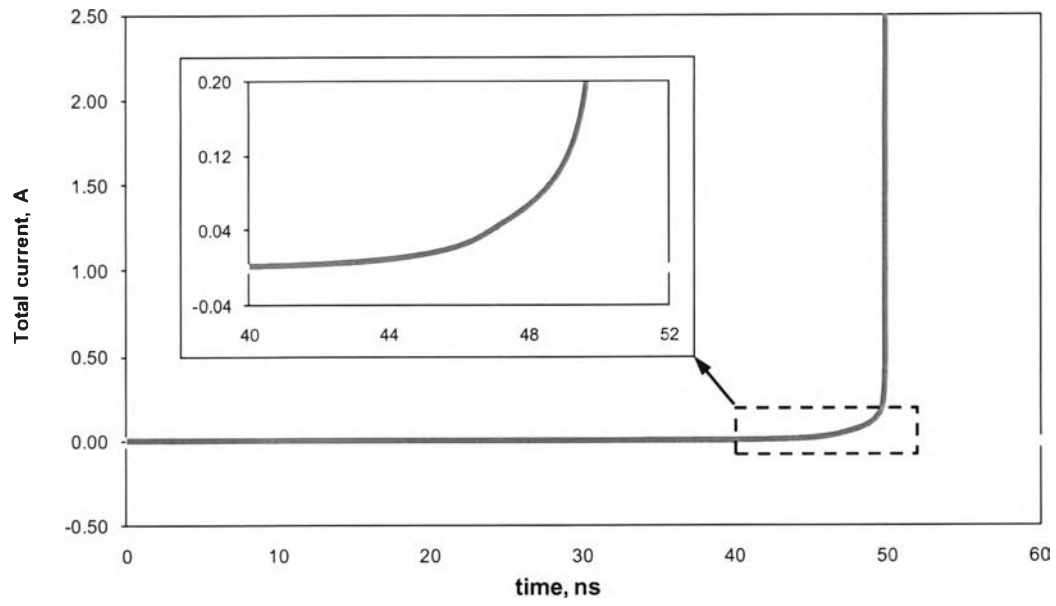


ค) เส้นชั้นความสูงความหนาแน่นของไอออนลบ



ง) เส้นชั้นความสูงขนาดสนามไฟฟ้า

รูปที่ 7.7 ผลการคำนวณในกรณีที่ 7 (ต่อ)

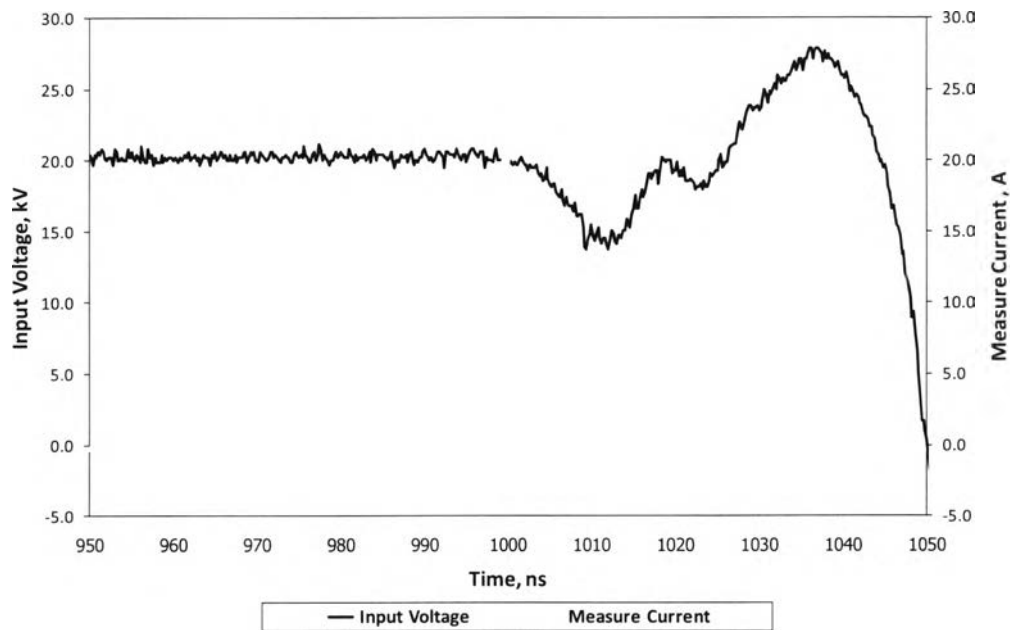


จ) กระแสดีสชาร์จที่ไหลระหว่างแกปทรงกลม

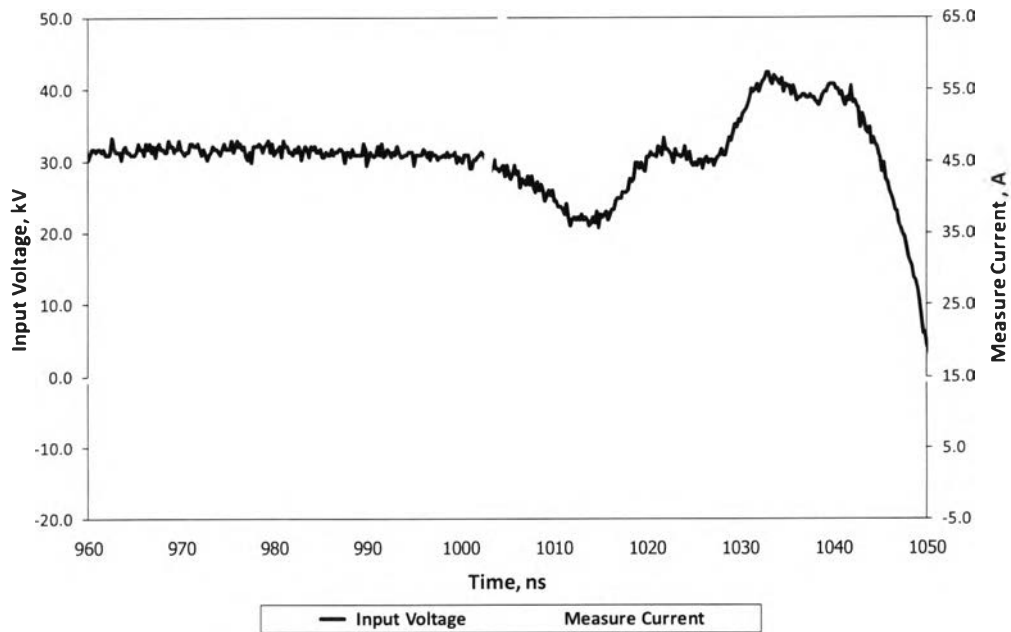
รูปที่ ง.7 ผลการคำนวณในกรณีที 7 (ต่อ)

ง.2 ผลการทดลองวัดค่ากระแสเบรกดาวน

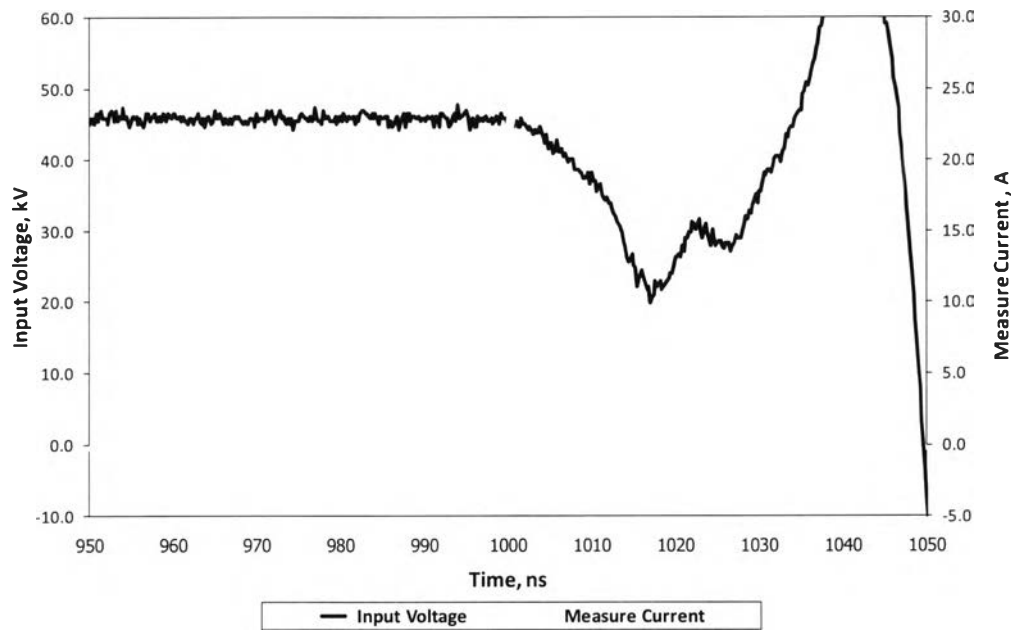
เนื่องจากการทดลองวัดค่ากระแสเบรกดาวนในแกปทรงกลมทั้ง 2 ขนาด ไม่ว่าจะเป็นที่สภาวะความดันบรรยากาศ หรือที่ค่าความชื้นสัมบูรณ์ต่าง ๆ จะมีการทำซ้ำหลายครั้ง ผลการทดลองที่ได้จึงมีจำนวนมากไม่สามารถนำมาแสดงทั้งหมดได้ กราฟต่าง ๆ ในหัวข้อนี้ จึงเป็นเพียงตัวอย่างบางส่วนของผลการวัดค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าในขณะเกิดการเบรกดาวน ที่แต่ละขนาดของแกปทรงกลมและความสัมพันธ์ ดังที่แสดงในรูปที่ ง.8 ถึงรูปที่ ง.20



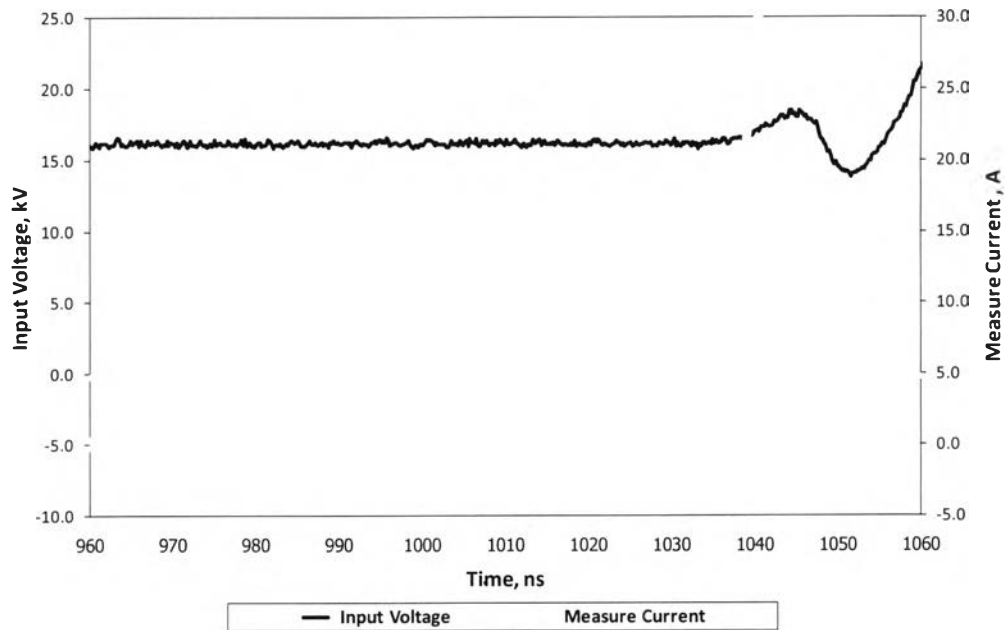
รูปที่ ง.8 ค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าในขณะเกิดการเบรกดาวน
ระหว่างแกปทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 cm ระยะแกป 0.6 cm



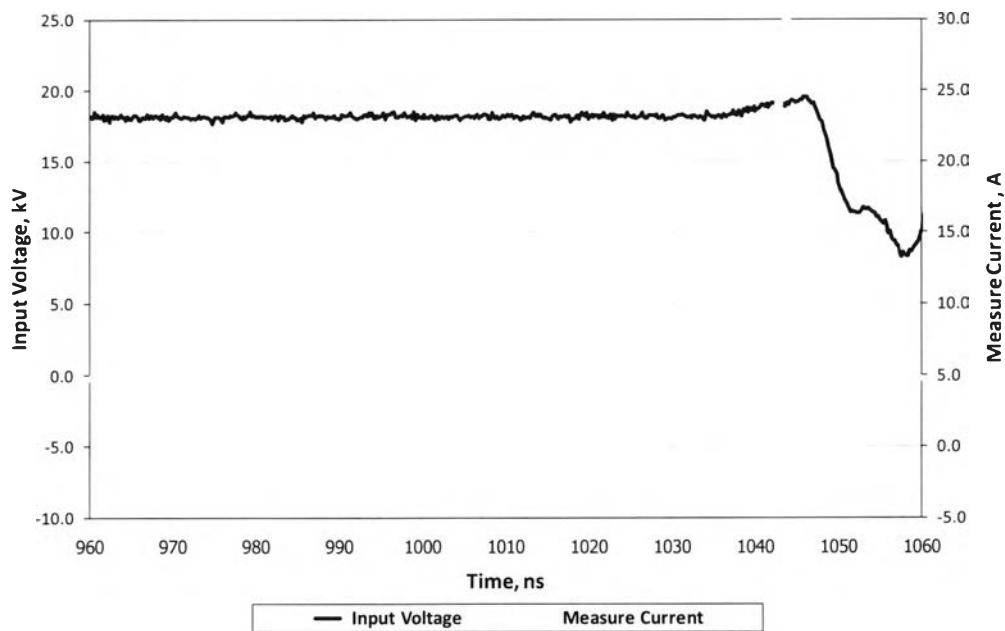
รูปที่ ง.9 ค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าในขณะเกิดการเบรกดาวน
ระหว่างแกปทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 cm ระยะแกป 1.0 cm



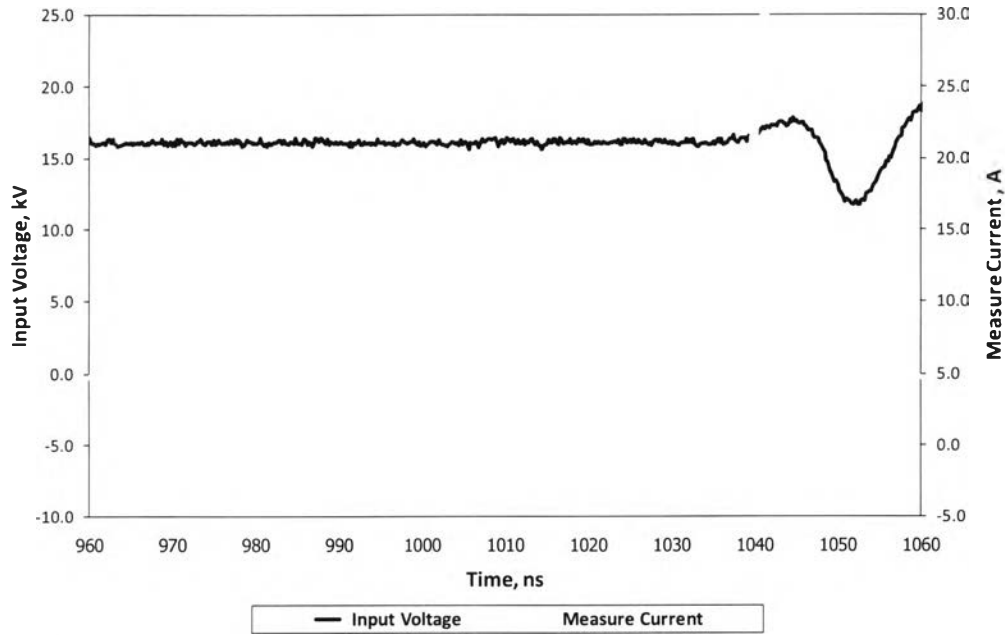
รูปที่ ง.10 ค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าในขณะเกิดการเบรกดาวน
ระหว่างแกปทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 cm ระยะแกป 1.5 cm



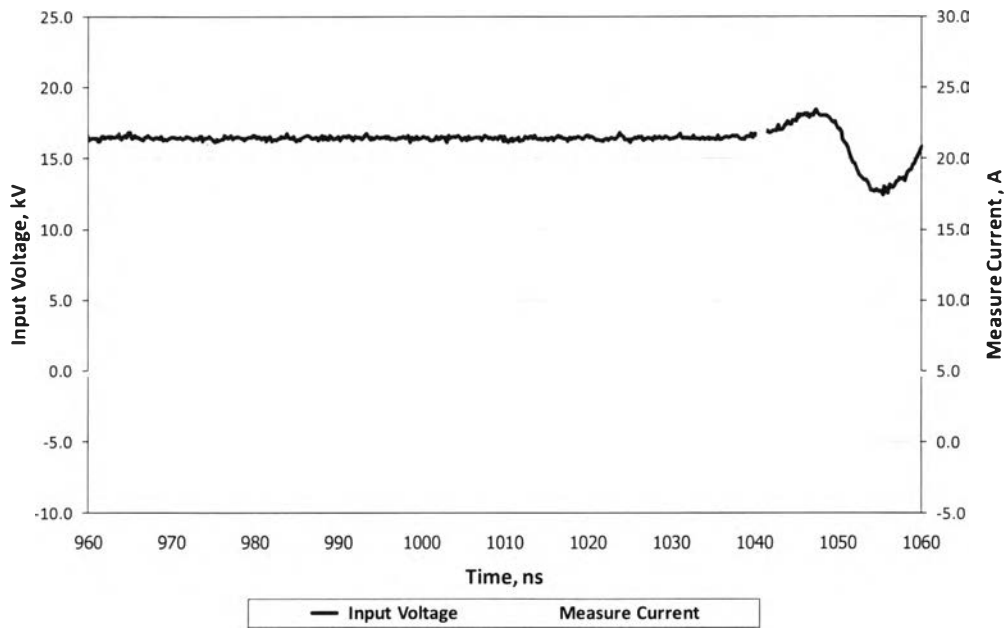
รูปที่ ง.11 ค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าในขณะเกิดการเบรกดาวน์ระหว่างแกปทรงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 cm ระยะแกป 0.5 cm ที่ความชื้นสัมบูรณ์ 2.07 g/m^3



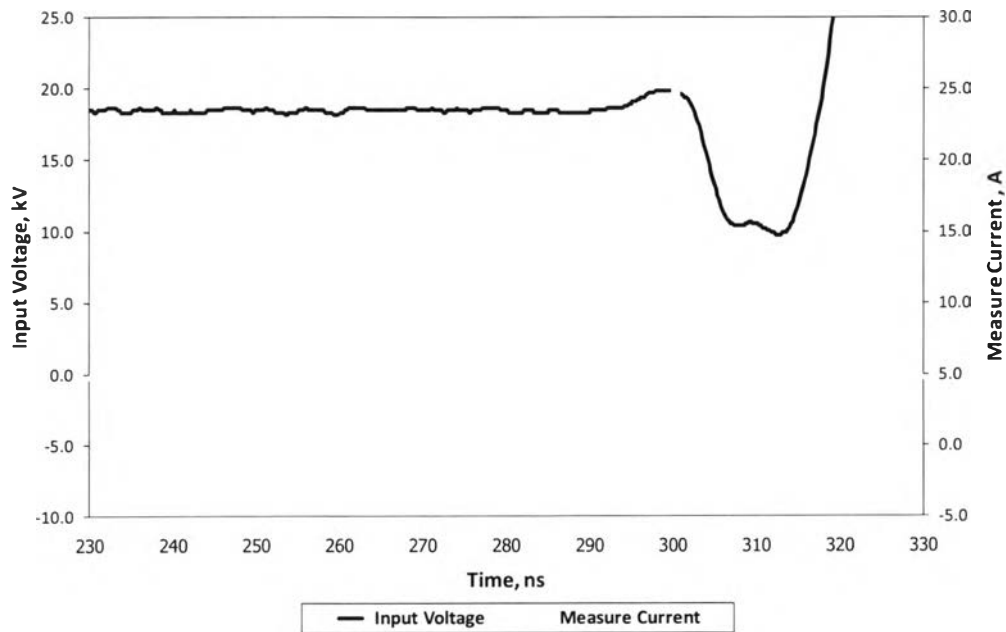
รูปที่ ง.12 ค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าในขณะเกิดการเบรกดาวน์ระหว่างแกปทรงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 cm ระยะแกป 0.5 cm ที่ความชื้นสัมบูรณ์ 9.22 g/m^3



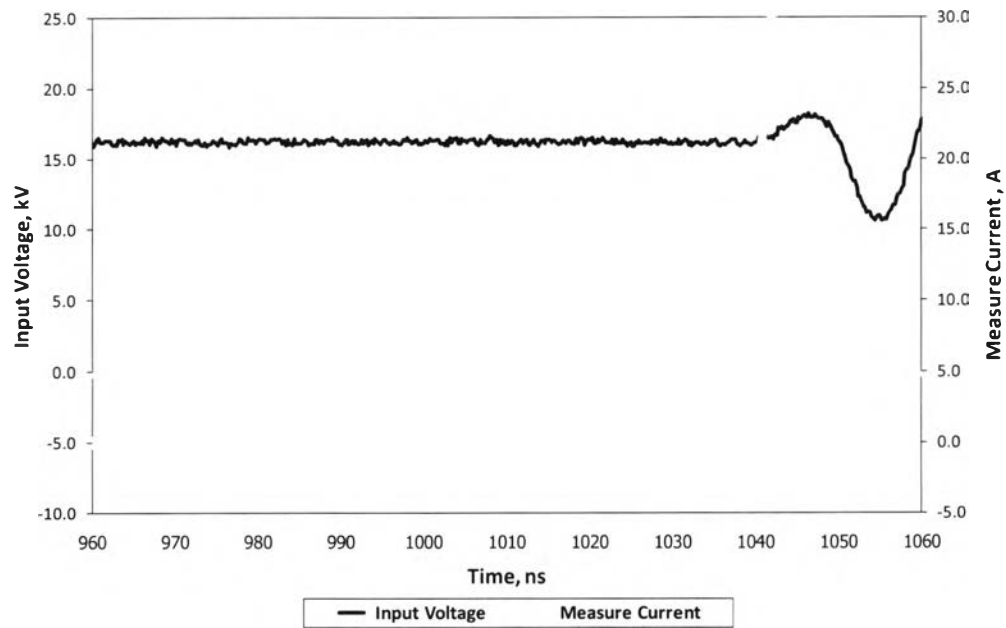
รูปที่ ง.13 ค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าในขณะที่เกิดการเบรกดาวนระหว่างแกปทรงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 cm ระยะแกป 0.5 cm ที่ความชื้นสัมบูรณ์ 9.82 g/m^3



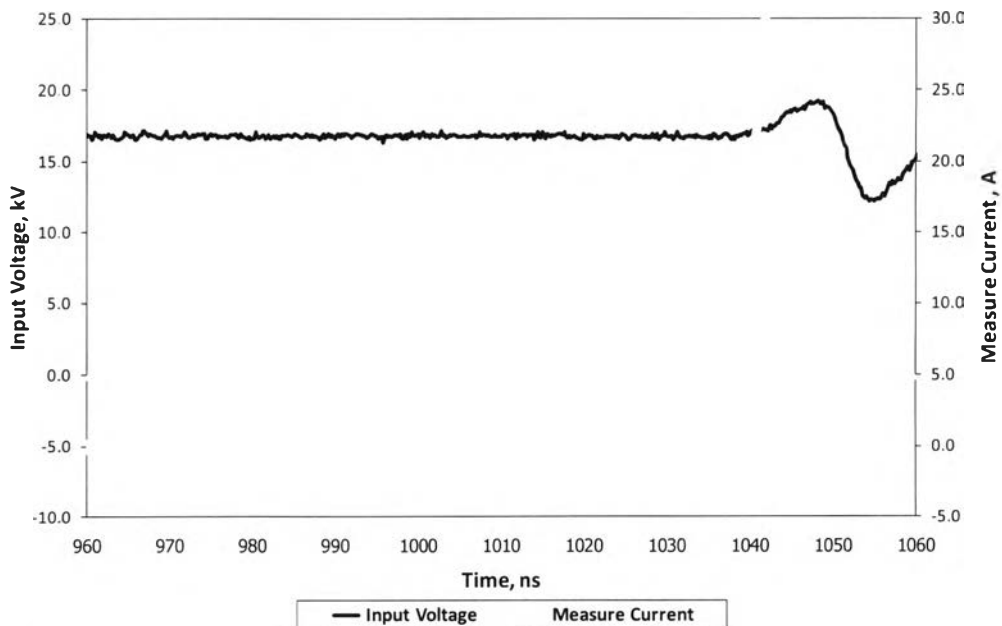
รูปที่ ง.14 ค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าในขณะที่เกิดการเบรกดาวนระหว่างแกปทรงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 cm ระยะแกป 0.5 cm ที่ความชื้นสัมบูรณ์ 10.01 g/m^3



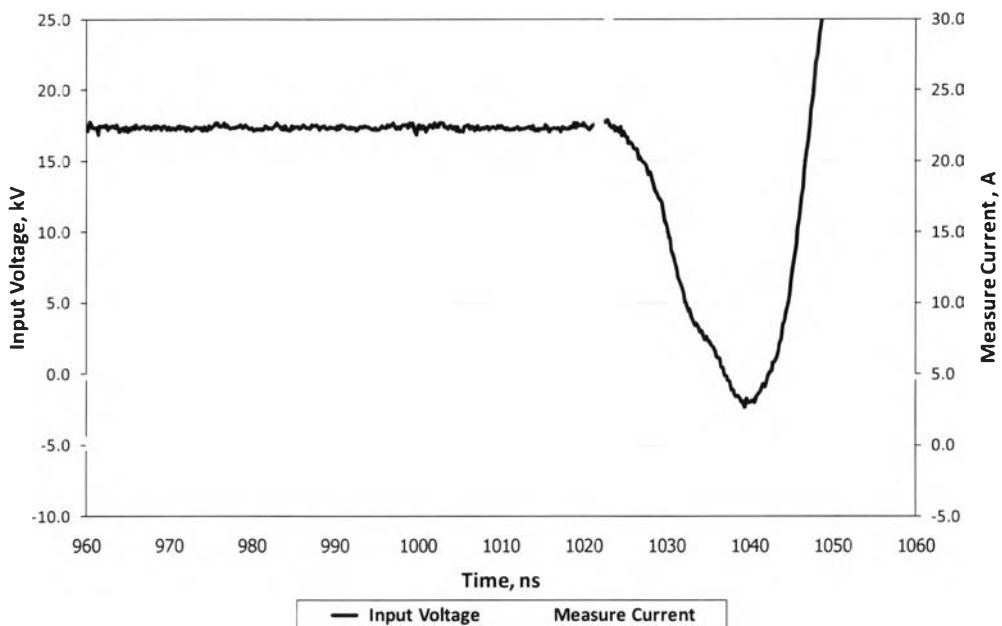
รูปที่ ง.15 ค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าในขณะเกิดการเบรกดาวนัระหว่างแกปทรงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 cm ระยะแกป 0.5 cm ที่ความชื้นสัมบูรณ์ 10.51 g/m³



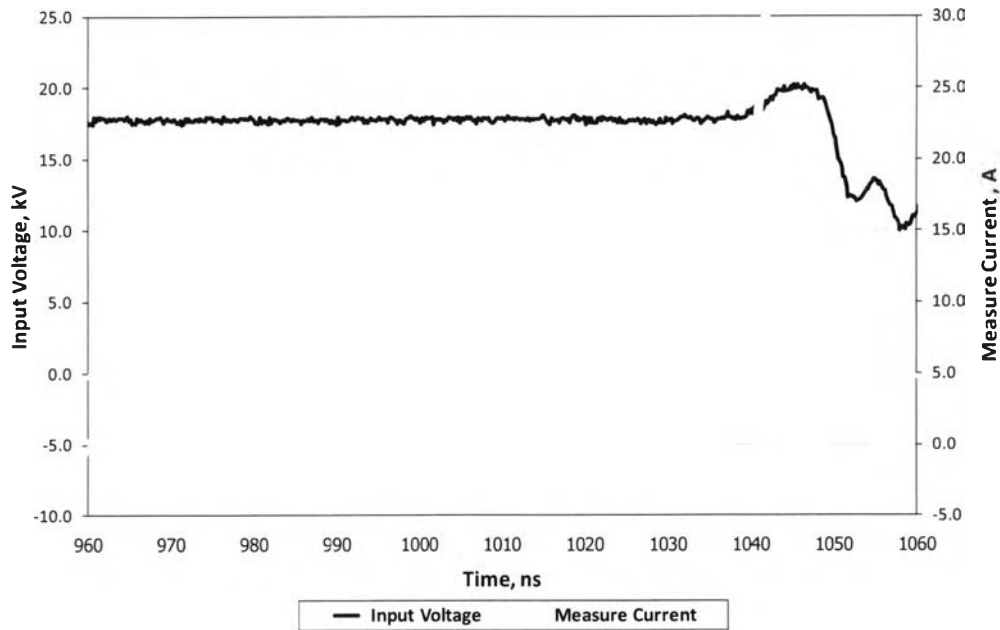
รูปที่ ง.16 ค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าในขณะเกิดการเบรกดาวนัระหว่างแกปทรงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 cm ระยะแกป 0.5 cm ที่ความชื้นสัมบูรณ์ 17.34 g/m³



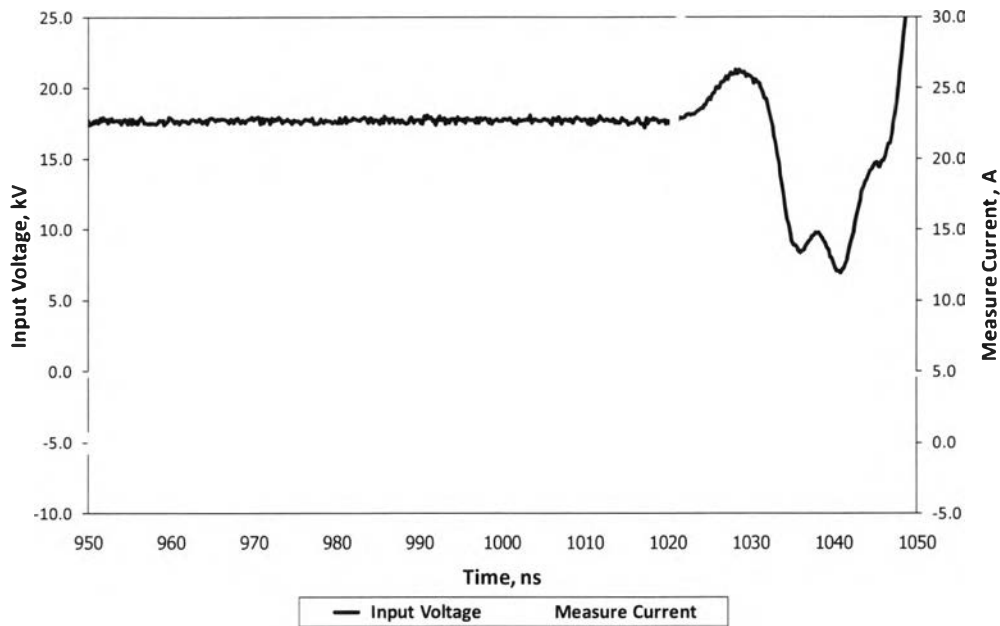
รูปที่ ๑.17 ค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าในขณะที่เกิดการเบรกดาวนระหว่างแกปทรงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 cm ระยะแกป 0.5 cm ที่ความชื้นสัมบูรณ์ 17.6 g/m³



รูปที่ ๑.18 ค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าในขณะที่เกิดการเบรกดาวนระหว่างแกปทรงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 cm ระยะแกป 0.5 cm ที่ความชื้นสัมบูรณ์ 18.31 g/m³



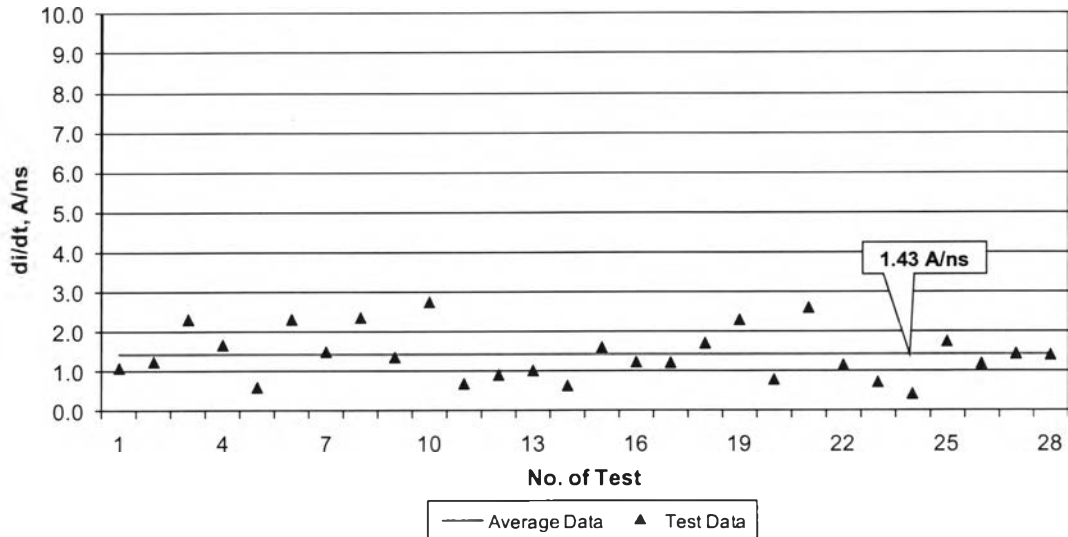
รูปที่ 19 ค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าในขณะเกิดการเบรกดาวนระหว่างแกปทรงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 cm ระยะแกป 0.5 cm ที่ความชื้นสัมบูรณ์ 19.15 g/m^3



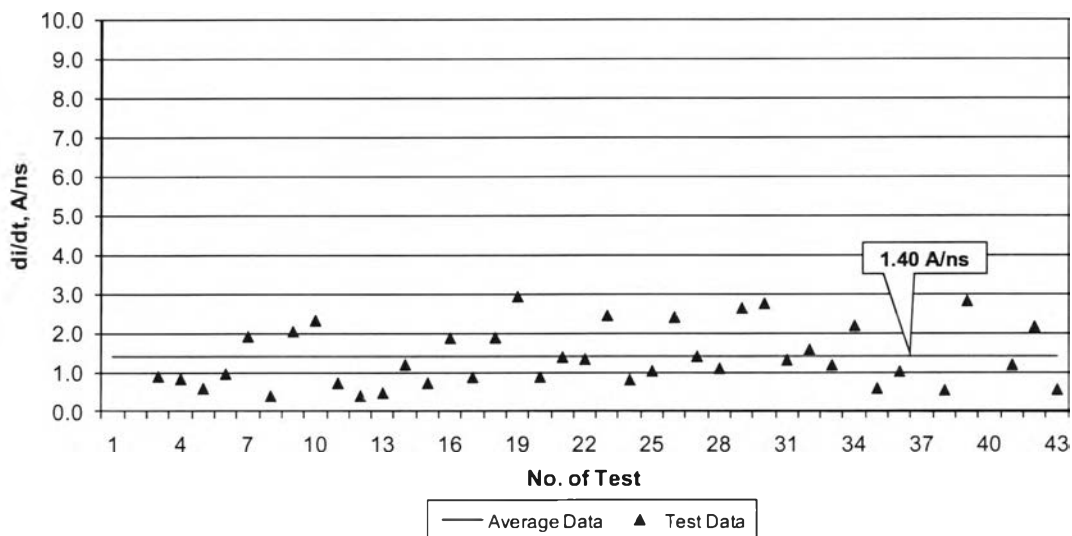
รูปที่ 20 ค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าในขณะเกิดการเบรกดาวนระหว่างแกปทรงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 cm ระยะแกป 0.5 cm ที่ความชื้นสัมบูรณ์ 20.14 g/m^3

ง.3 อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสเบรกดาวน

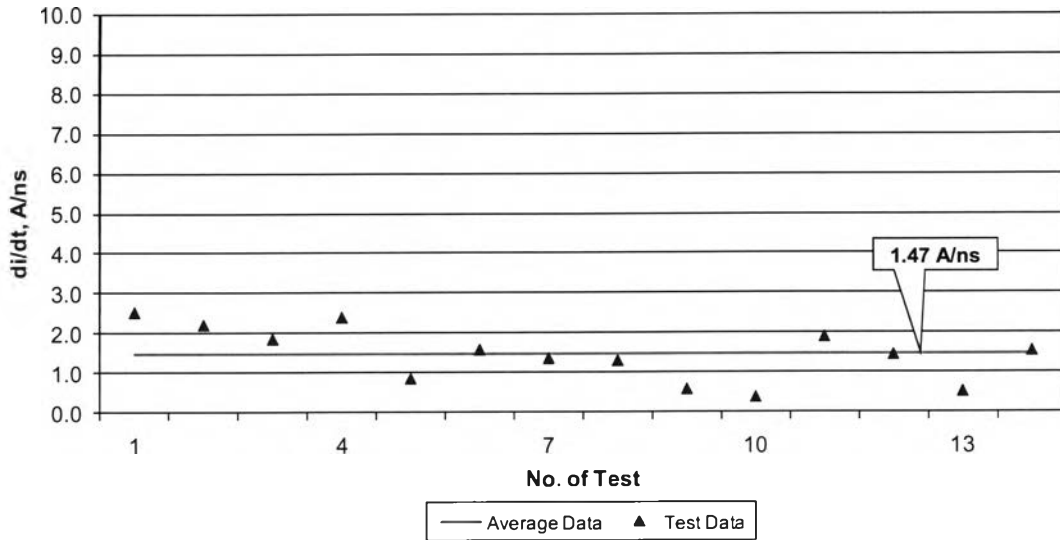
ผลการหาอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสในขณะที่ถูกทรงกลมเกิดการเบรกดาวนที่ได้จากการทดลองในแต่ละกรณีได้แสดงไว้ในรูปที่ ง.21 ถึงรูปที่ ง.33



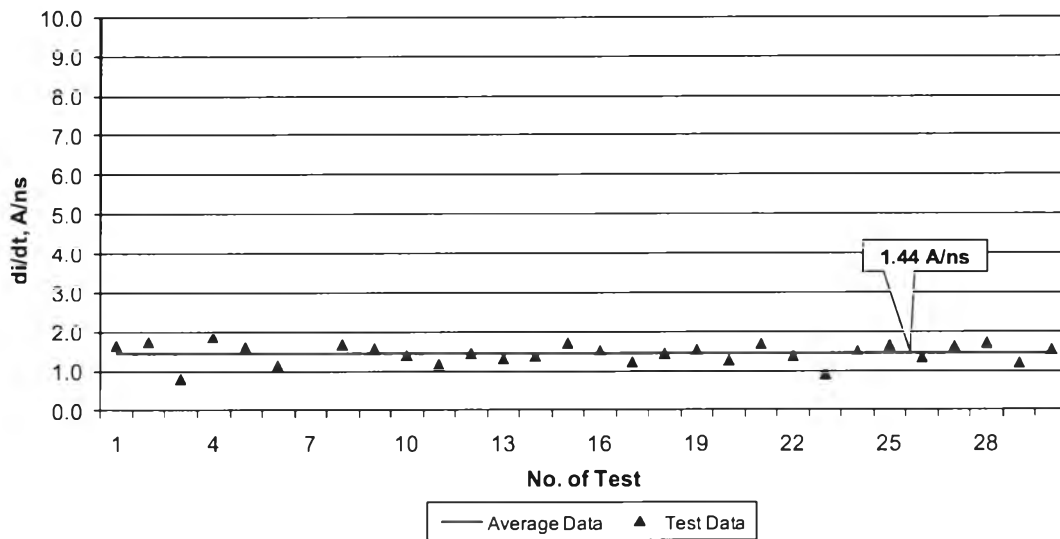
รูปที่ ง.21 อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสเบรกดาวนในขณะที่ถูกทรงกลมเกิดการเบรกดาวนของแก๊พทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 cm ระยะแก๊พ 0.6 cm



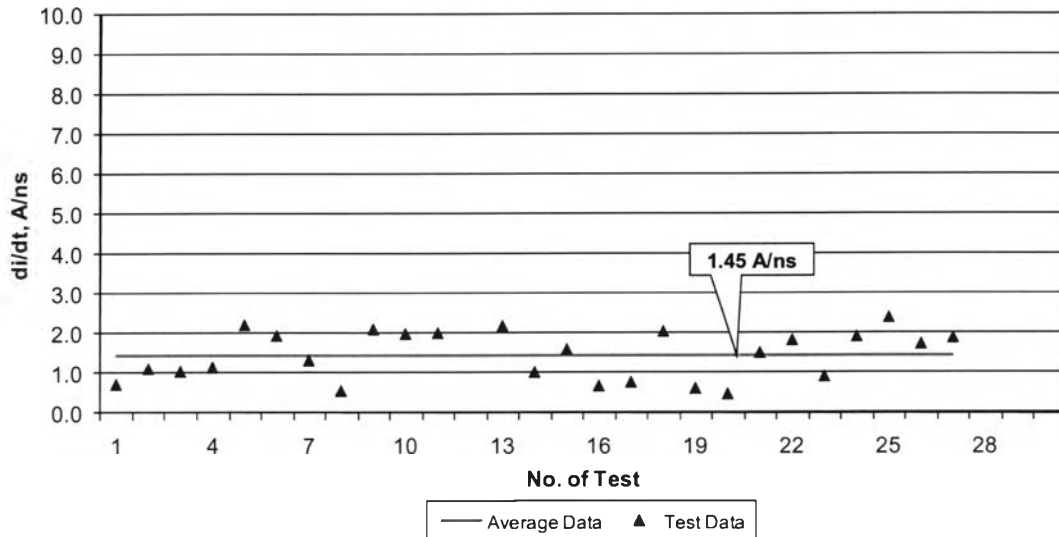
รูปที่ ง.22 อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสเบรกดาวนในขณะที่ถูกทรงกลมเกิดการเบรกดาวนของแก๊พทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 cm ระยะแก๊พ 1.0 cm



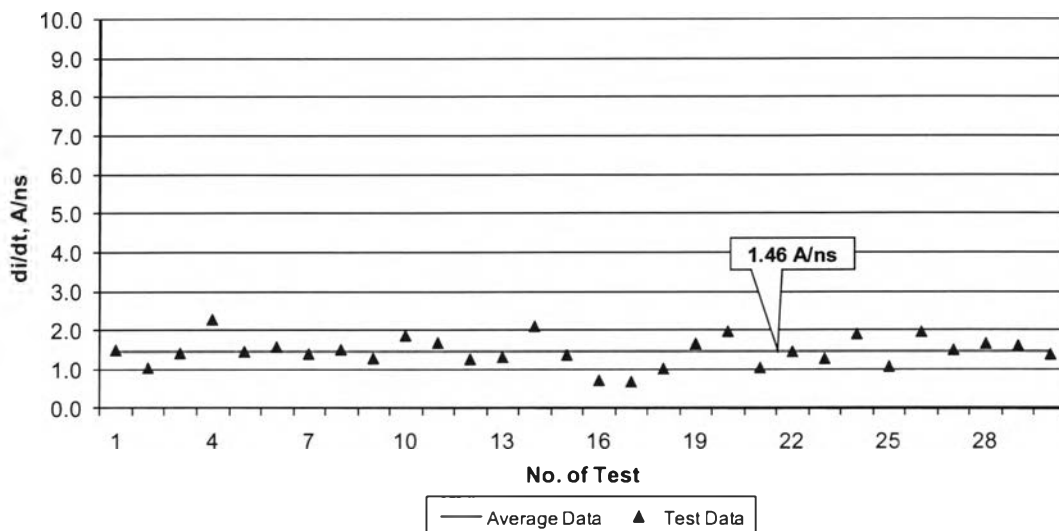
รูปที่ ง.23 อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสเบรกดาวนีในขณะที่แรงดันป้อนเข้าเกิดการยุบตัว
ของแก๊พทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 cm ระยะแก๊พ 1.5 cm



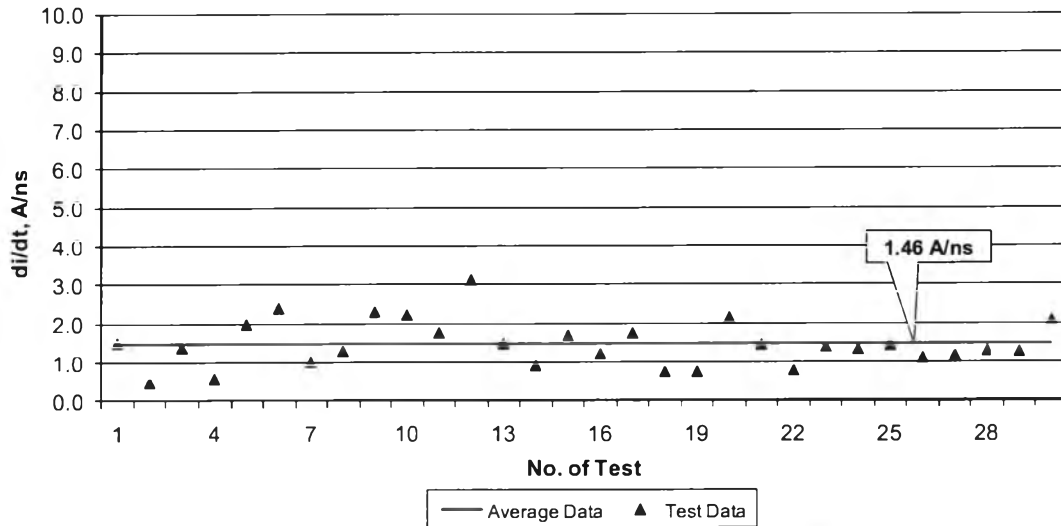
รูปที่ ง.24 อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสเบรกดาวนีในขณะที่แรงดันป้อนเข้าเกิดการยุบตัว
ของแก๊พทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 cm ระยะแก๊พ 0.5 cm ที่ความชื้นสัมบูรณ์ 2.07 g/m³



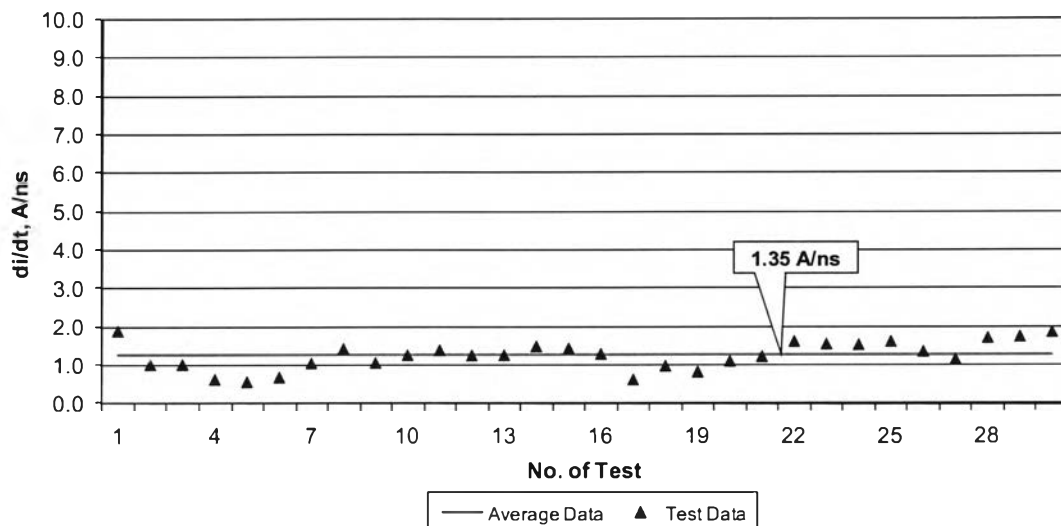
รูปที่ ง.25 อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสเบรกดาวนในขณะที่ยอดน้ำเกิดการยุบตัวของแก๊พทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 cm ระยะแก๊พ 0.5 cm ที่ความชื้นสัมบูรณ์ 9.22 g/m³



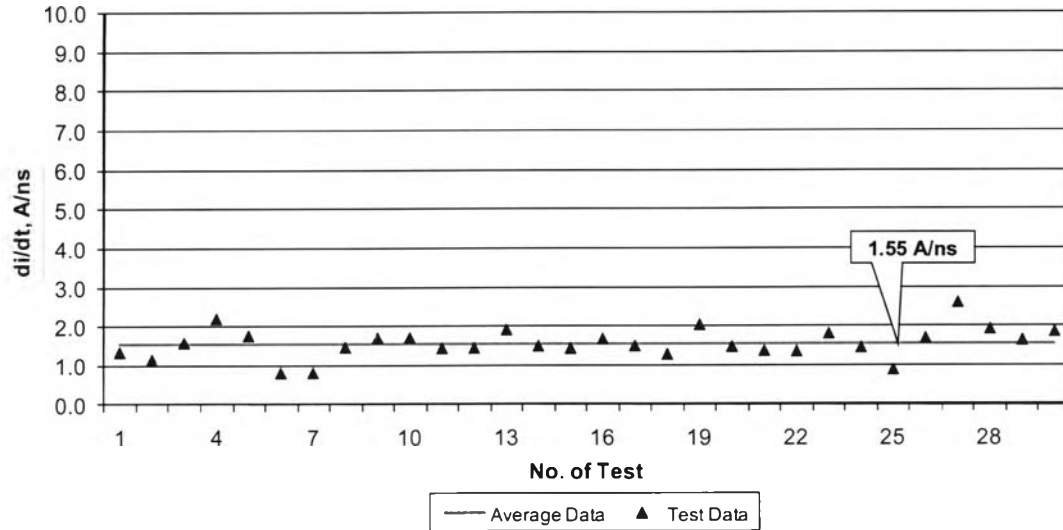
รูปที่ ง.26 อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสเบรกดาวนในขณะที่ยอดน้ำเกิดการยุบตัวของแก๊พทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 cm ระยะแก๊พ 0.5 cm ที่ความชื้นสัมบูรณ์ 9.82 g/m³



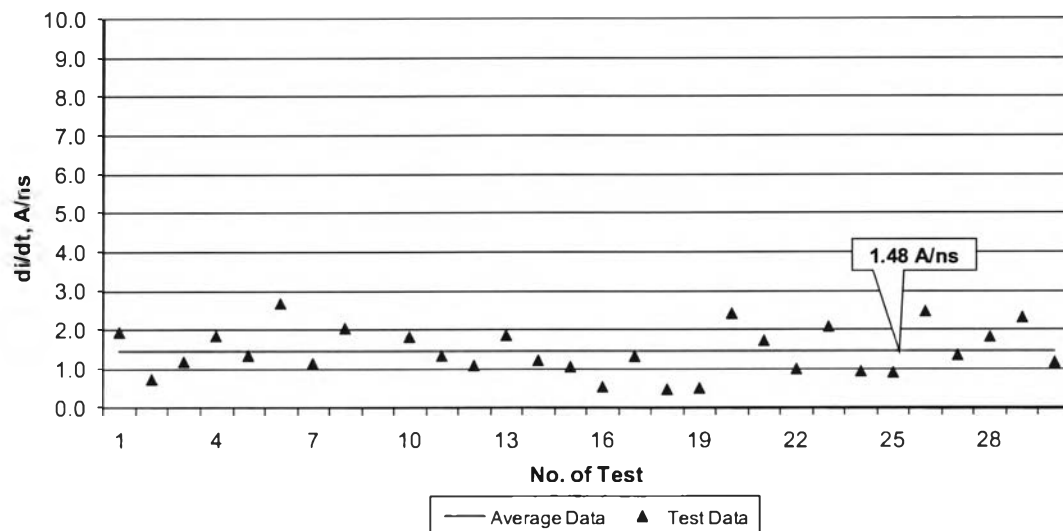
รูปที่ ง.27 อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสเบรกดาวนในขณะที่แรงดันป้อนเข้าเกิดการยุบตัวของแก๊พทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5cm ระยะแก๊พ 0.5 cm ที่ความชื้นสัมบูรณ์ 10.01 g/m³



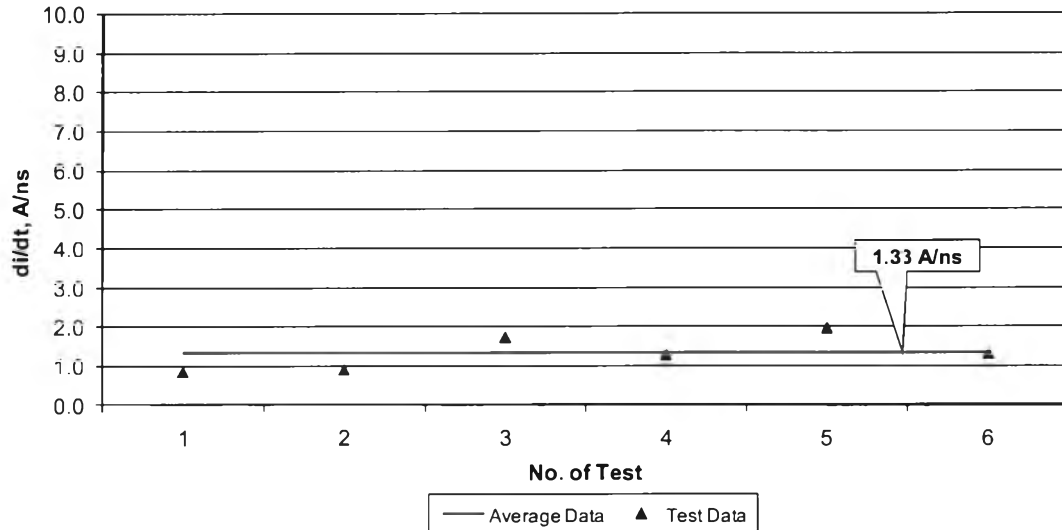
รูปที่ ง.28 อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสเบรกดาวนในขณะที่แรงดันป้อนเข้าเกิดการยุบตัวของแก๊พทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5cm ระยะแก๊พ 0.5 cm ที่ความชื้นสัมบูรณ์ 10.51 g/m³



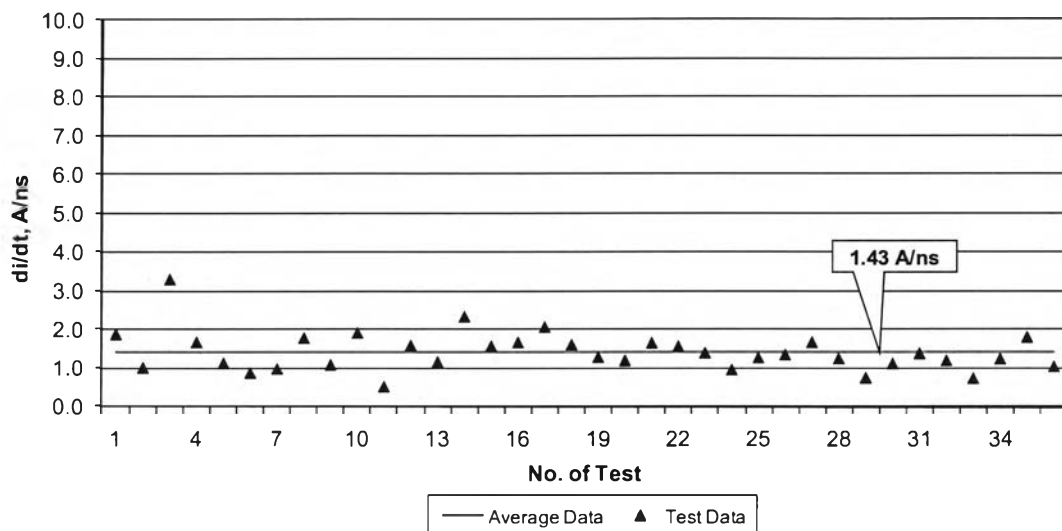
รูปที่ ง.29 อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสเบรกดาวนินในขณะที่แรงดันป้อนเข้าเกิดการยุบตัวของแก๊พทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 cm ระยะแก๊พ 0.5 cm ที่ความชื้นสัมบูรณ์ 17.34 g/m³



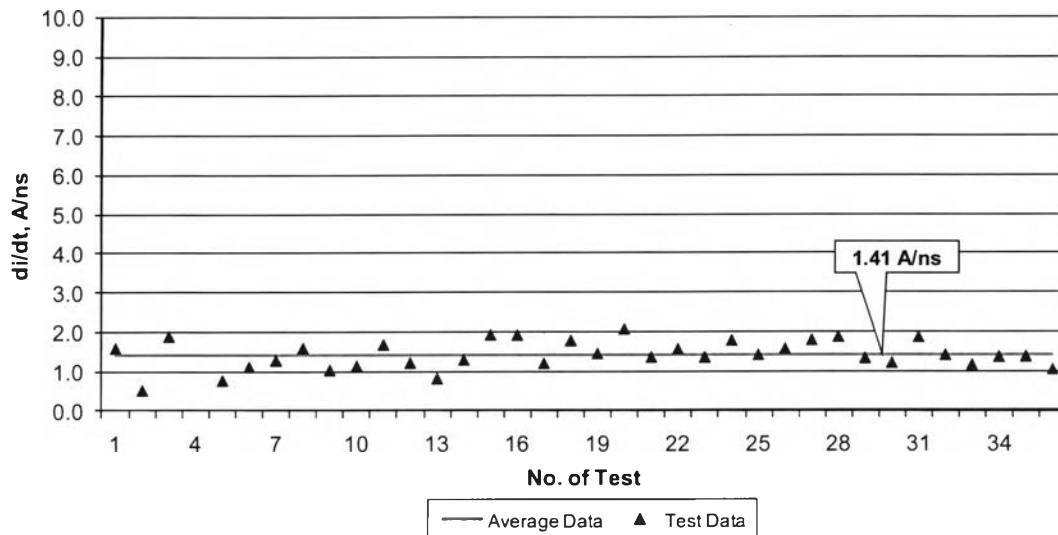
รูปที่ ง.30 อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสเบรกดาวนินในขณะที่แรงดันป้อนเข้าเกิดการยุบตัวของแก๊พทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 cm ระยะแก๊พ 0.5 cm ที่ความชื้นสัมบูรณ์ 17.6 g/m³



รูปที่ 31 อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสน้ำในขณะที่ยอดน้ำป้อนเข้าเกิดการยุบตัวของแก๊พทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 cm ระยะแก๊พ 0.5 cm ที่ความชื้นสัมบูรณ์ 18.31 g/m³



รูปที่ 32 อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสน้ำในขณะที่ยอดน้ำป้อนเข้าเกิดการยุบตัวของแก๊พทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 cm ระยะแก๊พ 0.5 cm ที่ความชื้นสัมบูรณ์ 19.15 g/m³



รูปที่ ง.33 อัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสเบรกดาวนีในขณะที่แรงดันป้อนเข้าเกิดการยุบตัวของแก๊ปทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 cm ระยะแก๊ป 0.5 cm ที่ความชื้นสัมบูรณ์ 20.14 g/m³

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายณัฐพงศ์ ตันทนุช สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2544 และสำเร็จการศึกษา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2547

ในปีการศึกษา 2549 ได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาเอก สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยศึกษาวิจัยทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง (Highvoltage engineering)

