สำนักงานวิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

การวิเคราะห์ผลการคำนวณ

ในบทนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์ผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองเชิงตัวเลขที่เกี่ยวข้องกับลักษณะการเกิดและการเคลื่อนที่ของสตรีมเมอร์ การเปลี่ยนแปลงของกระแสดีสชาร์จที่ไหลระหว่างแกปทรงกลม และผลกระทบของตำแหน่งประจุเริ่มต้นที่มีต่อสตรีมเมอร์

4.1 การเกิดและการเคลื่อนที่ของสตรีมเมอร์

จากผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองเชิงตัวเลขในกรณีที่ 1 ถึงกรณีที่ 3 (รูปที่ ง.1 ถึงรูปที่ ง.3 ในภาคผนวก ง) จะเห็นว่าเมื่อแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้กับแกปทรงกลมมีค่าเพิ่มขึ้น อิเล็กตรอนเริ่มต้นที่อยู่ใกล้กับแคโทดจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่เนื่องจากค่าสนามไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น โดยทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะมีทิศทางตรงกันข้ามกับทิศทางของสนามไฟฟ้าซึ่งมีทิศทางจากแอโนดไปยังแคโทด ในขณะที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปในสนามไฟฟ้าจะเกิดการชนกับอนุภาคของแก๊ส ถ้าอิเล็กตรอนดังกล่าวมีพลังงานมากพอก็จะทำให้เกิดการไอออไนเซชัน เกิดอิเล็กตรอนและไอออนบวกใหม่ขึ้น กระบวนการไอออไนเซชันนี้จะเกิดขึ้นตลอดเวลาที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปยังแอโนดส่งผลให้จำนวนอนุภาคที่มีประจุเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเกิดเป็นอิเล็กตรอนอะวาลานซ์ แต่ในขณะเดียวกันก็มีอิเล็กตรอนบางส่วนหายไปจากการกลายเป็นไอออนลบหรือเกิดการรวมตัวกันระหว่างอิเล็กตรอนกับไอออนบวกกลายเป็นอนุภาคที่เป็นกลาง นอกจากนี้ยังมีอนุภาคบางส่วนถูกชนด้วยอิเล็กตรอนที่มีพลังงานไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการไอออไนเซชัน เกิดเป็นอนุภาคในสภาวะตื่นกระตุ้นซึ่งจะปลดปล่อยโฟตอนออกมาเมื่ออนุภาคดังกล่าวกลับสู่สภาวะปกติ โฟตอนที่ถูกปล่อยออกมาจากอนุภาคในสภาวะตื่นกระตุ้นเหล่านี้จะเคลื่อนที่ไปชนอนุภาคของตัวกลาง ถ้าโฟตอนมีพลังงานมากพอก็จะทำให้เกิดการไอออไนเซชันหรือก็คือการเกิดโฟโตไอออไนเซชันซึ่งเป็นกลไกสำคัญที่ทำให้จำนวนอิเล็กตรอนมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และจากผลการคำนวณพบว่าโฟโตไอออไนเซชันจะเกิดขึ้นมากในบริเวณส่วนหน้าของอิเล็กตรอนอะวาลานซ์

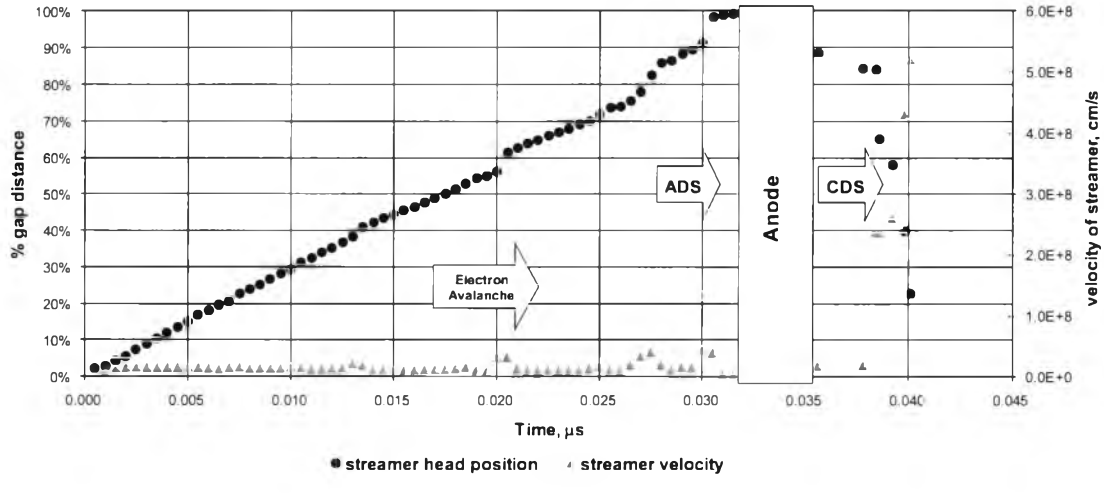
จากทฤษฎีการเกิดเบรกดาวน์แบบสตรีมเมอร์ได้กล่าวว่า "สตรีมเมอร์จะเกิดขึ้นเมื่อจำนวนอนุภาคที่มีประจุชนิดใดก็ตามมีค่าประมาณเท่ากับ 10^8" เมื่อพิจารณาผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองเชิงตัวเลขพบว่าสตรีมเมอร์ที่เกิดขึ้นในช่วงเวลาแรกเป็นสตรีมเมอร์ลบหรือสตรีมเมอร์ที่เคลื่อนที่จากแคโทดไปยังแอโนด (anode-directed streamer, ADS) และเมื่อสตรีมเมอร์ลบเคลื่อนที่ไปถึงแอโนด อิเล็กตรอนส่วนใหญ่จะถูกดูดกลืนไปโดยแอโนด

ทำให้บริเวณใกล้ ๆ กับแอโนดจะเต็มไปด้วยอนุภาคประจุบวก แต่อย่างไรก็ตามอิเล็กตรอนใหม่ ๆ ก็ยังคงเกิดขึ้นตลอดเวลาเนื่องมาจากการเกิดโฟโตไอออไนเซชัน และในช่วงเวลานี้ยังพบว่าการกระจายของสนามไฟฟ้าบริเวณใกล้กับแอโนดเริ่มมีการบิดเบือนไปในทางที่มีค่าสูงขึ้น

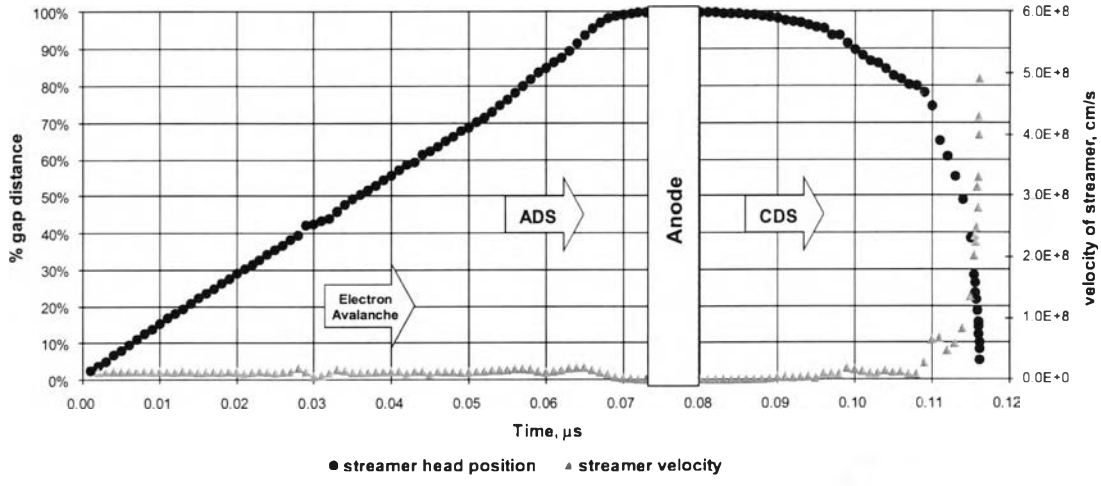
การเพิ่มขึ้นของสนามไฟฟ้าที่บริเวณแอโนดส่งผลให้การเกิดไอออไนเซชันที่บริเวณดังกล่าวเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้บริเวณที่มีสภาพเป็นตัวนำไฟฟ้าขยายตัวเข้าไปแกปมากขึ้น เกิดเป็นสตรีมเมอร์บวกหรือสตรีมเมอร์ที่เคลื่อนที่จากแอโนดไปยังแคโทด (cathode-directed streamer, CDS) และเมื่อเวลาผ่านไปสตรีมเมอร์บวกดังกล่าวก็จะสามารถเชื่อมต่อแกประหว่างแอโนดกับแคโทด

ลักษณะการเคลื่อนที่และการเปลี่ยนแปลงความเร็วของอิเล็กตรอนอะวาลานช์และสตรีมเมอร์ตามเวลาที่ได้จากผลการคำนวณด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลขในกรณีที่ 1 ถึงกรณีที่ 3 ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.1 ถึงรูปที่ 4.3

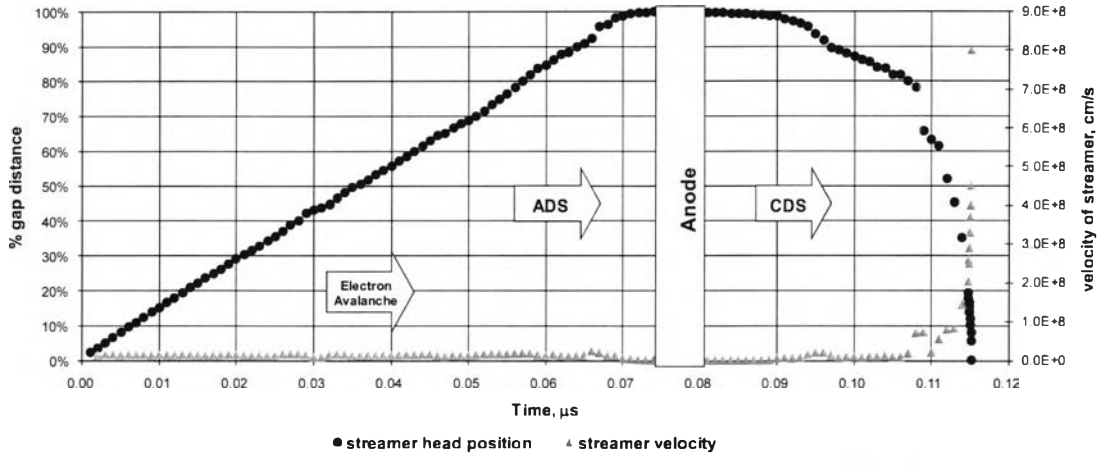
จากรูปที่ 4.1 ถึงรูปที่ 4.3 จะเห็นว่าความเร็วของสตรีมเมอร์ในช่วงเวลาแรกมีค่าค่อนข้างคงที่ แต่หลังจากที่สตรีมเมอร์ลบเคลื่อนที่ถึงแอโนด ความเร็วของสตรีมเมอร์จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว อัตราส่วนความเร็วเฉลี่ยของสตรีมเมอร์บวกต่อความเร็วเฉลี่ยของสตรีมเมอร์ลบจะมีค่าประมาณ 10 เท่า โดยสาเหตุที่ความเร็วของสตรีมเมอร์บวกมีค่ามากกว่าความเร็วของสตรีมเมอร์ลบ คือการเพิ่มขึ้นของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในขณะที่สตรีมเมอร์บวกเคลื่อนที่จากแอโนดไปยังแคโทด



รูปที่ 4.1 ตำแหน่งและความเร็วของอิเล็กตรอนอะวาลานช์และสตรีมเมอร์ที่ได้จากผลการคำนวณด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลขในกรณีที่ 1



รูปที่ 4.2 ตำแหน่งและความเร็วของอิเล็กตรอนอะวาลานซ์และสตรีมเมอร์
ที่ได้จากผลการคำนวณด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลขในกรณีที่ 2

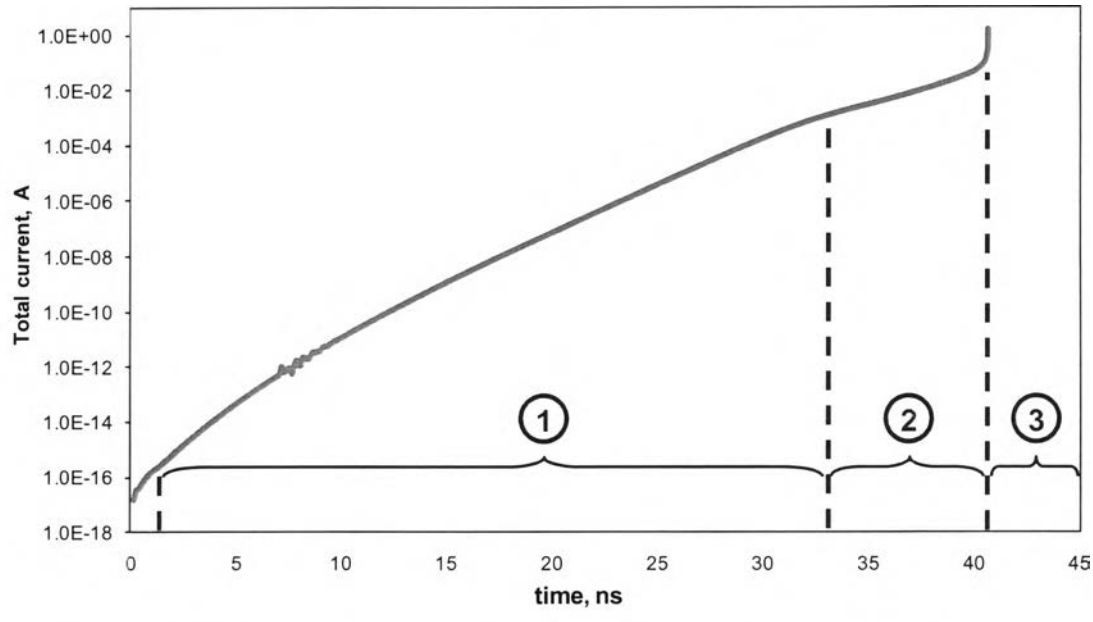


รูปที่ 4.3 ตำแหน่งและความเร็วของอิเล็กตรอนอะวาลานซ์และสตรีมเมอร์
ที่ได้จากผลการคำนวณด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลขในกรณีที่ 3

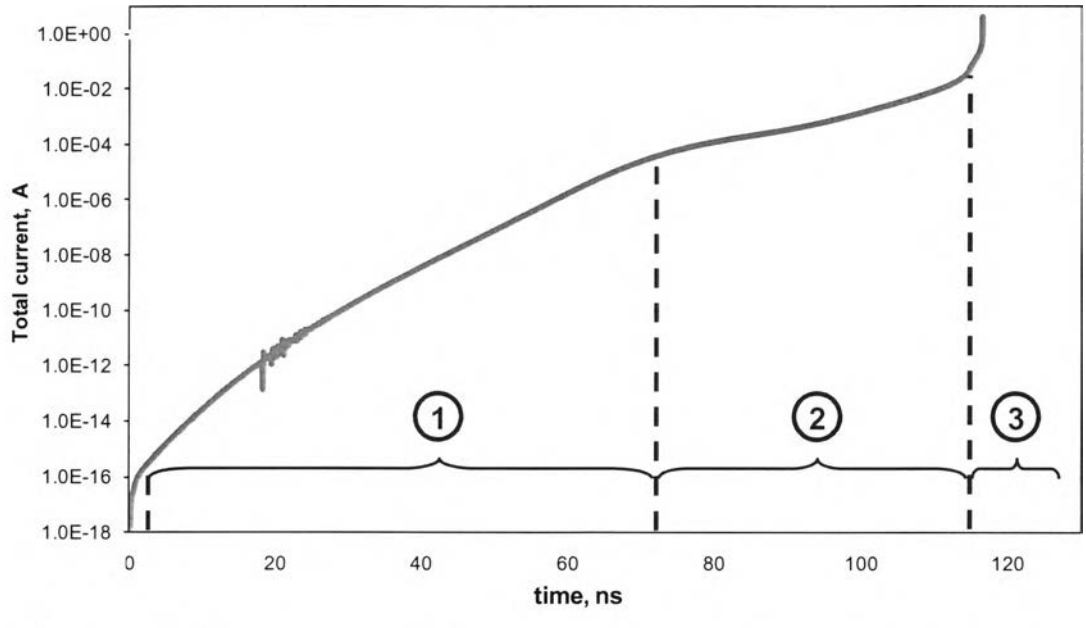
4.2 กระแสดีสชาร์จระหว่างแกปทรงกลม

ผลการคำนวณค่ากระแสดีสชาร์จที่ไหลระหว่างแกปทรงกลมขนาดต่าง ๆ ที่ได้จากแบบจำลองเชิงตัวเลขในกรณีที่ 1 ถึงกรณีที่ 3 (รูปที่ ง.1จ ถึงรูปที่ ง.3จ ในภาคผนวก ง) พบว่าการเพิ่มขึ้นของกระแสดีสชาร์จมีลักษณะเหมือนกันทั้ง 3 กรณี คือขนาดของกระแสดีสชาร์จในช่วงแรกมีการเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จากนั้นขนาดของกระแสดีสชาร์จจะมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงท้ายของกราฟกระแส ซึ่งสอดคล้องกับช่วงเวลาที่สตรีมเมอร์บวกเกิดขึ้น แต่อย่างไรก็ตามกราฟกระแสดีสชาร์จที่ได้จากการพล็อตค่าลงในแกนปกติไม่ได้แสดงถึงรายละเอียดการเพิ่มขึ้นของกระแสดีสชาร์จในช่วงเวลาแรก ทางผู้วิจัยจึงได้ทำการพล็อตกราฟกระแสดีสชาร์จใหม่ในแกนแบบกึ่งลอการิทึม (semi-log) ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ถึงรูปที่ 4.6

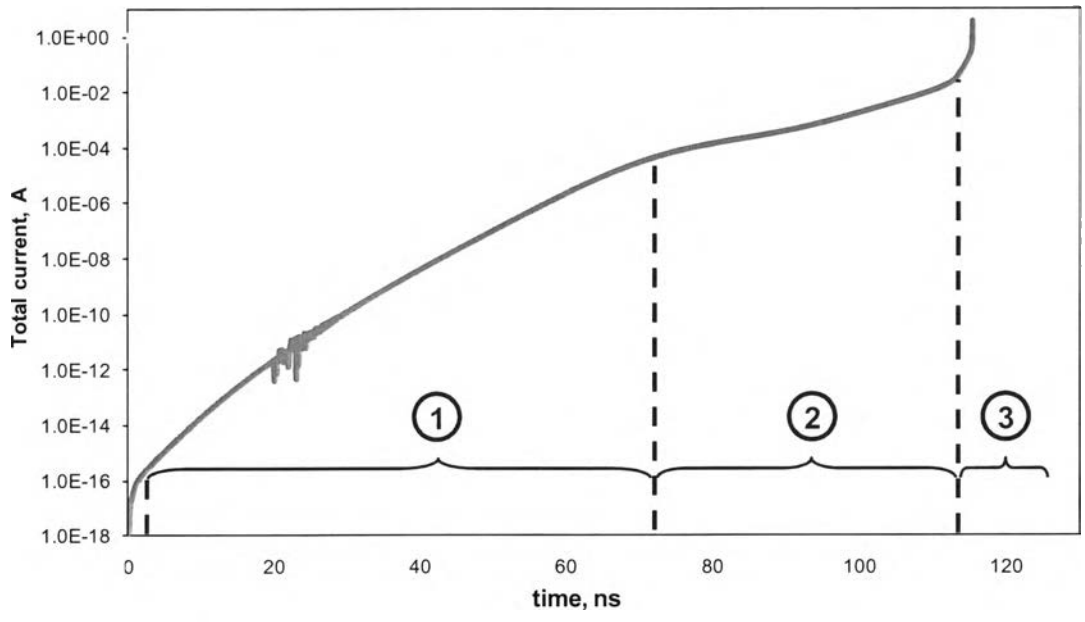
จากรูปที่ 4.4 ถึงรูปที่ 4.6 การเพิ่มขึ้นของกระแสดีสชาร์จเป็นไปอย่างต่อเนื่อง มีลักษณะการเพิ่มขึ้นเป็นขั้น ๆ ตามการเปลี่ยนแปลงความชันหรืออัตราการเพิ่มขึ้นของกระแสดีสชาร์จ ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็น3 ขั้นตอน โดยอ้างอิงจากลักษณะการเกิดและการพัฒนาจากอิเล็กตรอนอะวาลานซ์ไปเป็นสตรีมเมอร์



รูปที่ 4.4 การเพิ่มขึ้นของกระแสดีสชาร์จที่ได้การคำนวณด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลขในกรณีที่ 1



รูปที่ 4.5 การเพิ่มขึ้นของกระแสดีสชาร์จที่ได้การคำนวณด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลขในกรณีที่ 2



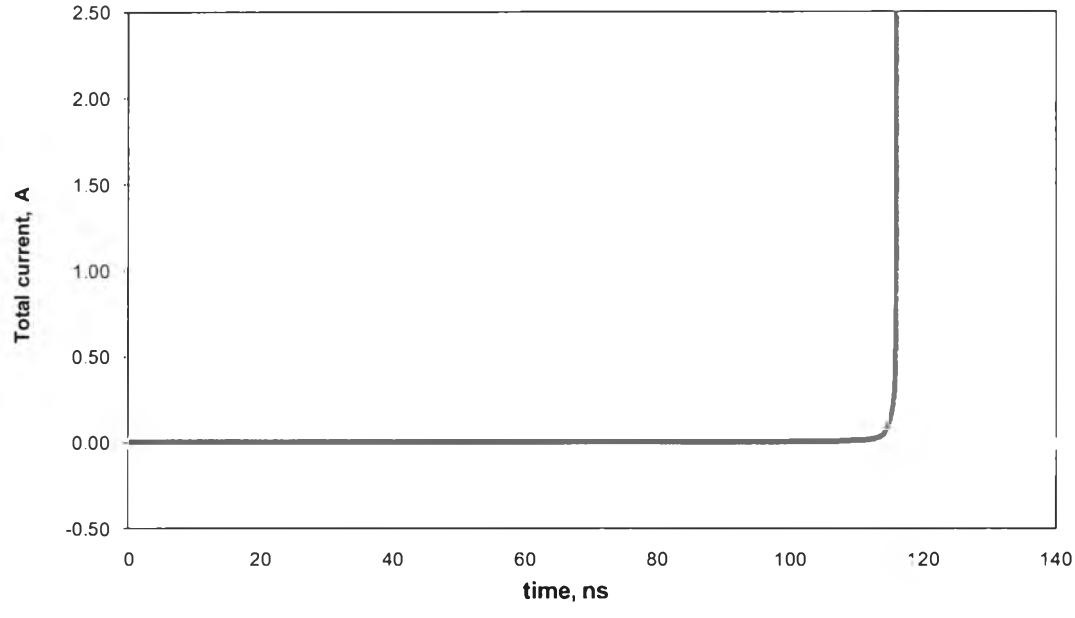
รูปที่ 4.6 การเพิ่มขึ้นของกระแสดีสชาร์จที่ได้การคำนวณด้วยแบบจำลองเชิงตัวเลขในกรณีที่ 3

รายละเอียดของของแต่ละขั้นตอนมีดังนี้

- ขั้นตอนที่ 1 : เป็นช่วงเวลาตั้งแต่อิเล็กตรอนอะวาลานช์เริ่มก่อตัวจนกระทั่งพัฒนาไปเป็นสตรีมเมอร์ลบเคลื่อนที่จากแคโทดไปยังแอโนด
- ขั้นตอนที่ 2 : เป็นช่วงเวลาหลังจากที่สตรีมเมอร์ลบเคลื่อนที่ถึงแอโนด เกิดการสะสมของอนุภาคที่มีประจุที่บริเวณใกล้กับแอโนดเนื่องมาจากผลของการเกิดโฟโตไอออไนเซชัน และเกิดการบิดเบือนของสนามไฟฟ้าที่บริเวณใกล้กับแอโนด
- ขั้นตอนที่ 3 : เป็นช่วงเวลาที่จำนวนของอนุภาคที่มีประจุมีจำนวนมากพอที่จะทำให้เกิดการขยายตัวของแอโนดเข้าไปในบริเวณแกปเกิดเป็นสตรีมเมอร์บวกเคลื่อนที่จากแอโนดไปยังแคโทด และสามารถเชื่อมต่อแกปทั้งหมดได้ในเวลาต่อมา

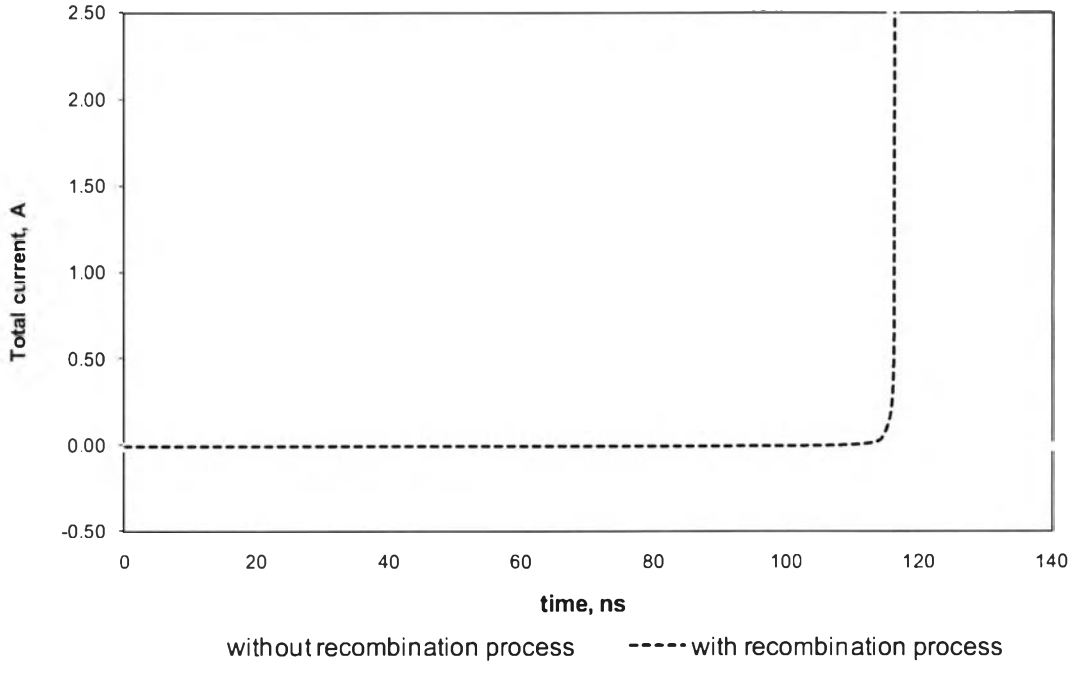
ตำแหน่งการเพิ่มขึ้นของกระแสดีสชาร์จในแต่ละขั้นตอนได้แสดงเป็นหมายเลขลงในรูปที่ 4.4 ถึงรูปที่ 4.6 แต่จากรูปการเพิ่มขึ้นของกระแสดีสชาร์จจะเห็นว่าบริเวณทางด้านซ้ายมือหรือในช่วงเวลาแรกซึ่งขนาดของกระแสดีสชาร์จมีการเพิ่มขึ้นอย่างกระทันหันนั้นไม่ได้ถูกแบ่งอยู่ในขั้นตอนการเพิ่มขึ้นของกระแสดีสชาร์จ เนื่องมาจากการเพิ่มของกระแสดีสชาร์จในช่วงเวลาดังกล่าวเกิดมาจากลักษณะการเพิ่มขึ้นของแรงดันไฟฟ้าแบบขั้นที่ป้อนให้กับแกปทรงกลมนั่นเอง

นอกจากนี้ทางผู้วิจัยยังได้ทำการศึกษาถึงผลของการรวมตัวกันของอนุภาคที่มีประจุ ซึ่งในที่นี้คือ การรวมตัวกันของอิเล็กตรอนกับไอออนบวกและการรวมตัวกันของไอออนบวกกับไอออนลบ ว่ามีผลต่อการเพิ่มขึ้นของกระแสดีสชาร์จหรือไม่ ด้วยการกำหนดให้สัมประสิทธิ์การรวมตัวของอนุภาคที่มีประจุ β_{ep} และ β_{pn} ในสมการที่ (3.1) ถึงสมการที่ (3.3) มีค่าเท่ากับศูนย์แล้วทำการคำนวณใหม่อีกครั้ง ตัวอย่างผลการคำนวณในแกปทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 cm ระยะแกป 1 cm และแรงดันป้อนเข้าขนาด 1 pu ได้แสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 กระแสดีสชาร์จระหว่างแกปทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 cm ระยะแกป 1 cm และแรงดันป้อนเข้าขนาด 1 pu ในกรณีที่ไม่คำนึงถึงผลของการรวมตัวกันของอนุภาคที่มีประจุ

เมื่อนำผลการคำนวณที่ได้ไปเปรียบเทียบกับกรณีที่คิดผลของการรวมตัวกันของอนุภาคที่มีประจุ พบว่าลักษณะการเพิ่มขึ้นของกระแสดีสชาร์จที่ได้จากทั้ง 2 กรณีมีความใกล้เคียงกันมาก ดังแสดงในรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นว่าการรวมตัวกันของอนุภาคที่มีประจุไม่มีอิทธิพลที่สำคัญต่อการเพิ่มขึ้นของกระแสดีสชาร์จ



รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบผลการคำนวณค่ากระแสดีสชาร์จระหว่างแกปทรงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 cm ระยะแกป 1 cm และแรงดันป้อนเข้าขนาด 1 pu

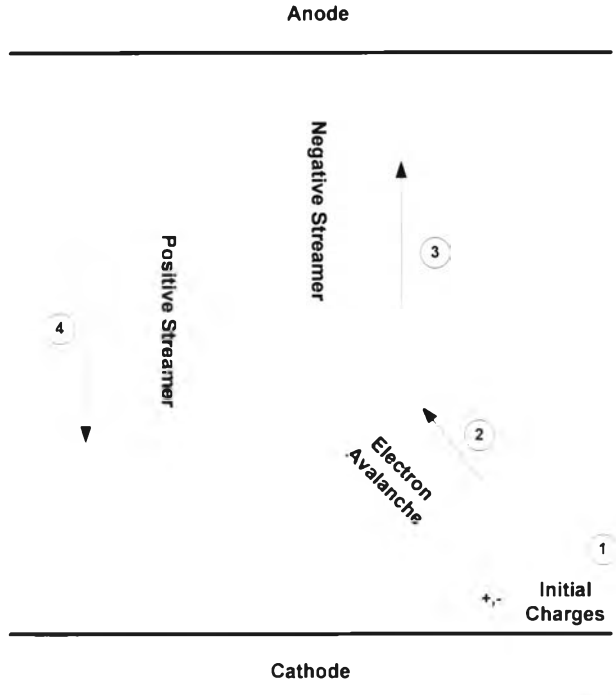
4.3 ตำแหน่งของประจุเริ่มต้น

ผลการคำนวณในหัวข้อที่ผ่านมาเป็นผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองเชิงตัวเลข ที่กำหนดให้ตำแหน่งของประจุเริ่มต้นวางอยู่ในแนวแกนสมมาตรของแกปทรงกลม ซึ่งลักษณะการเกิดและการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอะวาลานช์และสตรีมเมอร์จะอยู่ในแนวแกนทั้งหมด แต่ในทางปฏิบัติแล้วอิเล็กตรอนหรือประจุเริ่มต้นไม่จำเป็นต้องวางอยู่ในแนวแกนของแกป ในหัวข้อนี้จึงได้ทำการศึกษาถึงผลของตำแหน่งของประจุเริ่มต้นที่มีต่อการเกิดและการเคลื่อนที่ของสตรีมเมอร์ โดยทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองเชิงตัวเลขในกรณีที่ 2 กรณีที่ 4 และกรณีที่ 5 (รูปที่ ง.2, รูปที่ ง.4 และรูปที่ ง.5 ในภาคผนวก ง) ซึ่งเป็นแกปทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 cm ที่ระยะแกป 1 cm และตำแหน่งของประจุเริ่มต้นซึ่งเป็นอัตราส่วนของระยะแกปดังแสดงในตารางที่ 3.2

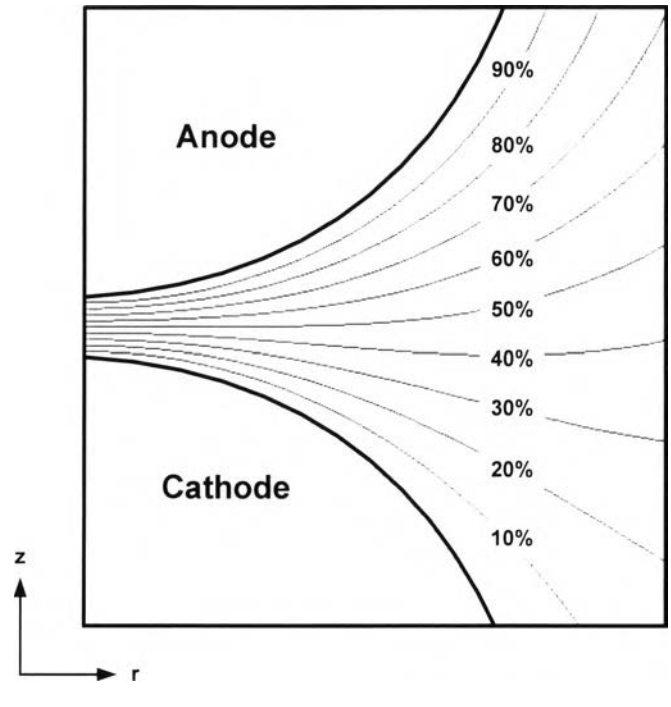
จากผลการคำนวณที่ได้จากแบบจำลองเชิงตัวเลขในกรณีที่ 4 และกรณีที่ 5 พบว่าในช่วงเวลาแรกลักษณะการก่อตัวของอิเล็กตรอนอะวาลานช์มีการเคลื่อนที่เข้าหาแนวแกนของแกปทรงกลมมากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป และเกิดเป็นสตรีมเมอร์ลบเคลื่อนที่เข้าหาแอโนดเช่นเดียวกับที่ได้จากผลการคำนวณในกรณีที่ 2 โดยลักษณะการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอะวาลานช์และสตรีมเมอร์ที่เกิดขึ้นในกรณีที่ 4 และกรณีที่ 5 ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.9

แต่อย่างไรก็ตามระยะเวลาที่อะวาลานช์เริ่มก่อตัวจนกระทั่งสตรีมเมอร์บวกเคลื่อนที่ถึงแคโทดในแต่ละกรณีมีค่าต่างกัน แสดงให้เห็นว่าตำแหน่งของประจุเริ่มต้นมีผลต่อลักษณะ

การก่อตัวของอิเล็กตรอนอะวาลานซ์และระยะเวลาที่สตรีมเมอร์ใช้ในการเคลื่อนที่เชื่อมต่อแกประหว่างแอโนดกับแคโทด



รูปที่ 4.9 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอะวาลานซ์และสตรีมเมอร์เมื่อประจุเริ่มต้นไม่ได้วางอยู่ในแนวแกนของแกปทรงกลม



รูปที่ 4.10 การกระจายตัวของแรงดันไฟฟ้าในแกปทรงกลม

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาจากลักษณะการกระจายตัวของแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในแกปทรงกลม ดังแสดงในรูปที่ 4.10 จะเห็นว่าแนวแกนของแกปทรงกลมเป็นบริเวณที่เส้นศักย์ไฟฟ้าเท่า (equipotential line) มีความหนาแน่นมากที่สุดหรือเป็นแนวที่สนามไฟฟ้ามีค่ามากที่สุด จากเหตุผลดังกล่าวจึงสรุปได้ว่าสตรีมเมอร์จะเกิดและเคลื่อนที่ในแนวที่สนามไฟฟ้ามีค่าสูงที่สุด