บทที่ 4

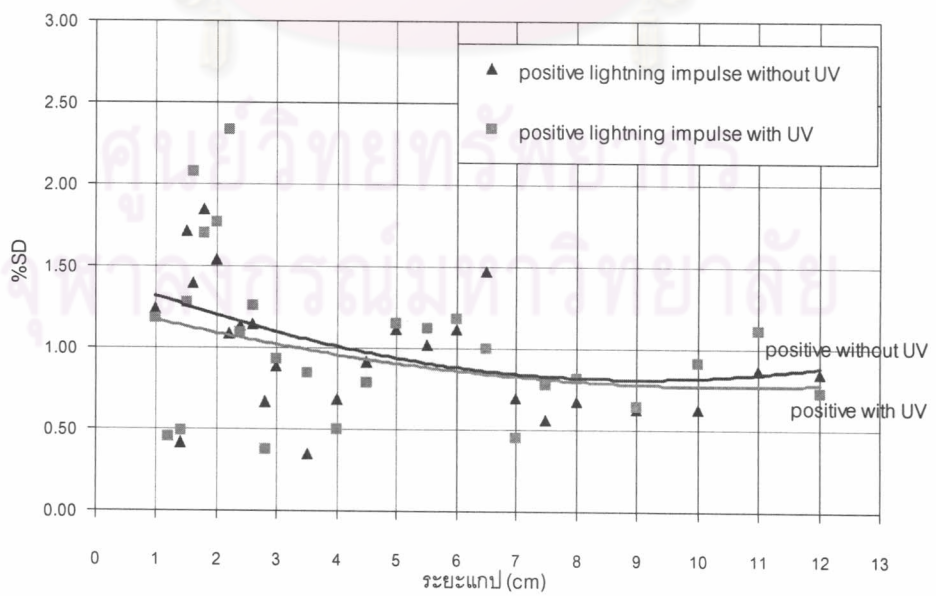
ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ผลการทดลองหาคุณลักษณะแรงดันเบรกดาวน์ที่ภาวะอากาศของห้องทดลอง ภายใต้แรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 μs ทั้งขั้วบวกและขั้วลบของอิเล็กโตรดทรงกลม-ระนาบ ที่ระยะแกป 1-12 cm ในกรณีส่องแสงUV และไม่ส่องแสงUV ที่ผิวของทรงกลม แสดงไว้ในภาคผนวก ข

ข้อมูลแรงดันเบรกดาวน์อิมพัลส์ที่ได้ จะนำมาวิเคราะห์พร้อมนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลคุณลักษณะแรงดันเบรกดาวน์ของทรงกลมมาตรฐาน ตามมาตรฐาน IEC52 นอกจากนั้นยังทำการทดลองเพิ่มเติมเพื่อหาแรงดันเบรกดาวน์ของแกปทรงกลมระนาบภายใต้แรงดันสูงกระแสสลับในสภาวะที่ไม่ได้ส่องแสงUV และสภาวะส่องแสงUV ด้วยเพื่อตรวจสอบผลการทดลองภายใต้แรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 μsขั้วลบ ผลการทดลองที่ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ข เช่นกัน

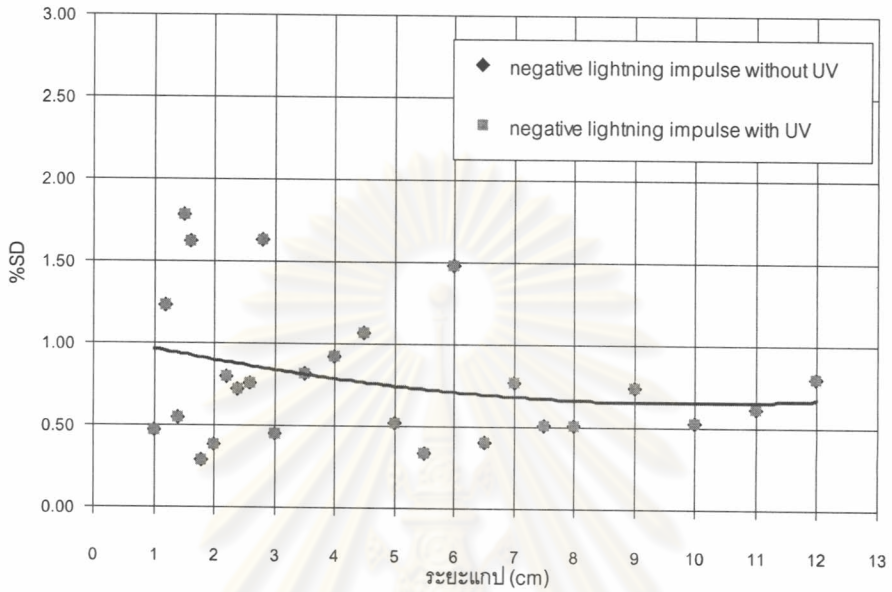
ข้อมูลที่ได้จากการทดลองทั้งหมดได้แก้ไขค่า ตัวประกอบความชื้น และตัวประกอบความหนาแน่นของอากาศสัมพัทธ์ตามที่กำหนดไว้ใน IEC52 ก่อนนำไปเขียนกราฟด้วยโปรแกรมไมโครซอฟเอ็กเซลส์ในลักษณะของโพลีโนเมียลกำลัง 2 [10] เนื่องจากมีความเหมาะสมในการทำนายค่าความสัมพันธ์ของแรงดันเบรกดาวน์-ระยะแกป (อ้างอิงในภาคผนวก ค)

4.1 $U_{b50\%}$ และ ค่าเบี่ยงเบนมาตราฐาน (%SD) จากผลการทดลอง

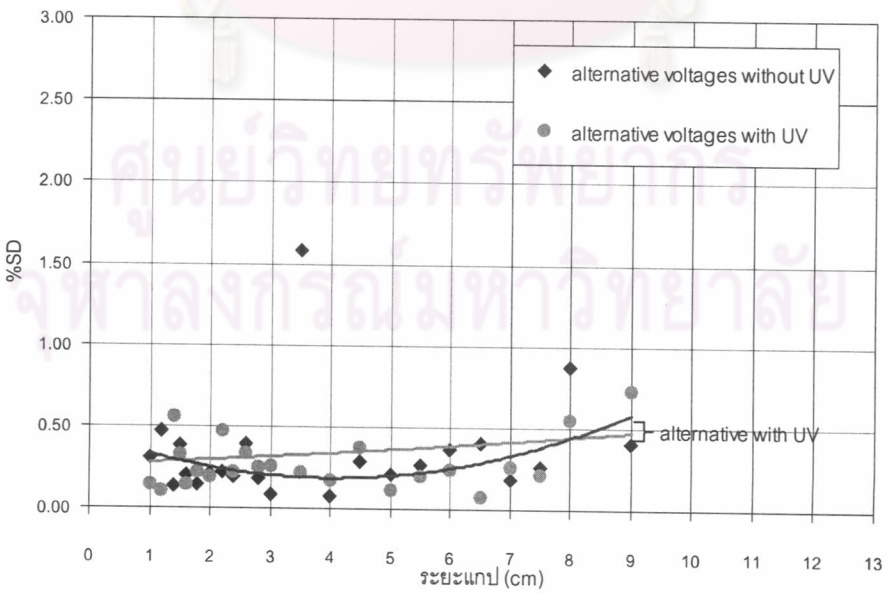


รูปที่ 4.1 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลองด้วยแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 μs ขั้วบวกที่ระยะแกปต่างๆ

รูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลการทดลองด้วยแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 μsขั้วบวกมีค่าอยู่ระหว่าง 0.7-1.4 % โดยผลของการส่องแสงUV ช่วยให้ความเบี่ยงเบนมาตรฐานดีขึ้นเล็กน้อยเท่านั้น



รูปที่ 4.2 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลองด้วยแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 μs ขั้วลบที่ระยะแกปต่างๆ



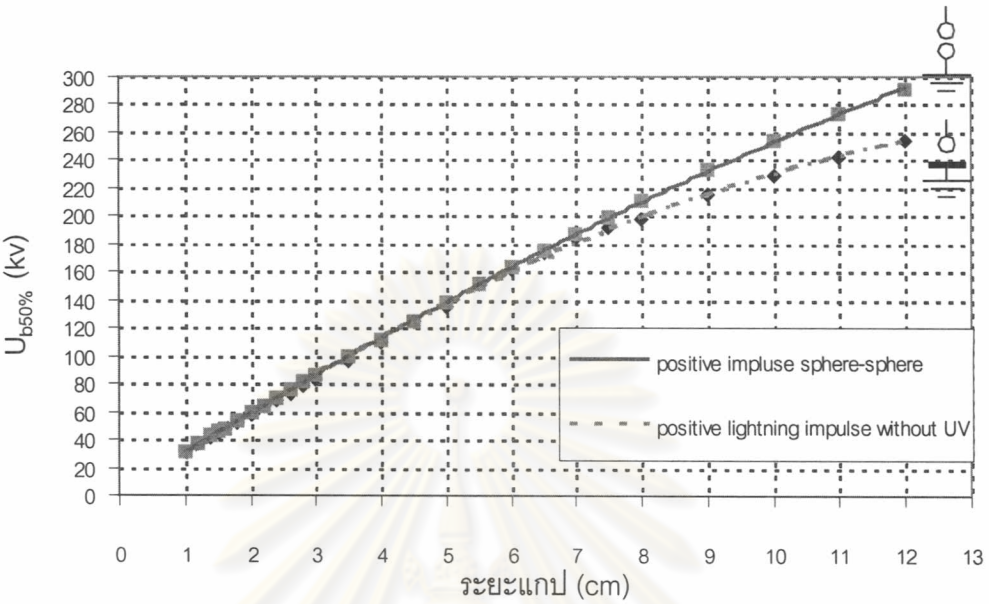
รูปที่ 4.3 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลองด้วยแรงดันกระแสสลับที่ระยะแกปต่างๆ

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.2 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการทดลองด้วยแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 μsขั้วลบกรณีส่องแสงUV และไม่ส่องแสงUV มีค่าประมาณ 0.6-1.0 % ใกล้เคียงกัน ส่วนในกรณีของแรงดันกระแสสลับแม้ว่าค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานกรณีส่องแสงUV และไม่ส่องแสงUV จะมีแนวโน้มที่แตกต่างกันแต่ทั้งสองกรณีมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับการทดลองด้วยแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 μs

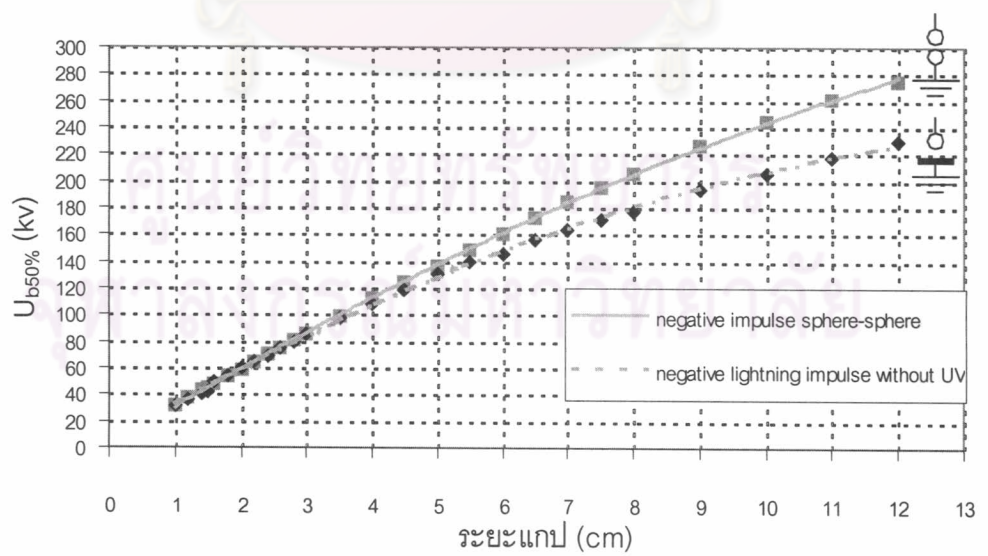
4.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง

รูปที่ 4.4 และรูปที่ 4.5 แสดงการเปรียบเทียบแรงดันเบรกดาวน์ของอิเล็กโตรดทรงกลม-ระนาบที่ใช้ในการทดลองกับแรงดันเบรกดาวน์ของแกปทรงกลมมาตรฐานที่ให้ไว้ในตารางของ IEC52 จะเห็นได้ว่าเป็นไปตามทฤษฎีคือ รูปลักษณะอิเล็กโตรดจะมีผลต่อแรงดันเบรกดาวน์ มากหรือน้อยขึ้นกับรูปทรงทางเรขาคณิตของอิเล็กโตรดเอง [3],[4],[11] ตามสมการ $U_b = E_b \cdot d \cdot \eta^*$ โดยจะสังเกตุเห็นได้ว่าแรงดันเบรกดาวน์ของอิเล็กโตรดทรงกลม-ระนาบมีค่าต่ำกว่าแรงดันเบรกดาวน์ของแกปทรงกลมมาตรฐานเสมอ เนื่องจากความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดของอิเล็กโตรดทรงกลมระนาบมีค่ามากกว่าในกรณีของแกปทรงกลมมาตรฐานทำให้แฟกเตอร์สนามไฟฟ้าลดลง แต่ที่ระยะแกปต่ำกว่า 5 ซ.ม. แรงดันเบรกดาวน์ของอิเล็กโตรดทั้งสองมีค่าประมาณเท่ากัน เนื่องมาจากค่าแฟกเตอร์สนามไฟฟ้ามีค่าใกล้เคียงกัน เพื่อให้การอธิบายมีความชัดเจนมากขึ้นได้ใช้โปรแกรม Maxwell 2D Simulation ทำการจำลองลักษณะสนามไฟฟ้า ของแกปทรงกลมมาตรฐานเทียบกับ อิเล็กโตรดทรงกลม-ระนาบ ที่ระยะแกป 10 ซ.ม. และ 5 ซ.ม. ดังแสดงในรูปที่ 4.6 ถึง 4.9

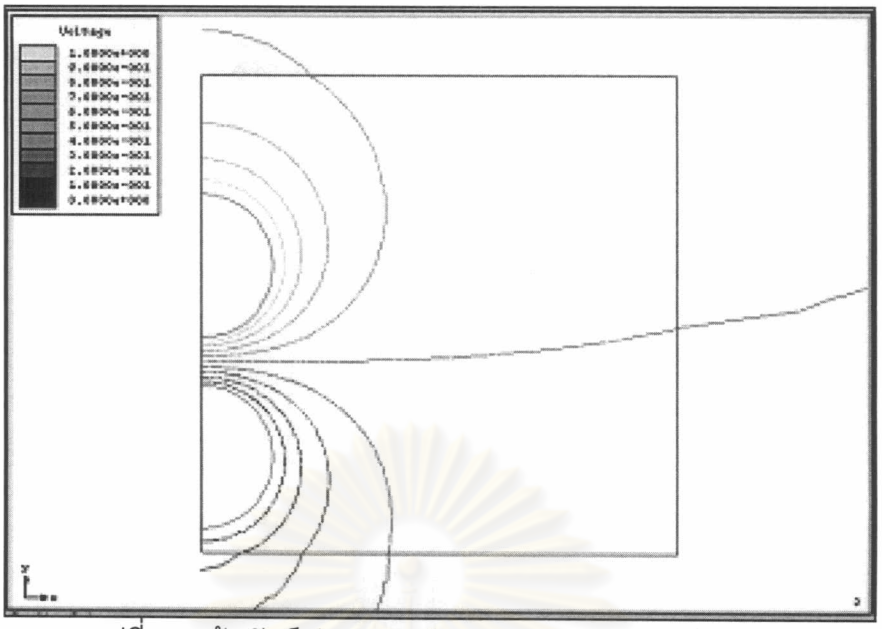
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.4 แรงดันเบรกดาวน์อิมพัลส์ 1.2/50 μsขั้วบวกสำหรับรูปทรงอิเล็กโตรดแตกต่างกัน

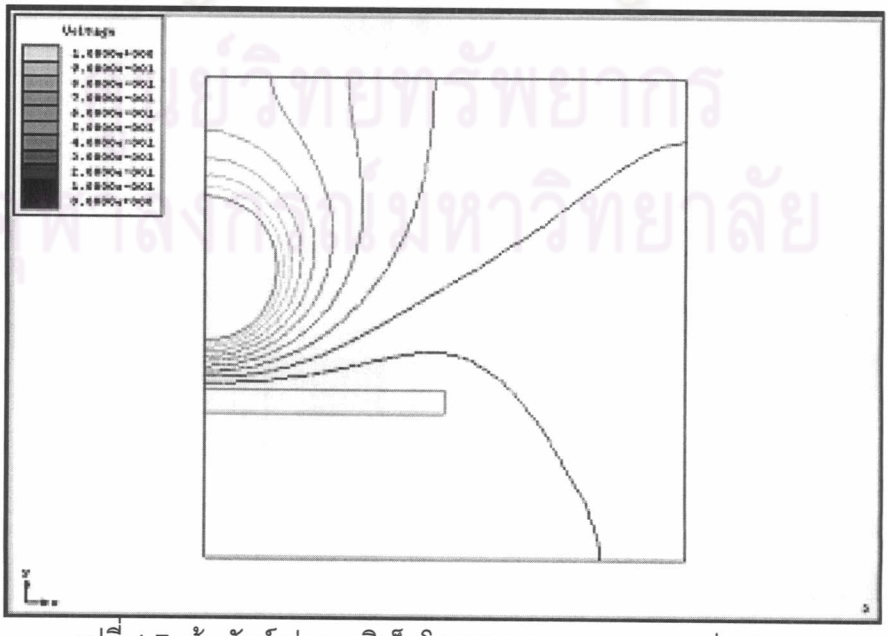


รูปที่ 4.5 แรงดันเบรกดาวน์อิมพัลส์ 1.2/50 μsขั้วลบสำหรับรูปทรงอิเล็กโตรดแตกต่างกัน

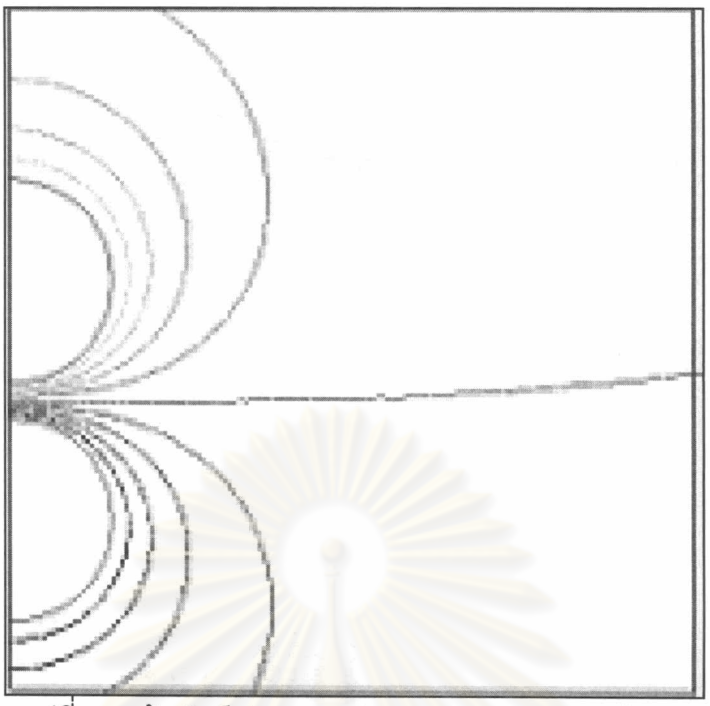


รูปที่ 4.6 เส้นศักย์เท่าของแกปทรงกลมมาตรฐานแกป 10 ซ.ม.

จากรูปที่ 4.6 สังเกตเห็นว่าเส้นศักย์เท่าแต่ละเส้นมีระยะห่างใกล้เคียงกันดังนั้นสนามไฟฟ้าจากสมการ $E = U/d$ จึงใกล้เคียงกัน ทำให้สนามไฟฟ้าค่อนข้างสม่ำเสมอ แต่ในรูปที่ 4.7 สำหรับกรณีอิเล็กโตรดทรงกลม-ระนาบ จะสังเกตเห็นได้ว่าเส้นศักย์เท่าแต่ละเส้นจะมีระยะห่างไม่เท่ากันโดยมีระยะห่างมากขึ้นเมื่อไกลจากผิวทรงกลมมากขึ้นดังนั้นผิวของทรงกลมจึงมีค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงกว่าเมื่อเทียบกับบริเวณอื่นทำให้ $\eta^* = E_{av}/E_{max}$ มีขนาดลดลง แรงดันเบรกดาวน์ $U_b = E_b \cdot d \cdot \eta^*$ ของอิเล็กโตรดทรงกลม-ระนาบจึงต่ำกว่าอิเล็กโตรดทรงกลม-ทรงกลม ที่ระยะแกป 10 ซ.ม.

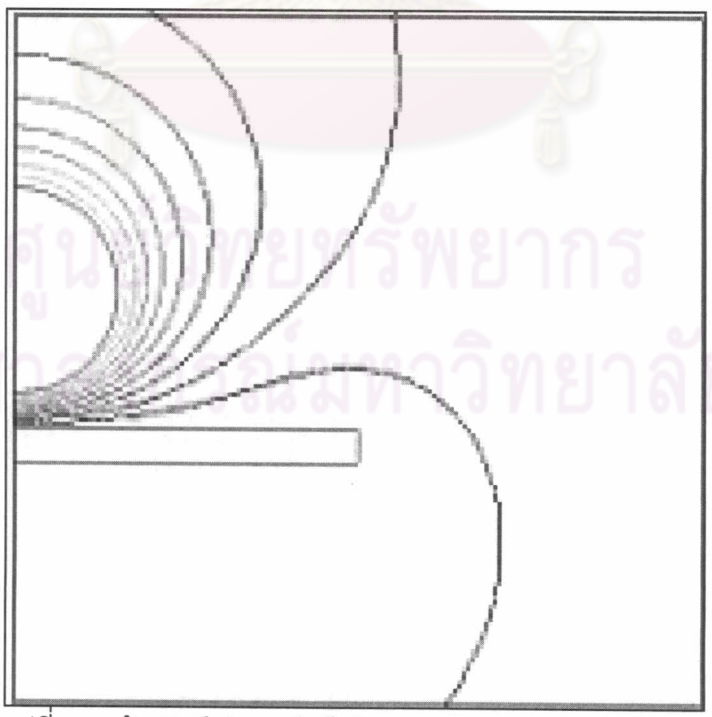


รูปที่ 4.7 เส้นศักย์เท่าของอิเล็กโตรดทรงกลม-ระนาบแกป 10 ซ.ม.

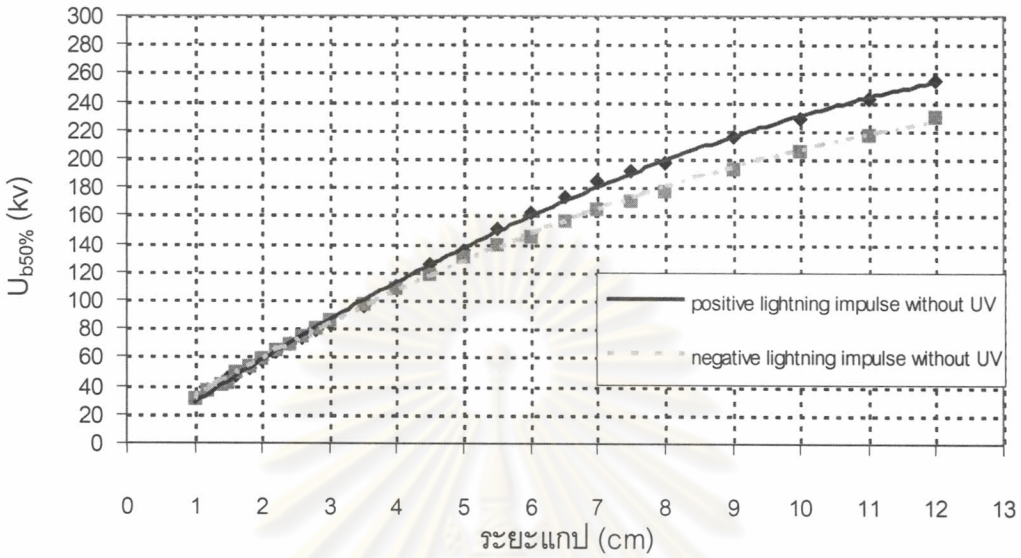


รูปที่ 4.8 เส้นศักย์เท่าของแกปทรงกลมมาตรฐานแกป 5 ซ.ม.

ส่วนที่ระยะ 5 ซ.ม.ดังที่แสดงในรูป 4.8 และ 4.9 พบว่าเส้นศักย์เท่ามีระยะห่างใกล้เคียงกันสนามไฟฟ้าจึงใกล้เคียงกันแรงดันเบรกดาวน์ของทั้งแกปทรงกลมมาตรฐาน และอิเล็กโตรดทรงกลม-ระนาบจึงใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.9 เส้นศักย์เท่าของอิเล็กโตรดทรงกลม-ระนาบแกป 5 ซ.ม.

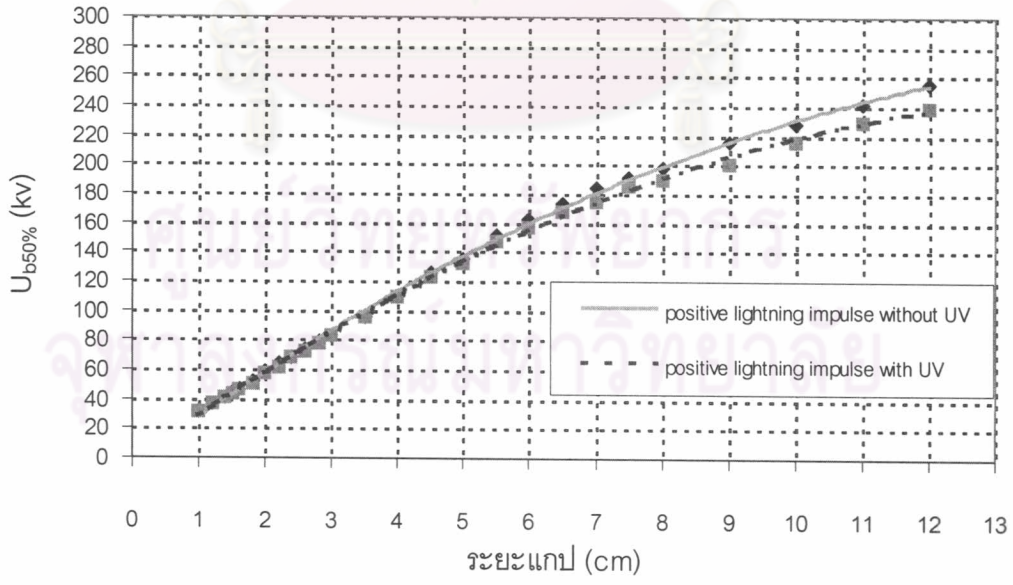


รูปที่ 4.10 แรงดันเบรกดาวน์อิมพัลส์ 1.2/50 μsขั้วบวกและขั้วลบของอิเล็กโตรดทรงกลม-ระนาบ

รูปที่ 4.10 แสดงถึงผลของขั้วของแรงดันอิมพัลส์ที่มีต่อค่าแรงดันเบรกดาวน์ โดยมีลักษณะเช่นเดียวกับในกรณีของแกปทรงกลมมาตรฐาน คือเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 μsขั้วลบที่ทรงกลมด้านบนจะเกิดเบรกดาวน์ที่แรงดันต่ำกว่าเมื่อป้อนค่าแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 μsขั้วบวกที่ทรงกลมด้านบน ความแตกต่างนี้สามารถอธิบายด้วยทฤษฎีสตรีมเมอร์ที่เสนอโดย Rather ซึ่งกล่าวว่าสตรีมเมอร์จะเกิดขึ้นเมื่ออะวาลานช์มีจำนวนอิเล็กตรอนหรือไอออนบวกตามกระบวนการไอออไนเซชั่นประมาณ 10^8 โดยไม่ขึ้นอยู่กับชนิดของก๊าซ และระดับความสม่ำเสมอของสนามไฟฟ้าหรือกล่าวได้ว่าขนาดอะวาลานช์วิกฤตจะเกิดขึ้นเมื่อจำนวนอิเล็กตรอนในอะวาลานช์มีค่าประมาณ 10^8 จากสมการแรงดันเบรกดาวน์ สมการที่ 2.23

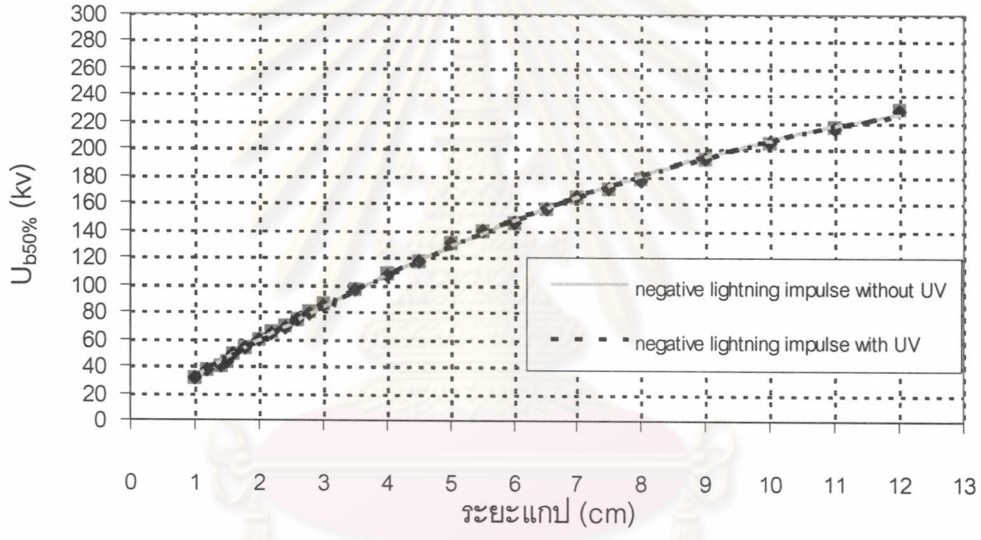
ในกรณีจ่ายแรงดันอิมพัลส์ 1.2/50 μsขั้วลบที่ทรงกลม ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงที่ผิวทรงกลมจะทำให้อิเล็กตรอนเริ่มต้นที่บริเวณผิวทรงกลมเริ่มกระบวนการเกิดไอออไนเซชั่น (กระบวนการ α) ขึ้นในอากาศก่อตัวเป็นอะวาลานช์ขึ้น ในอะวาลานช์เริ่มต้นนี้เองจะมีการไอออไนเซชั่นจำนวนมากจากพลังงานโฟตอน ที่เรียกว่าโฟตอนไอออไนเซชั่นของก๊าซโมเลกุลที่ส่วนหน้าของอะวาลานช์ กลุ่มประจุค้างของไอออนที่ส่วนหัวของอะวาลานช์ทำให้สนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้น และทำให้เกิดไอออไนเซชั่นขึ้นอย่างมาก ไอออนบวกเคลื่อนที่ได้ช้าเกือบจะเรียกได้ว่าอยู่กับที่ เมื่อเทียบกับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ปล่อยให้ไอออนบวกอยู่เบื้องหลังรวมกันเป็นหมอกประจุค้าง

เมื่ออะวาลานช์มีจำนวนอิเล็กตรอนหรือไอออนบวกตามกระบวนการชนไอออไนเซชั่นประมาณ 10^8 จะเกิดเป็นสตรีมเมอร์เบรกดาวน์ตามมา แต่การที่ขั้วลบมีแรงดันเบรกดาวน์ต่ำกว่าขั้วบวกเพราะอิเล็กตรอนเริ่มต้นสร้างอะวาลานช์วิกฤตอยู่บริเวณผิวทรงกลมซึ่งเป็นบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง ทำให้มีโอกาสเกิดไอออไนเซชั่นจากการชนได้มาก จึงสามารถสร้างอะวาลานช์วิกฤตของอิเล็กตรอนได้ง่าย ค่าแรงดันเบรกดาวน์จึงต่ำ ส่วนในขั้วบวกอิเล็กตรอนเริ่มต้นจะต้องเริ่มในแกปที่ระยะห่างจากผิวอิเล็กโตรดระนาบไปตามแนวที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง อย่างน้อยที่สุดเท่ากับระยะวิกฤต x_c เพื่อให้อิเล็กตรอนมีโอกาสสร้างอิเล็กตรอนอิสระเพิ่มทวีคูณถึงจำนวนวิกฤตได้ ซึ่งขนาดของอะวาลานช์วิกฤตอย่างน้อยจะต้องเท่ากับ x_c ตามเงื่อนไขการเกิดเบรกดาวน์ของทฤษฎีสตรีมเมอร์ แต่ที่ระยะ x_c เป็นบริเวณที่สนามไฟฟ้ามีความเครียดต่ำ โอกาสที่จะเกิดไอออไนเซชั่นจึงน้อยกว่าในขั้วลบ ดังนั้นแรงดันเบรกดาวน์ในขั้วลบจึงต่ำกว่าขั้วบวก นอกจากนั้นโอกาสที่อิเล็กตรอนเริ่มต้นจะไปปรากฏที่ตำแหน่งที่เหมาะสมเพื่อเริ่มกระบวนการไอออไนเซชั่นก็มีน้อยเพราะอิเล็กตรอนเริ่มต้นอาจรวมตัวกับ O_2 หรือ น้ำในอากาศเป็นไอออนลบซึ่งไอออไนซ์ก๊าซโมเลกุลได้ยาก เหตุการณ์ข้างต้นเกิดขึ้นเฉพาะแกปที่มีขนาดกว้างมากกว่า 5 ซ.ม. ขึ้นไป ส่วนที่แกปตั้วแต่ 5 ซ.ม.ลงมาแรงดันเบรกดาวน์ของทั้งสองขั้วใกล้เคียงกันเนื่องจากแกปที่แคบลงอิเล็กตรอนเริ่มต้นเกิดณ.ตำแหน่งที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.11 ผลการเปรียบเทียบแรงดันเบรกดาวน์อิมพัลส์ 1.2/50 μsขั้วบวกของอิเล็กโตรดทรงกลม-ระนาบกรณีไม่ส่องแสงUV กับกรณีส่องแสงUV

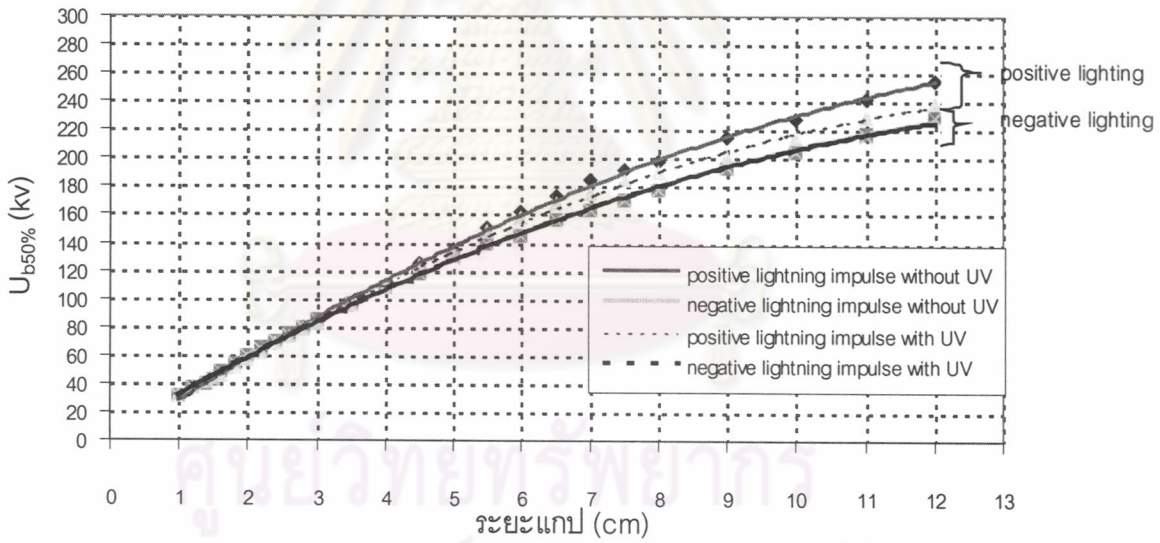
รูปที่ 4.11 แสดงแรงดันเบรกดาวน์อิมพัลส์ 1.2/50 μsขั้วบวกของอิเล็กโตรดทรงกลม-ระนาบกรณีไม่ส่องแสงUV กับกรณีส่องแสงUV จะเห็นได้ว่าเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่าขั้วบวกและส่องแสงUV ไปที่ผิวของทรงกลม แรงดันเบรกดาวน์จะลดลง สืบเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของอิเล็กตรอนเริ่มต้นในแกปอากาศนั่นเอง อิเล็กตรอนที่เพิ่มขึ้นเหล่านี้มาจากโฟตอนของแสงUV ชนโมเลกุลของอากาศทำให้โมเลกุลของอากาศไอออไนซ์ ข้อกำหนดโดยทั่วไปของแสงUV คือต้องมีความยาวคลื่นในช่วง 180-380 nm โดยพลังงานของความยาวคลื่นแสงที่ใช้แยกอิเล็กตรอนหนึ่งตัวคือ $\lambda \cdot U_a \leq 1.245 \times 10^{-5}$ Vm. [4]



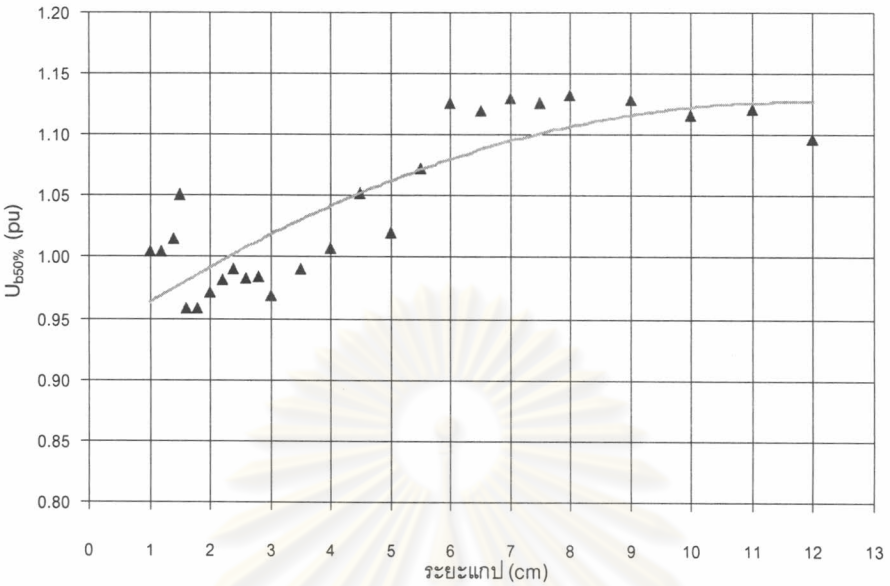
รูปที่ 4.12 ผลการเปรียบเทียบแรงดันเบรกดาวน์อิมพัลส์ 1.2/50 μsขั้วลบของอิเล็กโตรดทรงกลม-ระนาบกรณีไม่ส่องแสงUV กับกรณีส่องแสงUV

ในรูปที่ 4.12 แสดงแรงดันเบรกดาวน์อิมพัลส์ 1.2/50 μsขั้วลบของอิเล็กโตรดทรงกลม-ระนาบกรณีไม่ส่องแสงUV กับกรณีส่องแสงUV จะเห็นได้ว่าแสงUV ไม่มีผลต่อแรงดันเบรกดาวน์ที่เกิดขึ้น เนื่องมาจากอิเล็กตรอนเริ่มต้นในกรณีขั้วลบเกิดขึ้นบริเวณใกล้ผิวทรงกลมที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูง

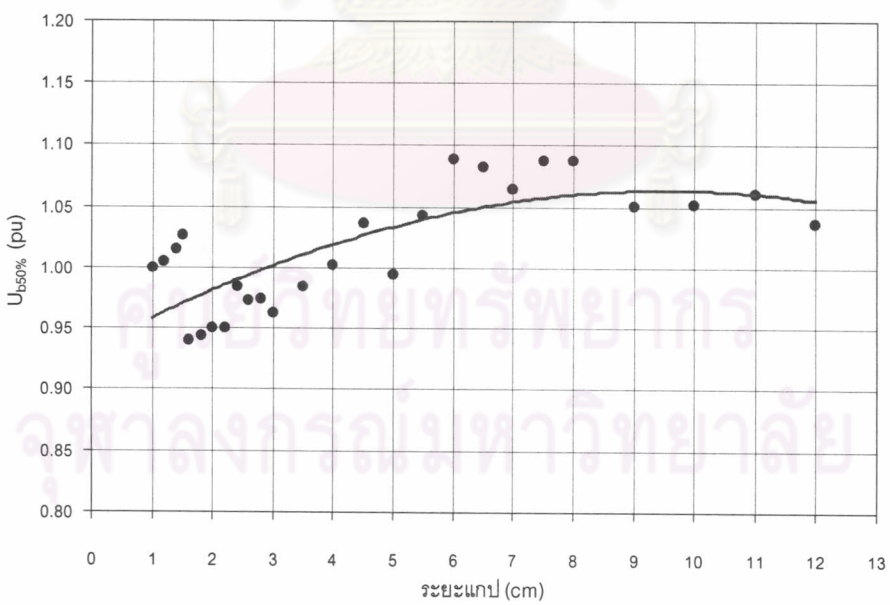
รูปที่ 4.13 แสดงถึงความเป็นไปได้ในการรวมตารางแรงดันเบรกดาวน์อิมพัลส์ 1.2/50 μs ของอิเล็กโตรดทรงกลม-ระนาบ จากวัตถุประสงค์ของเราคือเมื่อป้อนแรงดันอิมพัลส์ขั้วบวกพร้อมกับส่องแสงUV ไปที่ผิวของทรงกลมแรงดันเบรกดาวน์ที่ได้มีโอกาศที่จะเท่ากับแรงดันอิมพัลส์ขั้วลบ โดยจะเห็นได้ว่าแรงดันเบรกดาวน์ขั้วบวกกรณีส่องแสงUV ที่เกิดขึ้นมีค่าลดลงจริงแต่ยังลดลงไม่เท่าหรือใกล้เคียงกับแรงดันเบรกดาวน์ขั้วลบ สาเหตุที่เกิดขึ้นน่าจะเนื่องมาจากปริมาณการเพิ่มอิเล็กตรอนเริ่มต้นยังไม่พอเพียง ความแตกต่างของแรงดันเบรกดาวน์อิมพัลส์ขั้วบวกกรณีส่องแสง UV และไม่ส่องแสงUV กับแรงดันเบรกดาวน์อิมพัลส์ขั้วลบ และ แรงดันเบรกดาวน์ เมื่อให้แรงดันเบรกดาวน์อิมพัลส์ขั้วลบเป็นค่าอ้างอิงในระบบเปอร์ยูนิตแสดงในรูปที่ 4.14 และรูปที่ 4.15 ซึ่งจะเห็นว่าความแตกต่างระหว่างแรงดันเบรกดาวน์อิมพัลส์ขั้วบวกและขั้วลบที่แกปกว้างจะลดลงจาก 10% เหลือเป็น 5% เมื่อมีการส่องแสงUV ไปที่ทรงกลม



รูปที่ 4.13 ผลการเปรียบเทียบแรงดันเบรกดาวน์อิมพัลส์ 1.2/50 μsทั้งขั้วบวกและขั้วลบของอิเล็กโตรดทรงกลม-ระนาบกรณีไม่ส่องแสงUV และกรณีส่องแสงUV



รูปที่ 4.14 แรงดันเบรกดาวน์อิมพัลส์ขั้วบวกกรณีไม่ส่องแสงUV
เทียบกับแรงดันเบรกดาวน์อิมพัลส์ขั้วลบในระบบเปอร์ยูนิต

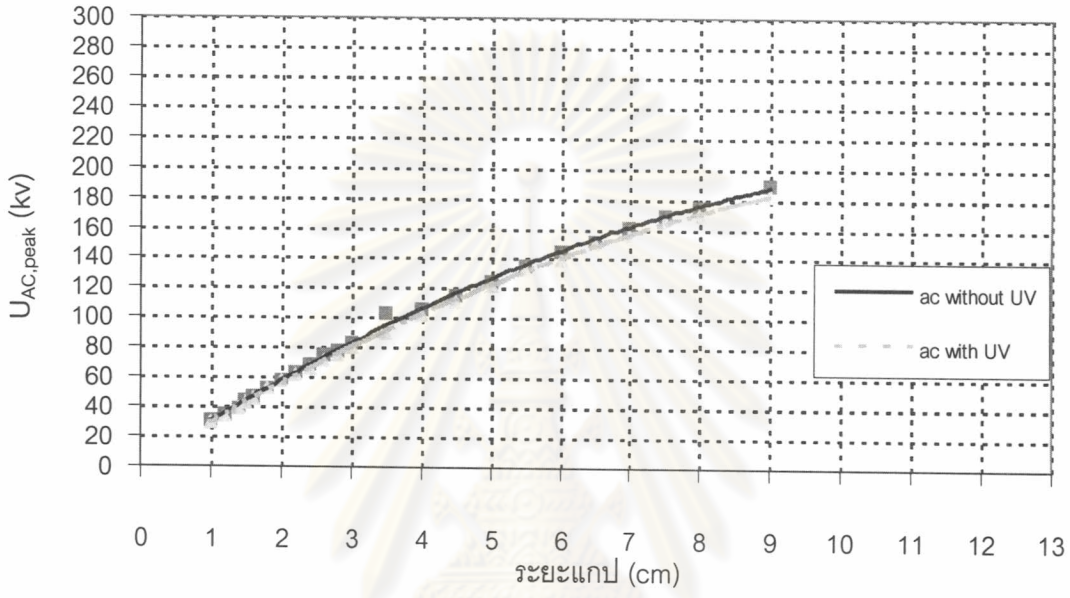


รูปที่ 4.15 แรงดันเบรกดาวน์อิมพัลส์ขั้วบวกกรณีส่องแสงUV
เทียบกับแรงดันเบรกดาวน์อิมพัลส์ขั้วลบในระบบเปอร์ยูนิต

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I21941282

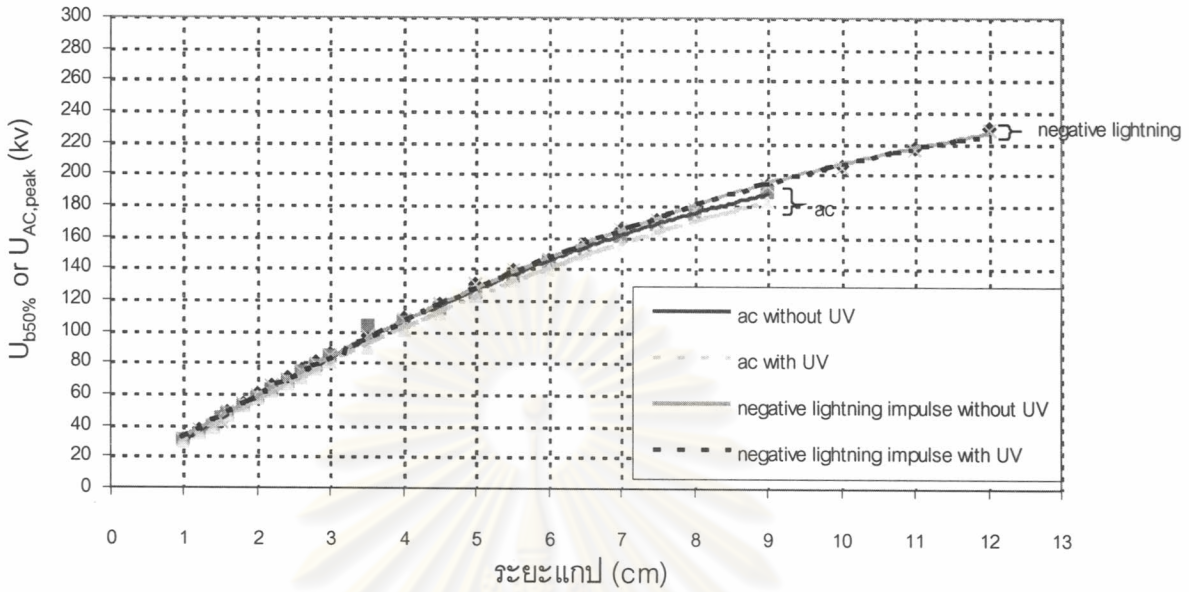
รูปที่ 4.16 แสดงแรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับในกรณีไม่ส่องแสงUV และกรณีส่องแสง UV จะเห็นได้ว่ากรณีส่องแสงUV มีแรงดันเบรกดาวน์ในช่วงแกปกว้างๆต่ำกว่ากรณีไม่ส่องแสงUV เล็กน้อยเท่านั้น



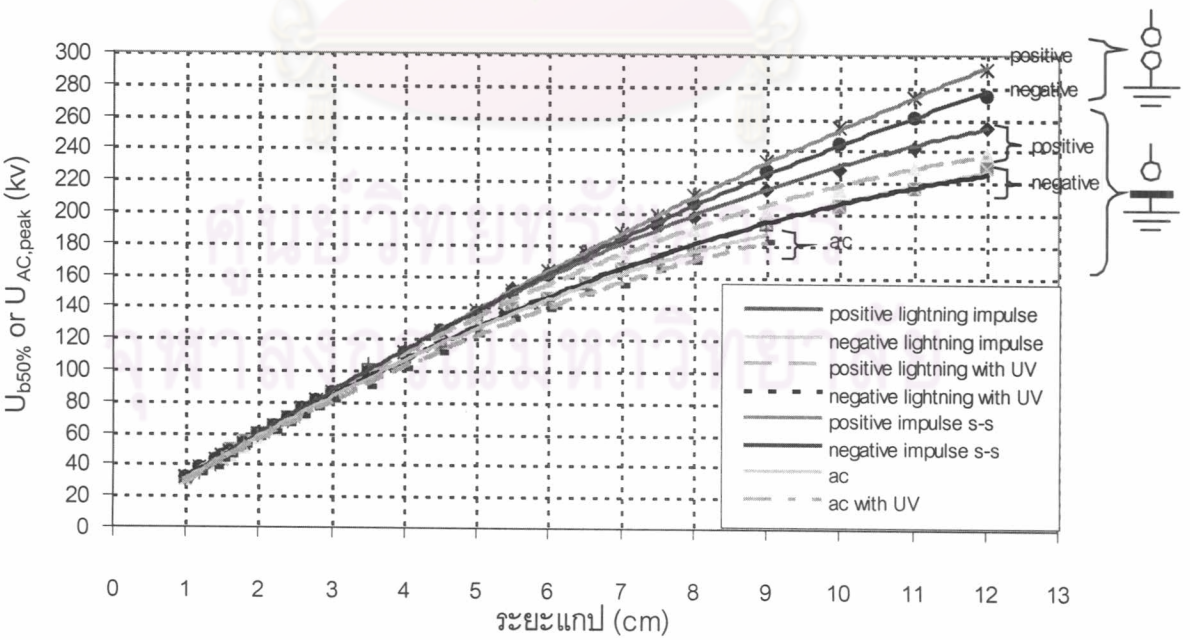
รูปที่ 4.16 ผลการเปรียบเทียบแรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับของ
อิเล็กโตรดทรงกลม-ระนาบกรณีไม่ส่องแสงUV กับกรณีส่องแสงUV

รูปที่ 4.17 แสดงแรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับเปรียบเทียบกับแรงดันเบรกดาวน์อิมพัลส์ขั้วลบ จากรูปจะเห็นได้ว่าแรงดันเบรกดาวน์มีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งเมื่อส่องแสงUV และไม่ส่องแสง UV ซึ่งผลที่ได้คล้ายกับตารางที่ 2 ของ IEC52 ที่ค่าแรงดันในตารางนี้ใช้ได้กับแรงดันเบรกดาวน์อิมพัลส์ขั้วลบ, แรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับ และ แรงดันเบรกดาวน์กระแสตรง

ผลการทดลองหาแรงดันเบรกดาวน์ของอิเล็กโตรดทรงกลม-ระนาบที่ได้จากการทดลองทั้งหมด เทียบกับแรงดันเบรกดาวน์ของแกปทรงกลมมาตรฐานตาม IEC52 ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.17 ผลการเปรียบเทียบแรงดันเบรกดาวน์กระแสสลับกับแรงดันเบรกดาวน์อิมพัลส์ขั้วลบของอิเล็กโตรดทรงกลม-ระนาบกรณีไม่ส่องแสงUV และกรณีส่องแสงUV



รูปที่ 4.18 แรงดันเบรกดาวน์ของอิเล็กโตรดทรงกลม-ระนาบที่ได้จากการทดลองทั้งหมด เมื่อเทียบกับแรงดันเบรกดาวน์ของแกปทรงกลมมาตรฐาน