



## บทที่ 6

### การหาความกว้างในการเคลือบสารกึ่งตัวนำที่พอเหมาะ

ในบทนี้ จะกล่าวถึงการคำนวณหาแรงดันกระจาย และสนามไฟฟ้าบนผิวลูกถ้วยที่มีความกว้างของสารกึ่งตัวนำต่าง ๆ กัน เพื่อคำนวณหาแรงดันเริ่มต้นเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ และทำการทดลองหาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าที่สำคัญของลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน ได้แก่ ค่าแรงดันวาบไฟตามผิวแห่งความถี่ 50 Hz, ค่าแรงดันวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤต และค่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด เพื่อนำมาหาความกว้างในการเคลือบสารกึ่งตัวนำที่เหมาะสม

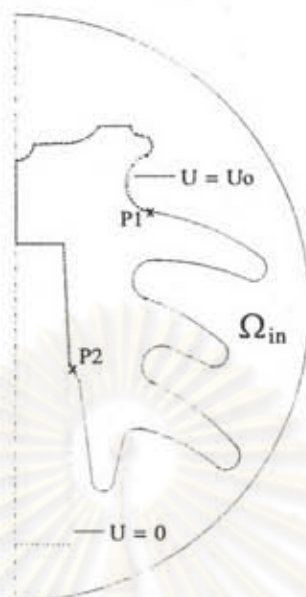
#### 6.1 ภาคการคำนวณลักษณะทางไฟฟ้าของลูกถ้วยพอร์ซเลน

ลูกถ้วยฉนวนที่จะใช้ในการคำนวณหาสนามไฟฟ้าและแรงดันเริ่มต้นเป็นลูกถ้วยพอร์ซเลนก้านตรง แบบ 56-2 ตามมาตรฐานมอก. 279-2521[11] ดังแสดงรายละเอียดในหัวข้อ 2.4

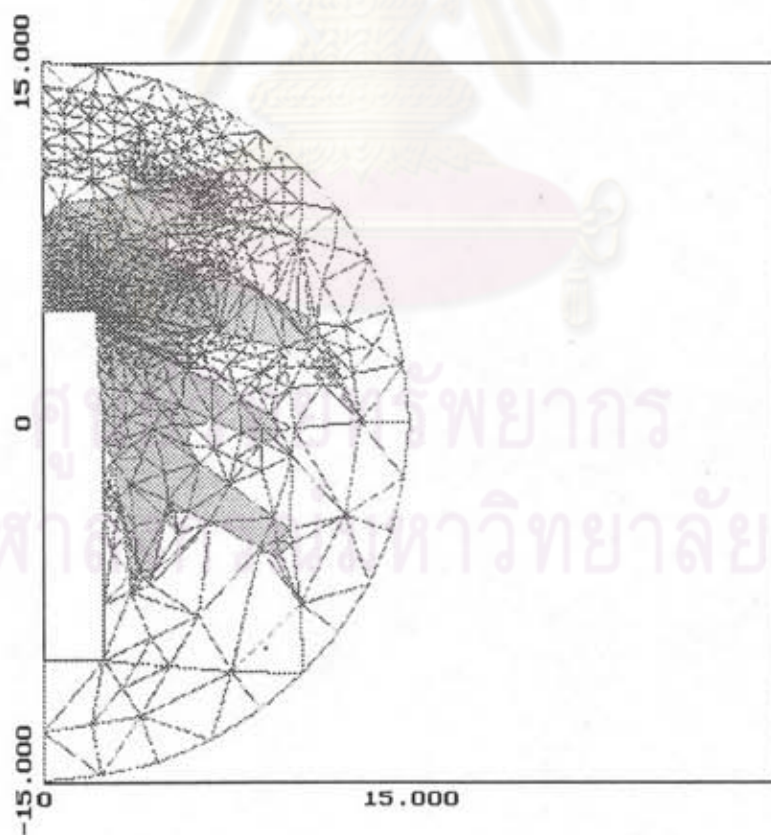
การคำนวณหาสนามไฟฟ้าจะเป็นการคำนวณบนบริเวณเปิด โดยมีเงื่อนไขขอบเขตคือ อิเล็กโทรดแรงสูง, ก้านโลหะที่ต่อลงดิน และขอบเขตที่ระยะอนันต์ โดยลูกถ้วยตัวอย่างที่จะนำมาคำนวณนั้นมีความกว้างของสารเคลือบกึ่งตัวนำเท่ากับ 0, 25, 50, 75 และ 100 เปอร์เซ็นต์ของความกว้างของปีกบนของลูกถ้วยฉนวน ซึ่งความกว้าง 0 เปอร์เซ็นต์หมายถึงลูกถ้วยไม่มีการเคลือบสารกึ่งตัวนำ และ 100 เปอร์เซ็นต์หมายถึงลูกถ้วยฉนวนมีการเคลือบสารกึ่งตัวนำเต็มพื้นบนของปีกบนสุด ลูกถ้วยตัวอย่างได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.3

##### 6.1.1 การคำนวณหาสนามไฟฟ้าบนผิวลูกถ้วยพอร์ซเลน

การคำนวณหาสนามไฟฟ้าบนผิวลูกถ้วยฉนวนด้วยวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์นั้น ในที่นี้จะใช้การแปลงทางคณิตศาสตร์แบบภายนอกสู่ภายใน ซึ่งได้แสดงไว้ในบทที่ 3 หัวข้อ 3.8.4 โดย  $\Omega_m$  จะประกอบด้วยเนื้อพอร์ซเลน อากาศและสารกึ่งตัวนำ เป็นบริเวณที่ต้องการทราบค่าศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้า ส่วน  $\Omega_{ex}$  เป็นบริเวณที่ไม่สนใจค่าศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้า ประกอบด้วยอากาศเพียงอย่างเดียวและจะมีการแปลงเป็น  $\Omega_r$  ต่อไป



รูปที่ 6.1 ปัญหาถูกด้วยฉนวนและเงื่อนไขขอบเขต



รูปที่ 6.2 การแบ่งอีลีเมนต์ในบริเวณ  $\Omega_{in}$

เนื่องจากลูกถ้วยมีลักษณะสมมาตรรอบแกนหมุน ดังนั้นการคำนวณจึงทำแบบ 2 มิติ บนระนาบ  $r-z$  โดยอาศัยเงื่อนไขพลังงานของระบบต่ำที่สุด คำนวณการพลังงาน[3]

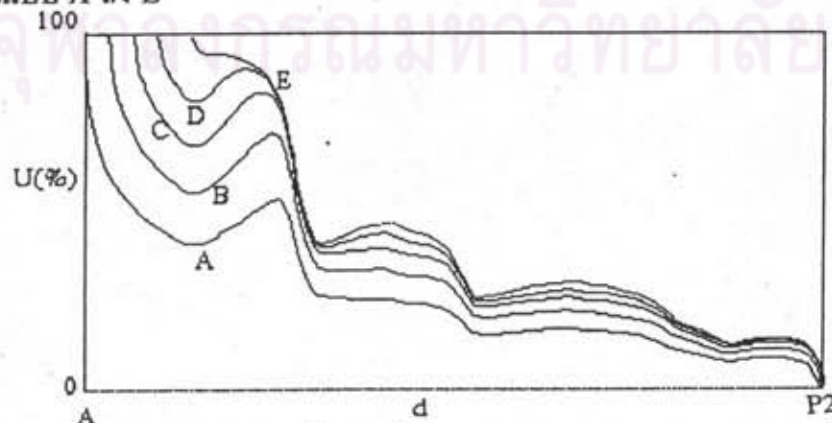
$$W = \int_{\Omega} \frac{\sigma}{2} (\nabla \phi)^2 (\nabla \phi) dx + j\omega \int_{\Omega} \frac{\epsilon}{2} (\nabla \phi)^2 (\nabla \phi) dx \quad (6.1)$$

การคำนวณหาแรงดันกระจายและสนามไฟฟ้าบนผิวลูกถ้วย จะให้แรงดันที่อิเล็กโทรดแรงสูงเป็นแรงดันกระแสสลับความถี่ 50 Hz ขนาด 22 kV ซึ่งเป็นแรงดันระบบของลูกถ้วย ตัวอย่าง รูปที่ 6.2 แสดงการแบ่งอิลีเมนต์ในบริเวณ  $\Omega_m$  ที่ได้หลังการคำนวณ และแบ่งอิลีเมนต์เพิ่มแล้ว ซึ่งได้ใช้อิลีเมนต์มากกว่า 2800 อิลีเมนต์ในการคำนวณ สำหรับรายละเอียดของขั้นตอนการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์อิลีเมนต์และการแบ่งอิลีเมนต์ย่อยเพิ่มนั้น ได้แสดงไว้ใน ภาคผนวก ก.

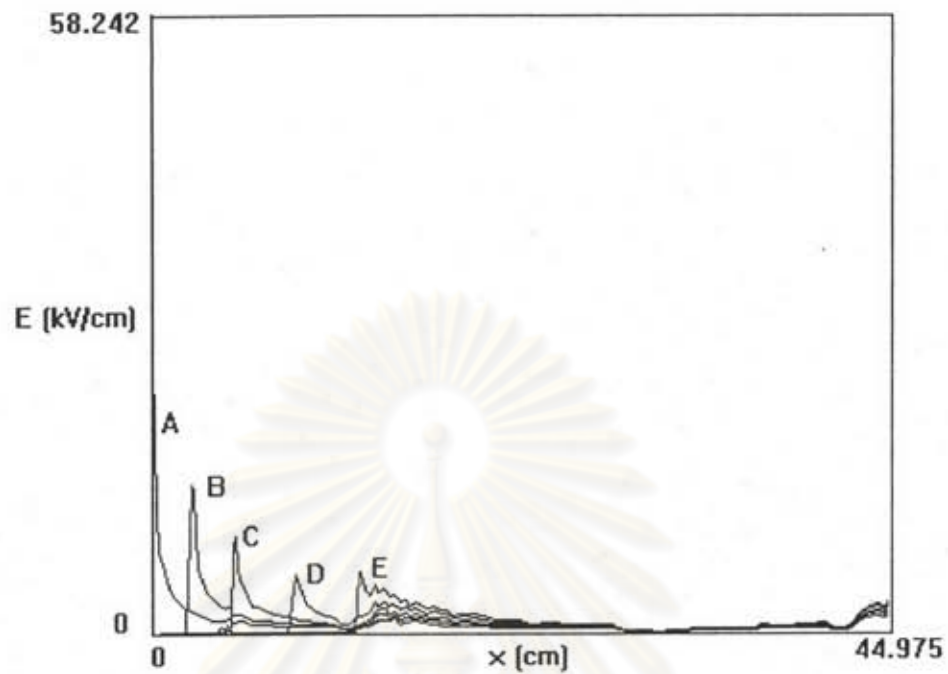
### 6.1.2 ผลการคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าบนผิวลูกถ้วยพอร์ซเลน

การเกิดควาบไฟตามผิวของลูกถ้วย โดยธรรมชาติจะเกิดควาบไฟตามผิวตามแนวที่ระยะสั้นที่สุดระหว่างอิเล็กโทรดแรงสูงกับก้านโลหะที่ต่อลงดิน ซึ่งเรียกว่าระยะอาร์ก[11]

ฉะนั้นในการคำนวณหาแรงดันเริ่มต้นนั้น แนวที่สนใจก็คือแนวที่จะเกิดอาร์กนั่นเอง ดังนั้นในที่นี้จึงได้แสดงผลการคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าตามแนวเส้นที่สั้นที่สุดผ่านอากาศที่อยู่รอบผิวลูกถ้วย ดังรูปที่ 6.3 เป็นการเปรียบเทียบแรงดันกระจายตามแนวอาร์กของลูกถ้วยฉนวนที่มีความกว้างของสารเคลือบกึ่งตัวนำ แบบ A, B, C, D และ E ที่มีความกว้างของสารกึ่งตัวนำเท่ากับ 0, 25, 50, 75 และ 100 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ รูปที่ 6.4 เป็นการเปรียบเทียบความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวอาร์กของลูกถ้วย และตารางที่ 6.1 แสดงค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นบนผิวลูกถ้วยที่ความกว้างของสารกึ่งตัวนำต่าง ๆ รูปที่ 6.5 ถึง 6.9 เป็นเส้นศักย์ไฟฟ้าทั่วของลูกถ้วยแบบ A ถึง E



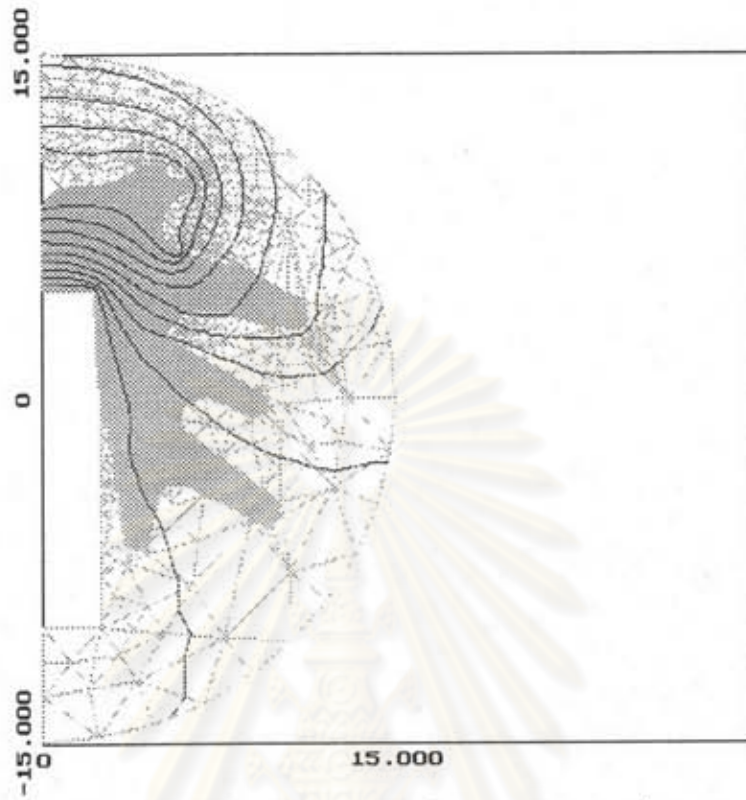
A, B, C, D, E = ความกว้างสารกึ่งตัวนำ 0, 25, 50, 75, 100% ตามลำดับ  
รูปที่ 6.3 ลักษณะแรงดันกระจายบนผิวลูกถ้วยฉนวนตามแนวอาร์ก



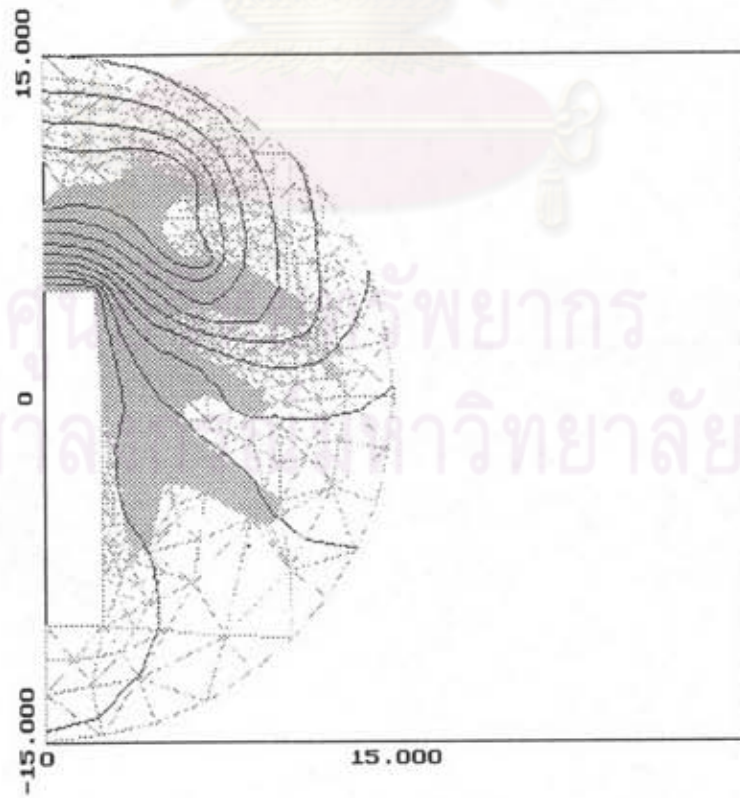
รูปที่ 6.4 ความเครียดสนามไฟฟ้าบนผิวลูกถ้วยฉนวนตามแนวอาร์ก

ตารางที่ 6.1 ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดบนผิวลูกถ้วยฉนวน

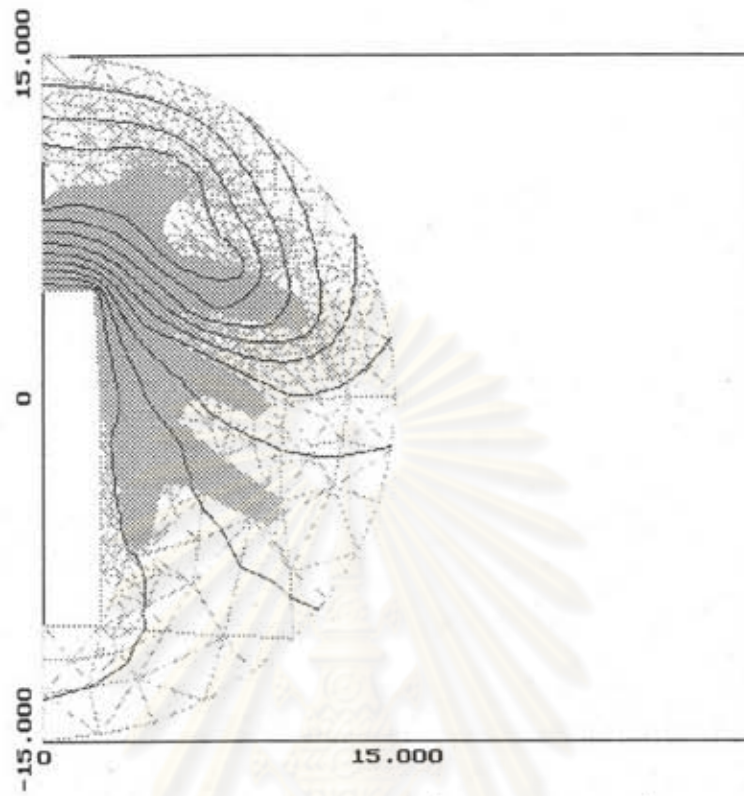
ความกว้างสารกึ่งตัวนำ ( $w$ ) (%)	ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุด ( $E_{max}$ ) (kVrms/cm)	ความแตกต่างของ $E_{max}$ (kVrms/cm)
0	58.242	--
25	14.135	-44.107
50	9.087	-5.048
75	5.475	-3.612
100	5.836	+0.361



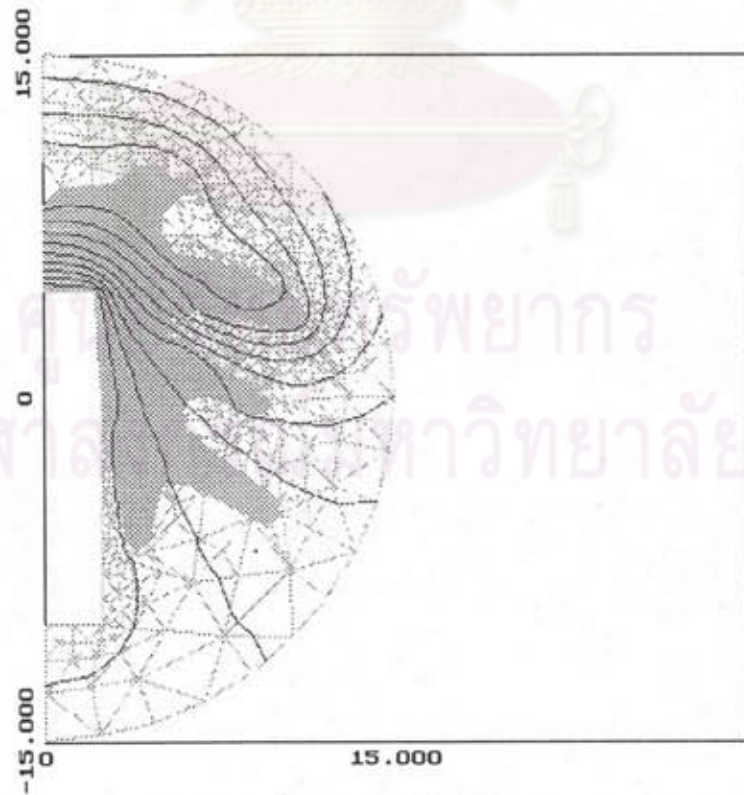
รูปที่ 6.5 เส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าของลูกถ้วยที่มีการเคลื่อนสารกึ่งตัวนำแบบ A



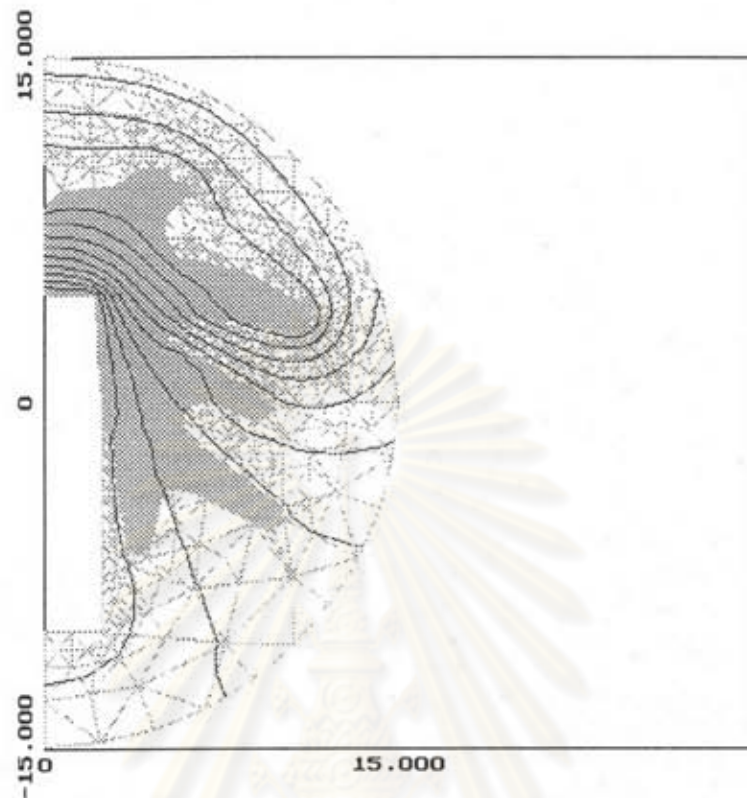
รูปที่ 6.6 เส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าของลูกถ้วยที่มีการเคลื่อนสารกึ่งตัวนำแบบ B



รูปที่ 6.7 เส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าของลูกถ้วยที่มีการเคลือบสารกึ่งตัวนำแบบ C



รูปที่ 6.8 เส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าของลูกถ้วยที่มีการเคลือบสารกึ่งตัวนำแบบ D



รูปที่ 6.9 เส้นศักย์ไฟฟ้าเท่าของลูกถ้วยที่มีการเคลือบสารกึ่งตัวนำแบบ E

### 6.1.3 การคำนวณแรงดันเริ่มต้นของลูกถ้วยพอร์ซเลน

จากรูปที่ 6.4 จะเห็นว่าลักษณะสนามไฟฟ้าบนผิวลูกถ้วยเป็นแบบไม่สม่ำเสมอสูง การคำนวณหาแรงดันเริ่มต้นจึงใช้เงื่อนไขของสตรีมเมอร์ซึ่งได้แสดงไว้ในบทที่ 3 และทำการอินทิเกรตตามแนวอาร์กของลูกถ้วย ได้ค่าแรงดันเริ่มต้นของลูกถ้วยจำนวนแสดงในตารางที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 แรงดันเริ่มต้นของลูกถ้วยจำนวนจากการคำนวณ

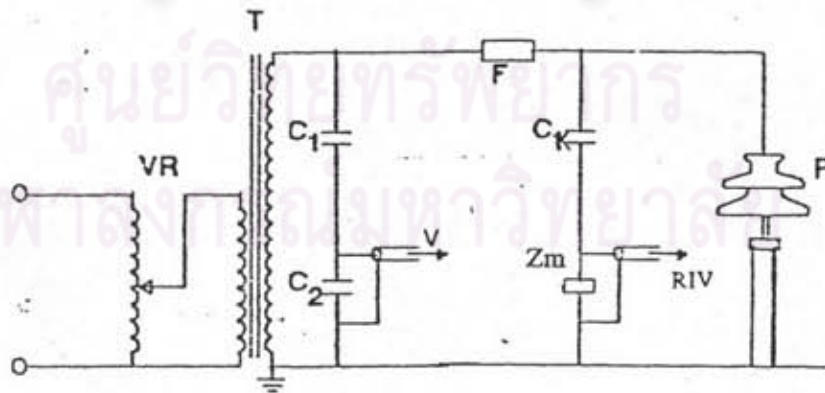
ความกว้างสารกึ่งตัวนำ (w) (%)	แรงดันเริ่มต้น (U <sub>i</sub> ) (kVrms)
0	23.702
25	55.691
50	91.217
75	119.558
100	119.727

## 6.2 ภาคการทดลองหาค่าทางไฟฟ้าของลูกถ้วยพอร์ซเลน

เพื่อเปรียบเทียบผลของการเคลือบสารกึ่งตัวนำที่มีต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนที่ได้จากการคำนวณในหัวข้อ 6.1 กับผลการทดลองจริง จึงได้ทำการทดลองหาค่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด แรงดันวาบไฟตามผิวแห้งความถี่พลังงานและแรงดันวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตของลูกถ้วยฉนวน

### 6.2.1 การทดลองหาแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด

การทดลองหาค่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดของลูกถ้วยพอร์ซเลนจะใช้ตัวอย่างลูกถ้วยฉนวนดังแสดงในหัวข้อ 2.4 ที่มีการเคลือบสารกึ่งตัวนำแบบ A ถึง E (มีความกว้างของสารกึ่งตัวนำ 0 ถึง 100 %) แบบละ 4 ลูกขึ้นไป โดยทำการทดลองด้วยแรงดันกระแสสลับความถี่ 50 Hz ที่ได้จากหม้อแปลงทดสอบ 200 kV 10 kVA วัดค่าแรงดันด้วยโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ และอ่านค่าแรงดันไฟฟ้าบริเวณคลื่นวิทยุ(RIV)จาก RIV มิเตอร์ ดังวงจรทดลองในรูปที่ 6.10 ติดตั้งลูกถ้วยตามมาตรฐาน มอก.279-2521 ดังรูปที่ 6.11 โดยบันทึกค่าคลื่นรบกวนสภาพแวดล้อม (background) ไว้ ค่อย ๆ เพิ่มแรงดันที่ป้อนให้กับลูกถ้วยฉนวน สังเกตค่า RIV เมื่อเริ่มเกิดโคโรนาขึ้น ค่า RIV ที่ได้จะมีค่าเพิ่มขึ้นจากค่าคลื่นรบกวนสภาพแวดล้อม บันทึกค่าแรงดันบนลูกถ้วยในขณะนั้นเป็นแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดของลูกถ้วย

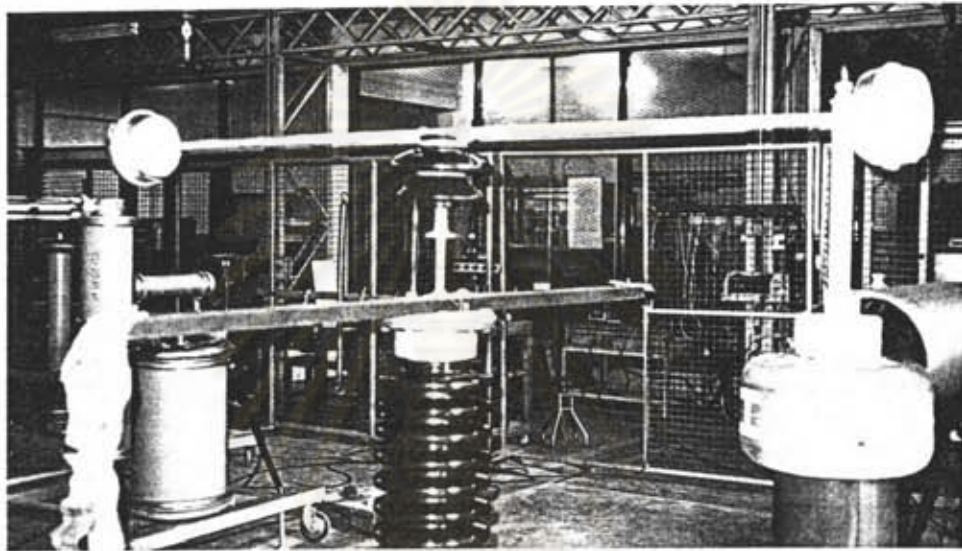


รูปที่ 6.10 วงจรทดลองสำหรับการวัด RIV

- |   |     |  |
|---|-----|--|
| T | คือ | หม้อแปลงทดสอบขนาด 200 kV, 10kVA              |
| F | คือ | อิมพีแดนซ์กรองคลื่นรบกวน (Inductance Filter) |



C1, C2	คือ	โวลเตจดีไวเดอร์
Ck	คือ	ตัวเก็บประจุคัปปลิง (Coupling Capacitor)
Zm	คือ	อิมพีแดนซ์วัด RIV (Measuring Impedance)
RIV	คือ	โคโรนามิเตอร์
P	คือ	วัตถุทดสอบ(ลูกถ้วยฉนวน)

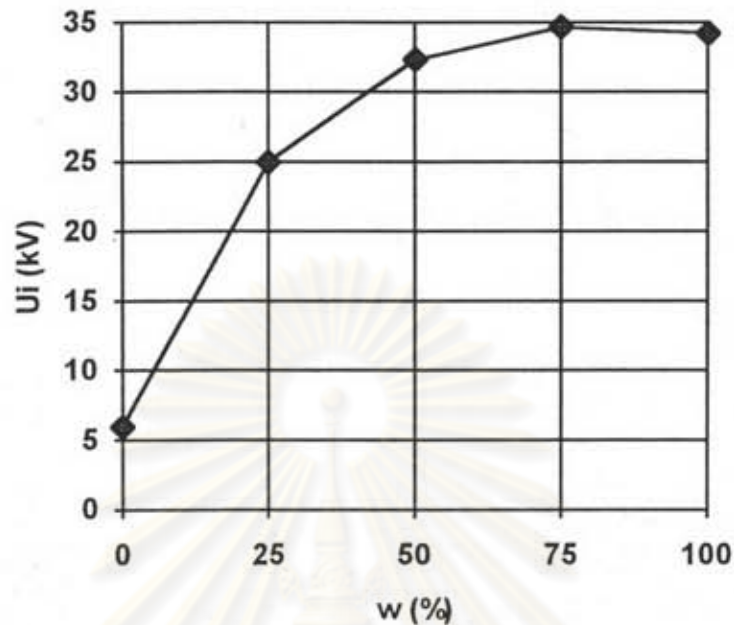


รูปที่ 6.11 การติดตั้งลูกถ้วยฉนวนในการทดสอบ RIV

ค่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดของลูกถ้วยฉนวนที่มีความกว้างของสารกึ่งตัวนำต่าง ๆ กัน จากการทดลองแสดงในตารางที่ 6.3 และรูปที่ 6.12

ตารางที่ 6.3 ผลการทดลองหาแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดที่ความกว้างต่าง ๆ ของสารเคลือบกึ่งตัวนำ

ความกว้างของสารกึ่งตัวนำ (%)	แรงดันโคโรนาเริ่มเกิด (kV)
0	6.00
25	25.00
50	32.30
75	34.70
100	34.30

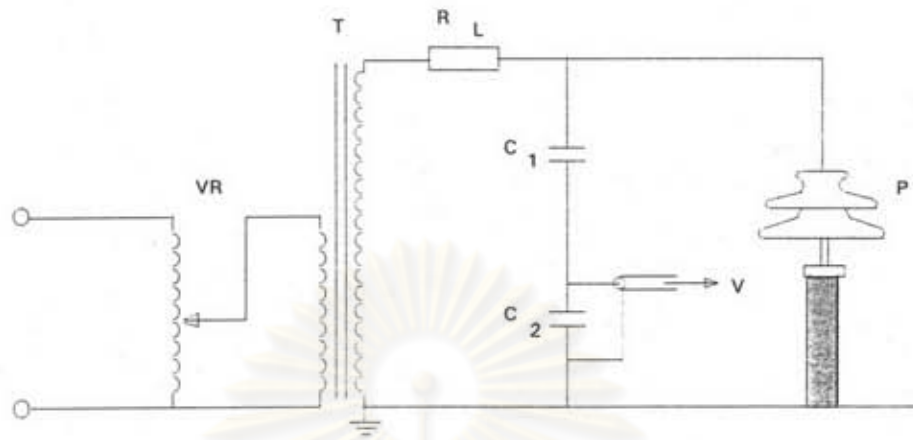


รูปที่ 6.12 กราฟแสดงแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดที่ความกว้างต่าง ๆ ของสารกึ่งตัวนำ

#### 6.2.2 การทดลองหาค่าแรงดันวابلตามผิวแห้งความถี่ 50 Hz

การทดลองหาค่าแรงดันวابلตามผิวแห้งความถี่ 50 Hz ใช้ลูกถ้วยตัวอย่างชุดเดียวกับที่ทำการทดลองหาแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดในหัวข้อที่ 6.2.1 โดยทำการทดลองด้วยแรงดันกระแสสลับความถี่ 50 Hz ที่ได้จากหม้อแปลงทดสอบ 200 kV 10 kVA วัดค่าแรงดันด้วยโวลต์เดจิติไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุ ประกอบวงจรดังรูปที่ 6.13 ติดตั้งลูกถ้วยตามมาตรฐาน มอก.279-2521 เริ่มป้อนแรงดันบนลูกถ้วยจากศูนย์ จนกระทั่งเกิดวابلตามผิวขึ้น หาค่าเฉลี่ยของลูกถ้วยแต่ละลูกจากการเกิดวابلอย่างน้อย 10 ครั้ง นำค่าที่ได้จากการทดลองแปลงผันไปเป็นค่าที่บรรยากาศมาตรฐานโดยใช้ตัวประกอบการแปลงผันความหนาแน่นอากาศ ( $K_d$ ) และตัวประกอบการแปลงผันความชื้น ( $K_h$ ) ซึ่งแสดงรายละเอียดในการแปลงผันค่าไปยังสภาวะมาตรฐานไว้ในภาคผนวก ข. จากนั้นหาค่าเฉลี่ยของแรงดันวابلตามผิวของกลุ่มลูกถ้วยจนวนที่มีความกว้างสารเคลือบกึ่งตัวนำเท่า ๆ กัน ทำการทดลองที่สภาวะบรรยากาศต่าง ๆ กันออกไปเพื่อยืนยันความถูกต้องของผลการทดลองที่ได้

จากการทดลองจะได้รับความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันวابلตามผิวแห้งความถี่ต่ำที่บรรยากาศมาตรฐานของลูกถ้วย ( $U_b$ ) กับความกว้างของสารกึ่งตัวนำ ( $w$ ) ได้ดังตารางที่ 6.4 และรูปที่ 6.14

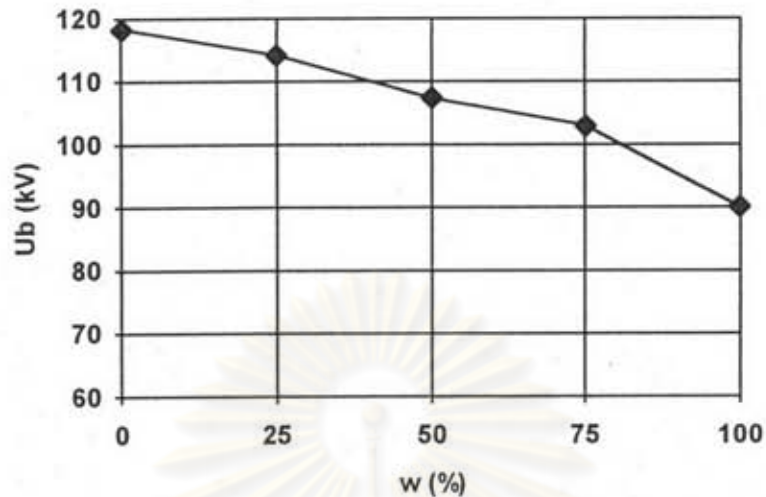


รูปที่ 6.13 วงจรทดลองสำหรับการหาแรงดันวابلตามผิวความถี่ 50 Hz

T	คือ	หม้อแปลงทดสอบขนาด 200 kV, 10kVA
VR	คือ	ตัวปรับแรงดันด้านเข้าของหม้อแปลงทดสอบ
C1, C2	คือ	โวลเตจดีไวเดอร์
R1	คือ	ความต้านทานจำกัดกระแส
P	คือ	วัตถุทดสอบ(ลูกถ้วยฉนวน)

ตารางที่ 6.4 แรงดันวابلตามผิวแห้งความถี่ 50 Hz ที่ความกว้างต่าง ๆ ของสารกึ่งตัวนำ

ความกว้างของสารเคลือบกึ่งตัวนำ (%)	แรงดันวابلตามผิวแห้งความถี่ 50 Hz (kV)
0	118.362
25	114.190
50	107.360
75	103.040
100	90.104



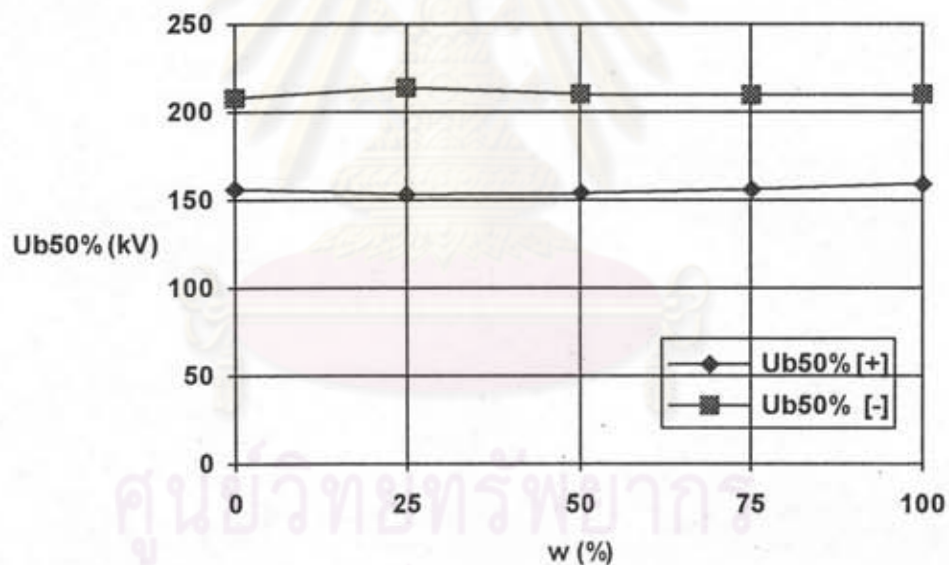
รูปที่ 6.14 กราฟแรงดันวابلไฟตามผิวแห้งความถี่ 50 Hz กับ ความกว้างสารกึ่งตัวนำ

### 6.2.3 การทดลองหาค่าแรงดันวابلไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤต

การทดลองหาค่าแรงดันวابلไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตด้วยแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน 1.2/50  $\mu$ s ใช้ลูกถ้วยตัวอย่างชุดเดียวกับที่ทำการทดลองในหัวข้อที่ 6.2.1 และ 6.2.2 โดยทำการทดลองด้วยแรงดันอิมพัลส์ที่ได้จากวงจรกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ 400 วัตต์จ่ายอดแรงดันด้วยโวลเตจดีไวเซอร์แบบตัวเก็บประจุ การหาค่าแรงดันอิมพัลส์วิกฤตก็คือการหาค่า  $U_{b50\%}$  ในที่นี่จะใช้วิธีปรับขึ้นและลง (Up and down method) โดยมีจำนวนครั้งที่ป้อนแรงดันมากพอ (25 ครั้ง) ทำการทดลองทั้งแรงดันอิมพัลส์ชั่ววอกและชั่วลบ จากนั้นแปลงผันค่าจากการทดลองไปสู่ค่าที่สถานะมาตรฐานโดยใช้ตัวประกอบการแปลงผันความหนาแน่นอากาศและตัวประกอบการแปลงผันความชื้น (แสดงรายละเอียดในการแปลงผันค่าไปยังสถานะมาตรฐานไว้ในภาคผนวก ข.) ผลการทดลองแสดงได้ดังตารางที่ 6.5 และ รูปที่ 6.15

ตารางที่ 6.5 แรงดันวาทไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตที่ค่าความกว้างต่าง ๆ ของสารเคลือบกึ่งตัวนำ

ความกว้างสารกึ่งตัวนำ (%)	แรงดันวาทไฟตามผิวอิมพัลส์ วิกฤตชั่ววาท (kV)	แรงดันวาทไฟตามผิวอิมพัลส์ วิกฤตชั่ววาท (kV)
0	155.94	208.00
25	153.20	213.86
50	154.04	209.99
75	156.06	209.86
100	159.29	210.09



รูปที่ 6.15 กราฟแสดงค่าแรงดันวาทไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตในเทอมของความกว้างของสารกึ่งตัวนำ

### 6.3 วิเคราะห์ผลการคำนวณและผลการทดลอง

จากผลการคำนวณและผลการทดลองเพื่อหาผลของการเคลือบสารกึ่งตัวนำบนผิวบนของลูกถ้วยฉนวนก้านตรงแบบ 56-2 ที่มีความกว้างของสารกึ่งตัวนำต่าง ๆ กัน ต่อลักษณะสมบัติ

ทางไฟฟ้าทั้งสาม คือ แรงดันวาวไฟตามผิวแห้งความถี่ 50 Hz แรงดันวาวไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤต และแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด เพื่อที่จะหาความกว้างของการเคลือบสารกึ่งตัวนำที่พอเหมาะ จะวิเคราะห์ได้ดังต่อไปนี้

### 6.3.1 วิเคราะห์ผลการคำนวณค่าแรงดันเริ่มต้น

จากการคำนวณที่ให้แรงดันที่ป้อนเป็นแรงดันกระแสสลับความถี่ 50 Hz ขนาด 22 kV ซึ่งเป็นแรงดันระบบของลูกถ้วย ในรูปที่ 6.3 พบว่าแรงดันจะตกคร่อมบริเวณที่เคลือบสารกึ่งตัวนำบนผิวลูกถ้วยน้อยมาก ดังนั้นแรงดันเกือบทั้งหมดจะตกคร่อมบนแก่ปส่วนที่เหลือ เมื่อพิจารณาความเครียดสนามไฟฟ้า จากรูปที่ 6.4 และตารางที่ 6.1 จะเห็นว่าสนามไฟฟ้าบนลูกถ้วยจนวนเป็นแบบไม่สม่ำเสมอสูง และผลของการเคลือบสารกึ่งตัวนำจะทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นลดลง ถ้าหากไม่มีการเคลือบสารกึ่งตัวนำ จากการคำนวณพบว่าได้ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดถึง 58.242 kV/cm ซึ่งทำให้เกิดโคโรนาที่ระดับแรงดันใช้งานได้ การเคลือบสารกึ่งตัวนำกว้าง 25 เปอร์เซ็นต์จะทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าลดลงถึง 44.107 kV/cm เมื่อความกว้างของสารกึ่งตัวนำเพิ่มขึ้น ความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดก็จะลดลง แต่ลูกถ้วยที่มีความกว้างของสารกึ่งตัวนำ 75 เปอร์เซ็นต์กับ 100 เปอร์เซ็นต์ ไม่มีความแตกต่างของความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดมากนัก ซึ่งสอดคล้องกับผลการคำนวณแรงดันเริ่มต้นในตารางที่ 6.2

### 6.3.2 วิเคราะห์ผลการทดลองหาแรงดันวาวไฟแห้งตามผิวความถี่ 50 Hz

จากผลการทดลองในรูปที่ 6.14 และตารางที่ 6.4 จะเห็นว่า เมื่อความกว้างของสารกึ่งตัวนำมากขึ้น ค่าแรงดันวาวไฟตามผิวแห้งความถี่ต่ำของลูกถ้วยจะลดลง สามารถอธิบายได้จากผลการคำนวณแรงดันกระจายตามแนวอาร์คซึ่งพบว่าแรงดันตกคร่อมสารกึ่งตัวนำบนผิวลูกถ้วยมีค่าน้อยมาก ดังนั้นแรงดันเกือบทั้งหมดจะตกคร่อมแก่ปส่วนที่เหลือ เมื่อความกว้างของสารกึ่งตัวนำมากขึ้น ความกว้างของแก่ปส่วนที่เหลือจะลดลง แรงดันเบรกคาวนของลูกถ้วยจึงมีค่าลดลงตาม

### 6.3.3 วิเคราะห์ผลการทดลองหาแรงดันวาวไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤต

ในกรณีแรงดันที่ป้อนให้กับลูกถ้วยจนวนเป็นแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นฟ้าผ่า 1.2/50  $\mu$ s ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาในลักษณะที่ต่างไปจากแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ จึงไม่สามารถ

คำนวณหาแรงดันกระจายหรือความเครียดสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นโดยใช้สมการพลังงานที่ 6.1 ได้ แต่จากผลการทดลองในรูปที่ 6.15 และตารางที่ 6.15 พบว่า ความกว้างของการเคลือบสารกึ่งตัวนำ ไม่มีผลนัยสำคัญต่อค่าแรงดันวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตทั้งแรงดันขั้วบวกและขั้วลบ ความแตกต่างระหว่างค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของแรงดันวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤตของในแต่ละขั้วมีค่าต่ำกว่า 5 เปอร์เซ็นต์

#### 6.3.4 วิเคราะห์ผลการทดลองหาแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด

จากผลการทดลองในรูปที่ 6.12 และตารางที่ 6.3 จะเห็นว่า ลูกถ้วยฉนวนที่มีความกว้างของสารเคลือบกึ่งตัวนำมากขึ้นจะมีค่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดสูงขึ้น แต่เมื่อลูกถ้วยที่มีความกว้างของสารเคลือบกึ่งตัวนำ 75 เปอร์เซ็นต์กับ 100 เปอร์เซ็นต์จะมีค่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดใกล้เคียงกัน เนื่องจากลักษณะสนามไฟฟ้าของลูกถ้วยเป็นแบบไม่สม่ำเสมอสูง จึงเกิดโคโรนาที่บริเวณใกล้อิเล็กโทรดแรงสูงเนื่องจากเป็นบริเวณที่มีความเครียดสนามไฟฟ้าสูงมาก หากพิจารณาค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดที่ได้จากการคำนวณในตารางที่ 6.1 จะพบว่ามีค่าสอดคล้องกันกับแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดที่ได้จากการทดลอง อย่างไรก็ตาม ผลการคำนวณแรงดันเริ่มต้นในตารางที่ 6.2 ซึ่งใช้เงื่อนไขการเกิดเบรกดาวน์ของสตรีมเมอร์ มีความแตกต่างกับผลการทดลองอย่างมาก โดยค่าที่ได้จากการคำนวณมีค่าสูงกว่าค่าจากการทดลอง 127 ถึง 295 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับค่าจากการทดลอง ดังนั้น จึงต้องมีเงื่อนไขหรือปัจจัยที่มีผลต่อแรงดันเริ่มต้นในอากาศ ซึ่งได้แสดงไว้ในหัวข้อ 6.5

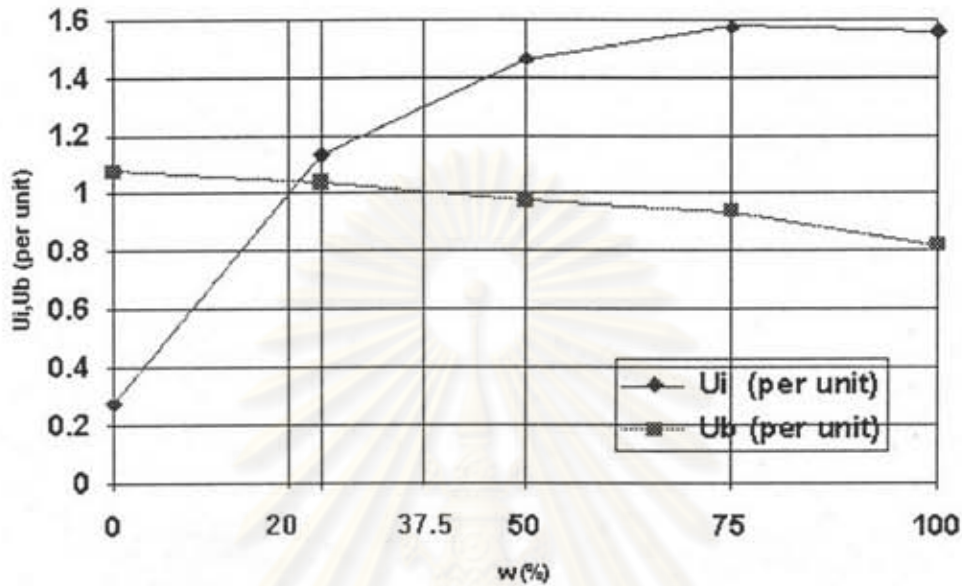
#### 6.4 การหาความกว้างของสารเคลือบกึ่งตัวนำที่พอเหมาะ

เนื่องจากความกว้างของการเคลือบสารกึ่งตัวนำไม่มีผลสำคัญต่อค่าแรงดันวาบไฟตามผิวอิมพัลส์วิกฤต ฉะนั้น ในการคำนวณหาความกว้างของการเคลือบสารกึ่งตัวนำที่พอเหมาะจึงพิจารณาเฉพาะแรงดันวาบไฟตามผิวความถี่ต่ำและแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดที่ความกว้างของการเคลือบสารกึ่งตัวนำต่าง ๆ กัน ในรูปที่ 6.16 เป็นการแสดงค่าแรงดันวาบไฟตามผิวแห่งความถี่พลังงานและแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดในรูปเดียวกัน โดยแสดงเป็นค่าต่อหน่วย(per unit) ซึ่งในกรณีนี้จะใช้ค่าแรงดันที่กำหนดตามมาตรฐานเป็นฐานหาค่าต่อหน่วย คือ 110 kV เป็นค่าฐานสำหรับแรงดันวาบไฟตามผิวแห้งและใช้ค่า 22 kV เป็นค่าฐานสำหรับแรงดันโคโรนาเริ่มเกิด ตาม

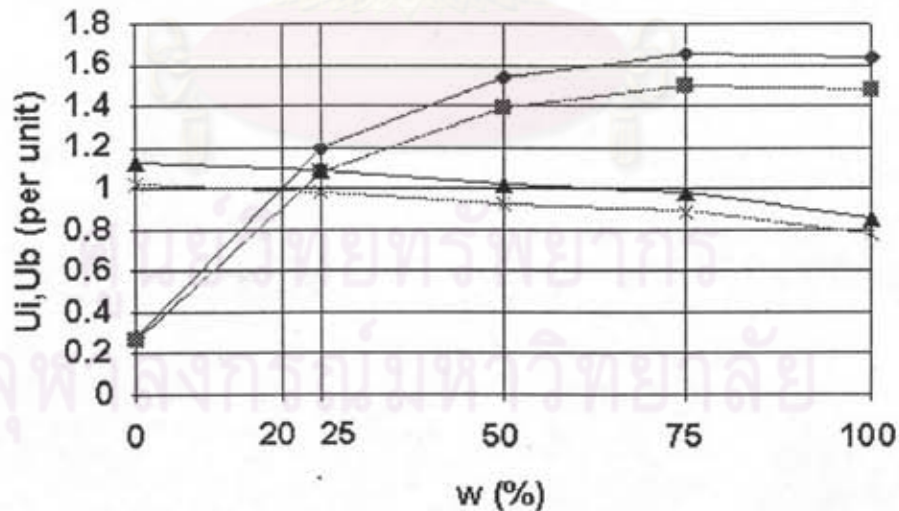
มอก.279-2521

สำหรับการทดสอบแรงดันวาทตามผิวแห้งและแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดตาม

ลำดับ



รูปที่ 6.16 แรงดันโคโรนาเริ่มเกิดและแรงดันวาทตามผิวแห้งความถี่ 50 Hz ของลูกถ้วยฉนวน เป็นค่าต่อหน่วย ที่ความกว้างต่าง ๆ ของสารเคลือบกิ่งตัวนำ



รูปที่ 6.17 แรงดันโคโรนาเริ่มเกิดและแรงดันวาทตามผิวความถี่ 50 Hz เมื่อพิจารณาค่า ความคลาดเคลื่อน 5 เปอร์เซ็นต์ ที่ค่าความกว้างต่าง ๆ ของสารเคลือบกิ่งตัวนำ

ในรูปที่ 6.16 จะเห็นได้ชัดถึงช่วงความกว้างของการเคลือบสารกิ่งตัวนำที่สามารถใช้ได้ โดยดูจากค่าแรงดันทั้งสองควรจะมากกว่าค่าที่กำหนดคือ มากกว่า 1 ขึ้นไป แม้ว่ามาตรฐานจะยอม



ให้แรงดันวาทไฟตามผิวจากการทดสอบจะต้องไม่ต่ำกว่า 95% ของค่ามาตรฐานหรือ 0.95 pu ก็ตาม ดังนั้น การกำหนดช่วงการเคลือบสารกึ่งตัวนำที่พอเหมาะควรอยู่ระหว่าง 20 ถึง 37.5 เปอร์เซ็นต์ของความกว้างปีกบนสุดของลูกถ้วย ที่จะทำให้ได้คุณสมบัติทั้งสองของลูกถ้วยจนวนเป็นไปตามมาตรฐาน โดยความกว้างน้อยหรือขีดจำกัดล่างกำหนดด้วยค่าแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดและความกว้างขีดจำกัดบนกำหนดด้วยค่าแรงดันวาทไฟตามผิวความถี่ต่ำ ถ้าให้ความสำคัญของแรงดันวาทไฟตามผิวความถี่ต่ำและแรงดันโคโรนาเริ่มเกิดเท่ากัน จะพิจารณาจุดตัดของเส้นกราฟทั้งสองเป็นความกว้างที่พอเหมาะในการเคลือบสารกึ่งตัวนำบนลูกถ้วยจนวน เมื่อผลการทดลองมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 5% จะได้ความกว้างที่พอเหมาะอยู่ในช่วง 20-25 เปอร์เซ็นต์ของความกว้างปีกบนสุดของลูกถ้วยดังรูปที่ 6.17

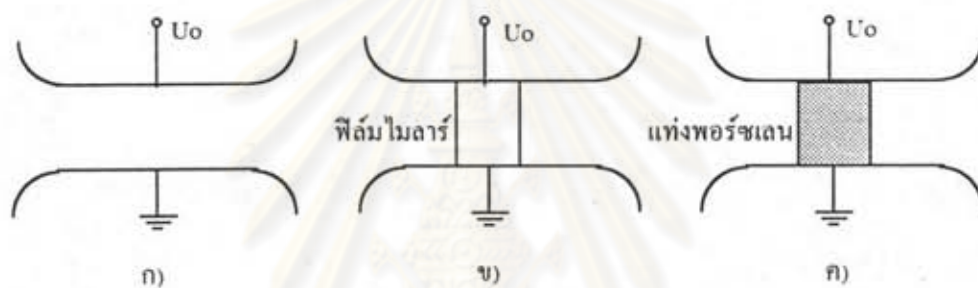
#### 6.5 ผลของพื้นผิวจนวนต่อแรงดันเริ่มต้นในอากาศ

จากการคำนวณในบทที่ 5 พบว่าสามารถคำนวณหาแรงดันเริ่มต้นของอิเล็กโทรดแท่งกลมปลายมนกับระนาบ และอิเล็กโทรดแบบแท่งปรงกลมซึ่งมีลักษณะสนามไฟฟ้าเป็นแบบไม่สม่ำเสมอได้อย่างถูกต้องแม่นยำ แต่ในกรณีของลูกถ้วยจนวน แรงดันเริ่มต้นที่คำนวณได้มีค่าต่างจากผลการทดลองมาก สิ่งที่แตกต่างกันออกไปของการคำนวณแรงดันเริ่มต้นของลูกถ้วยจนวนก็คือ การเกิดดีสชาร์จของลูกถ้วยจะเกิดขึ้นในแนวของพื้นผิวพอร์ซเลน ซึ่งผลของพื้นผิวจะทำให้การเคลื่อนที่ของโมเลกุล ประจุ และอิเล็กตรอนของก๊าซไม่เป็นไปอย่างอิสระทุกทิศทาง และจากผลการศึกษาของ V.N. Maller และ K.D. Srivastava[18] พบว่า เมื่อระบบประกอบด้วยจนวนแข็งและอากาศ จะเกิดประจุค้างขึ้นที่ผิวของจนวนแข็ง ซึ่งมีขนาดและขั้วของประจุขึ้นอยู่กับระดับแรงดัน ชนิดของจนวนแข็ง และการจัดวางอิเล็กโทรด ซึ่งผลของประจุค้างจะทำให้ความเครียดสนามไฟฟ้าตามแนวผิวจนวนมีค่าเปลี่ยนไปมาก และมีผลต่อแรงดันเริ่มต้นของอากาศด้วย

เพื่อที่จะหาผลของพื้นผิวต่อการเกิดดีสชาร์จของอากาศ จึงได้ทำการทดลองหาแรงดันเริ่มต้นของอิเล็กโทรด 2 รูปแบบ คือ แบบระนาบกับระนาบ ซึ่งมีลักษณะของสนามไฟฟ้าแบบสม่ำเสมอ และอิเล็กโทรดแบบที่มีลักษณะของสนามไฟฟ้าแบบไม่สม่ำเสมอ

### 6.5.1 ผลของพื้นผิวฉนวนแข็งต่อแรงดันเริ่มต้นในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอ

การทดลองเพื่อหาผลของพื้นผิวฉนวนแข็งต่อแรงดันเริ่มต้นในสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอในที่นี้จะได้จากการทดลองหาแรงดันเริ่มต้นของอิเล็กโทรดแบบระนาบกับระนาบที่ไม่มีพื้นผิวเข้ามาเกี่ยวข้อง เปรียบเทียบกับแรงดันเริ่มต้นที่ได้เมื่อสอดฟิล์มไมลาร์รูปทรงกระบอกความสูงเท่ากับระยะห่างของแก๊ประหว่างอิเล็กโทรด และเมื่อสอดแท่งฉนวนพอร์ซเลนรูปทรงกระบอกความสูงเท่ากับระยะห่างของแก๊ประหว่างอิเล็กโทรด ดังรูปที่ 6.18 ป้อนแรงดันกระแสสลับความถี่ 50 Hz จนกระทั่งเกิดเบรกดาวน์ที่แก๊ป ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 6.6



รูปที่ 6.18 อิเล็กโทรดแบบระนาบกับระนาบที่ใช้ในการทดลอง โดย  
ก) ไม่มีฉนวนแข็งคั่น ข) มีฟิล์มไมลาร์ม้วนเป็นทรงกระบอกคั่น ค) มีแท่งพอร์ซเลนคั่น

ตารางที่ 6.6 การเปรียบเทียบแรงดันเริ่มต้นเมื่อมีพื้นผิวฉนวนแข็ง

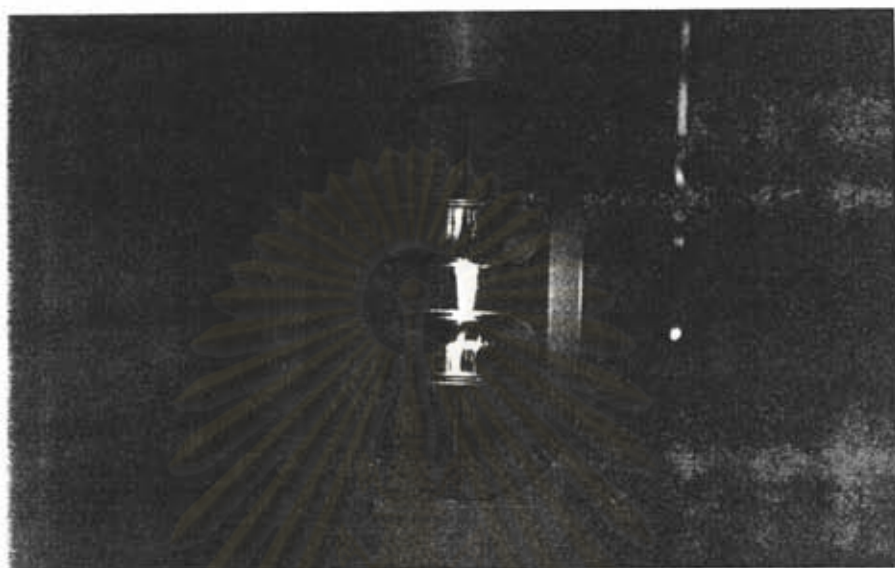
ลักษณะอิเล็กโทรด	$U_i / U_o$
มีฟิล์มไมลาร์คั่นอยู่	0.379
มีแท่งพอร์ซเลนคั่นอยู่	0.532

$U_o$  หมายถึง แรงดันเริ่มต้นเมื่อไม่มีพื้นผิวฉนวนแข็ง

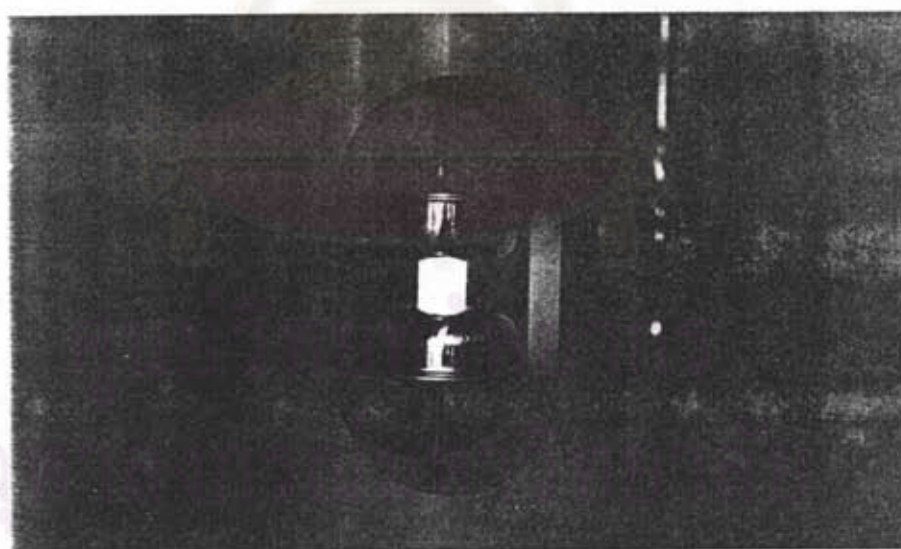
$U_i$  หมายถึง แรงดันเริ่มต้นเมื่อมีพื้นผิวฉนวนแข็ง

จากผลการทดลองในตารางที่ 6.6 จะเห็นได้ว่า เมื่อมีพื้นผิวไมลาร์จะทำให้แรงดันเริ่มต้นของระบบลดลง 62.1% และเมื่อมีพื้นผิวพอร์ซเลนจะทำให้แรงดันเริ่มต้นของระบบลดลง

46.8% นอกจากนี้เมื่อมีผิวฉนวนแข็งกั้นระหว่างอิเล็กโทรดจะสังเกตเห็นอาร์กของการเบรกควาน์เกิดขึ้นตามแนวผิวฉนวนแข็งอย่างชัดเจน ดังรูปที่ 6.19



a)



b)

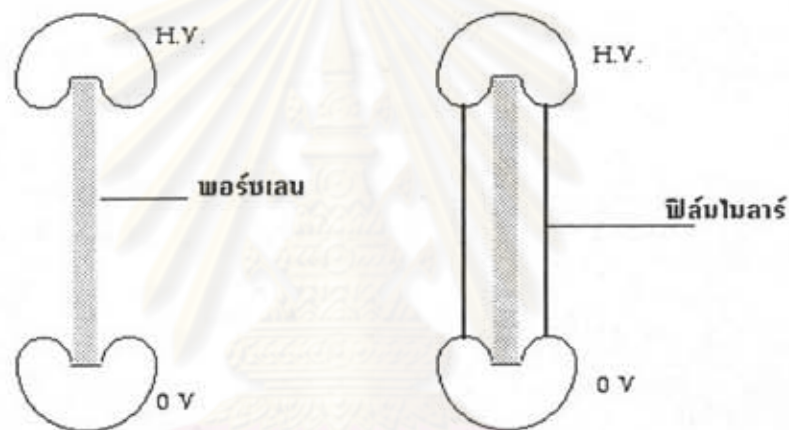
รูปที่ 6.19 ภาพถ่ายแสดงการเกิดดีสชาร์จตามแนวผิวของไมลาร์

a) เมื่อไม่มีฟิล์มไมลาร์กั้นระหว่างอิเล็กโทรด

b) เมื่อมีฟิล์มไมลาร์กั้นระหว่างอิเล็กโทรด

### 6.5.2 ผลของพื้นผิวต่อแรงดันเบรกควาน์ในสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ

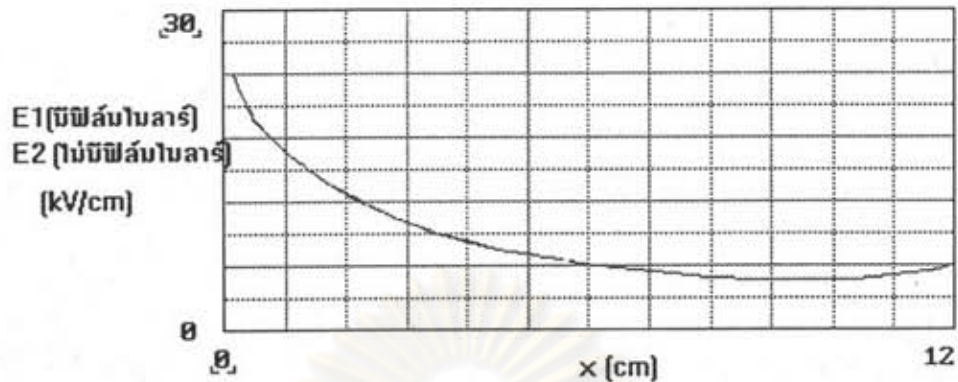
ในกรณีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอจะใช้อิเล็กโทรดในรูปที่ 6.20 โดยกั้นด้วยแท่งพอร์ซเลนทรงกระบอกตัน ซึ่งมีระยะผิวจนรวมยาวกว่าระยะช่องว่างในอากาศซึ่งมีความกว้าง 12 cm หาแรงดันเริ่มต้นของอิเล็กโทรดโดยไม่มีผลของพื้นผิวมาเกี่ยวข้อง เปรียบเทียบกับแรงดันเริ่มต้นเมื่อสอดฟิล์มไมลาร์คั่นระหว่างอิเล็กโทรด ซึ่งจากการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ในรูปที่ 6.21 จะเห็นว่า สนามไฟฟ้าตามแนวอาร์กมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยมาก แต่จากผลการทดลองในตารางที่ 6.7 พบว่าค่าแรงดันเบรกควาน์เมื่อมีแผ่นไมลาร์จะลดลงถึง 55.82%



รูปที่ 6.20 อิเล็กโทรดแบบสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอที่ใช้ในการทดลอง โดย  
ก) ไม่มีฟิล์มไมลาร์คั่น ข) มีฟิล์มไมลาร์คั่น

ตารางที่ 6.7 แรงดันเริ่มต้นที่ได้จากการคำนวณและการทดลอง

ลักษณะอิเล็กโทรด	แรงดันเบรกควาน์ (kVrms)	
	จากการคำนวณ	จากการทดลอง
ไม่มีฟิล์มไมลาร์คั่นอยู่	112.43	116.610
มีฟิล์มไมลาร์คั่นอยู่	112.43	51.520



รูปที่ 6.21 สนามไฟฟ้าตามแนวอาร์กที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

### 6.5.3 วิเคราะห์ผลของพื้นผิวต่อแรงดันเริ่มต้นในอากาศ

จากการทดลองบนอิเล็กทรอนิกส์แรงสูงทั้งแบบที่มีสนามไฟฟ้าสม่ำเสมอและแบบที่มีสนามไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ กล่าวได้ว่า ผลของพื้นผิวฉนวนตามแนวอาร์กจะทำให้แรงดันเริ่มต้นของระบบมีค่าต่ำลงมาก เนื่องจากมีผลของการอัดประจุบนพื้นผิวของฉนวน เกิดประจุค้างขึ้น ทำให้ลักษณะการกระจายของสนามไฟฟ้าเปลี่ยนไปอย่างมาก และเนื่องจากทฤษฎีของสตรีมเมอร์ คำนวณหาแรงดันเริ่มต้นโดยอาศัยสมมติฐานว่า ไม่มีผลของประจุค้างอยู่ในบริเวณที่คำนวณ ดังนั้นเมื่อมีประจุค้างอยู่บนพื้นผิวที่อยู่ตามแนวคิซซาร์จพอดี้ จะทำให้แรงดันเริ่มต้นจริงมีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณ โดยอาศัยทฤษฎีของสตรีมเมอร์อย่างมาก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย