บทที่ 2

ทฤษฎีเบื้องต้น

ลูกถ้วยไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ฉนวนที่ใช้สำหรับยึดหรือรองรับตัวนำไฟฟ้าที่มีแรงดันสูงกว่าดิน การเกิดวาบไฟตามผิวลูกถ้วยจะทำให้ระบบส่งจ่ายพลังงานต้องหยุดชะงัก สาเหตุสำคัญประการหนึ่งที่ทำให้เกิดการวาบไฟตามผิวคือสิ่งเปรอะเปื้อนที่อยู่บนผิวลูกถ้วย กล่าวคือเมื่อสิ่งเปรอะเปื้อนที่จับเกาะบนผิวของลูกถ้วยเปียกน้ำจากหมอกหรือความชื้นในตอนเช้า หรือฝนที่ตกปรอยๆ สภาพนำไฟฟ้าของผิวลูกถ้วยจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นผลให้กระแสรั่วไหลตามผิวของลูกถ้วยมีค่าเพิ่มมากขึ้นและเป็นสาเหตุให้เกิดวาบไฟตามผิวได้ง่าย การเกิดวาบไฟตามผิวเนื่องจากความเปรอะเปื้อนขึ้นอยู่กับชนิด,ปริมาณ, ลักษณะการจับเกาะของสิ่งเปรอะเปื้อน, การเปียกของผิวลูกถ้วยซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติไม่ชอบน้ำของผิวลูกถ้วย

2.1 สิ่งเปรอะเปื้อน

2.1.1 ชนิดของสิ่งเปรอะเปื้อน [กฟผ., 2536]

ก) สิ่งเปรอะเปื้อนจากทะเล

พบในบริเวณที่ติดกับชายฝั่งทะเล ในกรณีพื้นที่ชายฝั่งทะเลเป็นพื้นราบลมทะเลจะพัดพาเอาเกลือจากทะเลเข้ามาในแผ่นดินได้ค่อนข้างไกล ตามปกติระดับ ESDD (Equivalent Salt Deposit Density) จะลดลงเมื่อลึกเข้าไปจากชายฝั่งทะเล อย่างไรก็ดีอาจจะพบเกลือจากทะเลที่ระยะห่างจากชายฝั่งทะเลถึง 100 km ได้ ค่า ESDD ที่เกิดจากลมทะเลที่พัดเป็นฤดูกาลเป็นระยะเวลานานๆอาจจะมีค่าสูงพอๆกับค่า ESDD ที่เกิดจากไต้ฝุ่นได้ แต่ในกรณีของลมทะเลที่พัดเป็นฤดูกาลค่า ESDD มีแนวโน้มจะลดลงตามระยะจากชายฝั่งได้รวดเร็วกว่าค่า ESDD ที่เกิดจากไต้ฝุ่น

ข) สิ่งเปรอะเปื้อนจากโรงงานอุตสาหกรรม

เป็นผลมาจากการพัฒนาอุตสาหกรรม เมื่อมีแหล่งอุตสาหกรรมขนาดใหญ่เพิ่มขึ้นก็ทำให้มีแหล่งกำเนิดสิ่งเปรอะเปื้อนมากขึ้นด้วย สิ่งเปรอะเปื้อนประเภทนี้จะมีผลต่อลูกถ้วยในระบบส่งและระบบจำหน่ายที่อยู่ในบริเวณใกล้เคียงกัน ซึ่งบางครั้งเป็นแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับโรงงานเหล่านั้นเอง แต่โดยปรกติโรงงานอุตสาหกรรมจะตั้งอยู่ในบริเวณจำกัด และตัวโรงงานก็มักจะติดตั้งเครื่องกรองควันและฝุ่น ทำให้ลดความรุนแรงได้ นอกจากนี้แล้วระดับของสิ่งเปรอะเปื้อนชนิดนี้จะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อห่างไกลจากโรงงานมากขึ้น สิ่งเปรอะเปื้อนจากโรงงานอุตสาหกรรมมีหลาย

ชนิดขึ้นกับประเภทของอุตสาหกรรมนั้นๆ สิ่งเปรอะเปื้อนบางชนิดถูกชะล้างออกได้ง่ายเหมือนสิ่งเปรอะเปื้อนจากทะเล แต่สิ่งเปรอะเปื้อนบางชนิดติดผิวลูกถ้วยได้ มีเพียงไม่กี่ชนิดที่ติดผิวลูกถ้วยได้อย่างแน่นหนา เช่น ฝุ่นปูนซีเมนต์ ดังนั้นโรงงานอุตสาหกรรมที่ตั้งอยู่ติดกับชายฝั่งทะเลอาจทำให้เกิดสิ่งเปรอะเปื้อนแบบผสมในบริเวณนั้นได้

ค) สิ่งเปรอะเปื้อนจากฝุ่น

เกิดจากลมพัดพาเอาทรายและฝุ่นดินไปติดลูกถ้วย ระดับความรุนแรงของสิ่งเปรอะเปื้อนประเภทนี้ค่อนข้างต่ำ องค์ประกอบของสิ่งเปรอะเปื้อนชนิดนี้จะแปรไปตามพื้นที่ โดยปกติจะมีแคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$) อยู่ 30-70%

ง) สิ่งเปรอะเปื้อนจากทะเลทราย

ในพื้นที่ทะเลทรายสิ่งเปรอะเปื้อนจะสะสมบนผิวลูกถ้วยได้เป็นจำนวนมากเพราะมีฝนตกน้อย ทะเลทรายที่อยู่ห่างไกลชายฝั่งทะเลจะมีสิ่งเปรอะเปื้อนคล้ายกับสิ่งเปรอะเปื้อนจากฝุ่นสะสมบนผิวลูกถ้วยจำนวนมาก ในทะเลทรายที่ติดกับชายฝั่งทะเลจะมีเกลือผสมอยู่ในสิ่งเปรอะเปื้อนด้วย

จ) สิ่งเปรอะเปื้อนอื่นๆ

เกิดจากแหล่งอื่นๆนอกเหนือจากที่ได้กล่าวไปแล้ว เช่น เถ้าหรือฝุ่นภูเขาไฟ ปุ๋ยเป็นต้น

2.1.2 การแบ่งระดับความเปรอะเปื้อน

มาตรฐาน IEC 815 [1986] ได้แบ่งระดับความเปรอะเปื้อนออกเป็น 4 ระดับ ตามสภาพพื้นที่ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การแบ่งระดับของความเปรอะเปื้อนตามมาตรฐาน IEC 815

ระดับของความเปรอะเปื้อน	ตัวอย่าง
1) เล็กน้อย (Light)	- บริเวณที่ปลอดจากการประกอบอุตสาหกรรม และชุมชนที่มีอัตราการใช้เครื่องทำความร้อนปริมาณน้อย - บริเวณที่มีความหนาแน่นในการประกอบอุตสาหกรรม หรือที่อยู่อาศัยน้อยโดยที่จะต้องเป็นบริเวณที่มีลมพัดผ่าน หรือมีฝนตกบ่อย - บริเวณเขตเกษตรกรรมหรือบริเวณที่อยู่ใกล้ ๆ ภูเขา โดยที่พื้นที่ทั้งหมดเหล่านี้ จะต้องอยู่ห่างจากชายฝั่งทะเลไม่น้อยกว่า 10-20 กิโลเมตร และจะต้องไม่ได้รับลมทะเลโดยตรง

2) ปานกลาง (Medium)	- บริเวณเขตอุตสาหกรรมที่ไม่ได้มีการสร้างฝุ่นหรือควันออกมาและอาจจะเป็นบริเวณย่านชุมชนที่มีอัตราการใช้เครื่องทำความร้อนปานกลาง - บริเวณย่านชุมชนหรือเขตอุตสาหกรรมหนาแน่นแต่จะต้องมีลมพัดผ่านหรือฝนตกปรอยๆ - บริเวณที่มีลมทะเลพัดผ่านซึ่งจะต้องอยู่ห่างจากชายฝั่งทะเลพอสมควร (ควรจะห่างหลาย ๆ กิโลเมตร)
3) สูง (Heavy)	- เขตอุตสาหกรรมหนาแน่นหรือบริเวณชานเมืองของเมืองใหญ่ที่มีอัตราการใช้เครื่องทำความร้อนสูง - บริเวณที่ได้รับลมทะเลที่รุนแรงโดยตรงหรือชายฝั่งทะเล
4) สูงมาก(Very heavy)	- บริเวณที่เป็นเขตรับฝุ่นควันจากโรงงานอุตสาหกรรมโดยตรงโดยเฉพาะฝุ่นที่เป็น thick conductive deposit - บริเวณที่อยู่ใกล้ชายฝั่งทะเลมาก ๆ ซึ่งมีการรับเอาสิ่งเปรอะเปื้อนที่พัดมาจากทะเลโดยตรง - ทะเลทรายที่มีโอกาสฝนตกน้อยมาก จะต้องรับลมที่นำเอาทรายและไอเกลือเข้ามา

หมายเหตุ 1) บริเวณเกษตรกรรมในข้อ 1 ถ้ามีการใช้ปุ๋ยโดยการฉีดพ่นหรือมีการเผาไหม้ของกากธัญพืชต่างๆ เมื่อมีลมพัดนำเอาสิ่งเหล่านั้นแพร่กระจายออกไป ระดับความเปรอะเปื้อนอาจจะอยู่ในระดับสูง

2) บริเวณที่อยู่ห่างจากชายฝั่งทะเลหรืออยู่ใกล้ชายฝั่งทะเลในข้อ 2 หรือ 3 ระยะทางที่พิจารณาจะต้องขึ้นอยู่กับลักษณะภูมิประเทศของชายฝั่งทะเล และลักษณะของลมทะเลที่เกิดขึ้นด้วย

2.1.3 Equivalent Salt Deposit Density (ESDD)

Equivalent Salt Deposit Density คือ ปริมาณการสะสมของสิ่งเปรอะเปื้อนบนผิวลูกถ้วยเทียบเท่ากับปริมาณของเกลือ (NaCl) เป็น mg/cm^2 ซึ่งจะให้ความนำไฟฟ้าของสารละลายที่ได้จากการนำเอาสิ่งเปรอะเปื้อนมาละลายในน้ำที่มีปริมาณเท่ากัน ซึ่งค่า ESDD เป็นตัวเลขที่บอกระดับความรุนแรงของสิ่งเปรอะเปื้อนบนลูกถ้วย

ตารางที่ 2.2 การแบ่งระดับของความเปรอะเปื้อนตามระดับค่า ESDD [EPRI Red Book, 1982]

ระดับของความเปรอะเปื้อน	ESDD (mg/cm^2)
น้อยมาก	0 - 0.03
น้อย	0.03 - 0.06
ปานกลาง	0.06 - 0.1
รุนแรง	> 0.1

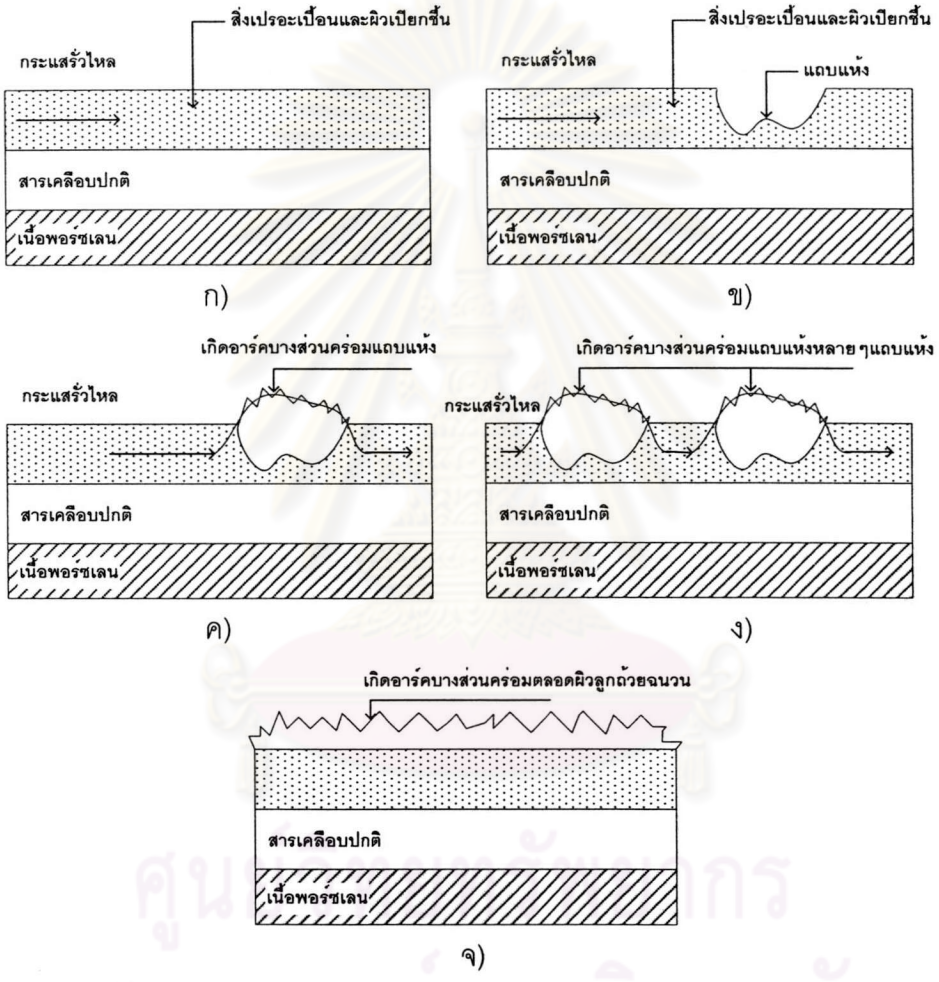
2.2 กระแสรั่ว

กระแสรั่วที่ไหลตามผิวลูกถ้วยเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ใช้ในการประเมินความเหมาะสมในการใช้งานลูกถ้วย กระแสรั่วไหลเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้การเกิดวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยเกิดได้ง่ายขึ้น การที่ลูกถ้วยมีกระแสรั่วไหลอยู่ต่อเนื่องตลอดจะทำให้ผิวของลูกถ้วยได้รับความเสียหายโดยเฉพาะลูกถ้วยประเภทวัสดุผสม(Composite insulator) เช่น ลูกถ้วยยางซิลิโคน ทำให้คุณสมบัติไม่ชอบน้ำลดลง และการกระจายของสนามไฟฟ้าตามผิวลูกถ้วยจะเปลี่ยนแปลงไป การใช้งานลูกถ้วยเคลือบสารกึ่งตัวนำจะมีกระแสรั่วไหลเกิดขึ้นอยู่ตลอดเวลา ขนาดของกระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่ากระแสรั่วไหลสำหรับลูกถ้วยชนิดอื่นๆ กระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นทำให้เกิดพลังงานสูญเสียอย่างต่อเนื่อง และอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้อุปกรณ์ประกอบที่ต่อร่วมกับลูกถ้วยร้อนขึ้นอีกด้วย จากผลกระทบต่างๆ ที่เกิดขึ้นนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการศึกษาเกี่ยวกับกระแสรั่วไหลของลูกถ้วย

2.3 การเกิดวาบไฟบนผิวลูกถ้วย [นรเศรษฐ, 2544]

กลไกการเกิดวาบไฟตามผิวเริ่มต้นจากสิ่งเปรอะเปื้อนที่สะสมอยู่บนผิวลูกถ้วยได้รับความชื้นจากหมอกหรือมีฝนตกเบาๆ สภาพนำไฟฟ้าที่ผิวลูกถ้วยจะมีค่าเพิ่มขึ้น กระแสรั่วไหลที่เกิดจะมีขนาดเพิ่มตามไปด้วย โดยที่อิมพีแดนซ์ของผิวของลูกถ้วย (Surface impedance) จะเปลี่ยนสภาพจากเชิงตัวเก็บประจุในตอนเริ่มต้นไปเป็นแบบเชิงความต้านทานเมื่อเวลาผ่านไปกระแสรั่วไหลทำให้เกิดความร้อนขึ้น อุณหภูมิของความร้อนที่เกิดขึ้นจะไม่สม่ำเสมอเท่ากันตลอดผิวลูกถ้วยโดยจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของกระแส บริเวณที่มีความหนาแน่นกระแสสูงเช่นบริเวณคอคอดจะเกิดความร้อนสูงกว่าบริเวณอื่นทำให้ผิวของลูกถ้วยบริเวณนั้นแห้งก่อน มีลักษณะเป็นส่วนเล็กๆแคบๆมีความกว้างประมาณ 1-2 มิลลิเมตรเรียกว่าแถบแห้ง(Dry band) บริเวณแถบแห้งนี้มีสภาพความต้านทานสูง ไม่สามารถที่จะนำกระแสได้ ทำให้แรงดันเกือบทั้งหมดจะตกคร่อมที่แถบแห้ง ถ้าความคงทนต่อความ

เป็นฉนวนของอากาศบริเวณแถบแห้งมีค่าน้อยกว่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่ตกคร่อมแถบแห้ง จะเกิดการเบรกดาวน์ของอากาศคร่อมแถบแห้งขึ้น เรียกว่าการเกิดดิสชาร์จบางส่วน(Partial discharge) กระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นอาจทำให้ขนาดของแถบแห้งขยายออกไป ถ้าความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ตกคร่อมแถบแห้งมีค่าไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการดิสชาร์จต่อไปการเกิดดิสชาร์จบางส่วนจะหยุดลง จนในที่สุดเมื่อดิสชาร์จที่เกิดขึ้นบนผิวลูกถ้วยเกิดการเชื่อมต่อถึงกันจนมีความยาวมากกว่าค่าพิกัดก็จะเกิดวาบไฟตามผิวตกคร่อมตลอดผิวลูกถ้วย

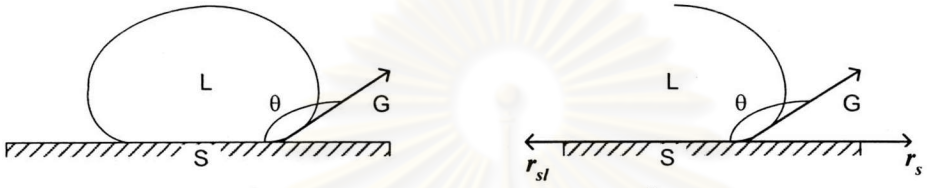


รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการเกิดวาบไฟตามผิวเนื่องจากสิ่งเปรอะเปื้อน

2.4 การเปียกของผิวลูกถ้วย

2.4.1 กลไกการเปียกของลูกถ้วยไฟฟ้า [Li, 1994]

เมื่อมีหยดน้ำเกิดบนผิวลูกถ้วย หยดน้ำดังกล่าวจะทำให้ผิวลูกถ้วยเปียกเกิดเป็นฟิล์มน้ำขึ้นบนผิว ซึ่งจะกระจายและมีการเชื่อมต่อกันเมื่อเวลาผ่านไป เนื่องจากน้ำสามารถละลายสิ่งเปรอะเปื้อนที่มีสาร Electrolytic ได้เป็นผลให้ความนำไฟฟ้าของผิวลูกถ้วยมีค่าเพิ่มมากขึ้น (ความเป็นฉนวนมีค่าลดลง) ส่งผลให้กระแสรั่วที่ไหลตามผิวมีค่าสูงขึ้นจนเป็นเหตุให้เกิดวาบไฟตามผิวลูกถ้วยได้ รูปที่ 2.2 แสดงถึงหยดน้ำที่เกาะบนผิวของแข็ง



รูปที่ 2.2 มุมสัมผัสผิวของแข็งของหยดน้ำในแนวราบ

ลักษณะการเปียกของผิวลูกถ้วยแบ่งได้เป็น 3 ลักษณะดังนี้

ก) Adhesive

พลังงาน adhesive เป็นพลังงานที่ทำให้ของเหลวสามารถยึดเกาะบนผิวของแข็งได้ โดยที่

$$W_a = W_{sl} = r_s + r_l - r_{sl} \tag{2.1}$$

เมื่อ r_s = surface tension of solid

r_l = surface tension of liquid

r_{sl} = solid-liquid interface tension

เงื่อนไขในการเกิดคือ $W_a > 0$ หรือ $r_s + r_l > r_{sl}$

ข) Spreading

เกิดจากของเหลวมีพลังงานมากกว่าพลังงานภายใน (internal energy : W_{ll}) ขณะที่เกิดการกระจาย (spreading wetting)

$$W_{ll} = 2r_l \tag{2.2}$$

ในระหว่างนั้นจะมีการปล่อยพลังงาน adhesive ออกมา ดังนั้นการเปียกของผิวที่เกิดจากการกระจายจะมีการปล่อยพลังงานอิสระ (free energy: W_s) ออกมา

$$W_s = W_{sl} - W_l = W_a - 2r_l = r_s - r_l - r_{sl} \quad (2.3)$$

เงื่อนไขในการเกิดคือ $W_s > 0$ หรือ $W_s > W_{ll}$ หรือ $W_s > 2r_l$

ค) Immersing

เป็นการที่ของเหลวแยกตัวออกจากผิวของแข็ง ทำให้มีการเกิดพื้นผิวใหม่ขึ้นบนผิวของแข็ง (Interface ระหว่างของแข็ง-ของเหลวหายไปในเวลาเดียวกัน) โดยพลังงานที่ใช้ในการแยกของเหลวออกจากของแข็งคือ

$$W_l = r_s - r_{sl}$$

เงื่อนไขในการเกิดคือ $W_l > 0$ หรือ $r_s > r_{sl}$

พิจารณาในสภาวะสมดุล โดยใช้ young function

$$r_l \cos\theta = r_s - r_{sl} \quad (2.4)$$

จากสมการทั้ง 3 ในข้างต้นจะได้;

$$W_a = r_s + r_l - r_{sl} = r_l(1+\cos\theta) \quad (2.5)$$

$$W_s = r_s - r_l - r_{sl} = -r_l + (r_s + r_{sl}) = r_l(\cos\theta - 1) \quad (2.6)$$

$$W_l = r_s - r_{sl} = r_l \cos\theta \quad (2.7)$$

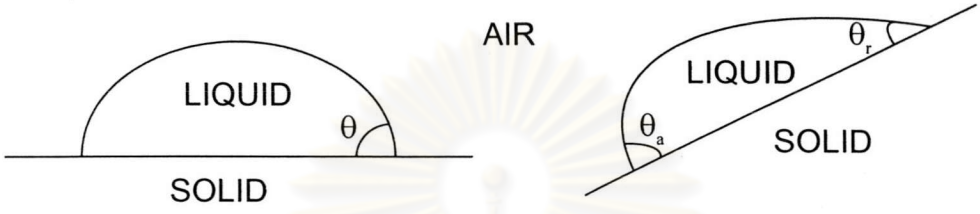
จากสมการจะพบว่าที่สภาวะสมดุล $\theta > 90^o$ W_a จะมีค่าน้อยส่วน W_s และ W_l จะมีค่าน้อยกว่าศูนย์ ของเหลวที่อยู่บนผิวของแข็งจะไม่เกิดการกระจายและจะเกาะติดอยู่บนผิว จนในที่สุดของเหลวจะไหลตามผิวไปรวมตัวกัน (บริเวณขอบ) และหลุดออกไปเองเมื่อมีน้ำหนักมากขึ้น

2.4.2 คุณสมบัติไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic)

คุณสมบัติไม่ชอบน้ำเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของผิวลูกถ้วยที่แสดงลักษณะการจับเกาะของหยดน้ำบนผิวลูกถ้วย และยังเป็นคุณสมบัติสำคัญที่ใช้ในการเลือกลูกถ้วยเพื่อนำไปติดตั้งในบริเวณที่มีระดับความเปราะเปื้อนสูง เนื่องจากถ้าลูกถ้วยมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำสูงจะทำให้หยดน้ำที่เกาะบนผิวลูกถ้วยมีลักษณะแยกเป็นเม็ดๆ ไม่เชื่อมต่อถึงกันทำให้ทางเดินของกระแสรั่วตามผิวลูกถ้วยไม่ต่อเนื่องและลดลง โอกาสที่ลูกถ้วยจะเกิดการวาบไฟตามผิวจึงมีค่าน้อยลง

ก) การแบ่งระดับความไม่ชอบน้ำ

ตามมาตรฐาน STRI Guide 92/1 ได้แบ่งระดับการแบ่งระดับความไม่ชอบน้ำออกเป็น 7 ระดับ โดยระดับ 1 จะมีค่าความไม่ชอบน้ำสูงสุดและระดับ 7 จะมีค่าความไม่ชอบน้ำต่ำสุด (เปียกน้ำได้ง่าย) ดังแสดงในตารางที่ 2.3 ซึ่งเกณฑ์ที่ใช้ในการแบ่งระดับความไม่ชอบน้ำ คือ มุมระหว่างหยดน้ำกับพื้นผิวที่ทำการพิจารณาดังรูปที่ 2.3



ก ข

รูปที่ 2.3 มุมระหว่างหยดน้ำกับพื้นผิวที่ทำการพิจารณา
ก) พื้นผิวในแนวระนาบ ข) พื้นผิวในแนวเอียง

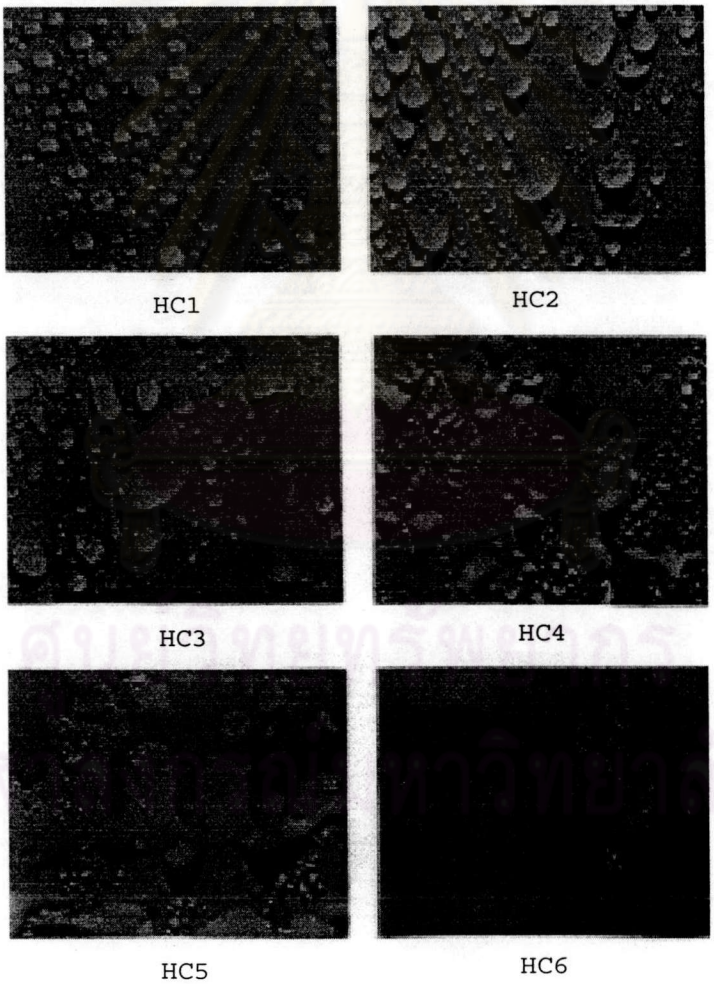
ตารางที่ 2.3 การแบ่งระดับของความเปรอะเปื้อน

ระดับความไม่ชอบน้ำ	นิยาม
1	- มีเพียงหยดน้ำเป็นเม็ดๆกระจายแยกกันตามผิว - หยดน้ำส่วนใหญ่จะมีมุม $\theta_r > 80°$
2	- มีเพียงหยดน้ำเป็นเม็ดๆกระจายแยกกันตามผิว - หยดน้ำส่วนใหญ่จะมีมุม $50° < \theta_r < 80°$
3	- มีเพียงหยดน้ำเป็นเม็ดๆกระจายแยกกันตามผิว - หยดน้ำส่วนใหญ่จะมีมุม $20° < \theta_r < 50°$, มี ลักษณะเป็นหยดเพียงระยะเวลาสั้นๆ
4	- มีทั้งหยดน้ำและรอยเปียกจากทางน้ำไหลให้เห็น - บริเวณที่เปียกตลอดน้อยกว่า 2 cm^2 พร้อมกับครอบคลุมพื้นที่น้อยกว่า 90 % ของพื้นที่ทดลอง

ตารางที่ 2.3 (ต่อ) การแบ่งระดับของความเปรอะเปื้อน

ระดับความไม่ชอบน้ำ	นิยาม
5	- มีบริเวณที่เปียกตลอดบางแห่งมีพื้นที่มากกว่า 2 cm^2 แต่ยังครอบคลุมพื้นที่น้อยกว่า 90 % ของพื้นที่ทดลอง
6	- มีบริเวณที่เปียกตลอดครอบคลุมพื้นที่มากกว่า 90 % ของพื้นที่ทดลอง แต่ยังมีบริเวณที่ไม่เปียกให้สังเกตได้ (เป็นจุดหรือรอยเล็กๆ)
7	- มีลักษณะเป็นฟิล์มน้ำปกคลุมพื้นที่ทดลองทั้งหมด

ตัวอย่างของระดับความไม่ชอบน้ำได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.4



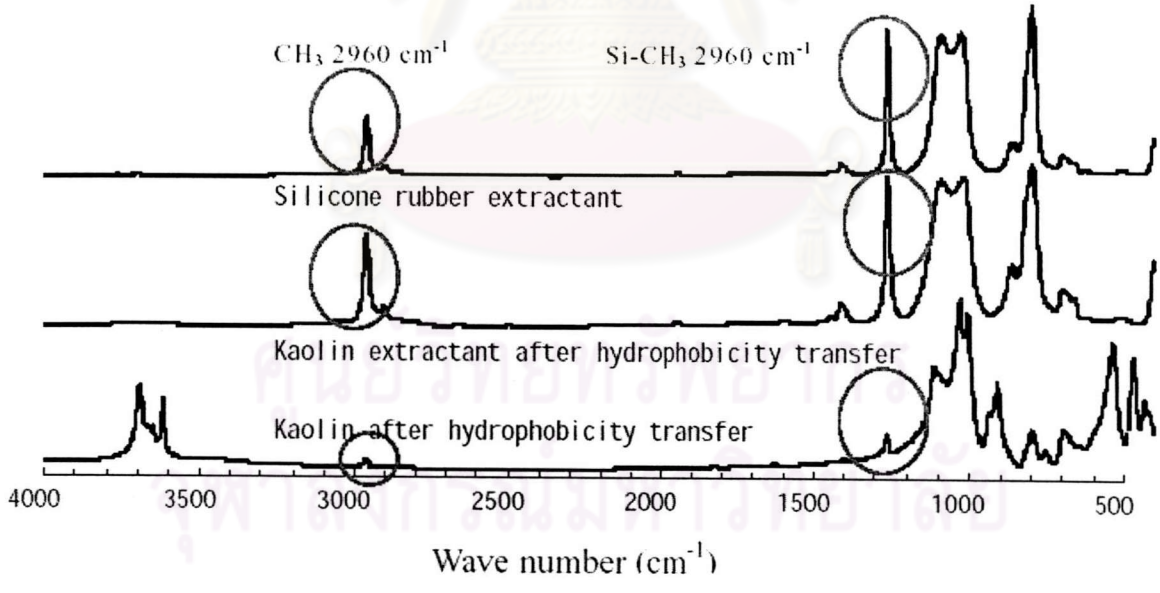
รูปที่ 2.4 ตัวอย่างพื้นผิวแบ่งตามระดับความไม่ชอบน้ำจากระดับที่ 1 ถึง 6

ข) ปรากฏการณ์ Hydrophobic Transfer [Wang, 2002]

1. โมเลกุลน้ำหนักเบาในเนื้อยางซิลิโคน

ยางซิลิโคนที่ผ่านกระบวนการผลิตที่สมบูรณ์แบบจะมีโครงสร้างที่มีเสถียรภาพมาก ไม่ถูกละลายด้วยสารทำละลายและไม่หลอมเหลวแม้จะอยู่ภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูง ในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมเนื้อยางซิลิโคนมักจะมีห่วงโซ่โมเลกุลน้ำหนักเบาเกิดขึ้นและมีสารอื่นๆปะปนอยู่เสมอ แต่สิ่งที่น่าสนใจของห่วงโซ่โมเลกุลน้ำหนักเบาที่ดูเหมือนเป็นเพียงสิ่งเจือปนในเนื้อสาร คือ เป็นสิ่งสำคัญที่ส่งผลถึงคุณสมบัติทางกายภาพของลูกถ้วยยางซิลิโคน (Silicone Rubber Insulator : SIR) จากการทดลองหลายครั้งในอดีตพบว่า

- ในเนื้อยางซิลิโคนจะมีห่วงโซ่โมเลกุลน้ำหนักเบาที่มีความคล่องตัวสูงเกิดขึ้นจำนวนหนึ่ง จากการวิเคราะห์เนื้อสารที่ได้จากยางซิลิโคนและ Kaolin (สารจำลองความเปรอะเปื้อน) จากผิวลูกถ้วยซิลิโคนที่จำลองสภาวะเปรอะเปื้อนด้วยวิธี Fourier Transform-infrared spectrum (FTIR) ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ในการตรวจวัดหมู่โครงสร้าง (function group) ของสารในย่านพลูออเรสเซนต์(75 – 750 kHz) พบว่าสเปคตรัมที่ได้มีลักษณะเหมือนกัน แสดงให้เห็นว่ามีห่วงโซ่โมเลกุลน้ำหนักเบาเกิดขึ้นจริง



รูปที่ 2.5 สเปคตรัมของยางซิลิโคนและ Kaolin จากผิวยางซิลิโคนที่ได้จากวิธี FTIR

- สิ่งเปรอะเปื้อนที่มีลักษณะเป็น Hydrophilic (ระดับความไม่ชอบน้ำต่ำ,เปียกน้ำได้ง่าย) ที่เกาะบนผิวลูกถ้วยจะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาผ่านไป โดยจะค่อยๆเปลี่ยนเป็นผิวที่ไม่ชอบน้ำ เรียกปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นว่าปรากฏการณ์ Hydrophobicity Transfer จากการวิเคราะห์สิ่งเปรอะเปื้อนที่เกาะบนผิวลูกถ้วยยางซิลิโคนด้วยวิธี FTIR พบว่ามีอนุภาค CH_3 (methyl group) เกิดขึ้นซึ่งมีลักษณะเหมือนกับสเปคตรัมที่ได้จากเนื้อยางซิลิโคน ดังรูปที่ 2.5

2. กลไกการเกิดปรากฏการณ์ Hydrophobicity Transfer

การเคลื่อนย้ายโมเลกุลน้ำหนักเบาจากเนื้อยางซิลิโคน ,กระบวนการดูดซึมโมเลกุลน้ำหนักเบาทั้งทางกายภาพและทางเคมีบนสิ่งเปรอะเปื้อนเป็นสิ่งสำคัญที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ Hydrophobicity Transfer ของยางซิลิโคน คุณสมบัติของผิวของสิ่งเปรอะเปื้อนก็เป็นสิ่งสำคัญอีกประการหนึ่งในการดูดซึมโมเลกุลน้ำหนักเบา โดยความเร็วในการดูดซึมหรือการเคลื่อนย้ายขึ้นอยู่กับปัจจัย 3 ประการ

- ความถี่ในการเกิดโมเลกุลน้ำหนักเบาที่มีความคล่องตัวสูง จากการใช้งานจริงและการทดลองในห้องทดลองพบว่า ยางซิลิโคนที่ใช้กันทั่วไปมีคุณสมบัติเพียงพอในการสร้างโมเลกุลน้ำหนักเบาที่ทำเกิดปรากฏการณ์ Hydrophobicity Transfer ให้คงอยู่ตลอดการใช้งาน
- มีกิจกรรมของวัสดุ polymer ที่เพียงพอ ได้แก่ ความจุและปริมาณของสารเติม ,จำนวน cross-link ,การกระจายน้ำหนักของโมเลกุลในเนื้อยางซิลิโคน และปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อกิจกรรมและลักษณะที่เปลี่ยนแปลงของระบบในยางซิลิโคน
- คุณสมบัติทางเคมีและลักษณะโครงสร้างของสิ่งเปรอะเปื้อน

ถึงแม้ว่าในทางปฏิบัติเราจะไม่สามารถควบคุมระดับมลภาวะที่เกิดขึ้นได้ แต่เราก็สามารถที่จะคาดคะเนถึงสิ่งจะเกิดขึ้นได้ทำให้สามารถเลือกใช้ชนิดลูกถ้วยที่เหมาะสมและวางแผนในการบำรุงรักษาได้ สำหรับลูกถ้วย SIR การนำไปใช้ใกล้กับบริเวณที่มีความเป็นด่างและทะเลนั้นดูเหมือนว่าจะมีความเสี่ยงเนื่องจากการสะสมของเกลือจำนวนมากบนลูกถ้วยและความเป็นไปได้ที่คุณสมบัติไม่ชอบน้ำของลูกถ้วยจะมีค่าต่ำลงเพราะความเร็วและความสามารถในการกระจายของปรากฏการณ์ Hydrophobicity Transfer จะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณเกลือ (NaCl ,$CaSO_4$) บนผิวลูกถ้วยมีจำนวนมากขึ้น

ค) สาเหตุที่ทำให้สูญเสียคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ

- สภาพผิวที่เปียก
- การดิสชาร์จบนผิว เช่น การอาร์คบนแถบแห้ง (มีพลังงานสูง) ,water-induced corona discharge (มีพลังงานต่ำ) เป็นต้น ทำให้พื้นผิวของยางซิลิโคนเสียหาย

2.5 แนวทางการแก้ไขการเกิดวาบไฟตามผิวลูกถ้วยเนื่องจากการใช้งานในบริเวณเปรอะเปื้อน

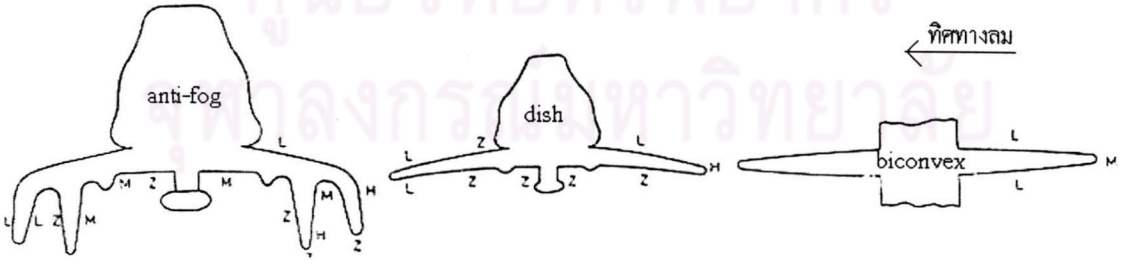
วิธีการป้องกันไม่ให้เกิดวาบไฟตามผิวลูกถ้วยในสภาวะเปรอะเปื้อน มีอยู่ด้วยกันหลายวิธี ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.5.1 การลดปริมาณการสะสมของสิ่งเปรอะเปื้อนบนผิวลูกถ้วย

การป้องกันการเกิดวาบไฟตามผิวลูกถ้วยโดยวิธีการลดปริมาณการสะสมของสิ่งเปรอะเปื้อน ได้แก่การทำความสะอาดลูกถ้วยตามระยะเวลาที่กำหนด หรือ การใช้ลูกถ้วยประเภทที่มีรูปทรงที่ยากแก่การจับเกาะของสิ่งเปรอะเปื้อน (Aerodynamic profiles)

ก) การฉีดล้างทำความสะอาดลูกถ้วยตามระยะเวลาที่เหมาะสม เป็นวิธีดั้งเดิม จะทำเมื่อลูกถ้วยเริ่มสกปรก สามารถทำได้ทั้งในขณะดับกระแสไฟฟ้า(De-energize) และขณะจ่ายกระแสไฟฟ้า (Hot line) โดยจะต้องพิจารณาค่าความนำไฟฟ้า(Conductivity)ของน้ำที่ใช้ในการฉีด ระยะห่าง และ แรงดันของน้ำ (Minimum distance and nozzle pressure) ทิศทางลม (Wind direction) ตลอดจนลักษณะการติดตั้งของลูกถ้วย

ข) การออกแบบลูกถ้วยให้มีรูปร่างที่ทำให้การจับเกาะของสิ่งเปรอะเปื้อนทำได้ยากขึ้น จากผลการศึกษาการจับเกาะของสิ่งเปรอะเปื้อนบนลูกถ้วยที่มีรูปร่างต่างๆดังแสดงในรูปที่ 2.6 พบว่าลูกถ้วยแบบ biconvex มีสิ่งเปรอะเปื้อนจับเกาะน้อยที่สุด รายละเอียดการจับเกาะของสิ่งเปรอะเปื้อนบนผิวลูกถ้วยตัวอย่างแสดงในตารางที่ 2.4



รูปที่ 2.6 การจับเกาะที่ส่วนต่างๆของผิวลูกถ้วยแต่ละแบบ
ที่เกิดจากสิ่งเปรอะเปื้อนประเภทควัน เคลื่อนที่ด้วยความเร็วลมที่แตกต่างกัน

โดยที่ H คือ บริเวณที่มีการจับเกาะหนาแน่น

M คือ บริเวณที่มีการจับเกาะปานกลาง

L คือ บริเวณที่มีการจับเกาะเบาบาง

Z คือ บริเวณที่ไม่มีการจับเกาะหรือมีการจับเกาะที่น้อยมาก

ตารางที่ 2.4 ปริมาณการจับเกาะของสิ่งเปรอะเปื้อน (mg) บนลูกถ้วยแต่ละแบบ

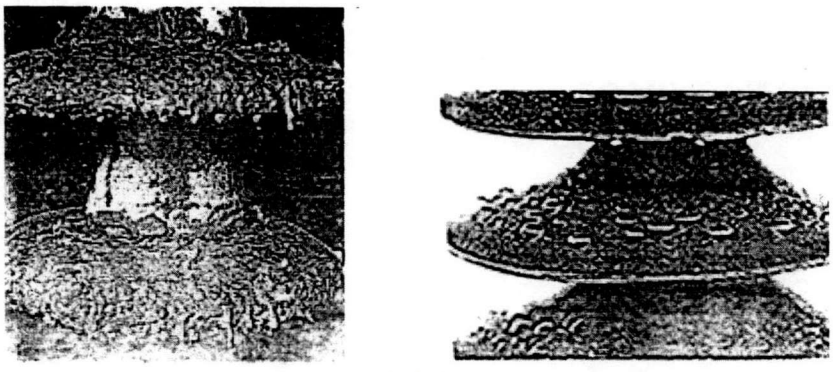
ความเร็วลม	ลูกถ้วยแบบ anti- fog	ลูกถ้วยแบบ disk	ลูกถ้วยแบบ biconvex
9 m/s	630	390	40
1.5 m/s	150	10	น้อยมาก

ปัจจัยที่สำคัญอีกประการหนึ่งที่จะต้องพิจารณาในการออกแบบรูปร่างของลูกถ้วยคือการทำความสะอาดตัวเองโดยธรรมชาติ เมื่อมีลมพัดผ่านหรือฝนตก ลูกถ้วยแบบ anti-fog ออกแบบให้มีระยะรั่วสูงขึ้นแต่จะพบว่าโอกาสที่สิ่งเปรอะเปื้อนจับเกาะมีได้สูงสุด ลูกถ้วยแบบ disk โอกาสที่สิ่งเปรอะเปื้อนจับเกาะมีมากกว่าลูกถ้วยแบบ biconvex แต่ก็มีคุณสมบัติในการทำความสะอาดตนเองโดยอาศัยปรากฏการณ์ธรรมชาติได้ดีกว่า

2.5.2 การป้องกันการเกิดสภาพนำไฟฟ้าบนผิวลูกถ้วย

สภาพนำไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนผิวลูกถ้วย เป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการเพิ่มขึ้นของกระแสรั่วไหลตามผิว จะเป็นผลให้ลูกถ้วยมีโอกาสที่จะเกิดวาบไฟตามผิวได้ง่าย การป้องกันไม่ให้เกิดสภาพนำไฟฟ้าที่มีลักษณะฟิล์มนำไฟฟ้ากระจายอยู่อย่างต่อเนื่องตลอดผิวลูกถ้วย สามารถทำได้โดยการเคลือบผิวของลูกถ้วยด้วยวัสดุที่มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ(Water repellent หรือ hydrophobic material) เช่น พวก Silicone pastes หรือ Silicone elastomer หรือการใช้ลูกถ้วยยางซิลิโคน (Silicone rubber insulator)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ก) ข)

รูปที่ 2.7 การเคลือบผิวลูกถ้วยด้วยวัสดุไม่ชอบน้ำ

ก) การจับเกาะของสิ่งเปรอะเปื้อนบนผิว ลูกถ้วยที่เคลือบด้วย Hydrocarbon grease หลังจากติดตั้งใช้งานเป็นเวลา 3 ปี ในบริเวณเปรอะเปื้อน

ข) ลักษณะการจับเกาะของหยดน้ำบนผิวของลูกถ้วยยางซิลิโคน

2.5.3 การเพิ่มความคงทนต่อแรงดันวาบไฟตามผิวลูกถ้วยโดยการเพิ่มระยะรั่ว

การเพิ่มระยะรั่ว (Leakage distance) ของลูกถ้วยทำได้โดยการติดตั้ง Creepage extender หรือการใช้ลูกถ้วยที่มีระยะรั่วมากขึ้น การเพิ่มระยะรั่วของลูกถ้วยให้มากขึ้นนั้นทำให้กระแสรั่วไหลเกิดขึ้นน้อยลงเช่น ลูกถ้วยแบบ Anti fog มาตรฐาน IEC 815[1986] ได้แนะนำค่าต่ำสุดของ Nominal specific creepage distance (mm/kV) ที่ใช้สำหรับการออกแบบหรือเลือกใช้ลูกถ้วยที่จะนำไปใช้ในบริเวณเปรอะเปื้อนโดยเป็นฟังก์ชันของระดับของสิ่งเปรอะเปื้อนของสถานที่นั้นๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.5 โดยที่ ระยะรั่ว คือ ระยะที่สั้นที่สุดที่วัดตามผิวลูกถ้วยระหว่างอิเล็กโทรด และอาจจะมีการพิจารณาปัจจัยอย่างอื่นอีกเช่น ระยะอาร์ค (Arcing distance) คือ ระยะที่สั้นที่สุดที่วัดระหว่างอิเล็กโทรดผ่านอากาศหรือระยะที่วัดตามแนวเกิดอาร์ค และ ความยาวปกติ (Nominal length) คือ ระยะที่วัดระหว่างจุดศูนย์กลางของรูหรือช่องของฝาครอบโลหะด้านบนและด้านล่างของลูกถ้วย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.5 ค่าต่ำสุดของ Nominal specific creepage distance ที่ใช้สำหรับการออกแบบหรือเลือกใช้ลูกถ้วยที่จะนำไปใช้ในบริเวณเปรอะเปื้อน [IEC 815, 1986]

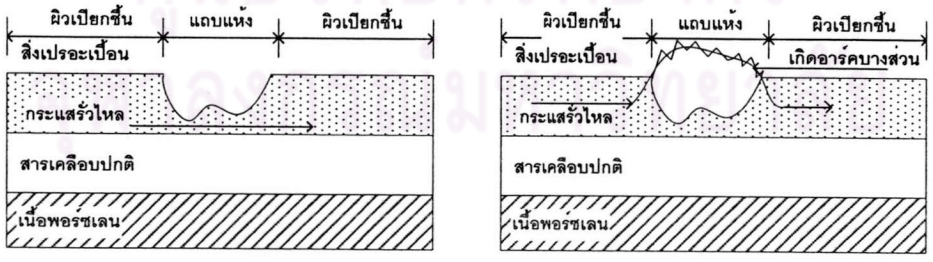
ระดับของความเปรอะเปื้อน	ค่าต่ำสุดของ Nominal specific creepage distance (mm/kV*)
เล็กน้อย	16
ปานกลาง	20
สูง	25
สูงมาก	31

* ค่าแรงดันระหว่างสาย (line to line voltage)

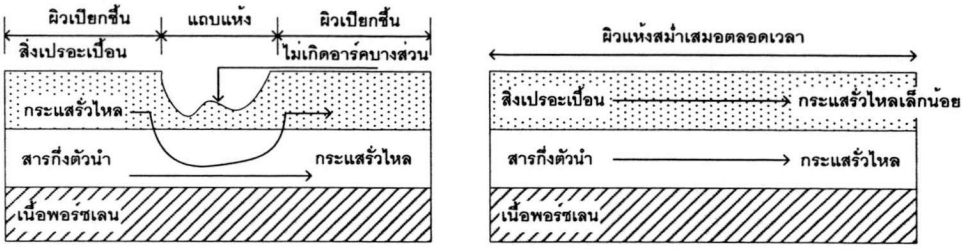
โดยที่บริเวณที่มีระดับของความเปรอะเปื้อนเบาบาง ค่าต่ำสุดของ Nominal specific creepage distance อาจจะมีค่าน้อยกว่า 16 mm/kV ก็ได้ แต่จะต้องไม่น้อยกว่า 12 mm/kV (ค่าต่ำสุดที่ยินยอมให้ใช้) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับการดูแลบำรุงรักษา และบริเวณที่มีระดับของความเปรอะเปื้อนสูงมากเป็นพิเศษ ค่าที่ระบุไว้คือ 31 mm/kV อาจจะไม่เพียงพอที่จะสามารถป้องกันการเกิดวาบไฟตามผิวได้ ดังนั้นควรจะพิจารณาใช้ลูกถ้วยที่มีค่า Nominal specific creepage distance เพิ่มขึ้น โดยจะขึ้นอยู่กับการบำรุงรักษาและผลการทดสอบจากห้องปฏิบัติการ และประสบการณ์ผู้ออกแบบ บางกรณีอาจจะต้องพิจารณาควบคู่ไปกับการวางแผนการทำความสะอาดลูกถ้วยหลังจากติดตั้งใช้งานหรือการใช้สารเคลือบเคลือบลูกถ้วยอีกด้วย

2.5.4 การใช้ลูกถ้วยเคลือบสารกึ่งตัวนำ

การเคลือบผิวลูกถ้วยด้วยสารกึ่งตัวนำทำให้มีกระแสรั่วไหลตามผิวเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อย การกระจายของแรงดันไฟฟ้าและอุณหภูมิที่ผิวของลูกถ้วยจะสม่ำเสมอตลอดผิวลูกถ้วย จึงไม่ทำให้เกิดปรากฏการณ์แถบแห้งอันเป็นสาเหตุการเกิดวาบไฟตามผิวได้โดยง่าย



รูปที่ 2.8 กระแสรั่วไหลบนลูกถ้วยเคลือบธรรมดา



รูปที่ 2.9 กระแสรั่วไหลบนลูกถ้วยเคลือบสารกึ่งตัวนำ

2.5.5 ใช้อุปกรณ์พิเศษป้องกัน

อุปกรณ์ป้องกันเป็นอุปกรณ์ทำให้ผิวส่วนใหญ่ของลูกถ้วยแห้งในขณะที่ลูกถ้วยเริ่มเปียกชื้น และช่วยป้องกันการสะสมของมลภาวะบนลูกถ้วย

รูปที่ 2.10 ตัวอย่างของอุปกรณ์ที่ป้องกันไม่ให้ส่วนล่างของลูกถ้วย
สะสมมลภาวะมากเกินไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย