การค้นคว้าวัสดุที่ใช้ทำลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า

RESEARCH OF MATERIAL FOR HIGH VOLTAGE INSULATOR

โดย

นายบัณฑิต	ศรีอรุโณทัย	32. 1159
นายธนิต	ณ. อุบล	32. 1114
นายธวัชชัย	วงศ์นรากุล	32. 1119
นายบุญช่วย	เงาวิศิษฏ์กุล	32. 1163
นายปาลวัฒน์	เต็มเจริญ	32. 1186

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2535

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

032552

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2535

ภาควิชาไฟฟ้ากำลัง

คณะวิศวะกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การศึกษาค้นคว้าวัสดุที่ใช้ทำลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า

RESEARCH OF MATTERTIAL FOR HIGH VOLTAGE INSULATOR

ผู้จัดทำ

นายบัณฑิต	ศรีอรุโณทัย
นายธนิต	ณ. อุบล
นายธวัชชัย	วงศ์นรากุล
นายบุญช่วย	เงาวิศิษฏ์กุล
นายปาลวัฒน์	เต็มเจริญ

. . . . . .อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ สมเจตน์ เทียมเมือง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

032552

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	2
ฉนวนแข็ง	2
วัสดุที่ใช้ทำอินซูเลเตอร์	6
- คุณสมบัติของปอร์ชเลน	9
- คุณสมบัติของอินซูเลเตอร์แบบแก้วเหนียว	14
- คุณสมบัติของเรซิ่นบอนด์กลาสไฟเบอร์	18
- คุณสมบัติของโพลิเมอร์และโพลิเมอร์คอนกรีต	22
ขบวนการการผลิตอินซูเลเตอร์	24
การทดสอบลูกถ้วยฉนวน	31
บทที่ 3 การทดลองและวิธีการทดลอง	33
ขั้นตอนการผลิตลูกถ้วย	33
ขั้นตอนการหล่อเรซิ่น	37
อุปกรณ์การทดลอง	39
ขั้นตอนและวิธีการทดลอง	39
ผลการทดลอง	40
บทที่ 4 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	46
สรุป	46
วิจารณ์ผลการทดลอง	46
ลักษณะจำเพาะของลูกถ้วยที่ผลิตจากเรซิ่น	47
แนวทางการศึกษาต่อไป	47
กิตติกรรมประกาศ	III
เอกสารอ้างอิง	IV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การค้นคว้าเกี่ยวกับวัสดุที่ใช้ทำลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า

นายบัณฑิต ศรีอรุโณทัย
นายธนิต ณ. อุบล
นายธวัชชัย วงศ์นรากุล
นายบุญช่วย เงาวิศิษฏ์กุล
นายปาลวัฒน์ เต็มเจริญ
อาจารย์สมเจตน์ เทียมเมือง อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2535

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นการศึกษาถึงคุณสมบัติของวัสดุต่างๆที่นำมาใช้ทำอินซูเลเตอร์ ตลอดจนแสดงถึงขั้นตอนในการผลิตอินซูเลเตอร์ในปัจจุบัน และทำการผลิตโดยใช้เรซิ่นเป็นวัสดุที่ใช้ในการทำลูกถ้วยแบบแขวน แล้วทำการทดสอบโดยวิธี 50 % แฟลชโอเวอร์ เพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ที่จะสามารถนำเรซิ่นมาทำลูกถ้วยแบบแขวน แล้วนำมาเปรียบเทียบคุณสมบัติทางไฟฟ้ากับลูกถ้วยที่ทำด้วยเซรามิค ตลอดจนกล่าวถึงวิธีที่ทำการสร้างลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้าที่ได้ทำจากเรซิ่นด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Research Of Material For High Voltage Insulater

Mr.Tanit Naubol
Mr.Tawatchai Vongnaragul
Mr.Bundid Sriarunothai
Mr.Bunchuiy Ngouvisitkul
Mr.Palawat Temcharoen
Associate Mr.Somjate Tiammuang
1992

Abstract

This thesis is about the properties of the insulator and the method in manufacturing the insulator and method in producing the resin's suspention insulator . After producing the resin's suspention insulator , we test it with 50% flash over method and compare with porcelain's insulator to study that we can use resin's insulator instead of porcelain's insulator or not .

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

เนื่องจากปัจจุบันนี้ ไฟฟ้าเป็นสิ่งจำเป็นต่อมนุษย์ทุกคน เป็นปัจจัยที่ขาดไม่ได้ ดังนั้นไฟฟ้าจึงมีบทบาท มีความสำคัญต่อมนุษย์เป็นอย่างมาก อินซูเลเตอร์จึงเป็นสิ่งที่มีความสำคัญ และเป็นสิ่งที่พบเห็นได้ทั่วไป สำหรับวัสดุหลักที่ใช้ในการผลิตอินซูเลตอร์ในปัจจุบันนี้ มีอยู่เพียงไม่กี่ชนิด คือ ปอร์ซเลน (porcelain) แก้วเหนียว (toughened glass) โพลิเมอร์ (polymer) และเรซิ่นบอนด์กลาสไฟเบอร์ (resin-bonded glass fiber) ในประเทศไทยส่วนใหญ่จะเป็นอินซูเลเตอร์ที่ทำจากปอร์ซเลนเป็นส่วนใหญ่ แต่ในปัจจุบันก็ได้มีการใช้แก้วเหนียวบ้างแล้ว

ในการค้นคว้าเกี่ยวกับวัสดุที่ใช้ในการทำลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า เนื่องจากยังไม่ค่อยมีการค้นคว้าและศึกษาเรื่องนี้มากนัก และอีกทั้งยังไม่มีการผลิตในประเทศอีกด้วย ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาถึงการผลิต และคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการผลิต เพื่อเป็นการศึกษาหาความรู้ และเพื่อใช้เป็นแนวทางในการนำเอาวัสดุอื่นๆที่มีคุณสมบัติที่ดี ซึ่งอาจจะสามารถนำมาใช้ในการผลิตลูกถ้วยต่อไปได้

ในปัจจุบันวิทยาการต่างๆได้ก้าวหน้าไปอย่างมาก เกิดสิ่งใหม่ๆขึ้นมากมาย ซึ่งการเกิดขึ้นของสิ่งต่างๆนี้อาจเกิดจากการลองผิดลองถูก เกิดขึ้นโดยบังเอิญ เกิดจากการสังเกตุ ความพยายาม และเชื่อมั่นว่าสิ่งนี้ต้องเกิดขึ้นได้ ถ้าไม่มีความคิดเหล่านี้ก็จะไม่มีวิทยาการใหม่ๆเกิดขึ้น การที่เรานำเรซิ่นมาทำลูกถ้วยนี้ก็เกิดจากความที่อยากศึกษาว่า เรซิ่นสามารถนำมาผลิตลูกถ้วยแทนวัสดุชนิดอื่นได้หรือไม่ เราจะไม่สามารถบอกได้ว่าเลยว่าเรซิ่นจะสามารถทดแทนวัสดุชนิดอื่นได้หรือไม่ นอกจากว่าเราได้ทำการศึกษาแล้วอย่างละเอียดและจริงจังแล้วเท่านั้น

การศึกษาในชิ้นนี้เป็นเพียงแต่การเริ่มต้น ยังจะต้องมีการนำไปพัฒนาและทดลองอีกมาก เพื่อจะสรุปว่าเราสามารถนำเรซิ่นมาใช้ทำลูกถ้วยได้หรือไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1) ฉนวนแข็ง

ฉนวนไฟฟ้า นอกจากจะทำหน้าที่กั้นหรือแยกส่วนที่มีไฟฟ้าที่มีความต่างศักย์มิให้สัมผัสหรือลัดวงจรถึงกันแล้ว บางส่วนยังต้องทำหน้าที่ยึดให้มั่นคงหรือรับแรงกลอันเกิดจากน้ำหนักของโครงสร้าง หรือแรงกลไดนามิคส์ที่เกิดจากกระแสไฟฟ้าอีกด้วย ฉนวนก๊าซและฉนวนเหลวใช้ทำหน้าที่การฉนวนทางไฟฟ้าได้ดี และเพียงพอแต่ก็ต้องใช้ฉนวนแข็งประกอบทำหน้าที่ยึดและรับแรงกล ตัวอย่างง่ายๆ เช่นสายไฟซึ่งในอากาศ ใช้อากาศทำหน้าที่ฉนวนแต่สายไฟจะลอยและยึดอยู่ได้อย่างไร จำเป็นต้องใช้ฉนวนแข็ง เช่น ลูกถ้วยทำหน้าที่ยึดสายไฟไว้ให้มั่นคงห่างจากดิน และสายไฟอื่นที่มีศักย์ไฟฟ้าไม่เท่ากันหรือเคเบิลอัดก๊าซ หรืออัดน้ำมันก็ตามต้องใช้ฉนวนแข็งเป็นตัวยึดตัวนำ หรือในหม้อแปลงไฟฟ้าใช้ฉนวนเหลวหรือก๊าซเป็นตัวฉนวน แต่ก็ต้องใช้ฉนวนแข็งทำหน้าที่ยึดขดลวดต่างๆและแกนเหล็กให้มั่นคงให้มีระยะห่างตามที่กำหนดออกแบบ ฉะนั้นจึงกล่าวได้ว่าการฉนวนแข็งอาจกำหนดด้วยคุณสมบัติสำคัญ คือ

1. ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (dielectric strenght)
2. เปอร์มิตติวิตี้ (permitivity)
3. แฟคเตอร์พลังงานสูญเปล่าในไดอิเลคตริค (tg = δ)
4. ความคงทนต่อแรงกล
5. ความคงทนต่อปฏิกิริยาเคมี , ความร้อน

ฉนวนแข็งที่ดีนั้นต้องมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูง มีความต้านทานสูงทุกระดับแรงดัน มีพลังสูญเปล่าในไดอิเลคตริคต่ำ ทนต่อแรงกลได้สูง ปลอดจากฟองก๊าซและความชื้น ไม่ดูดซึมความชื้น ทนความร้อนได้สูง และทนต่อปฏิกิริยาเคมีได้ดี และไม่เป็นพิษเมื่อติดไฟ ฉนวนแข็งที่ใช้กันอยู่กันทั่วไป อาจได้มาจากสารอินทรีย์ เช่น กระดาษ , ผ้า , ยาง เป็นต้น หรือสารอนินทรีย์ เช่น ไมก้า แก้ว เซรามิค หรือสารสังเคราะห์อื่นๆ เช่น พลาสติก รายละเอียดของ ฉนวนแข็งที่จะกล่าวในที่นี้คือ

2.1.1) กระดาษ

กระดาษปกติที่ใช้เพื่อวัตถุประสงค์การฉนวน รู้จักในลักษณะกระดาษบางๆ หรือกระดาษเหนียว ความหนาแน่น และความหนาขึ้นกับการใช้งาน ความหนาแน่นต่ำ (0.8 กรัม/ล.บ.เมตร) เหมาะกับการใช้เป็นไดอิเลคตริคของคาปาซิเตอร์ความถี่สูง และเป็นฉนวนของเคเบิลความหนาแน่นปานกลาง (1.0 กรัม/ล.บ.เมตร) ใช้เป็นไดอิเลคตริคของคาปาซิเตอร์ไฟฟ้ากำลัง กระดาษที่มีความหนาแน่นสูงใช้ในคาปาซิเตอร์กระแสตรงเพื่อเก็บ พลังงาน หรือเครื่องจักรกล ไฟฟ้ากระแสตรง

เนื่องจากกระดาษมีคุณสมบัติดูดความชื้นได้ ฉะนั้นการใช้กระดาษเป็นฉนวนจำเป็นต้องทำให้แห้ง แล้วชุบฉนวนเหลว เช่น น้ำมันฉนวน ค่าเปอร์มิตติวิตี้ของกระดาษชุบฉนวนเหลวขึ้นอยู่กับค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปอร์มิตติวิตี้ของเซลูโลสของกระดาษ และฉนวนเหลวที่ชุบ และความหนาแน่นของกระดาษ ซึ่งค่าเปอร์มิตติวิตี้รวมกันนี้สามารถคำนวณได้ตัวอย่างกระดาษชุบน้ำมันต่างกันแสดงในตารางที่ 1

ฉนวนเหลวที่ใช้ชุบ	เปอร์มิตติวิตี้ของกระดาษชุบฉนวนเหลว ε_r ตามความหนาแน่นกระดาษ		
	0.8 g/cm^3	1.0 g/cm^3	1.2 g/cm^3
Trichlorodipheny l ε_r = 6.1	6.28	6.30	6.4
Pentachlordiphenyl	5.71	5.88	6.06
Transformer oil	3.26	3.72	4.3

ตารางที่ 1

2.1.2) **เซรามิค**

เซรามิคเป็นอนินทรีย์สารได้จากส่วนผสมของดินเหนียว หินบด เฟลสปาร์ ฟลินท์ อะลูมินา แล้วเผาด้วยอุณหภูมิสูง เซรามิคส์อาจแบ่งตามค่าเปอร์มิตติวิตี้ออกได้เป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่มีค่าเปอร์มิตติวิตี้ต่ำ (ε < 12) ใช้ทำลูกถ้วยฉนวนไฟฟ้า ส่วนอีกประเภทหนึ่งมีค่าเปอร์มิตติวิตี้สูง (ε > 12) ใช้เป็นไดอิเลคตริคของคาปาซิเตอร์ดังตัวอย่างสมบัติของไดอิเลคตริคเซรามิคที่ใช้ในทางปฏิบัติแสดงในตารางที่ 2

เซรามิค	ส่วนประกอบทางเคมี	ε_r	tg δ x 10^4
แมกนีเซียม เมคาคิตาเนต	$MgTiO_3$	16	2
สแตรเนียม เซอโคเนท	$SrZrO_3$	38	3
คิตาเนียมออกไซด์	TiO_3	90	5
แคลเซียม คิตาเนต	$CaTiO_3$	150	3
แบเรียม คิตาเนต	$SrTi_3$	200	5
	$BaTiO_3$	1500	150

ตารางที่ 2 เซรามิคค่าเปอร์มิตติวิตี้สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติ	ปอร์ซเลน แรงสูง	ปอร์ซเลน แรงต่ำ	สเตไตท์ พลังงาน สูญเปล่าต่ำ	อะลูมินา	ฟอร์สเตไตน์
ส่วนผสม	ดินเหนียว 50% เฟลสปาร์ 25% ฟลินท์ 25%	ดินเหนียว 50% เฟลสปาร์ 25% ฟลินท์ 25%	$3MgO$ $4SiO_2$ H_2O 0	95.7	$2MgO$ SiO
ดูดความชื้น (ppm)	0	0.5 - 2	0	0	0
ขีดกำจัดอุณหภูมิ (^oC) ที่ปลอดภัย	1000	900	1050	1600	1050
ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า (kv/mm)	2.5	3	8 - 25	16	8 -12
ε_r	5 - 7	5 - 7	6	9	6
tg $\delta \times 10^4$	50 - 100	100 - 200	10	5	3 - 4

ตารางที่ 3 เซรามิคค่าเปอร์มิตติวิตี้ต่ำ

2.1.3) แก้ว

แก้วเป็นสารอนินทรีย์เทอร์โมพลาสติกประกอบด้วยออกไซด์ SiO_2 ที่ซับซ้อนค่าเปอร์มิตติวิตี้มีค่าอยู่ในช่วง 3.5 ถึง 9 ความหนาแน่นตั้งแต่ 2.2 ถึง 6 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ที่อุณหภูมิห้องค่าความต้านทานจำเพาะมีค่าตั้งแต่ 10^{12} ถึง 10^{20} โอห์ม-ซม. ค่าพลังงานสูญเปล่า ไดอิเลคตริค 0.005 ถึง 0.01 ค่าพลังงานสูญเปล่านี้จะมีค่ามากที่สุดที่ความถี่ต่ำ ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 3000 ถึง 5000 KV/cm และลดลงเหลือครึ่งหนึ่งเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น 100^oC

2.1.4) ไมก้า

ไมก้าเป็นชื่อเรียกรวมทั่วไปของแร่ผลึกซิลิเกทของอะลูมินาและโปแตช ซึ่งอาจแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม ด้วยกันคือ (1) muscovite (2) phlogopite (3) fibiolite และ (4) lipidolite โดยที่สองกลุ่มหลังนี้แข็งและเปราะจึงไม่ค่อยใช้ในงานฉนวน ไมก้าสามารถแยกเป็นแผ่นบางๆได้ ไมก้าเป็นวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฉนวนที่มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูง มีพลังงานสูญเปล่าไดอิเลคทริคน้อย ทนต่อความร้อนสูง สามารถรับแรงกลได้ดี ด้วยเหตุนี้เองไมก้าจึงเหมาะที่จะใช้เป็นฉนวนไฟฟ้าได้อย่างกว้างขวาง อุปกรณ์แรงดันต่ำใช้ไมก้าเป็นตัวกั้นระหว่างซี่ของคอมมิวเตเตอร์ ขดลวด อาร์มาเจอร์ สวิตเกียร์ และ อุปกรณ์ทำความร้อน และความเย็น ไมก้าที่บริสุทธิ์มากๆเหมาะที่จะใช้กับความถี่สูง

2.1.5) <u>ยาง</u>

ยางเป็นสารที่มีทั้งตามธรรมชาติและสารสังเคราะห์ของโพลิเมอร์ มีคุณสมบัติการยืดหยุ่นได้ดี คุณสมบัติทางไฟฟ้าของยางขึ้นอยู่กับองค์ประกอบและกรรมวิธีที่ทำให้ยืดหยุ่นได้ (valcanizing) และยังขึ้นอยู่กับสิ่งเจือปนการเปลี่ยนแปลงทางเคมีตามเวลาที่ผ่านไป

2.1.6) <u>พลาสติก</u>

พลาสติกเป็นฉนวนแข็งที่ใช้กันกว้างขวาง เพราะพลาสติกมีคุณสมบัติทนต่อแรงดันไฟฟ้าได้ดีพิเศษ การพัฒนาอุปกรณ์ไฟฟ้าทั้งหลายในปัจจุบันต้องอาศัยพลาสติก พลาสติกประกอบด้วยจำนวนโมเลกุลเล็กๆมากมายเป็นโมเลกุลใหญ่ ฉะนั้นโครงสร้างแตกต่างกันเป็นผลให้มีชนิดของพลาสติกมากหลาย สารสังเคราะห์เทอร์โมเซทติ้งประกอบด้วยโมเลกุลเป็นทรงลูกบาศก์ (สามมิติ) เนื่องจากพลาสติกมีมากมายหลายชนิด จึงขอกล่าวแต่เฉพาะที่มีใช้งานเพื่อการฉนวนไฟฟ้าเท่านั้น

2.1.6.1) <u>โพลีเอททิลีน (Polyethylene = PE)</u>

เป็นสารเทอร์โมพลาสติกที่มีคุณสมบัติพิเศษทางไฟฟ้า ทนต่อความชื้นและปฏิกริยาเคมีได้สูงมีความต้านทานจำเพาะ และความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงแม้แต่ที่ความถี่สูง กระบวนการทำง่าย ราคาไม่แพง ฉะนั้น PE จึงมีที่ใช้งานได้กว้างขวาง โดยเฉพาะใช้ในการฉนวนของสายเคเบิล แกนร่วม (coaxial cable) ทั้งในงานไฟฟ้ากำลังและงานสื่อสาร โดยเหตุที่กระบวนการผลิต PE มีแตกต่างกัน ซึ่งอาจจะทำเพื่อวัตถุประสงค์เพื่อเฉพาะกิจ จึงแบ่งออกเป็นประเภทตามความหนาแน่นมาก น้อย แบบเบา ปานกลาง และแบบหนัก และยังอาจใช้กรรมวิธีผ่านรังสีก้ามมันตภาพ เพื่อเพิ่มคุณสมบัติบางประการ อย่างไรก็ตามทุกชนิดมีความต้านทานจำเพาะสูงกว่า 10^{15} โอห์ม-เซนติเมตร ค่าเปอร์มิตติวิตี้ (50 Hz - 1 MHz) เท่ากับ 2.3 และแฟกเตอร์พลังงานสูญเปล่าในไดอิเลคตริค tg δ เท่ากับ 2×10^{-4} มีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 200 ถึง 400 kV/cm ทนอุณหภูมิได้สูงถึง 90°c ถ้า PE ผ่านรังสีก้ามมันตภาพจะมีความคงทนต่อแรงดัน ไฟฟ้าเพิ่มสูงขึ้นเป็น 700-1000 kV/cm แต่จะมีค่า tg δ เท่ากับ 5×10^{-4}

2.1.6.2) <u>โปลีเอสเตอร์ (Polyesters)</u>

โปลีเอสเตอร์เป็นพลาสติกประเภทเทอร์โมเซทติ้ง ประกอบด้วยกรด dicarboxylic และแอลกอฮอล์ dihydric มีคุณสมบัติคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าสูงมาก ผิวแข็งเป็นพิเศษ และทนต่อแรงปฏิกริยาเคมีทั้งหลายได้ดี อาจแบ่งออกได้เป็นสองประเภท คือ ประเภทอิ่มตัว และไม่อิ่มตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปลีเอสเตอร์ไม่อิ่มตัวใช้ในชั้นแผ่นแก้วบางหรือหล่อแก้วไฟเบอร์ ซึ่งใช้มากในรูปขององค์ประกอบของอุปกรณ์ไฟฟ้า ส่วนโปลีเอสเตอร์อิ่มตัวใช้ทำไฟเบอร์ และฟิลม์ โปลีเอสเตอร์ไฟเบอร์ใช้ทำกระดาษ เสื่อ และใยผ้าเพื่อใช้ในงานไฟฟ้า ส่วนฟิล์มนั้นใช้หุ้มสายไฟ และเคเบิลสำหรับมอเตอร์ คาปาซิเตอร์ และหม้อแปลงไฟฟ้า คุณสมบัติการฉนวนของโปลีเอสเตอร์ ขึ้นอยู่กับประเภทและความถี่ที่ใช้งาน มีค่าเปอร์มิตติวิตี้ 3-7 ความต้านทานจำเพาะ 10^{13}-10^{15} โอห์ม-เซนติเมตร แฟคเตอร์พลังงานสูญเปล่าในไดอิเลคตริคที่ความถี่ 50 Hz เท่ากับ 0.003-0.03 และที่ 1 MHz เท่ากับ 0.006-0.04 และจะยังต่ำลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 25-45 kv/mm

2.1.6.3) <u>โปลิสทีรีน (Polysterene = PS)</u>

โปลิสทีรีนเป็นสารประเภทเทอร์โมพลาสติก มีคุณสมบัติต่างๆกันตามสี ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าราว 20-35 kv/mm ความต้านทานจำเพาะเชิงปริมาตรราว 1^{19} โอห์มซเซนติเมตร เปอร์มิตติวิตี้ที่ 20°C ประมาณ 2.5 มีแฟคเตอร์พลังงานสูญเปล่าไดอิเลคตริคต่ำและไม่ขึ้นอยู่กับความถี่คือ tg δ = 0.002 ที่ความถี่พลังงานถึงความถี่ 10,000 MHz ด้วยเหตุนี้จึงมีการใช้โปลิสทีรีนฟิล์มเป็นไดอิเลคตริคของคะแปซิเตอร์กันมาก เพราะจะทำให้ค่าคะแปซิแตนซ์คงตัวในช่วงความถี่กว้าง และมีความต้านทานสูง

2.1.6.4) <u>โปลิไวนีลคลอไรด์ (Polyvinyl chloride = PVC)</u>

โปลิไวนีลคลอไรด์หรือพีวีซีใช้กันหลายรูปแบบในเชิงการค้า มีแบบที่ไม่เป็นพลาสติก แต่เหนียวทำเป็นรูปร่างต่างๆตามต้องการได้ง่าย ทนต่อปฏิกิริยาเคมี กรดและด่างและไม่ละลายน้ำแรงดันไฟฟ้าสูง ความต้านทานจำเพาะเชิงผิว และเชิงปริมาตรมีค่าสูง ประมาณ 3.8-4.3 ที่ 50 Hz และ tg δ = 0.012 ถึง 0.15 ที่ 50 Hz และ 0.006 ถึง 0.1 ที่ 1 MHz

ส่วนพีวีซีที่อ่อนตัวเป็นพลาสติกได้จะใช้สำหรับหุ้มสายไฟ ปลอกฉนวน และเปลือกนอกของเคเบิล นิยมใช้ฉนวนพีวีซีมากกว่ายางเพราะทนต่อแสงแดด ออกซิเจน และไม่ดูดซึมน้ำหรือความชื้น

2.1.6.5) <u>ไนลอน (Nylon)</u>

ไนลอนเป็นสารประกอบเทอร์โมพลาสติก ซึ่งมีกระบวนการทำให้ทนการกระทบแรงดึง และทนต่อแรงบิดม้วนในช่วงอุณหภูมิกว้างตั้งแต่ 3 - 300°C มีความทนต่อแรงดันได้สูงความต้านทานเฉพาะเชิงผิว และปริมาตรสูงถึงแม้ว่าจะอยู่ในสภาพความชื้นมาเป็นเวลานานแล้วก็ตามทนต่อปฏิกริยาทางเคมี การหล่อหรือเอกซทรูดหรือตบแต่งด้วยเครื่องเป็นรูปร่างต่างๆได้ง่าย เหมาะที่จะใช้งานความถี่สูงและต้องการ พลังงานสูญเปล่าน้อย ในทางวิศวกรรมไฟฟ้ามักใช้ไนลอนเป็นที่ผูกรัดข้อต่อ แหวนรองสายรัดเคเบิ้ล สวิทช์ไฟฟ้าเป็นต้น ไนล่อนมีความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้าประมาณ 15-20 kV/mm. ความต้านทานจำเพาะเชิงปริมาตรประมาณ 10^{12} ถึง 10^{15} โอห์ม-เซนติเมตร ค่าเปอร์มิตติวิตี้ประมาณ 4-14 ที่ 50 Hz. และ 3.5-5 ที่ 1 MHz. แฟคเตอร์พลังงานสูญเปล่าไดอิเลคตริก 0.014 ที่ 50Hz. และ 0.03-0.13 ที่ 1 MHz.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.6.6) **ฟลูออโรคาร์บอนพลาสติก (Fluorocarbon plastics)**

ฟลูออโรคาร์บอนพลาสติกแบ่งเป็น polytetrafluoroethylene (PTFE) , polychlorotrifluoroethylene (PCTFE), polyvinylidene (PVF_2.) ในบรรดาฟลูออโรคาร์บอนพลาสติกนี้ PTFE มีเสถียรภาพทางความร้อน และทางเคมีดีที่สุด และจัดเป็นพลาสติกที่ดีที่สุดในการใช้เป็นฉนวน เพราะมีคุณสมบัติดีพิเศษทั้งทางไฟฟ้าและทางกล จะไม่มีการแตกตัวแม้จะร้อนถึง 300°C ส่วน PCTFE มีค่าเปอร์มิตติวิตี้และพลังงานสูญเปล่าไดอิเลกตริกสูงกว่าแบบ PTFE หลอมละลายที่ 190°C PVF_2 เหมาะที่จะใช้กับงานที่อุณหภูมิเปลี่ยนในช่วงกว้างคือใช้งานได้ดีตั้งแต่ -30°C ถึง 150°C ใช้หุ้มสายควบคุมเป็นปลอกหุ้มคะแปซิเตอร์

2.1.6.7) **อิพ็อกซี-เรซิน**

อิพ็อกซี-เรซิน เป็นสารฉนวนประเภทเทอร์โมเซ็ทติ้ง มีคุณสมบัติดีเยี่ยมทางไดอิเลคตริกและทางกล ง่ายต่อการหล่อขึ้นรูปตามที่ต้องการแม้แต่ที่อุณหภูมิห้อง ทำเป็นตัวฉนวนรูปร่างต่างๆที่ต้องการใช้งาน ส่วนมากจะใช้งานทางด้านวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง เช่น ปลอกฉนวนนำสายลูกถ้วย หุ้มอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า สวิทช์เกียร์ ขดลวด แม้แต่อุปกรณ์อิเลคทรอนิคส์ ใช้ผสานต่อเข้าด้วยกันได้อย่างกว้างขวาง เช่น ปอร์ซเลน ไม้ โลหะ พลาสติก เป็นต้น ใช้งานปิดผนึกรอยต่อเพื่อทำสูญญากาศในห้องทดลอง หรือโรงงานอุตสาหกรรมอิเลคทรอนิค และอุปกรณ์ไฟฟ้าสามารถใช้อิพ็อกซี-เรซินเพื่ออเนกประสงค์ ประหยัดเวลาและราคาไม่แพง

อิพ็อกซี-เรซิน สามารถยืดหยุ่นได้ดี ตัวอย่างทดสอบทนแรงอัดได้ถึง 180,000 psi หรือความดัน 12,000 บรรยากาศ แล้วกลับคืนสู่สภาพเดิมได้หลังจากเอาโหลดออกแล้ว โดยจะไม่เสียรูป ทนต่อดินฟ้าอากาศและสารเคมี มีค่าเปอร์มิตติวิตี้ = 2.2-3.8, แฟคเตอร์พลังงานสูญเปล่าที่ความถี่พลังงาน tg δ = 0.003-0.03 ความคงทนต่อแรงดันไฟฟ้า 75 kV/mm ที่ตัวอย่างหนา 0.025 mm ความต้านทานจำเพาะเชิงปริมาตรสูงถึง 10^{13}-cm

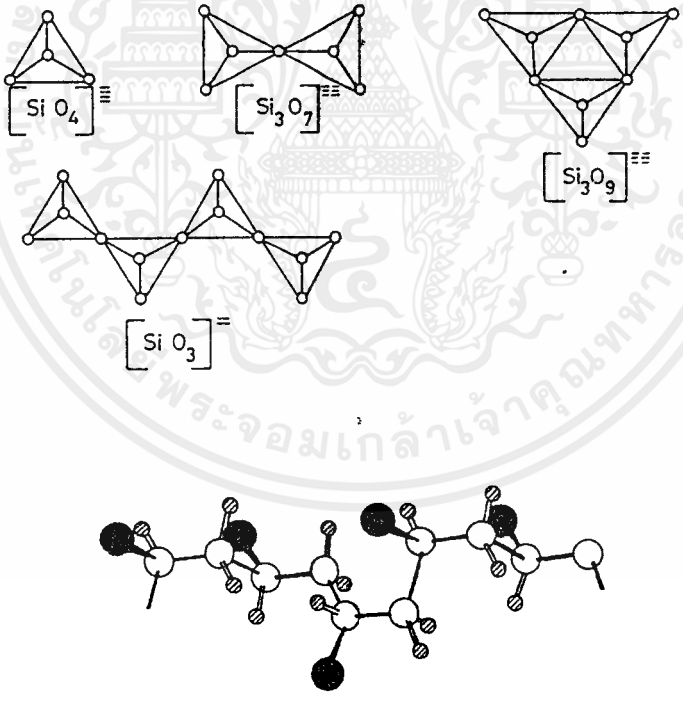
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2) วัสดุที่ใช้ทำอินซูเลเตอร์ [INSULATOR]

2.2.1) ลักษณะพื้นฐานของฉนวนที่ใช้ทำอินซูเลเตอร์

ฉนวนส่วนใหญ่ที่ใช้ทำอินซูเลเตอร์ได้แก่เซรามิคส์และโพลิเมอร์ ซึ่งเกิดจากอะตอมที่มี 4 วาเลนซ์อิเลคตรอน โดยเซรามิคส์จะมีอะตอมของซิลิคอน และโพลิเมอร์จะมีอะตอมของคาร์บอน ซึ่งอะตอมเหล่านี้มีความสามารถในการยึดโครงสร้างให้ยาวออก

ซิลิคอนประกอบด้วยอ๊อกซิเจนในการเรียงตัวเป็นผลึกแว่ควอทซ์ มีโครงสร้างที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ แต่ มีพื้นฐานเป็น Si-O ซึ่งมีมุมใช้ร่วมกัน ดังรูป 1 หรือจะเกิดเป็นรูปแก้ว (glassy form) และเมื่อมีธาตุอื่นผสมก็จะมีการเปลี่ยนแปลงเป็นซิลิเกต (siligate) ทั้งในรูปผลึกหรือรูปแก้ว (electrical porcelain) ดังรูปที่ 2 ถูกทำขึ้นจากกลาสซี่เมตตริก (glassy matrix) ซึ่งประกอบด้วยผลึกหลายชนิด และเกรนดั้งเดิมที่เป็นองค์ประกอบของแร่ซึ่งบางส่วนละลายน้ำได้ ในทางความคิดอิเลคตริคคอลกลาซ (electrical glass) เป็นส่วนผสมของซิลิเกตในรูปทรงของแก้ว

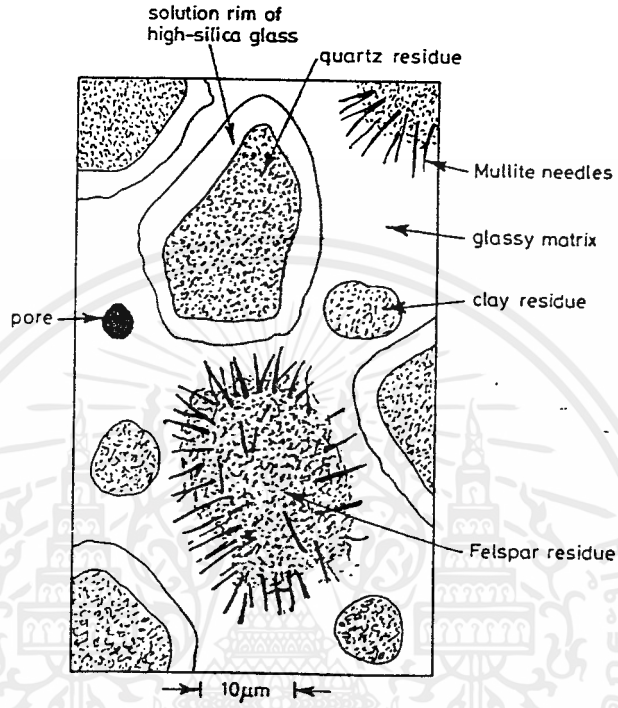


รูปที่ 1 แสดงโครงสร้างของสารประกอบซิลิกา

คาร์บอนผสมกับไฮโดรเจน อ๊อกซิเจน และธาตุอื่นๆ จะสร้างพันธะให้เป็นโครงข่ายที่ซับซ้อนดังรูป 2 โพลิเมอร์บริสุทธิ์ที่ประกอบด้วยโมเลกุลเดี่ยวเพียงอย่างเดียวจะหาได้ยากในการผลิตอินซูเลเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางปฏิบัติโดยทั่วไปจะใช้โคโพลิเมอร์ และแร่ธาตุผสมกันเพื่อให้ได้คุณสมบัติ ทางกลศาสตร์ และไฟฟ้าตามต้องการ



รูปที่ 2

พันธะระหว่างซิลิคอนและอ๊อกซิเจนทำให้เซรามิคส์จำพวกปอร์ซเลน (porcelain) และแก้วมีจุดหลอมเหลว ความเครียดทางกล และความต้านทานต่อสารเคมีสูง นอกจากนี้ยังช่วยให้มีพลังงานสะสมที่ผิว และปริมาณการส่งผ่านความร้อน (ตัวตัดสินใจเรื่องความแข็งแรงหรือความเครียดของการยึดเกาะของสิ่งสกปรก) ที่สูง และด้วยสาเหตุเหล่านี้ทำให้อินซูเลเตอร์แบบเซรามิคส์ทนต่อความชื้นและมลภาวะต่างๆได้

ในอีกแง่หนึ่งโพลิเมอร์มีพันธะที่อ่อนกว่า จะสามารถแยกตัวได้ด้วยความร้อนเพียงไม่กี่ร้อยองศาเซลเซียส มีโพลิเมอร์จำนวนมากที่เกิดความเสียหายที่ผิวได้เพียงแค่สัมผัสรังสีอุลตร้าไวโอเลตจากแสงแดดเพียงปริมาณหนึ่ง และโพลิเมอร์ทุกชนิดอาจได้รับผลกระทบภายใต้บรรยากาศที่เป็นอ๊อกซิเจนภายใต้เงื่อนไขที่มีการสร้างประจุไฟฟ้าออกมา ข้อบกพร่องที่สำคัญมากอยู่ที่ธาตุพื้นฐาน คือ คาร์บอนซึ่งเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีในสภาวะที่อยู่โดดๆ การถูกกระทบจากบางอย่างโดยเฉพาะการดีสชาร์จ (discharge) ที่อุณหภูมิสูงจะทำให้เกิดรอยเป็นทางขึ้นซึ่งอาจเป็นสาเหตุของการแฟลชโอเวอร์ หรือแม้กระทั่งเป็นการทำลายลูกถ้วย

นอกจากนี้ความยืดหยุ่นและความแข็งแรงที่เกิดจากเส้นใยโมเลกุลของโพลิเมอร์ แล้วประโยชน์ที่เห็นได้ชัดอยู่ที่การมีพลังงานอิสระที่ต่ำ ผิวภายนอกของอะตอมไฮโดรเจนสร้างพันธะกับอะตอมของคาร์บอน เป็น ตัวทำให้โพลิเมอร์ต้านทานต่อความเปียกชื้นและความสกปรกมากกว่าเซรามิคส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

032552

2.2.2) **คุณสมบัติของปอร์ซเลน**

2.2.2.1 **ข้อกำหนด**

คุณสมบัติของชิ้นส่วนของปอร์ซเลน ถูกกำหนดจากกระบวนการผลิต ชิ้นส่วนจะถูกเผาแล้วประกอบเป็นอนุภาคที่มีขนาดผลึก และรูต่างกันการรวมตัวนี้ เกิดจากกลาสซี่เมตตริค (glassy metrix) ซึ่งมีความแตกต่างของผิวแก้วคือความมันเงาบนพื้นผิวของมันเอง สมบัติเคมีที่สำคัญและลักษณะทางกายภาพถูกกำหนดจากวัตถุดิบ และการเผา

ในกระบวนการผลิตจะมีขั้นตอนการผลิตแบบเปียกคือเป็นการผสมกันของดินเหนียว และแร่ธาตุในน้ำ การทำให้แห้ง ขั้นตอนการขึ้นรูปการขัดมัน และการเผาบางทีอาจตามด้วยการเผาซ้ำถ้ายังไม่ได้คุณสมบัติตามต้องการ คุณสมบัติสำคัญของการหล่อหรือปั้นขึ้นรูปได้ระหว่างการผลิตวัตถุดิบที่เปียกคือจะต้องทนต่อการผิดรูปในเอกทรูดเดอร์ (extruder) ได้สูง ต้องสามารถไหลผ่านแบบหล่อที่ซับซ้อนระหว่างการกด และรักษารูปร่างได้ขณะทำตัวให้แห้ง ในขั้นตอนอื่นต้องทนต่อการกลึงซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้จะขึ้นกับสัดส่วนของอนุภาค เล็กๆในตารางที่ 4 อย่างไรก็ตาม สัดส่วนที่สูงขึ้นของอนุภาคที่เล็กในขณะเปียกหรือเรียกว่า สถานะสเลอรี่ (slurry) สูงขึ้นก็จะทำให้เวลาแข็งตัวมากขึ้น

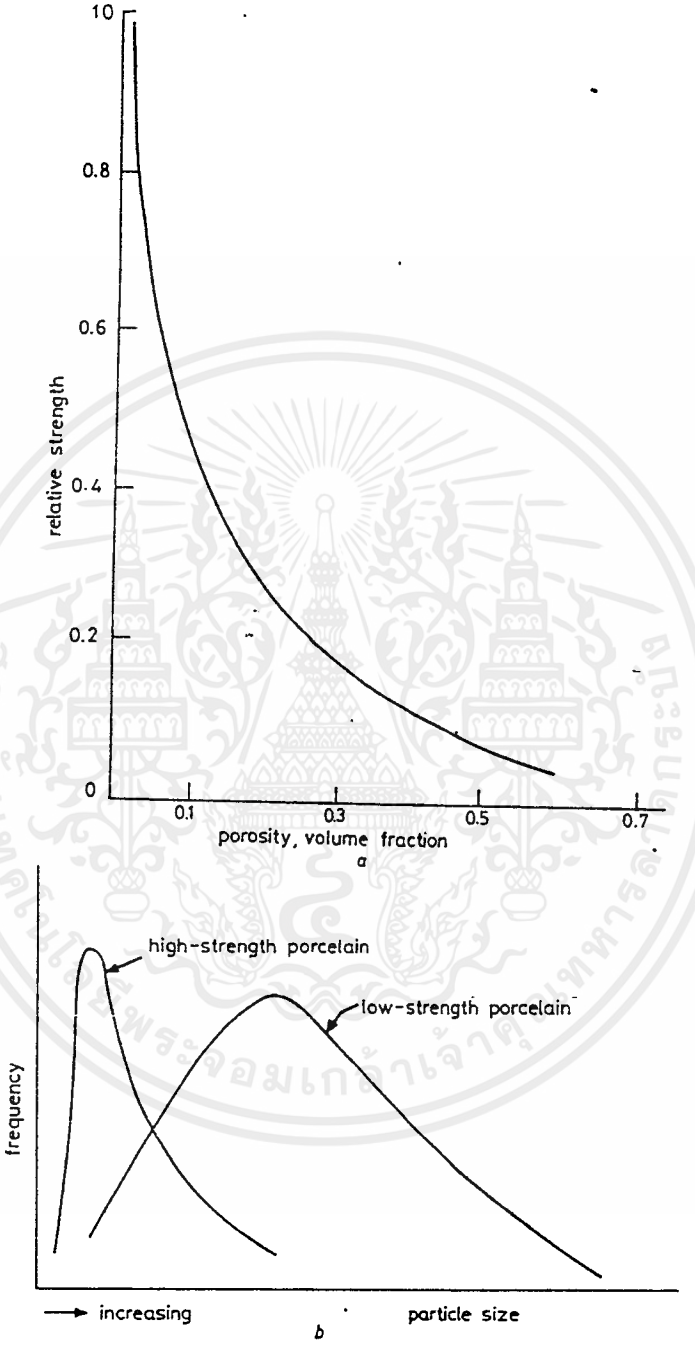
Material (μm)	< 0·05	0·05–0.10	0·10–0·25	0·25–0·50	0·50–0·75	0·75–1·00
Ball clay (% in range)	20	23	38	12	7	0
Kaolin (% in range)	0	0	5	8	21	21
Siliceous body (% in range)	7	7	9	7	4	3

ตารางที่ 4

ข้อกำหนดอีกข้อของคุณสมบัติของปอร์ซเลนคือการหดตัว การเปลี่ยนแปลงอย่างมากของขนาดเกิดขึ้นเมื่อน้ำแห้งก่อนที่จะถูกเผา ฉะนั้นการทำให้แห้งต้องทำอย่างระมัดระวังโดยต้องหลีกเลี่ยงการเกิดรอยร้าวภายในขณะเข้าเตาเผาชิ้น ปอร์ซเลนจะมีรูอากาศที่เปิดอยู่ 35% และจะเหลือ 7% หรือน้อยกว่านี้ระหว่างการเผา ดังนั้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงในด้านขนาดเกิดชิ้นประมาณ 3% หรือมากกว่านี้เมื่อชิ้นงานมีความหนาแน่นขึ้น สิ่งเหล่านี้เกิดจากการทำให้แห้งโดยทางเคมี ปฏิกิริยาเคมีการขึ้น รูปของแก้ว การเผา และการเคลือบเงา

คุณสมบัติข้อสุดท้ายอยู่ที่การพิจารณาโครงสร้างโดยละเอียดภายใน และความกดดันที่ผิวภายนอกซึ่งเกิดขึ้น ขนาดของโพรงอากาศ อนุภาค และรอยแตกภายในเป็น ตัวกำหนดคุณสมบัติทางกลและความเครียดทางไฟฟ้า โดยทั่วไปยิ่งรูภายในผลึก และอนุภาคที่เหลือมีขนาดเล็กความเครียดทางกลก็จะยิ่งมีค่าสูงดังรูปที่ 3 อย่างไรก็ตามข้อบกพร่องที่พื้นผิวนั้นจะมีผลให้เกิดรอยแตกที่อันตรายมากกว่าข้อบกพร่องภายในชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3 แสดงถึงผลของขนาดอนุภาคต่อความแข็งแรงของปอร์ซเลน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2.2 **คุณสมบัติทางกล**

คุณสมบัติทางกลของอิเลคทริคคอลปอร์ซเลนดังตารางที่ 5 ต้องการการปฏิบัติอย่างระมัด ระวัง เพราะความเปราะตามธรรมชาติของปอร์ซเลน ซึ่งแสดงให้เห็นในรูปของแรงต้านทานการดึง ไม่กระจายออกอย่างปกติแต่เป็นไปตามสกรูคาแรกเตอริสติก (skewed characteristic) ดังรูป 4 ซึ่งผลในทางปฏิบัติที่ตามมาก็คือ ความเครียดทางกลที่สูง อินซูเลเตอร์จึงจะต้องสามารถ ทนแรงดึงได้สูง ดังตัวอย่างของอินซูเลเตอร์ทรงกลมยาว ซึ่งโดยทั่วไปจะมีการทดสอบแต่ละชิ้นส่วน เพื่อให้ได้ถึงภาวะใช้งาน ถ้าใช้ไม่ได้ก็จะคัดออก

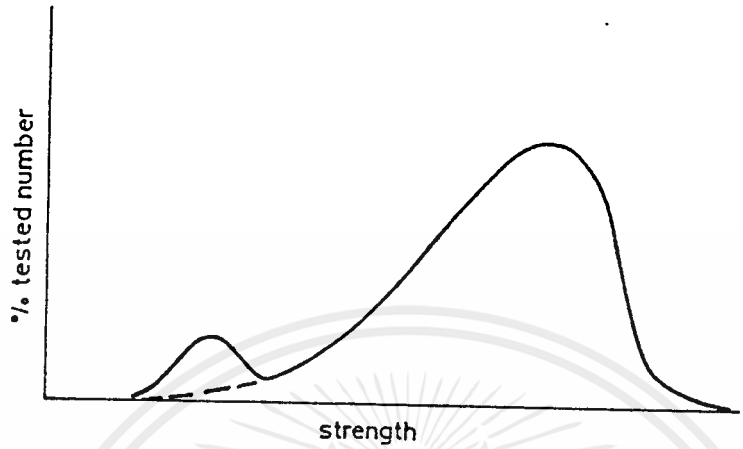
Property	Siliceous Porcelain		Aluminous Porcelain		Toughened glass: Alkali lime silica
Density (g/cm^3)					
Bulk	2·26–2·42		2·60–3·25		2·30–2·60
True, without pores	2·42–2·50		2·78–3·47		
Unglazed/Glazed	U	G	U	G	
Strength (MPa)					
Flexural	42–90	56–120	100–140	120–170	200–250
Tensile	21–42	28–56	50–70	60–80	100–120
Compressive	280–450	380–690	400–600	500–700	700
Fracture impact energy (J)	2·0–3·0		2·5–4·0		5·0–6·0
Modulus elastic, tensile (GPa)	55–80		80–120		60–70
Expansibility (20–100°C) ($\times 10^{-6}$/°K)	3·5–5·5		4·6–6·0		8·0–9·5
Thermal conductivity (W/m°K)	1·0–2·5		2·0–25·0		0·5–0·9
Specific heat (20–100°C) (J/g°K)	0·46–0·72		0·11–0·13		0·5–0·67

ตารางที่ 5

2.2.2.3 **คุณสมบัติทางไฟฟ้า**

คุณสมบัติทางไฟฟ้าสำหรับอินซูเลเตอร์ประเภทอิเลคตริคคอลปอร์ซเลน คือพันซ์เชอร์สเตร็ง (puncture strength) . เปอร์มิตติวิตี้ . พลังงานสูญเปล่าในไดอิเลคทริค . volumn resistivity และ อุณหภูมิ (หน่วยองศาเซลเซียสที่ volume resistivity = 10^6cm) ส่วนน้อยในทางปฏิบัติที่เราจะใช้คุณสมบัติทางไฟฟ้าในการทำอินซูเลเตอร์ เพราะตามปกติขนาดของอินซูเลเตอร์จะถูกกำหนดจากคุณสมบัติทางกล และความร้อน เช่น แผ่นปอร์ซเลนที่มีความหนาประมาณ 20 ม.ม. เมื่อถูกกระตุ้นด้วยไฟฟ้ากระแสสลับจะมีความเครียดไฟฟ้าไม่เกิน 1.5 kV/mm ซึ่งโดยทั่วไปปอร์ซเลนจะสามารถทนได้มากกว่านี้อย่างน้อย 5 เท่า ฉะนั้นการทดสอบทางไฟฟ้าในทางปฏิบัติจะทำเพื่อหารูข้อบกพร่องหรือรอยร้าวในวัสดุซึ่งอาจทำให้คุณสมบัติทางกลของอินซูเลเตอร์ลดลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4

พันซ์เชอร์สเตร็งภายใต้การกระตุ้นมีส่วนสัมพันธ์กัน เพราะฟ้าผ่ามีผลต่อสายส่งไฟฟ้า ศักดาไฟฟ้าชั่วขณะอาจมีค่าเกินพันซ์เชอร์สเตร็งของปอร์ซเลนทำให้เกิดการสปาร์คโอเวอร์ (spark-over) ขึ้นได้ที่ตำแหน่งบนสุดของอินซูเลเตอร์แบบจานหรือระหว่างส่วนที่เป็นโลหะของฐานเสา รอยที่เกิดจากการสปาร์คโอเวอร์นี้จะยิ่งกินลึกลงไปโดยน้ำ และทำให้เกิดการร้าวขึ้นได้โดยที่ตาเปล่ามองไม่เห็น การวัดรอยนี้เริ่มเมื่อปีค.ศ. 1941 แสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติที่ด้อยของปอร์ซเลนเมื่อเทียบกับฉนวนชนิดอื่น และบทบาทสำคัญของข้อบกพร่องที่พื้นผิว

ค่าที่ได้จากการสังเกตุของ พันซ์เชอร์สเตร็ง , เปอร์มิตติวิตี้ , พลังงานสูญเปล่าในไดอิเลคทริค volumn resistivity และค่าที่แปรเปลี่ยนของมันเมื่อเทียบกับอุณหภูมิ จะสอดคล้องกับรูปแบบของกลาสซี่เมตตริก (glassy matrix) ที่ประกอบด้วยอิออนที่เคลื่อนที่ซึ่งรวมตัวกันเป็นโครงสร้างของเกรน (grains) และผลึก จากตารางจะเห็นว่าแก้วมีค่า พันซ์เชอร์สเตร็งสูงกว่าเพราะการกระจายของความเครียดทางไฟฟ้าภายในชิ้นงานจะสม่ำเสมอไม่ผิดเพี้ยนไป เพราะความผิดเพี้ยนไม่ต่อเนื่องของค่าเปอร์มิตติวิตี้ (แก้ว/ซิลิกา/อากาศ = 7.5/4.2/1.0) ที่ต่ำเกินไป ค่าลอสแทนเจน (loss tangent) และค่าความนำไฟฟ้าจะขึ้นกับการเคลื่อนที่ของอิออนใน glassy matrix เนื่องจากปริมาณการ เคลื่อนที่ของอิออนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามอุณหภูมิ การแทนที่ของโปแทสเซียมอิออนด้วยโซเดียมอิออนจะเป็นการลดค่าลอสแทนเจน ค่าความนำไฟฟ้า และเพิ่มค่าพันซ์เชอร์สเตร็ง

ผลที่ตามมาในทางปฏิบัติของการเคลื่อนที่ของอิออนจะเห็นได้จาก ความผิดพลาดที่เพิ่มขึ้นภายใต้ความเครียดของไฟฟ้ากระแสตรง เมื่อเทียบกับไฟฟ้ากระแสสลับ การเปลี่ยนขนาดของอิออนโดยเฉพาะอิออนของโซเดียมในการคายประจุที่อิเลคโตรด จะเป็นสิ่งแสดงให้เห็นถึงความเค้นทางกลในขณะที่รอยร้าวภายใน อาจสนับสนุนแรงทางไฟฟ้าสถิตย์ที่ผิวของผลรวมทั้งหมด

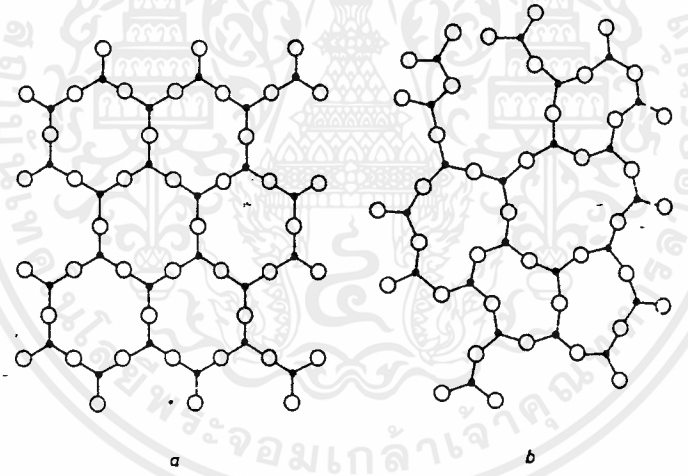
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 **<u>คุณสมบัติของอินซูเลเตอร์แบบแก้ว</u>**

2.2.3.1 <u>สถานะแก้ว</u>

จากงานวิจัยของ P.M. Hogg เกี่ยวกับลูกถ้วยแบบแก้วที่เขียนขึ้นในปี ค.ศ. 1939 ได้กล่าวอ้างถึงคำอธิบาย ของผู้วิจัยก่อนหน้านี้เกี่ยวกับแก้วว่าเป็นคอนกรีตจุ๋ย "concrete juice" ซึ่งยังไม่สามารถหาคำอธิบายที่ชัดเจนได้ ลูกถ้วยแบบแก้วนี้มีซิลิก้าเป็นส่วนประกอบหลักถึงแม้ว่าแก้วประกอบด้วยวัสดุหลายชนิดทั้งสารอินทรีย์ และอนินทรีย์ และมีขอบเขตอยู่ในช่วงของ toffee ถึงโลหะ

พฤติกรรมของแก้วในหลายๆประการเหมือนกับของเหลวที่แข็งแล้ว โมเลกุลของแก้วจะเรียงตัวเป็นระเบียบเพียงใดขึ้นอยู่กับอัตราการลดอุณหภูมิของวัสดุที่เราจะทำให้แข็ง แก้วจะมีความหนาแน่นแตกต่างกันโดยการทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็ว จะมีความหนาแน่นต่ำกว่าการทำให้เย็นลงอย่างช้าๆ การลดอุณหภูมิลงอย่างช้าๆจะทำให้ได้แก้วมีความหนาแน่นสูงมาก แต่ยังต่ำกว่าในรูปแบบของผลึก Zachariasen ได้แสดงให้เห็นถึง ความแตกต่างของผลึกและแก้วที่ใช้วัสดุชนิดเดียวกัน 2 ชนิดดัง รูป 5 และรูป 6 เป็นตัวอย่าง รูป 6 ที่มีการนำอะตอมชนิดที่ 3 คือโซเดียม มาเป็นส่วนผสมเพิ่มโดยให้อิออนบวกของโซเดียมไปจับกับอิอกซิเจนอิออน



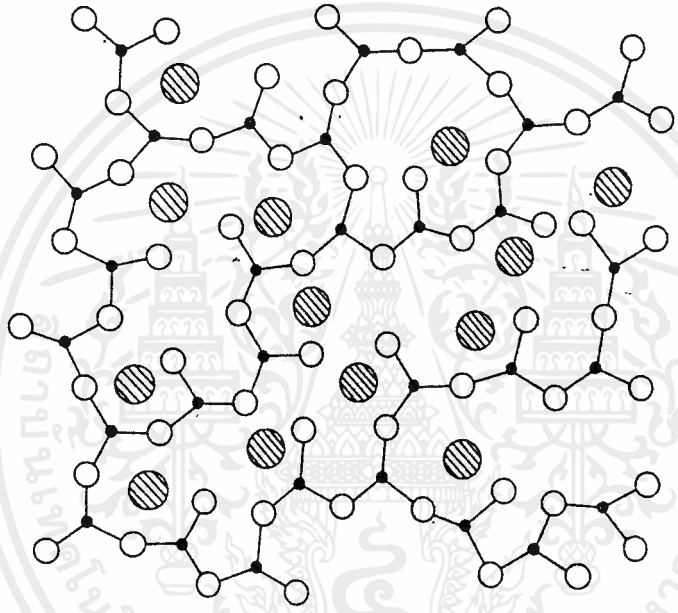
Zachariasen's models of crystalline and glassy forms
Two-dimensional analogues of substance R_2O_3
a Crystalline ● radical R
b glassy ○ oxygen

รูปที่ 5

แก้วที่ได้จากการเผาไม่เป็นวัสดุที่แข็งในทางกลศาสตร์ เพราะที่ผิวของมันมีรอยร้าวเล็กๆอยู่ซึ่งสามารถเพิ่มขึ้นได้อย่างอิสระไปตามปริมาตรได้ เพราะมันไม่มีโครงสร้างที่เป็นแกรนูลา (granular) เหมือนปอร์ซเลนที่ใช้หยุดรอยร้าว ฉะนั้นลูกถ้วยที่ทำจากแก้วที่ได้จากการเผามีความเสี่ยงต่อเทอร์มอล-แครกกิ้ง (thermal cracking) ในบางครั้งเราใช้แก้วแบบโบโรซิลิเกต (borosilicate) ที่มีการขยายตัวต่ำ ในปัจจุบันมีการนำลูกถ้วยแบบแก้วมาใช้เป็นจำนวนมาก โดยทำมาจากแก้วเหนียว ซึ่งรอยแตกที่ผิวถูกกำจัดโดยวิธีการให้ความกดดันสูงที่ผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แก้วถูกทำให้เหนียวโดยการให้ความร้อนจนเกินอุณหภูมิทรานซิชั่น (transition temperature) แล้วทำให้ที่ผิวของมันเย็นลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นการจำกัดให้เกิดการหดตัว ทำให้ภายในมีความดันสูง อย่างไรก็ตามแก้วจะถูกทำให้เย็นลงในรูปร่างที่ต้องการด้วยเหตุที่ว่า ส่วนผสมภายในสามารถหดตัวได้ ทำให้เกิดแรงอัดภายในและความกดดันที่ผิว



Glassy structure modified by alkali
Addition of alkaline oxide, AO, opens up network, much reducing melting point, viscosity at given temperature etc.
● alkali ion A
O oxygen

รูปที่ 6

2.2.3.2 <u>คุณสมบัติทางกลของอินซูเลเตอร์แบบแก้ว</u>

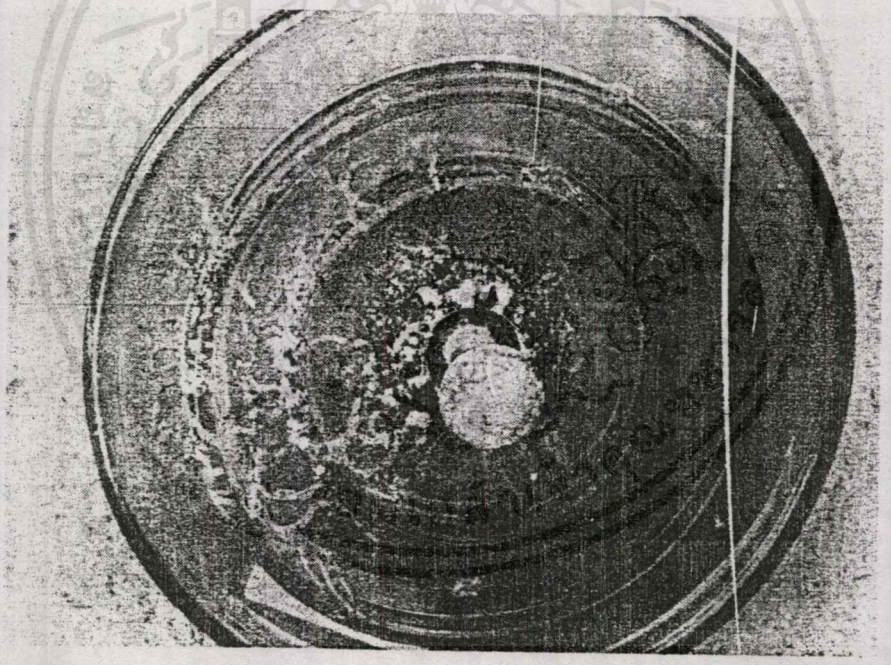
แก้วแบบโซดาไลม์ซิลิเกต (soda-lime silicate) ประกอบด้วยโปรตัสเซียม แบเรียม และอลูมิเนียม เป็นสารซึ่งทำให้อินซูเลเตอร์แบบแก้วเหนียว มีความแข็งแรงประมาณ 7 จิกะปาสคาล (GPa) และจะลดลงเหลือ 30 ถึง 70 เมกกะปาสคาล (MPa) สำหรับแก้วอ่อน และแบบขัดเงามีค่า 30-80 เมกกะปาสคาล ในขณะไม่ขัดเงามีค่าเท่ากับ 20-70 เมกกะปาสคาล ค่าเหล่านี้เป็นค่าของกำลังต้านทานการดึงในภาวะความกดดัน ส่วนค่าความต้านทานแรงอัดทั้ง แก้วเหนียว และ porcelain จะแข็งแกร่งกว่านี้ 5 เท่า และในบางครั้งอาจสูงถึง 15 เท่า ค่ายังโมดูลัส (Young 's

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Modulus) จะต่ำลงในลูกถ้วยแบบแก้วเมื่อเทียบกับปอร์ซเลนที่ดีที่สุด ซึ่งมีค่าระหว่าง 60-70 GPa สำหรับแก้ว และ 50-120 GPa สำหรับปอร์ซเลน

รูปที่ 7 เป็นรูปของการเกิดการกัดเซาะที่เกิดขึ้นในเขตทะเลทราย และทะเล การกัดกร่อนของทรายอาจเป็นสาเหตุทำให้ลูกถ้วยแบบแก้วแตกในเขตทะเลทรายได้ แต่ข้อได้เปรียบของแก้วนั้นคือการแผ่ความร้อนที่ต่ำกว่าปอร์ซเลนขัดเงาในตอนกลางคืน ซึ่งจะป้องกันการแฟลชโอเวอร์ (flashover) อันเนื่องมาจากน้ำค้าง เพราะจะทำให้ไม่เกิดน้ำค้างเกาะซึ่งจะเป็นเหตุให้เกิดการแฟลชโอเวอร์ อันเป็นปัญหาสำหรับสายส่งไฟฟ้าในเขตแห้งแล้ง การเก็บความร้อนของลูกถ้วยจะยับยั้งการเกิดน้ำค้างได้

การขัดเงาของปอร์ซเลน จะทำให้เกิดการกัดกร่อนได้น้อยกว่าในลูกถ้วยแบบแก้ว เปอร์เซ็นต์ของโซเดียมในโครงสร้างยิ่งน้อย ก็จะยิ่งเป็นผลดีต่อลูกถ้วย คือจะลดการกัดกร่อนเกิดขึ้นในส่วนของที่เกิดความชื้นและสกปรก โดยทั่วไปแก้วที่มีโซเดียมผสมอยู่มากจะถูกกัดกร่อนได้โดยไอน้ำ ซึ่งมากับการติสชาร์จที่บริเวณพื้นผิวดังรูปที่ 8 แสดงถึงการกัดกร่อนของอินซูเลเตอร์ภายใต้การดีสชาร์จ 14 ชม.

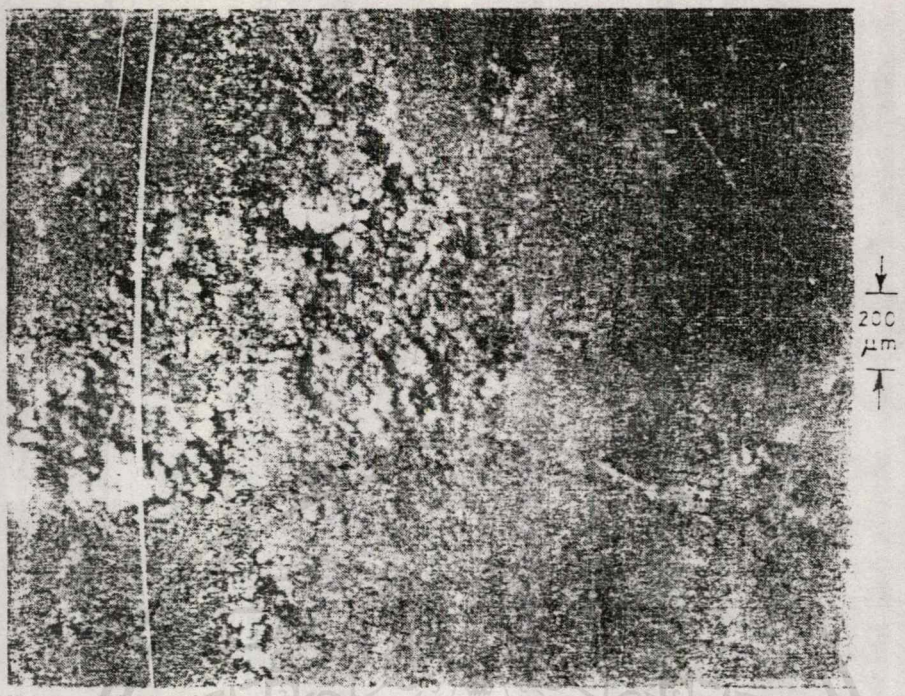


รูปที่ 7

2.2.2.3 <u>คุณสมบัติทางไฟฟ้าของลูกถ้วยแบบแก้ว</u>

เนื่องจากองค์ประกอบของปอร์ซเลนและองค์ประกอบของแก้วมีลักษณะใกล้เคียงกัน คือมีส่วนประกอบของ alkali-lime-silica insulator glass คุณสมบัติของปอร์ซเลน และแก้วจึงความคล้ายคลึงกันแสดงดังตารางที่ 6 ความได้เปรียบด้านความแข็งแรงทางกลของแก้วเหนียวเมื่อเทียบกับปอร์ซเลนจะ ทำให้เชล (shell) ลูกถ้วยที่ทำจากแก้วเหนียวมีขนาดเล็กกว่าในลูกถ้วยแบบแผ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 8

Property	Unit	Siliceous porcelain	Aluminous porcelain	Toughened glass: Alkali lime silica
Permittivity				
(50–60 Hz, 20°C)	air = 1	5·0–6·5	6·0–7·5	7·3–7·5
(1 MHz, 20°C)	air = 1	4·8–5·6	5·0–6·5	7·1–7·5
Loss tangent				
(50–60 Hz, 20°C)	$\times 10^{-3}$	10·0–25·0	12·0–30·0	15·0–60·0
(1 MHz, 20°C)	$\times 10^{-3}$	5·0–12·0	5·0–12·0	5·0–12·0
Puncture strength				
(50–60 Hz, 20°C)	kV/mm	10·0–20·0	10·0–20·0	> 25·0
Impulse puncture strength				
(1/5 μs)	kV/mm	40·0–50·0	40·0–50·0	170·0–220·0
$\varrho \equiv$ Volume resistivity				
20°C	Ω cm	10^{13}	10^{12}	10^{12}
300°C	Ω cm	10^{6}	10^{11}*	10^{5}–10^{6}
$T_e \equiv$ Temperature for				
$\varrho = 10^6$ Ω cm	°C	280–340	830–1070*	270–400

* Values fall rapidly with increasing per cent Na

ตารางที่ 6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

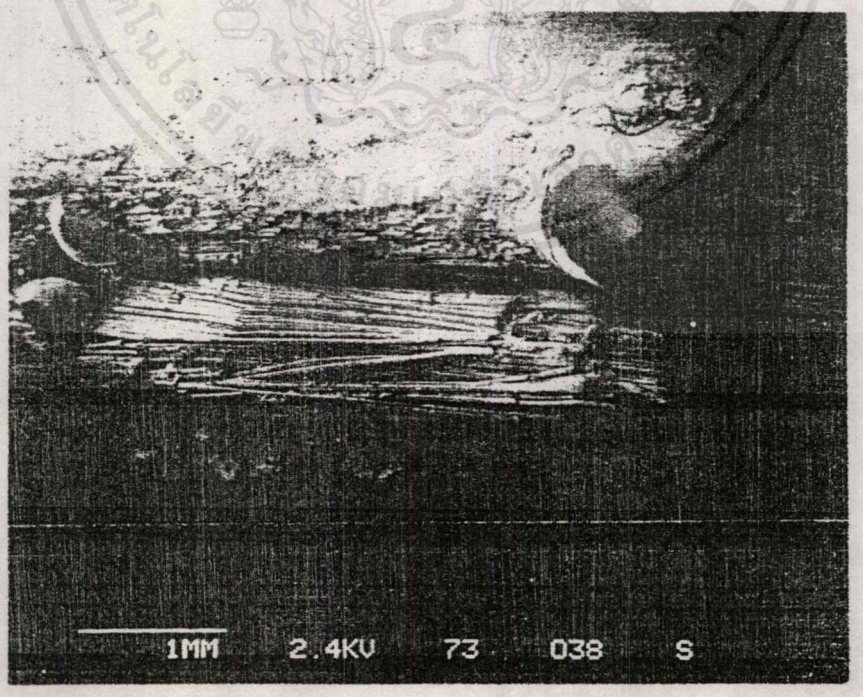
2.2.4 เรซิ่นบอนด์กลาสไฟเบอร์ (Rasin-bond glass fibre (RBGF))

2.2.4.1) คุณสมบัติทั่วไปของเรซิ่นบอนด์กลาสไฟเบอร์

ในปัจจุบันนี้ในทางวิทยาศาสตร์ ได้มีการยอมรับถึงความแข็งแรงของวัสดุที่มีการผสมไฟเบอร์ซึ่งประโยชน์ สำคัญของไฟเบอร์ต่ออินซูเลเตอร์นั้น คือมีผลต่อโหลดทางกล โดยเรซิ่นนั้นจะทำหน้าที่ป้องกันไฟเบอร์ และช่วยในการถ่ายเทน้ำหนักในส่วนที่แตกหัก จากหน้าที่ที่เห็นนี้แสดงให้เห็นว่าเรซิ่นมีความแข็งแรงน้อยกว่าไฟเบอร์มาก เรซิ่นทั่วไปจะเป็นพวกโปลีเอสเทอร์ และอีพอกซี่ ซึ่งทั้งคู่จะมีค่าความหนืดค่าหนึ่ง เรซิ่นจะเปลี่ยนแปลงคุณภาพตามเวลา และที่สำคัญคือตามผลของ อุณหภูมิ

เรซิ่นจะถูกใช้เพื่อป้องกันกลาสไฟเบอร์ glass fibre จากการทำลายจากน้ำซึ่งทำให้เกิดรอยแตกเล็กๆ (micro crack) และเรซิ่นยังใช้เป็นตัวประสานไฟเบอร์ และที่สำคัญเท่ากับเรซิ่นคือไพรมิง (priming material) ซึ่งใช้เคลือบไปบนเรซิ่นกับไฟเบอร์เพื่อเพิ่มพันธะทางเคมีระหว่างเรซิ่นกับไฟเบอร์

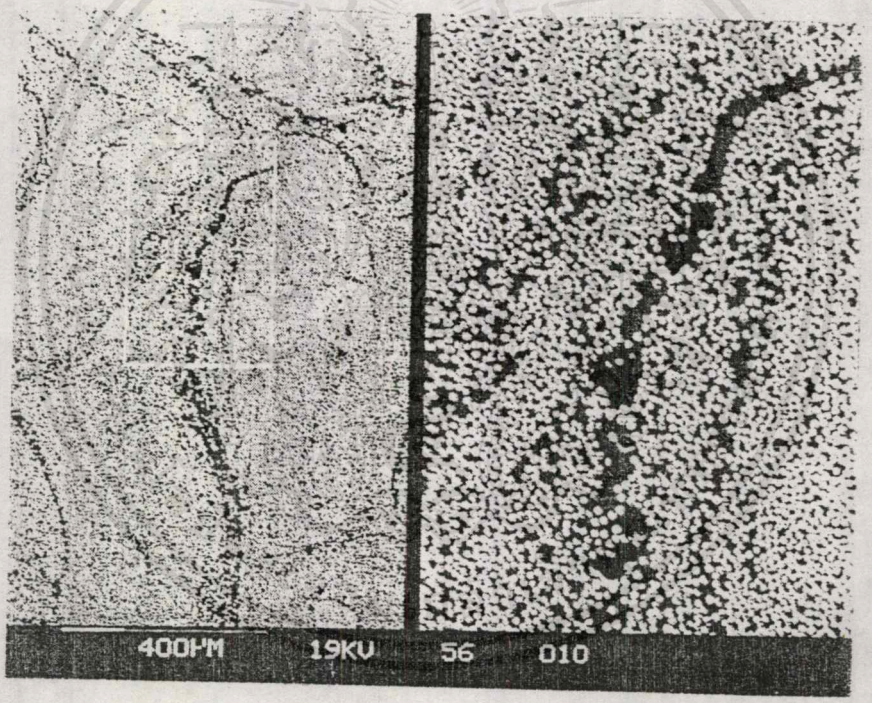
อย่างไรก็ตาม คุณสมบัติของเรซิ่นบอนด์กลาสไฟเบอร์ ที่ไม่สมบูรณ์และสกปรก ซึ่งผลได้จากการทดลองนั้น ในแท่งของ RBGF ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 20 mm จะมี glass fiber ประมาณ 1 ล้านเส้น แต่ละเส้นมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 10 ไมโครเมตร ซึ่งเมื่อรวมพื้นผิวของแต่ละเส้นแล้ว ก็จะเป็นพื้นผิวจำนวนมาก น้ำจะทำให้ค่าความต้านทานเรซิ่นบอนด์กลาสไฟเบอร์ต่ำลงอย่างรวดเร็ว และเหตุผลเดียวกัน เมื่อเรซิ่นบอนด์กลาสไฟเบอร์สกปรก และมีความเครียดทางไฟฟ้าสูงจะทำให้เกิดความเสียหายจากกระแสลีกเกจ (leakage current) ทำให้เกิดรอยไหม้บนผิวของเรซิ่นบอนด์กลาสไฟเบอร์ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อบกพร่องอีกอย่างบนเรซิ่นบอนด์กลาสไฟเบอร์คือการเป็นรูพรุน (porisity) ดังรูปที่ 10 และลักษณะรูบนเรซิ่นบอนด์กลาสไฟเบอร์ นั้นไม่ว่าจะมีน้ำหรืออากาศอยู่ภายในรูนั้น หากเป็นอากาศจะทำให้วัตถุมีความเครียดสูงเมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้าที่มีความเข้มสูง ทำให้เกิดการคายประจุได้ง่ายขึ้น ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีทำให้เกิดสารใหม่ ซึ่งรวมทั้งกรดอ็อกซาลิกซึ่งทำลายคุณสมบัติทางกลของกลาสไฟเบอร์ หากในรูนั้นมีน้ำจะทำให้รูนั้นทำตัวเป็นอิเลคโตรดปลายแหลม และที่จุดนั้นความหนาแน่นสนามไฟฟ้าจะมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 10

2.2.4.2) <u>คุณสมบัติทางกลของเรซิ่นบอนด์กลาสไฟเบอร์</u>

ทั่วไปค่าต้านทานแรงดึงของเรซิ่นบอนด์กลาสไฟเบอร์ (tensile strenght) จะสูงมาก แต่ค่าความคงทนแรงอัด (compressive strength) จะไม่สูงเท่า แต่ในส่วนเซรามิคนั้นค่าความคงทนแรงอัดจะสูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าต้านทานแรงดึง และบางชนิดสูงมากโดยสูงกว่าค่าต้านทานแรงดึงถึง 15 เท่า

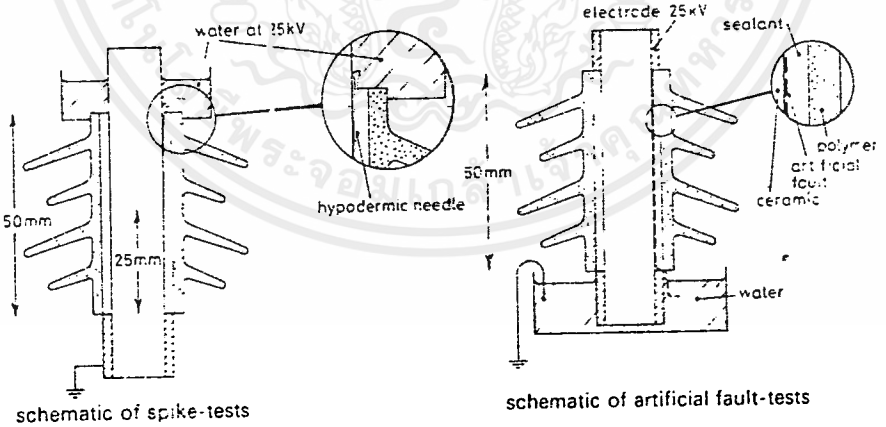
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในเรซิ่นบอนด์กลาสไฟเบอร์ ค่ายังโมดูลัสจะมีค่าต่ำกว่า 90 GPa ซึ่งจะมีค่าเท่าไรนั้นขึ้นกับส่วนประกอบของไฟเบอร์ และเช่นเดียวกันค่าต้านทานแรงดึงจะสูง ทำให้สามารถดึงได้ไกลกว่าวัสดุอื่น อายุการใช้งานของเรซิ่นบอนด์กลาสไฟเบอร์จะสั้น โดยเรซิ่นบอนด์กลาสไฟเบอร์ จะสูญเสียความแข็งแรงไปตามเวลา อุณหภูมิก็เป็นตัวเร่งอีกชนิดหนึ่งที่ทำให้สูญเสียความแข็งแรง ถึงแม้ว่าจะทำการดูแลและรักษา แต่อุณหภูมิ และความชื้นที่สูงจะเป็นอันตรายร้ายแรงต่อความแข็งแรง

2.2.4.3) <u>คุณสมบัติทางไฟฟ้าของเรซิ่นบอนด์ไฟเบอร์</u>

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวอย่างที่ทดลองชนิดเสริมไฟเบอร์ (fibre-rainforce) ในสภาพที่แห้งและสมบูรณ์จะมีค่าพันซ์เชอร์สเตร็งเท่ากับ 10 kv/mm ซึ่งก็ขึ้นกับส่วนประกอบของไฟเบอร์ที่ผสมในอันไดเรกชั่นไฟเบอร์ (unidirection fibre) ค่าเปอร์มิตติวิตี้จะขึ้นกับส่วนประกอบประเภทแก้วซึ่งมีค่าเปอร์มิตติวิตี้ประมาณ 7 แต่จะลดลงโดยชั้นของโพลิเมอร์ในแนวขวาง ค่าลอสแทนเจนจะเป็นค่าเฉลี่ยระหว่างโพลิเมอร์ และแก้วซึ่งขึ้นกับปริมาณแก้ว ปกติเท่ากับ 10^{-2}

การเกิดสไปค์ (spike) บนผิวของเรซิ่นบอนด์กลาสไฟเบอร์ ซึ่งมีลักษณะเป็นแข็มปลายแหลม เมื่อให้โวลเตจจะทำให้เกิดการดิสชาร์จ แต่ความเสียหายจะไม่แพร่กระจายจะไม่เกิดขึ้น แต่เมื่อทิ้งไว้หลายอาทิตย์ น้ำจะเข้าไปรูเหล่านั้น (ดังรูปที่ 11) จะทำให้เรซิ่นบอนด์กลาสไฟเบอร์ที่ทดลองไม่



รูปที่ 11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถทนแรงดันไฟฟ้าได้ จากการนำชิ้นส่วนมาศึกษาจะพบว่าตัวอย่างทดลองจะได้รับความเสียหาย เกิดการไหม้ถูกทำลายเป็นทางระหว่างจุดที่แตกหรือบริเวณที่อ่อนแอ ซึ่งผลนี้จะสามารถตรวจพบได้บนผิว โดยวิธี TERT (tracking and erosion resistance test)

ลักษณะการผิดพลาดที่พบอีกประเภทคือชนิดที่เรียกว่าคาปิลลารีเว็ทเต็จ (capillary-wetted) ซึ่งจะทำให้เกิดส่วนกระแสลีกเกจระหว่างปลายด้านหนึ่งกับอีกด้านหนึ่ง ทำให้เรซิ่นบอนด์กลาสไฟเบอร์เสียหาย แต่จะกินระยะเวลานานกว่าประเภทแรก (ดูรูปที่ 12 ประกอบ) ผลที่เกิดขึ้นจะคล้ายกับที่เกิดกับประเภทแรกโดยน้ำจะซึมเข้าไปตามแนวรัศมี และผลที่เกิดขึ้นอีกอย่างคือจะพบรอยทำลายแต่เป็นรอยจากอิเลคโตรดด้านหนึ่งไปอีกด้านหนึ่ง

รูปที่ 12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.5 คุณสมบัติของโพลิเมอร์ (polymers) และโพลิเมอร์คอนกรีต (polymer concretes)

2.2.5. หน้าที่และการนำไปใช้

ทั้งการนำไปใช้และหน้าที่จะใช้คุณสมบัติทางกลและการเป็นฉนวนไฟฟ้าประกอบกัน สำหรับการใช้งานของโพลิเมอร์นั้นจะใช้ในส่วนที่ผิวหรือการป้องกันภายใน โพลิเมอร์จะมีราคาที่แพงกว่าเซรามิคเมื่อน้ำหนักเท่ากันและจะมีความยืดหยุ่นต่ำ

หน้าที่ที่สำคัญของโพลิเมอร์ คือใช้ทำเฮาส์ซิ่ง (housings) เพื่อป้องกันภายในโดยจะป้องกันการทำลายจากน้ำ และความเสียหายจากกระแสรั่วไหลและการคายประจุ

โพลิเมอร์สำหรับเฮาส์ซิ่ง

หน้าที่หลักของโพลิเมอร์ซึ่งถูกใช้ทำแกนรชิ่นบอนด์ไฟเบอร์เฮาส์ (house RBGF) เพื่อปกป้องเส้นใยภายใน โดยป้องกันน้ำและเป็นโครงของเฮาส์ซิ่ง การสร้างเฮาส์วซิ่งโพลิเมอร์ (housing polymer) ต้องไม่เป็นรอย ต้านทานสภาพดินฟ้าอากาศโดยปราศจากการสูญเสียของคุณสมบัติทางกลและทางไฟฟ้า อัตราการผุกร่อนต้องยอมรับได้ แบบขนาดพอประมาณและต้องรับแรงทางกล ได้ดี ทนอุณหภูมิจาก -40 ถึง +120°C

ในตารางที่ 7 เป็นคุณสมบัติของวัสดุที่นิยมใช้ทำ housing ซึ่งในปัจจุบัน ส่วนใหญ่ใช้ในการทดลองอินซูเลเตอร์

2.5.5.2 โพลิเมอร์คอนกรีต (Polymer concretes)

สำหรับวัสดุที่เป็นโพลิเมอร์คอนกรีตจะมีอยู่ 2 ชนิดคือ โพลีซิล (Polysil) และ NIMS (acronym for new inorgaric materials) ซึ่งคุณสมบัติของวัสดุทั้งสองแสดงในตารางที่ 9

โพลีซิลเป็นการพัฒนาของสถาบันอิเลคทริคพาเวอร์รีเสิร์ช (Electric Power search Institute) คือ อะครีลริคโพลิเมอร์ (acrylic polymer) อัดด้วยทรายและ NIMS เป็น polymer ที่ถูกอัดให้แข็ง

ข้อได้เปรียบของโพลิซิลที่เหนือปอร์ซเลน คือใช้ขบวนการที่ใช้เทคโนโลยีไม่ยุ่งยากในการผลิตและใช้อุณหภูมิที่ต่ำกว่า ทนการกระทบกระเทือน และมีอัตราการขยายตัวใกล้เคียงโลหะ สามารถหล่อได้ในขั้นการผลิต โพลิซิลจะถูกทำโดยการผสมแห้งของอะครีลริคเบสโมโนเมอร์ (acrylic-based monomer) และฮาร์ดเดนเนอร์ (hardener) โดยใช้การสั่นและเทลงในแบบ และรอเวลาระหว่าง 10 นาทีถึง 24 ชม.ขึ้นอยู่กับขนาดและแบบ

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของโพลีซิลในมลภาวะจะไม่ค่อยคงทีนัก แต่ก็สามารถทนต่อมลภาวะได้เล็กน้อย และภูมิอากาศโดยปราศจากความเสียหาย แต่การทดสอบในสภาวะที่อยู่ในทะเล จะทำให้เกิดการเสียหายบนผิวอย่างรวดเร็วอุณหภูมิ ทำให้เกิดกระแสรั่วไหลที่ผิวเพิ่มขึ้น เกิดอิรอชั่นดิสชาร์จ (discharg erosion) พร้อมกับความสามารถในการทนค่าแฟลชโอเวอร์โวลท์เตจ (flashover voltage) จะตกลง

NIMS วัสดุที่ใช้จะใช้เทคโนโลยีชั้นสูงในการผลิต NIMS นั้นไม่สามารถนำมาใช้ทำอินซูเลเตอร์โดยตรงได้ เพราะว่าค่าความต้านทานของ NIMS มีการเปลี่ยนแปลงตามความชื้นมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NIMS สามารถที่จะสร้างพันธะเคมีง่ายๆเพื่อให้คุณสมบัติคล้ายโลหะ ทำให้เกิดช่องทางที่จะใช้ใน ไฮบริดช์ อินซูเลเตอร์ (Hybrid insulators) ของความแข็งแรงสูง

หลักการใช้ระหว่าง NIMS และโพลิซิลเป็นส่วนประกอบของโพลิเมอร์ คือใช้โพลิซิล 30% โดยปริมาตร แต่ประมาณ 10% โดยปริมาตรใน NIMS และผลที่ได้จะทำให้เกิดเสถียรภาพความคงทนต่อสภาพอากาศ และการดิสชาร์จ แต่จะไม่สามารถใช้ได้ดีโดยปราศจากการป้องกันภายนอกจากมลภาวะและโดยเฉพาะสภาวะที่เป็นทะเล

Material	Resistance to:				Processing
	Tracking	Erosion	Chemical attacks	Weather	
Sintered PTFE: mouldings bonded with other fluoropolymers	Excellent	Good, but becomes wettable	Excellent	Excellent, but becomes roughened	Difficult
EPDM filled with ALTH: mouldings bonded with EPDM	Good	Good	Good	Good	Needs vulcanisation
Silicone elastomer filled with ALTH: hot cured mouldings	Excellent	Good	Excellent	Good	Difficult to bond mouldings
Heat shrinkable silicone/ polyolefine: filled with ALTH and catalysts	Very good	Good	Good	Good	Easy
Thermoset alicyclic epoxy filled with ALTH and silica	Good	Good	Vulnerable to NaOH	Poor	Easy

ตารางที่ 7 แสดงคุณสมบัติของเฮาซิ่งโพลิเมอร์ (housing polymer)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3) <u>กระบวนการในการผลิตอินซูเลเตอร์</u>

การใช้วัตถุดิบที่มีคุณภาพสูง เพื่อให้ได้สภาวะที่สมบูรณ์สำหรับการผลิตอินซูเลเตอร์ วัตถุดิบที่ได้มา จะต้องดีมีคุณภาพ สำหรับขั้นตอนการผลิตนั้นจะมีขั้นตอนดังนี้

2.3..1) <u>การครัชชิ่ง (CRUSHING)</u>

เริ่มต้นจากการนำหินไชน่าสโตน (chaina stone) และ หินเฟลสปาร์ (feldspar) นำมาบด โดยอิมเพลเลอร์เบรคเกอร์ (Impeller Breaker) จนได้เป็นเม็ดหยาบๆ แล้วทำการร่อนแล้วเก็บไว้

2.3.2) <u>พุลเวอร์ไรซิ่งและการผสม (PULVERIZING and MIXING)</u>

นำหินไชน่าสโตนและหินเฟลสปาร์ ที่ถูกบดแล้วจะถูกจ่ายเข้าไปในบอลมิล (Ball Mill) กับดินเหนียวและน้ำ เพื่อบดเป็นผงแล้วผสมให้เข้ากัน จะได้ของผสมเป็นของเหลวเหนียวเรียกว่าเคลสลิป (Clay Slip)

2.3.3) <u>การฟิลเตอร์ริง (FILTERING)</u>

เคลสลิปนี้จะผ่านการแยกสารแม่เหล็กไฟฟ้าออก แล้วทำการร่อนโดยการสั่นสะเทือน เพื่อแยกส่วนที่ไม่ บริสุทธิ์ออกจากเคลสลิป

2.3.4) <u>การฟิลเตอร์เพรสซิ่ง (FILTER PRESSING)</u>

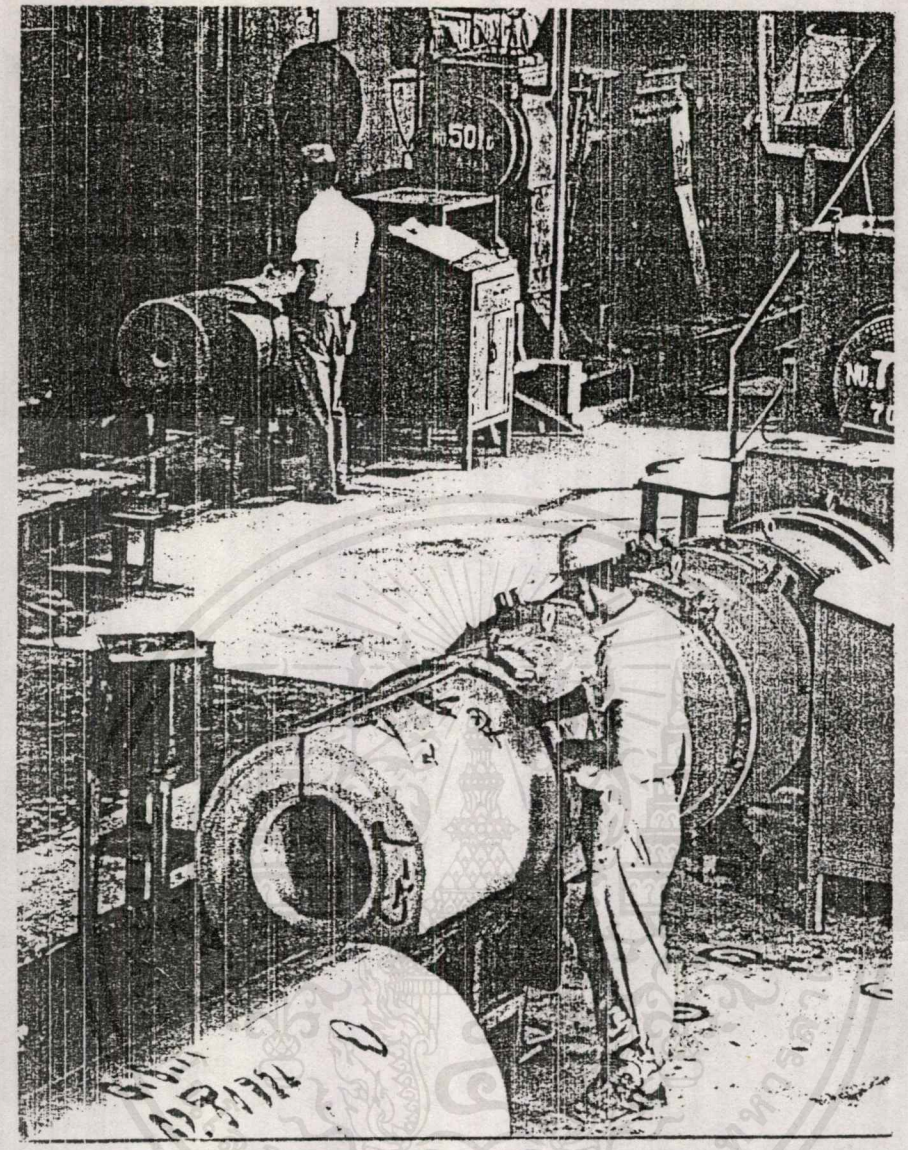
เคลสลิปที่ถูกคนหรือกวนเป็นอย่างดีแล้ว จะถูกส่งเข้าสู่ ฟิลเตอร์เพรสเซส (FILTER PRESSES) ซึ่ง ณ ที่นี้ น้ำที่มีมากเกินไปจะถูกกรองออก วัสดุที่ได้นี้เราเรียกว่าเคลสแล็ป (Clay Slap) หรือเรียกว่าเค้ก (Cake)

เคลสแล็ปจะถูกนวดแล้วจะถูกนำไปผลิตรูปร่าง ซึ่งขั้นตอนการนวดนี้มีความสำคัญอย่างยิ่ง เพราะเมื่อนำมาอัดเป็นแท่งเพื่อผลิตรูปร่างจะทำให้ปราศจากฟองอากาศ เคลสแลปจะถูกนวดโดยวิธีดีแอริ่งปลัก- มิว (De-airing Pug Mill)

2.3.5) <u>การเอ็กทรูดดิ่งและการเซมิดรายอิ่ง (EXTRUDING and SEMI-DRYING)</u>

เคลสแล็ปจะถูกเอ็กทรูดเป็นแท่งเคลร์อด (clay rod) ซึ่งเมื่อถูกขับออกมา จะทำการเซมิดรายให้เคลร์อดแห้งขึ้นเพื่อให้เคลร์อดมีความแข็งแรงพอที่จะทำเป็นรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 13 แสดงให้เห็นถึงแท่งเคลร์อดที่ที่ถูกขับออกมา

2.3.6) <u>การทริมมิ่ง (TRIMMING)</u>

แท่งเคลร์อดที่ผ่านการเซมิดรายแล้ว จะถูกนำมาแต่งโดยการกลึงในแนวตั้ง หรือแนวนอน ปกติการกลึงในแนวตั้งจะใช้สำหรับอินซูเลเตอร์ขนาดใหญ่ เช่น ลองร์อด (Long-rod) และการกลึงในแนวนอนใช้สำหรับลูกถ้วยขนาดเล็ก

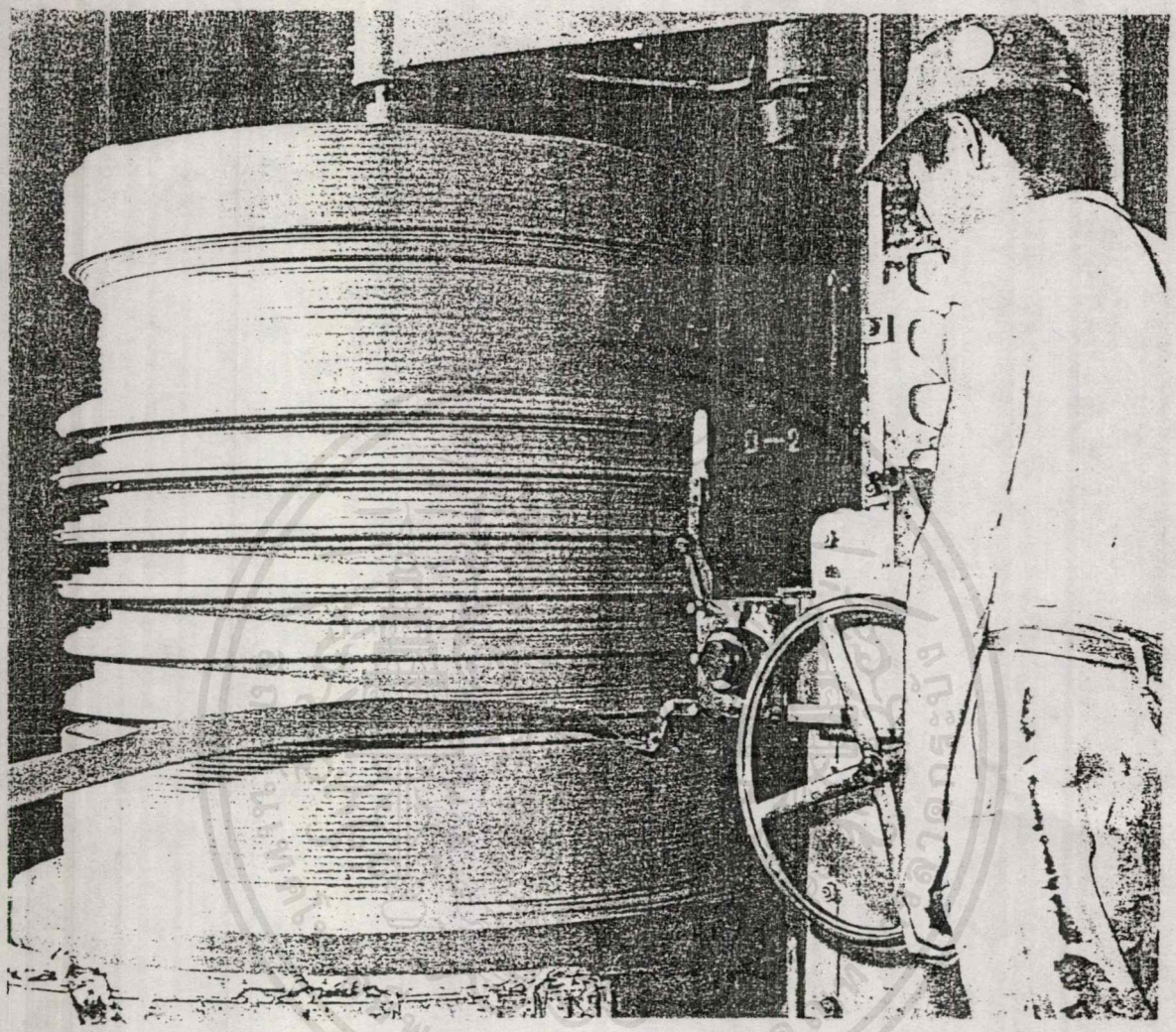
การกลึงในแนวตั้งนั้น จะวางลองร์อดในแนวตั้ง แล้วทำการกลึง การกลึงนี้จะเป็นไปอย่างต่อเนื่องและต้องสังเกตุอย่างระมัดระวัง เมื่อตกแต่งเรียบร้อยแล้ว ก็จะนำไปสู่ขบวนการทำให้แห้ง (drying process)

สำหรับอินซูเลเตอร์แบบเซลเช่น ลูกถ้วยแขวน จะถูกทำให้เป็นรูปโดยเครื่องออโตเมติกจิกเกอร์ริง (automatic jiggering Machine) โดยทำการตัดเคลร์อดให้มีขนาดที่เหมาะสม แล้วใส่ไปในแบบ จากการหมุนของแม่พิมพ์จะทำให้ได้รูปแบบของโครงร่างภายในของอินซูเลเตอร์เซล

การกระทำอย่างอัตโนมัตินี้จะทำให้ได้อินซูเลเตอร์ที่มีขนาดเหมือนกันทั้งในด้านรูปร่าง และความ

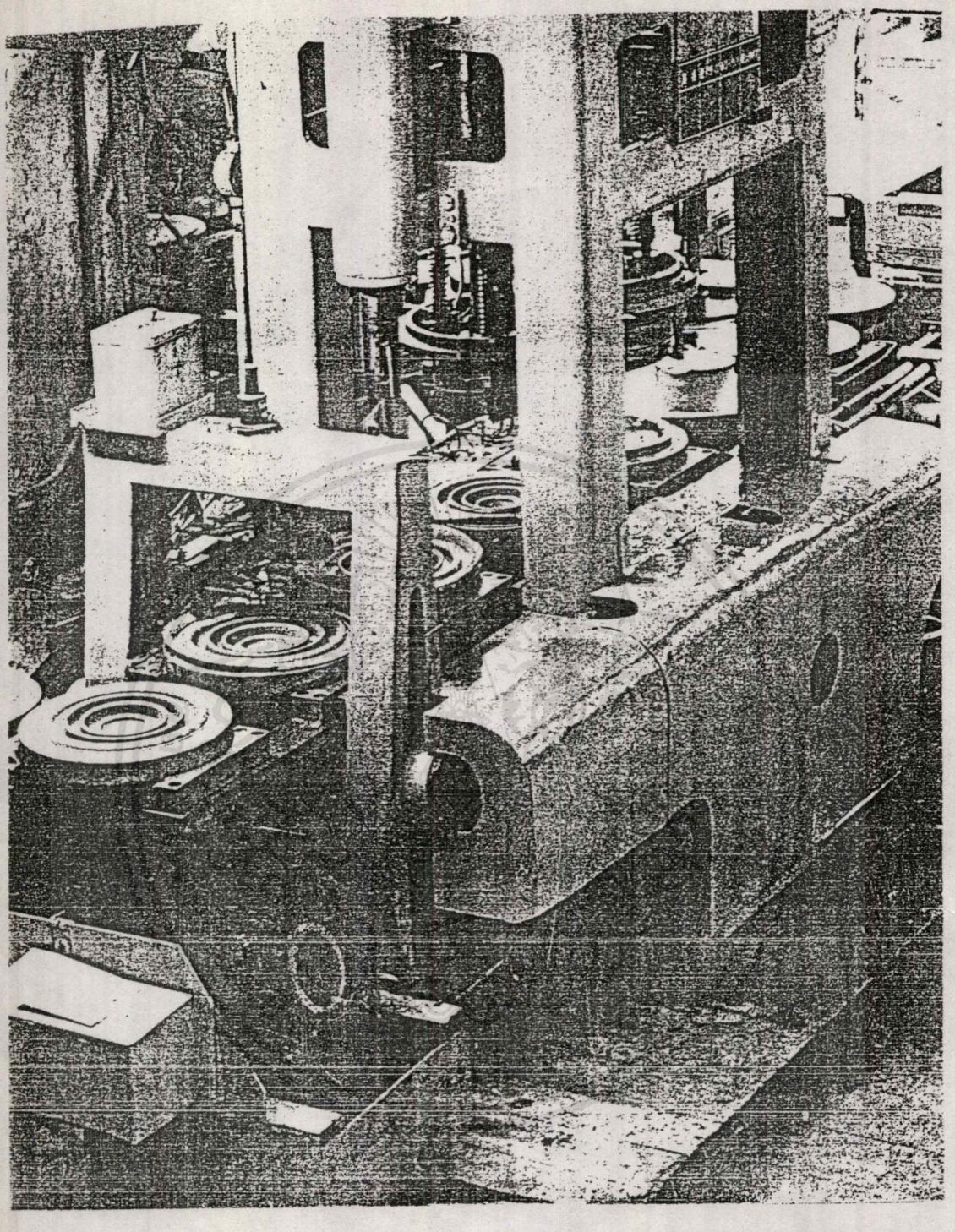
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คงทนแข็งแรง สำหรับลูกถ้วยแขวนนั้น ปัจจุบันจะใช้เครื่องจักรกลในการผลิต โดยแบบจะถูกส่งไปอย่างอัตโนมัติ และการประกอบ แค็ปกับพินนั้น จะทำอย่างอัตโนมัติเช่นกัน



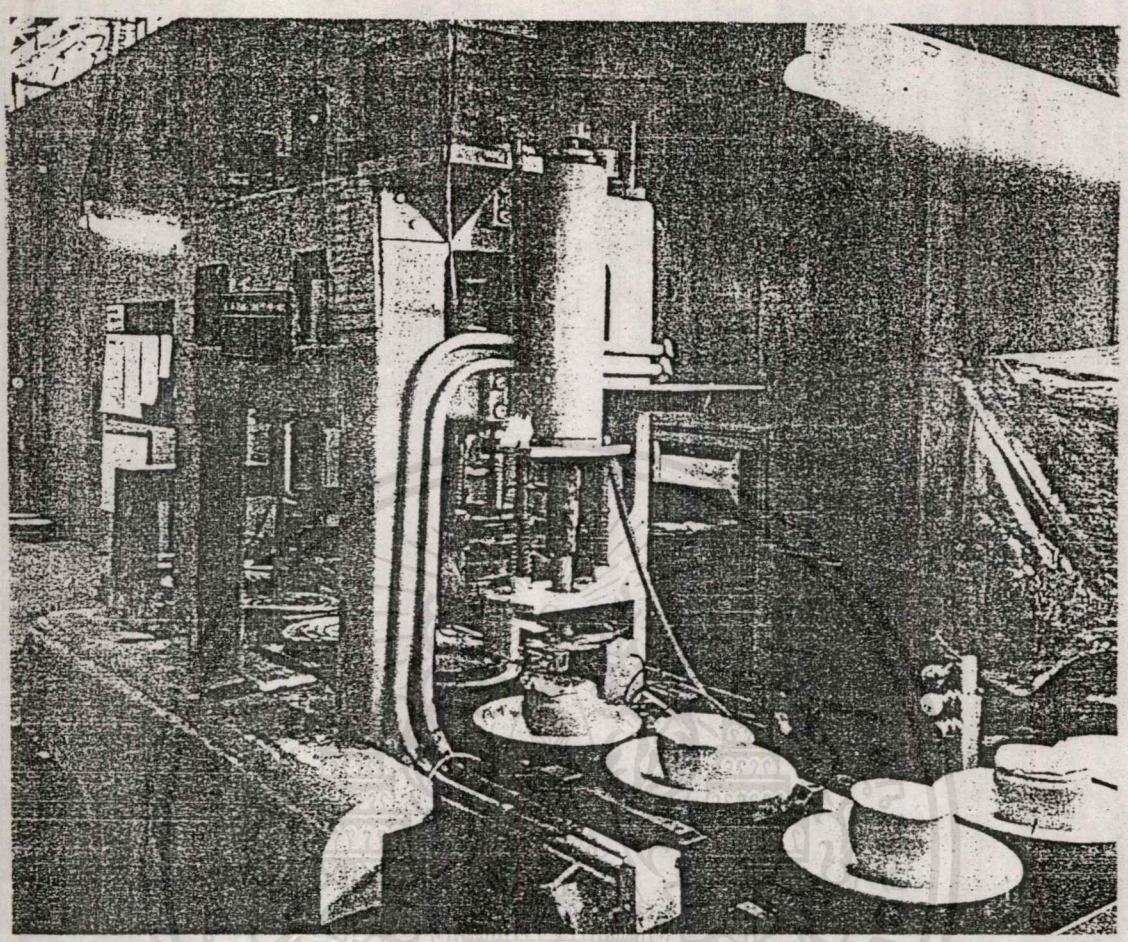
รูปที่ 14 แสดงให้เห็นถึงขบวนการทริมมิ่ง (ในรูปเป็นการกลึงแท่งเคลร์อด)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 15 แสดงขั้นการผลิตลูกถ้วยแบบเชลซึ่งทำการผลิตโดยใช้เครื่องออโตเมติกจิกเกอร์ริ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 16 แสดงขั้นการผลิตลูกถ้วยแบบเซลซึ่งทำการผลิตโดยใช้เครื่องออโตเมติกจิกเกอร์ริ่งเช่นกัน

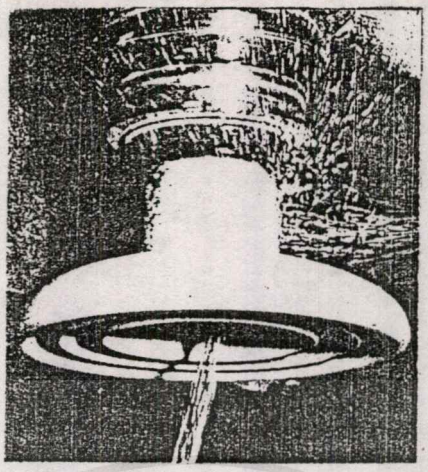
2.3.7) <u>การเกรสซิ่ง (GLAZING) และแซนดิง (SANDLING)</u>

อินซูเลเตอร์ชนิดลองร็อดจะถูกเคลือบด้วยขบวนการเพียวริ่งโปรเซส (pouring process) สำหรับอินซูเลเตอร์แบบเซล จะถูกเคลือบให้เรียบโดยวิธีการพ่น (spraying meyhod)

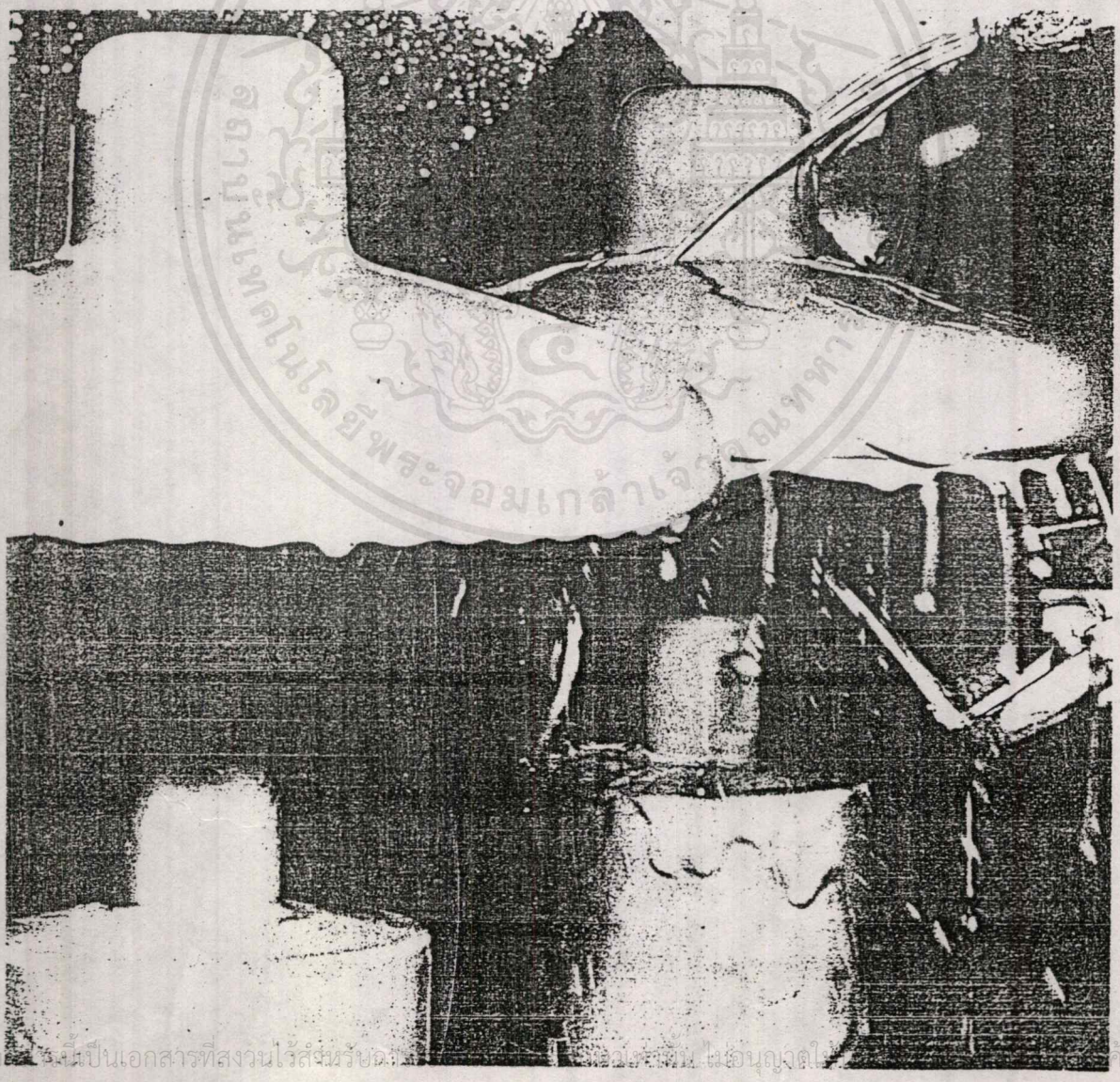
สำหรับอินซูเลเตอร์แบบเซลจะถูกเคลือบเงาเช่นกันโดยออโตเมติกเพียวริ่ง (Autometic pouring) คือการเทราดอย่างแรงจากหัวฉีด หลังจากขั้นตอนการเคลือบเงาจะทำการแซนดิงในบริเวณที่ต้องสัมผัสกับซีเมนต์เมื่อจะประกอบเข้ากับฮาร์ดแวร์

การแซนดิงนั้น เป็นการพ่นทรายบนอินซูเลเตอร์ ซึ่งการพ่นนี้จะพ่นบริเวณที่ต้องใช้ติดกับอุปกรณ์อื่นๆเช่น แค็ป พิน สำหรับการแซนดิงนั้นจะทำให้เมื่อทำการซีเมนต์แล้ว อุปกรณ์อื่นๆที่ติดเช่น พิน แค็ป จะติดได้แน่น สามารถรับโหลดทางกลได้สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

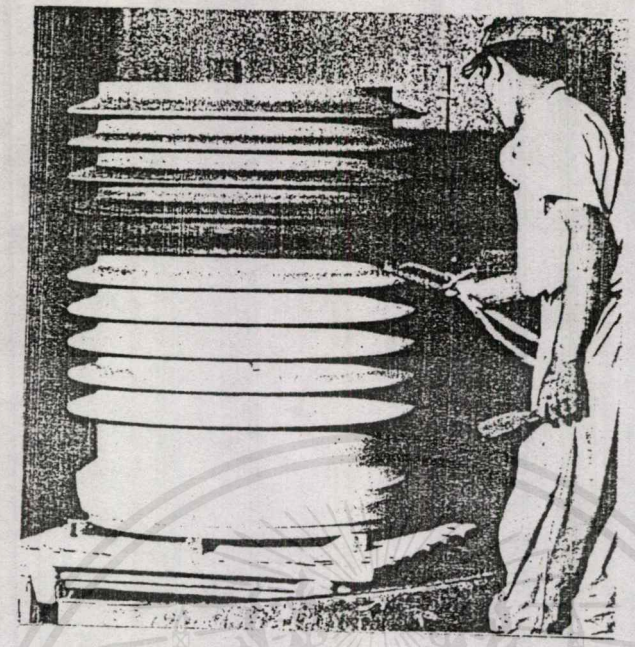


รูปที่ 17 แสดงการแขวนดิ่งบนลูกถ้วยแขวน



รูปที่ 18 แสดงการเพียวริ่งอินซูเลเตอร์ที่มีขนาดเล็ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งไม่อนุญาตให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 20 แสดงการเกรสซิ่งบนอินซูเลเตอร์ที่มีขนาดใหญ่ซึ่งทำโดยการพ่น

2.3.8) <u>การซีเมนต์ (CEMENTING)</u>

อินซูเลเตอร์แบบเซลจะถูกส่งลำเลียงไปยังแอสเซมบลิ้งแมชชีน (assembling machine) เพื่อนำแคัปและพินมาประกอบกันเข้าที่อินซูเลเตอร์เข้าด้วยกันโดยใช้ซีเมนต์

2.3.9 <u>การเผา (FIRING)</u>

สำหรับอินซูเลเตอร์แบบเซลนี้จะถูกนำไปเผาในทันแนลคิลน์ (tunnel kiln) และสำหรับอินซูเลเตอร์ที่มีขนาดใหญ่จะถูกนำไปเผาในมัฟเฟิลคิลน์ (muffle kiln) การเผานี้เป็นกระบวนการเผาที่สำคัญในการผลิตอินซูเลเตอร์ซึ่งจะต้องควบคุมอุณหภูมิ ความดัน และเวลา เพื่อที่จะทำให้อินซูเลเตอร์ที่ได้มีความแข็งแรง สมบูรณ์ และทนทาน เมื่อดินที่ได้รับการเคลือบออกมาจากเตาเผาแล้วที่ผิวของดินจะมีความเงางามจากการเคลือบเงาซึ่งเราเรียกวัสดุที่ได้นี้ว่า "ปอร์ซเลน (PORCELAIN)"

เมื่อผ่านกระบวนการทั้งหมดนี้แล้วเราก็จะได้อินซูเลเตอร์ออกมา ซึ่งในทางอุตสาหกรรมนั้นจะต้องนำอินซูเลเตอร์ที่ได้นี้ไปผ่านกระบวนทดสอบ เพื่อให้ได้อินซูเลเตอร์ที่มีคุณสมบัติได้ตามมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4) การทดสอบลูกถ้วยฉนวน

เนื่องด้วยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เราจะทำการสร้างลูกถ้วยขึ้นมา ซึ่งลูกถ้วยที่เราสร้างนี้จะนำมาทำการทดสอบ โดยวิธีที่ทำการทดสอบนั้น เราจะทำการทดสอบโดยวิธี 50 % แฟลชโอเวอร์ สำหรับวิธี คำนวณการหาค่า 50 % แฟลชโอเวอร์นั้น จะทำการอธิบายดังต่อไปนี้

2.4.1) ทฤษฎีการทดสอบ 50 % แฟลชโอเวอร์

ในการวัดแรงดันอิมพัลส์ ต้องใช้การอัดประจุให้กับคาปาซิเตอร์แรงสูงของเครื่องกำเนิดสัญญาณอิมพัลส์ให้ได้แรงดันอัดประจุตามที่ต้องการ แล้วจึงปล่อยดิสชาร์จออกไป ซึ่งอาจเกิดแฟลชโอเวอร์หรือไม่เกิดก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความน่าจะเป็น (Probability) และขนาดของแรงดัน กล่าวคือ ถ้าแรงดันอัดประจุต่ำเกินไปก็ย่อมจะไม่เกิดแฟลชโอเวอร์ แต่ถ้าสูงขึ้นมากพอก็จะทำให้เกิดแฟลชโอเวอร์มากขึ้น และถ้าสูงมากเกินไปก็จะทำให้ เกิดการแฟลชโอเวอร์ทุกครั้งที่ดิสชาร์จออกไป ดังนั้น การวัดแรงดันอิมพัลส์ จึงกำหนดเป็นค่าแรงดัน 50% อันหมายถึงค่ายอดแรงดันค่าปานกลาง ซึ่งเป็นค่าแรงดันที่ทำให้จำนวนครั้งที่เกิดแฟลชโอเวอร์ เป็นจำนวนครึ่งหนึ่งของจำนวนครั้งที่ดิสชาร์จออกไป แต่การอัดประจุเพื่อให้ได้แรงดันอัดประจุพอดีที่จะทำให้ได้ค่าแรงดันแฟลชโอเวอร์ 50% พอดีนั้นทำได้ยากและเสียเวลา โดยทั่วไปจึงวัดค่าแรงดันแฟลชโอเวอร์ 50% ได้ 2 วิธี คือ

2.4.1.1. วิธีเส้นกราฟแรงดันหลายระดับ (Mutiple Level Voltage Method) ทำได้โดยการป้อน แรงดันอย่างน้อย 10 ครั้งที่แรงดันแต่ละค่า โดยทดลองที่แรงดันหลายระดับที่สูงกว่าและต่ำกว่าค่าที่ทำให้เกิดแฟลชโอเวอร์ 50% ประมาณ 3% ของค่าแรงดันแฟลชโอเวอร์ 50% ที่คาดหมายไว้นำมา Plot กราฟระหว่างเปอร์เซ็นต์ความน่าจะเป็น (แกน Y) กับ แรงดันแฟลชโอเวอร์ (แกน X) จากแกน Y ก็ได้ค่า % ความน่าจะเป็นเท่ากับ 50 ลากมาตัดกราฟ แล้วลากมาตัดแกน X ได้ค่าแรงดันแฟลชโอเวอร์ 50% ตามต้องการ

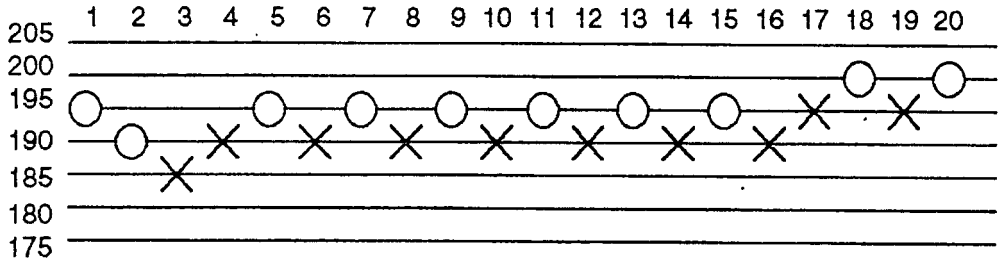
2.4.1.2 วิธีปรับขึ้นลง (Up-and-Down Method) เริ่มจากเลือกแรงดันค่าหนึ่งที่คาดหมายว่าเป็นแรงดันแฟลชโอเวอร์ 50% แล้วจ่ายเข้ากับอุปกรณ์ที่ทำการทดลอง ถ้าไม่เกิดแฟลชโอเวอร์ ให้เพิ่มแรงดันขึ้นอีกประมาณ 3% ของแรงดันแฟลชโอเวอร์ 50% แล้วทำการทดลองใหม่ แต่ถ้าเกิดการแฟลชโอเวอร์ ก็ให้ทำการลดแรงดันลงประมาณ 3% แล้วทำการทดลองเช่นเดิมอีก ปฏิบัติต่อเนื่องกันเช่นนี้จนกระทั่งมีจำนวนครั้งที่ป้อนแรงดันมากพอ ค่าแรงดันแฟลชโอเวอร์ 50% หาได้จากสมการ

$$V_{50\%} = (\Sigma N_i V_i)/\Sigma N_i$$

โดย V_i : ระดับแรงดันที่ป้อน N_i : จำนวนครั้งที่ป้อนแรงดันที่ระดับแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3) ตัวอย่างการคำนวนหาค่า 50% Flashover



วิธีที่ 1 ในการคำนวนแบบนี้เราจะนับจำนวนทั้ง O และ X ในแต่ละค่า Voltage

จากรูปจะเห็นได้ว่า ที่แรงดัน 185 KV จะมี 1 จำนวน

ที่แรงดัน 190 KV จะมี 8 จำนวน

ที่แรงดัน 195 KV จะมี 9 จำนวน

ที่แรงดัน 200 KV จะมี 2 จำนวน

ดังนั้น จากสมการ

$$V'_{50\%} = (\Sigma n_i V_i)/\Sigma n_i$$

$$V_{50\%} = \frac{(185 \ x1) + (190 \ x8) + (195 \ x9)}{20}$$

$$= 193 \text{ KV}$$

จะได้ค่า 50% Flashover Voltage = 193 KV

วิธีที่ 2 เราจะคิดโดยใช้จำนวนของ O หรือ X เท่านั้น ตัวอย่างนี้เราจะใช้ O ในการคำนวน

จากรูปเราจะได้ว่ามีจำนวน O ที่ 190 KV จะมี 1 จำนวน ($n_0 = 1$)

ที่ 195 KV จะมี 7 จำนวน ($n_1 = 7$)

ที่ 200 KV จะมี 2 จำนวน ($n_2 = 2$)

จากสมการ $$V_{50\%} = V' + d(\frac{A}{N} \pm \frac{1}{2})$$

โดยที่ $N = \Sigma n_i = 1+7+2 = 10$

$A = \Sigma i n_i = (0x1)+(1x7)+(2x2) = 11$

$d = \Delta V = 5$

$V' = 190$

ดังนั้น $V_{50\%} = 190 + 5[(11/10)-(1/2)]$

$= 193$

จะได้ค่า 50% Flashover Voltage = 193 KV

หมายเหตุ ถ้าเราใช้ O ในการคำนวณ เครื่องหมาย ± จะเป็นลบ

ถ้าเราใช้ X ในการคำนวณ เครื่องหมาย ± จะเป็นบวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การทดลองและวิธีการทดลอง

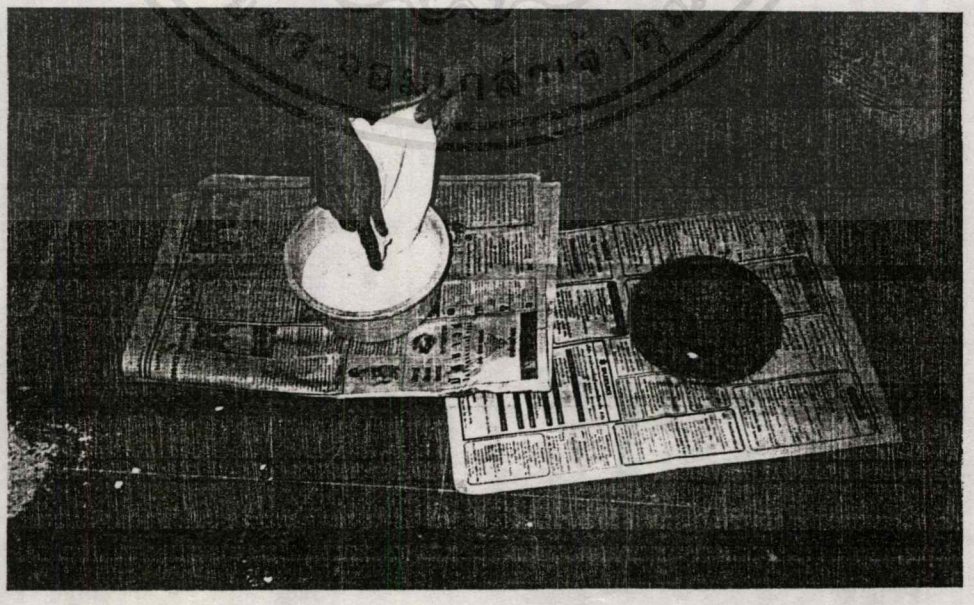
ในการทดลองนี้เราจะทำการสร้างลูกถ้วยโดยใช้วัสดุชนิดอื่นที่นอกเหนือจาก porcelain และแก้วเหนียว ซึ่งในตอนนี้เราจะใช้เรซิ่นทำการทดลองสร้างลูกถ้วย ซึ่งเหตุผลที่เราใช้เรซิ่นมาใช้ในการทดลอง นี้นั้น ก็เพราะด้วยเหตุผลดังนี้

1. เรซิ่นมีคุณสมบัติทางกลดี สามารถรับโหลดทางกลได้สูง
2. เรซิ่นมีการหดตัวต่ำ
3. เรซิ่นสามารถหล่อขึ้นรูปได้ง่าย และสามารถแข็งตัวได้แม้อุณหภูมิห้อง
4. เราสามารถผสมวัสดุอื่นๆลงไปในเรซิ่นเพื่อสามารถทำให้ได้คุณสมบัติตามต้องการได้ อีกทั้งมีเรซิ่นชนิดต่างๆมากมายซึ่งแต่ละชนิดก็มีคุณสมบัติแตกต่างกัน เราสามารถเลือกตามคุณสมบัติที่เหมาะสมได้

3.1) ขั้นตอนการผลิตลูกถ้วย

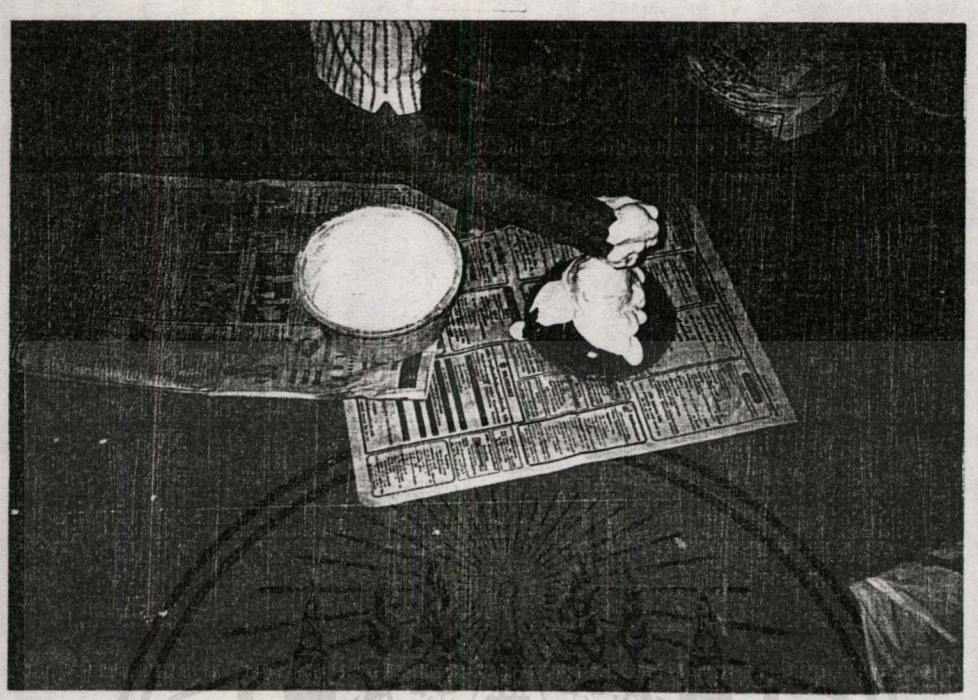
สำหรับการสร้างลูกถ้วยนั้น เรามีวิธีการและขั้นตอนต่างๆดังนี้

3.1.1) ในการสร้างลูกถ้วยนั้น เราจะนำเรซิ่นมาทำการหล่อ โดยจะหล่อเรซิ่นให้มีลักษณะเหมือนกับลูกถ้วยที่ใช้ในปัจจุบัน ซึ่งขั้นตอนแรกนั้น เราจะทำการสกัด cap กับ pin ของลูกถ้วยออกเพื่อนำมาเป็นต้นแบบ จากนั้นก็นำมาแต่งเพื่อให้ได้ลูกถ้วยต้นแบบให้มีลักษณะที่ต้องการโดยคำนึงถึงความง่ายในการสร้างแบบ และการหล่อลูกถ้วยรวมถึงการเกะผลิตผลิตภัณฑ์ที่ได้ในตอนสุดท้าย ในที่นี้เราจะแบ่งแม่แบบเป็นสองส่วน คือส่วนด้านบนกับด้านล่าง ซึ่งรูปแสดงการหล่อแบบจะแสดงไว้ในรูปที่ 20, 21 และรูปที่ 22

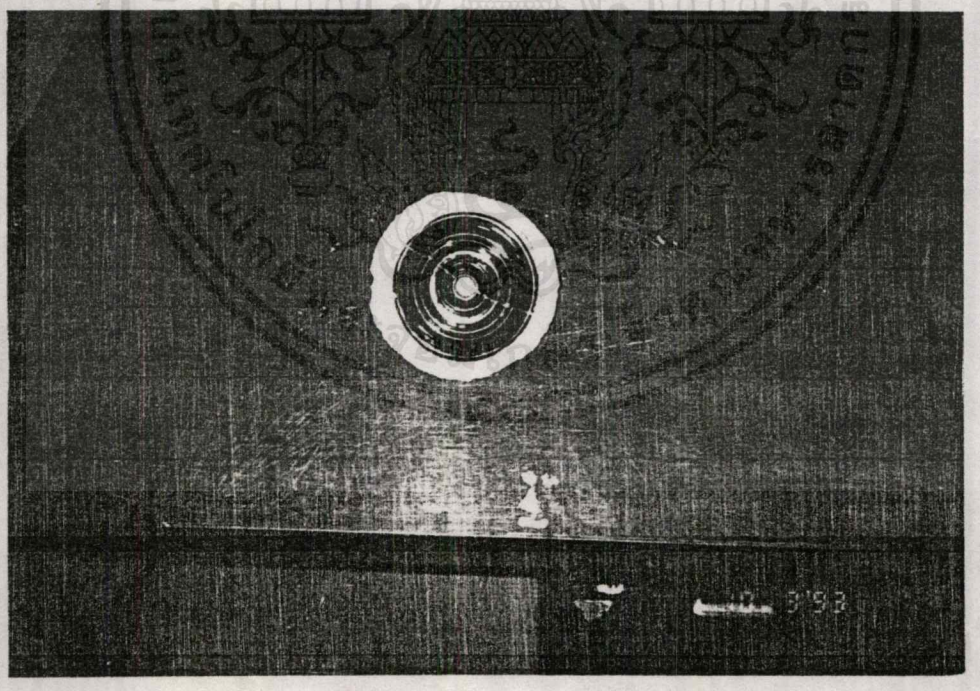


รูปที่ 20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



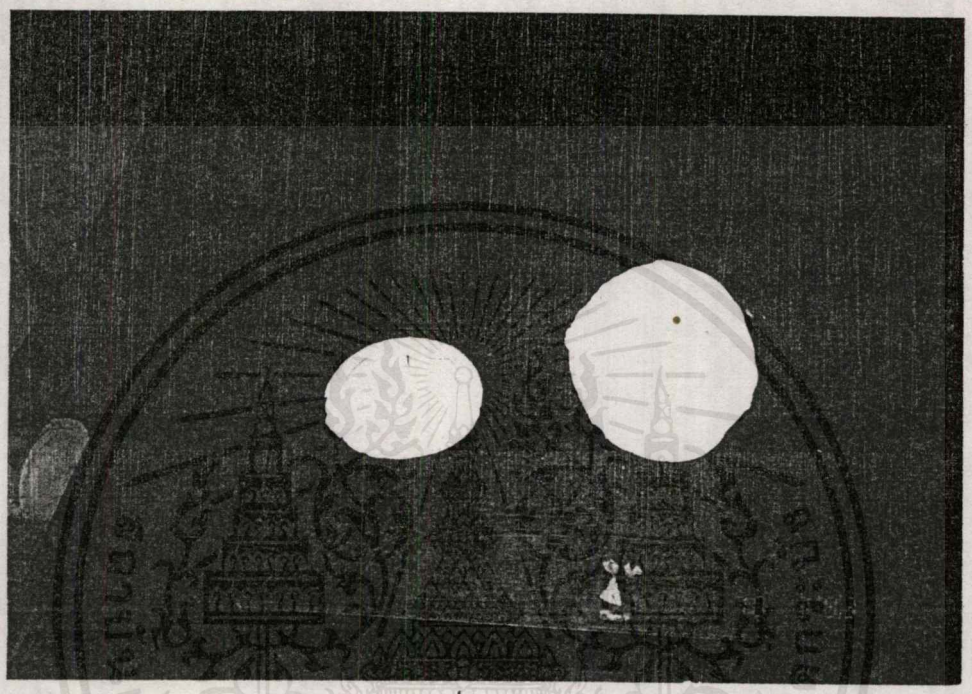
รูปที่ 21



รูปที่ 22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

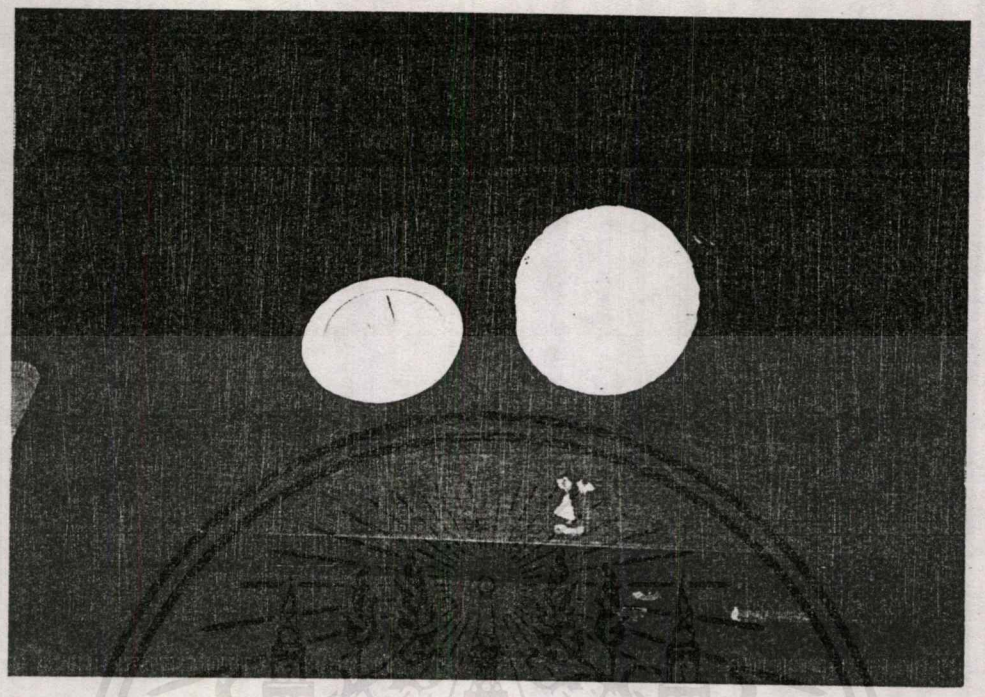
3.1.2) ทำการสร้างแบบโดยใช้ปูนพลาสเตอร์ ทำการหล่อแบบตามลักษณะที่ต้องการ คือหล่อแบบเป็นสองส่วนได้แก่ ส่วนบนที่มีลักษณะคล้ายครึ่งทรงกลม ค่อนข้างแบน มีส่วนจุกตรงกลางซึ่งจะเป็นส่วนที่อยู่ในแค็ป และส่วนล่างมีลักษณะเป็นลอนตามลักษณะลูกถ้วย และตรงกลางจะทำเป็นแท่งทรงกระบอก เพื่อใช้ในการบรรจุพิน แบบลูกถ้วยที่หล่อสำเร็จแล้วแสดงไว้ในรูปที่ 2.4



รูปที่ 23

3.1.3 เมื่อได้แบบที่ต้องการแล้ว เราต้องทำการเคลือบผิวปูนด้วยน้ำมันเพื่อให้ผิวเรียบและทำให้เรซิ่นไม่เกาะปูน น้ำมันนี้ทำมาจากน้ำมันมะพร้าวนำมาเคี่ยวกับสบู่ โดยน้ำมันจะซึมเข้าไปในโพรงอากาศของปูนพลาสเตอร์ ส่วนสบู่ก็ช่วยเคลือบผิวของแบบให้ลื่น เพื่อให้การแกะผลิตภัณฑ์กระทำได้โดยง่าย แบบที่นำมาทาน้ำมันแล้วแสดงในรูปที่ 25 การทาน้ำมันนั้นจะต้องทาหลายๆครั้ง โดยทาแล้วเว้นระยะเวลาพอประมาณให้น้ำมันค่อนข้างแห้ง ก็จะทำการทาทับใหม่จนผิวของแบบมีความลื่นตลอดทั่วพื้นผิว อันเนื่องจากมีสบู่เคลือบอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

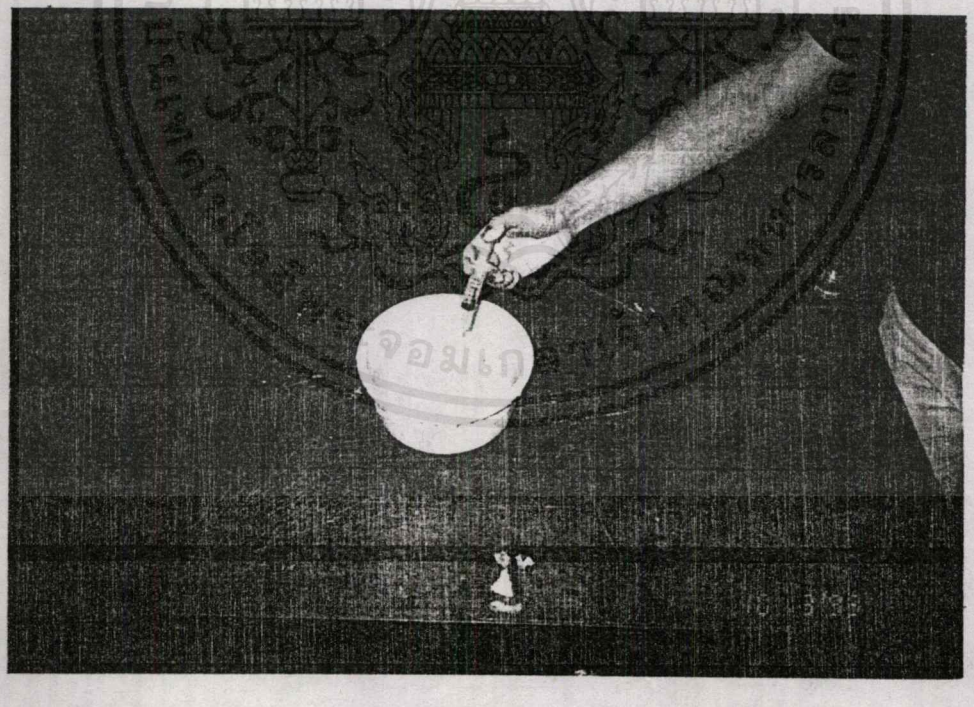
3.2) ขั้นตอนการหล่อเรซิ่น

ขั้นตอนนี้จะเป็นขั้นตอนสำหรับการหล่อเรซิ่น ซึ่งจะมีวิธีการดังนี้

3.2.1) เรซิ่นที่ใช้เป็นเรซิ่นหล่อใส เบอร์ 240 BS ของเยอรมัน ทำการผสมตัวเร่งปฏิกิริยาจากโรงงานแล้ว มีลักษณะเหลว ใส สีฟ้าอ่อน

3.2.2) การหล่อลูกถ้วยแต่ละลูกจะใช้เรซิ่นประมาณ 1 กิโลกรัม ทำการตวงเรซิ่นใส่ภาชนะเตรียมไว้ จากนั้นใส่ตัวทำแข็ง (Hardener) ซึ่งมีลักษณะสีขาวใสลงไปอัตราส่วนเรซิ่น 1 กิโลกรัม ต่อตัวทำให้แข็ง 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร กวนให้เข้ากัน และต้องระวังไม่ให้เกิดฟองอากาศ จนกระทั่งเรซิ่นมีสีเหลืองอ่อน แต่ยังใสเหมือนเดิม เมื่อทำการผสมตัวทำแข็งแล้ว ต้องรีบใช้งานให้หมดภายใน 20 นาที

หมายเหตุ อัตราส่วนผสมของเรซิ่นเบอร์นี้คือ 1 กิโลกรัมต่อตัวทำให้แข็ง 5 ลูกบาศ์กเซนติเมตร หากทำงานตอนบ่ายแดดร้อนจัด ควรลดตัวทำแข็งลง ให้ใช้เรซิ่น 0.5 ถึง 1 % ถ้าทำงานในช่วงค่ำหรือตอนฝนตก ต้องใช้ตัวทำแข็งเพิ่มขึ้นคือใช้ประมาณ 1-2 % (ไม่ควรใช้มากกว่านี้เนื่องจากชิ้นงานที่ได้จะร้าว ถ้าชิ้นงานที่ทำมีขนาดใหญ่หรือหนามาก ต้องทำ การลดตัวทำแข็งลง เพราะปริมาณเรซิ่นมาก จะเกิดความร้อนมาก ทำให้แห้งเร็วขึ้น เมื่อชิ้นงานแข็งตัว ชิ้นงานจะแตกร้าว)

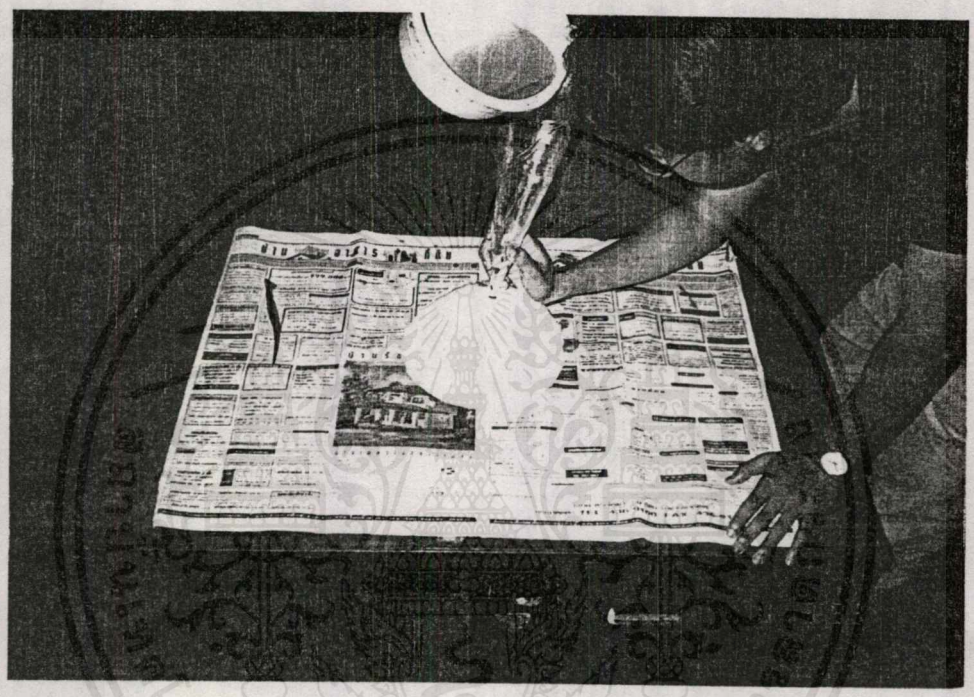


รูปที่ 25 แสดงการผสมเรซิ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3) ทำการเทเรซิ่นที่ผสมแล้วลงในแบบที่ประกบกันเรียบร้อยแล้วดังรูปที่ 2.7 โดยการเทผ่านรูที่เจาะไว้ที่ส่วนบนสุด ระวังไม่ให้เกิดฟองอากาศในขณะเท ทำการเทจนเต็มจึงหยุด

เรซิ่นมีระยะเวลาการทำปฏิกริยา คือ ระยะแรกจะเป็นลักษณะคล้ายวุ้นภายในเวลา 20 นาที ระยะที่สองจะเกิดความร้อนเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนแห้งสนิท เรซิ่นชนิดนี้จะแห้งช้ามาก จะแห้งสนิทภายใน 8-10 ชม บางครั้งอาจต้องใช้ความร้อนอบ หรือ ตากแดดเพื่อช่วยให้แห้งเร็วขึ้น



รูปที่ 26

3.3.4) ทิ้งไว้ประมาณ 1 วัน แล้วทำการแกะแบบปูนพลาสเตอร์ออก

3.3.5) นำผลิตภัณฑ์ที่ได้มาทำความสะอาด และขัดด้วยกระดาษทรายน้ำ โดยค่อยๆเพิ่มความละเอียดของกระดาษทรายขึ้นเรื่อยๆ จนได้ผลิตภัณฑ์ที่มีผิวเรียบตามต้องการ

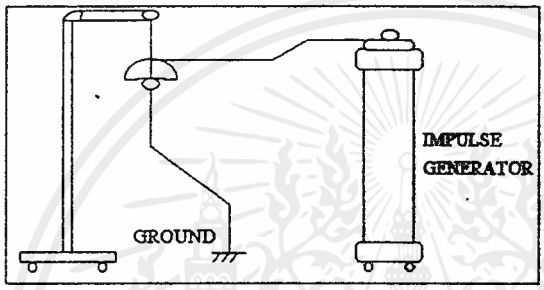
3.3.6 นำผลิตภัณฑ์ที่ขัดเรียบแล้วมาประกอบกับ แค็ป พิน โดยใช้ปูนซีเมนต์เป็นตัวผสานยึดเอาไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

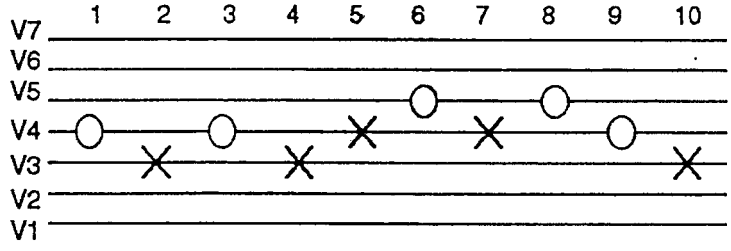
3.3) <u>อุปกรณ์การทดลอง</u>

- ชุดกำเนิดแรงดัน Impulse
- ลูกถ้วย พร้อมน็อตยึด
- สายไฟ

3.5 <u>ขั้นตอนและวิธีการทดลอง</u>



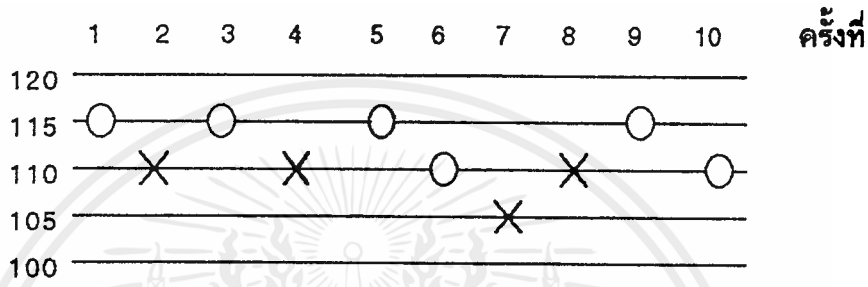
1. ต่ออุปกรณ์ดังรูป
2. ทำการตั้งระยะแก็ปของอิมพัลส์ให้เหมาะสมกับระดับแรงดันไฟฟ้า ที่เริ่มเกิดการแฟลชโอเวอร์ของลูกถ้วย
3. เมื่อได้ระยะ gap ที่เหมาะสม เริ่มการทดลองการแฟลชโอเวอร์ ที่ระดับแรงดันนั้น
4. การทดลองใช้วิธี Up-and-Down โดยปรับระดับแรงดันลงในการทดลองครั้งต่อไป เมื่อเกิดการแฟลชโอเวอร์ขึ้น และปรับระดับแรงดันโวลท์เตจขึ้น เมื่อไม่เกิดการแฟลชโอเวอร์ (ในการปรับระดับแรงดันแต่ละครั้งให้ห่างกัน 5 KV) หลังการทดลองแต่ละครั้ง ทำการดีสชาร์จประจุและเว้นระยะประมาณ 1 นาที ก่อนทำการทดลองครั้งต่อไป
5. บันทึกผลการทดลองลงในกราฟ โดยใช้เครื่องหมาย O เมื่อเกิดการแฟลชโอเวอร์และใช้เครื่องหมาย x เมื่อไม่เกิดการแฟลชโอเวอร์ดังรูป
6. ในการทดลองนี้เราจะใช้ลูกถ้วย 2 ประเภทคือ ลูกถ้วยที่ผลิตจากปอร์ซเลน และลูกถ้วยที่ผลิตจากเรซิ่น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 ผลการทดลอง

ในการทดลองนี้เราได้ทำการทดลองโดยใช้ลูกถ้วยปอร์ซเลน และลูกถ้วยที่ผลิตจากเรซิ่นมาทำการทดลองโดยทำการทดสอบด้วยเครื่องอิมพัลซ์ และทำการบันทึกผลการทดลอง โดยทำการพล็อตกราฟออกมา แล้วทำการคำนวนหาค่า 50 % แฟลชโอเวอร์ ทำที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 82 % ใช้ลูกถ้วยขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 7.5 นิ้ว



กราฟที่ 1 แสดงผลจากการวัดที่ได้จากลูกถ้วยแบบปอร์ซเลน
(ทดสอบโดยแรงดันอิมพัลส์ทางลบ)

การคำนวณ 50 % แฟลชโอเวอร์

วิธีที่ 1 ในการคำนวนแบบนี้เราจะนับจำนวนทั้ง O และ X ในแต่ละค่า Voltage

จากรูปจะเห็นได้ว่า ที่แรงดัน 115 KV จะมี 4 จำนวน
ที่แรงดัน 110 KV จะมี 5 จำนวน
ที่แรงดัน 105 KV จะมี 1 จำนวน

ดังนั้น จากสมการ

$$V_{50\%} = (\Sigma n_i V_i)/\Sigma n_i$$

$$V_{50\%} = \frac{(115 \times 4)+(110 \times 5)+(105 \times 1)}{10}$$

$$= 111.5 \text{ KV}$$

จะได้ค่า 50% Flashover Voltage = 111.5 KV

วิธีที่ 2 คิดโดยใช้จำนวนของ O เท่านั้น

จากรูปเราจะได้ว่ามีจำนวน O **ที่** 110 KV **จะมี** 2 จำนวน ($n_0 = 2$)
ที่ 115 KV **จะมี** 4 จำนวน ($n_1 = 4$)

จากสมการ $$V_{50\%} = V' + d(\frac{A}{N} \pm \frac{1}{2})$$

โดยที่ $N = \Sigma n_i = 4+2 = 6$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$A = \Sigma i n_i = (0x2)+(1x4) = 4$

$d = \Delta V = 5$

$V' = 110$

ดังนั้น $V_{50\%} = 110 + 5[(4/6)-(1/2)]$

$= 110.83$

จะได้ค่า 50% Flashover Voltage = 110.83 KV

วิธีที่ 3 เราจะใช้ x ในการคำนวน

จากรูปเราจะได้ว่ามีจำนวน x ที่ 105 KV จะมี 1 จำนวน ($n_0 = 1$)

ที่ 110 KV จะมี 3 จำนวน ($n_1 = 3$)

จากสมการ $$V_{50\%} = V' + d(\frac{A}{N} \pm \frac{1}{2})$$

โดยที่ $N = \Sigma n_i = 1+3 = 4$

$A = \Sigma i n_i = (0x1)+(1x3) = 3$

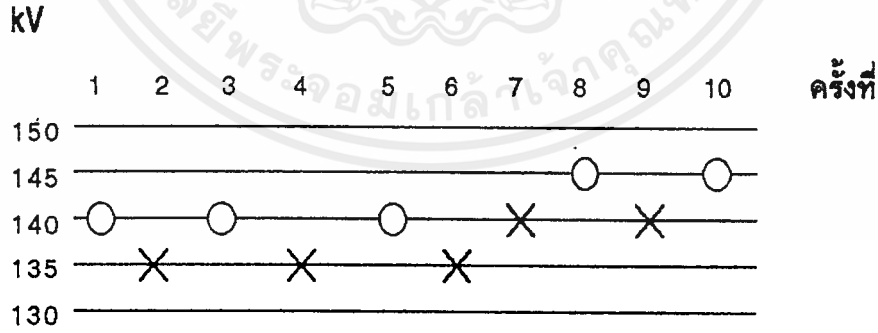
$d = \Delta V = 5$

$V' = 105$

ดังนั้น $V_{50\%} = 105 + 5[(3/4)+(1/2)]$

$= 111.25$

จะได้ค่า 50% Flashover Voltage = 111.25 KV



กราฟที่ 2 แสดงผลจากการวัดที่ได้จากลูกถ้วยที่ผลิตจากเรซิ่น (ทดสอบโดยแรงดันอิมพัลส์ทางลบ)

การคำนวณ 50 % แฟลชโอเวอร์

วิธีที่ 1 ในการคำนวนแบบนี้เราจะนับจำนวนทั้ง O และ X ในแต่ละค่า Voltage

จากรูปจะเห็นได้ว่า ที่แรงดัน 145 KV จะมี 2 จำนวน

ที่แรงดัน 140 KV จะมี 5 จำนวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่แรงดัน 135 KV จะมี 3 จำนวน

ดังนั้น จากสมการ

$$V_{50\%} = (\Sigma n_i V_i)/\Sigma n_i$$

$$V_{50\%} = \frac{(145 \times 2)+(140 \times 5)+(135 \times 3)}{10}$$

$$= 139.5 \text{ KV}$$

จะได้ค่า 50% Flashover Voltage = 139.5 KV

วิธีที่ 2 คิดโดยใช้จำนวนของ O เท่านั้น

จากรูปเราจะได้ว่ามีจำนวน O ที่ 140 KV จะมี 3 จำนวน ($n_0 = 3$)

ที่ 145 KV จะมี 2 จำนวน ($n_1 = 2$)

จากสมการ $$V_{50\%} = V' + d(\frac{A}{N} \pm \frac{1}{2})$$

โดยที่ $N = \Sigma n_i = 3+2 = 5$

$A = \Sigma i n_i = (0x3)+(1x2) = 2$

$d = \Delta V = 5$

$V' = 140$

ดังนั้น $V_{50\%} = 140 + 5[(2/5)-(1/2)]$

$= 139.5$

จะได้ค่า 50% Flashover Voltage = 139.5 KV

วิธีที่ 3 คิดโดยใช้จำนวนของX เท่านั้น

จากรูปเราจะได้ว่ามีจำนวน x ที่ 135 KV จะมี 3 จำนวน ($n_0 = 3$)

ที่ 140 KV จะมี 2 จำนวน ($n_1 = 2$)

จากสมการ $$V_{50\%} = V' + d(\frac{A}{N} \pm \frac{1}{2})$$

โดยที่ $N = \Sigma n_i = 3+2 = 5$

$A = \Sigma i n_i = (0x3)+(1x2) = 2$

$d = \Delta V = 5$

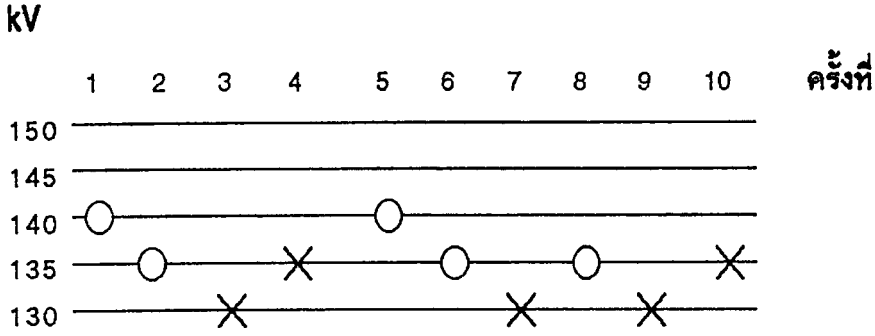
$V' = 135$

ดังนั้น $V_{50\%} = 135 + 5[(2/5)+(1/2)]$

$= 139.5$

จะได้ค่า 50% Flashover Voltage = 139.5 KV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กราฟที่ 3 แสดงผลจากการวัดที่ได้จากลูกถ้วยที่ผลิตจากเรซิ่น (ทดสอบโดยแรงดันอิมพัลส์ทางลบ)

การคำนวณ 50 % แฟลชโอเวอร์

วิธีที่ 1 ในการคำนวนแบบนี้เราจะนับจำนวนทั้ง O และ X ในแต่ละค่า Voltage

จากรูปจะเห็นได้ว่า ที่แรงดัน 130 KV จะมี 3 จำนวน
ที่แรงดัน 135 KV จะมี 5 จำนวน
ที่แรงดัน 140 KV จะมี 2 จำนวน

ดังนั้น จากสมการ

$$V_{50\%} = (\Sigma n_i V_i)/\Sigma n_i$$

$$V_{50\%} = \frac{(140\ x2)+(135\ x5)+(130\ x3)}{10}$$

$$= 134.5 \text{ KV}$$

จะได้ค่า 50% Flashover Voltage = 134.5 KV

วิธีที่ 2 เราจะคิดโดยใช้จำนวนของ O เท่านั้น

จากรูปเราจะได้ว่ามีจำนวน O ที่ 135 KV จะมี 3 จำนวน ($n_0 = 3$)
ที่ 140 KV จะมี 2 จำนวน ($n_1 = 2$)

จากสมการ $$V_{50\%} = V' + d(\frac{A}{N} \pm \frac{1}{2})$$

โดยที่ $N = \Sigma n_i = 3+2 = 5$

$A = \Sigma i n_i = (0x3)+(1x2) = 2$

$d = \Delta V = 5$

$V' = 135$

ดังนั้น $V_{50\%} = 135 + 5[(2/5)-(1/2)]$

$= 134.5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีที่ 3 คิดโดยใช้จำนวนของ X

จากรูปเราจะได้ว่ามีจำนวน O ที่ 130 KV **จะมี** 3 **จำนวน** (n_0 = 3)

ที่ 135 KV **จะมี** 2 **จำนวน** (n_1 = 2)

จากสมการ $$V_{50\%} = V' + d(\frac{A}{N} \pm \frac{1}{2})$$

โดยที่ N = Σn_i = 3+2 = 5

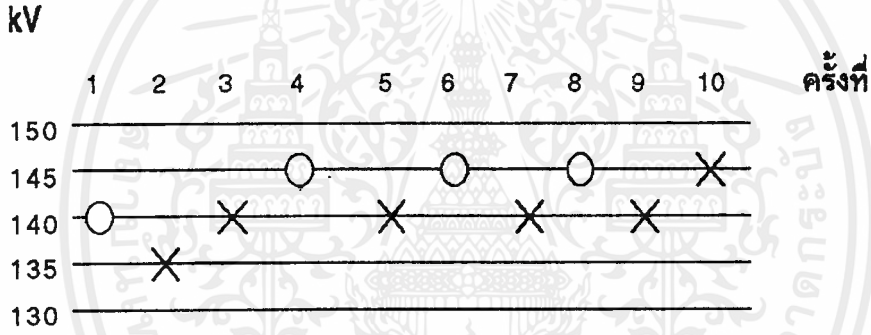
A = $\Sigma i n_i$ = (0x3)+(1x2) = 2

d = ΔV = 5

V' = 130

ดังนั้น $V_{50\%}$ = 135 + 5[(2/5)+(1/2)]

= 134.5



กราฟที่ 4 **แสดงผลจากการวัดที่ได้จากลูกถ้วยที่ผลิตจากเรซิ่น (ทดสอบโดยแรงดันอิมพัลส์ด้านบวก)**

การคำนวณ 50 % แฟลชโอเวอร์

วิธีที่ 1 ในการคำนวนแบบนี้เราจะนับจำนวนทั้ง O และ X ในแต่ละค่า Voltage

จากรูปจะเห็นได้ว่า ที่แรงดัน 145 KV จะมี 4 จำนวน

ที่แรงดัน 140 KV จะมี 5 จำนวน

ที่แรงดัน 135 KV จะมี 1 จำนวน

ดังนั้น จากสมการ

$$V_{50\%} = (\Sigma n_i V_i)/\Sigma n_i$$

$$V_{50\%} = \frac{(145\,x4)+(140\,x5)+(135\,x1)}{10}$$

= 141.5 KV

จะได้ค่า 50% Flashover Voltage = 141.5 KV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีที่ 2 เราจะคิดโดยใช้จำนวนของ O เท่านั้น

จากรูปเราจะได้ว่ามีจำนวน O ที่ 140 KV จะมี 1 จำนวน ($n_0 = 1$)

ที่ 145 KV จะมี 3 จำนวน ($n_1 = 3$)

จากสมการ $$V_{50\%} = V' + d(\frac{A}{N} \pm \frac{1}{2})$$

โดยที่ $N = \Sigma n_i = 3+1 = 4$

$A = \Sigma i n_i = (0x1)+(1x3) = 3$

$d = \Delta V = 5$

$V' = 140$

ดังนั้น $V_{50\%} = 140 + 5[(3/4)-(1/2)]$

$= 141.25$

วิธีที่ 3 คิดโดยใช้จำนวนของ X เท่านั้น

จากรูปเราจะได้ว่ามีจำนวน ที่ 135 KV จะมี 1 จำนวน ($n_0 = 1$)

ที่ 140 KV จะมี 3 จำนวน ($n_1 = 4$)

ที่ 145 KV จะมี 1 จำนวน ($n_2 = 1$)

จากสมการ $$V_{50\%} = V' + d(\frac{A}{N} \pm \frac{1}{2})$$

โดยที่ $N = \Sigma n_i = 1+4+1 = 6$

$A = \Sigma i n_i = (0x1)+(1x4)+(2x1) = 6$

$d = \Delta V = 5$

$V' = 135$

ดังนั้น $V_{50\%} = 135 + 5[(6/6)+(1/2)]$

$= 142.5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

4.1) สรุป

จากการทดลองโดยวิธี 50 % แฟลชโอเวอร์ เราก็จะพบว่าลูกถ้วยที่ทำจากเรซิ่นสามารถทนแรงดันอิมพัลส์ได้สูงกว่าลูกถ้วยที่ทำจากปอร์ซเลนเมื่อมีขนาดใกล้เคียงกันมาก และสามารถทนแรงดันอิมพัลส์ได้สูงกว่ามาตรฐานของลูกถ้วยแบบปอร์ซเลน คือทนได้มากกว่า 130 กิโลโวลท์ ขณะที่มาตรฐานของลูกถ้วยแบบปอร์ซเลนทนได้เพียง 115 กิโลโวลท์ ทั้งที่การผลิตนี้ ความปราณีต ความละเอียด และมาตรฐานยังไม่ดีนัก เพราะทำการผลิตเอง ทำให้สามารถสรุปได้ว่าลูกถ้วยที่ทำจากเรซิ่นทนแรงดันอิมพัลส์ได้สูง แต่ถึงอย่างไร เราก็ยังไม่สามารถให้คำตอบได้ว่า เรซิ่นจะสามารถนำมาทดแทนปอร์ซเลนและแก้วเหนียวได้ เนื่องจากว่ายังไม่ได้ทำการศึกษาทดสอบวิธีอื่นๆและคุณสมบัติในด้านอื่นๆของเรซิ่น ถึงแม้เราจะไม่ได้ทำการทดสอบถึงคุณสมบัติของเรซิ่นในด้านอื่น แต่เราก็อาจกล่าวได้ว่า เรซิ่นมีคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่ดี คือมีความเป็นฉนวนสูง และสามารถทนแรงดันอิมพัลส์ได้สูงมาก และมีน้ำหนักเบาเมื่อเทียบกับ ปอร์ซเลนหรือแก้วเหนียว

4.2) วิจารณ์ผลการทดลอง

ในการผลิตลูกถ้วยนี้ (ลูกถ้วยที่ทำจากเรซิ่น) ยังไม่ได้มาตรฐานเท่าที่ควรเพราะเป็นการผลิตด้วยมือ ทำให้มีข้อเสียดังนี้

1. ผิวลูกถ้วยยังไม่มีความเรียบเพียงพอ ซึ่งอาจเป็นผลให้เกิด leakage current สูงซึ่งจะนำไปสู่การเกิด flashover ได้ง่ายขึ้น
2. ไม่ได้ค่า 50% flashover ที่แท้จริงเนื่องจากความไม่เรียบของผิวลูกถ้วยที่ทำจากเรซิ่น ซึ่งอาจจะทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง หากผิวเรซิ่นเรียบ คุณสมบัติทางไฟฟ้าของลูกถ้วยชนิดนี้ควรจะดีกว่านี้
3. ในการทดลองนี้ ค่าสเกลของเครื่องอิมพัลส์เจนแนอเรเตอร์ค่อนข้างหยาบมาก ค่าแรงดันที่อ่านได้จึงอาจมีค่าที่คลาดเคลื่อน
4. ในที่นี้มีการทดสอบเพียงอย่างเดียวคือ การทนแรงดันอิมพัลซ์ ควรที่จะมีการทดสอบอื่นๆด้วย
5. ลูกถ้วยปอร์ซเลนที่ทำการทดสอบ เป็นลูกถ้วยที่ค่อนข้างเก่า คุณสมบัติจึงอาจจะต่ำกว่ามาตรฐานลงบ้าง ค่าที่ได้ในการทดลองจึงได้ไม่ตรงตามมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะจำเพาะของลูกถ้วยที่ผลิตจากเรซิ่น

1. ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 190 มิลลิเมตร หรือ 7.5 มิลลิเมตร
2. ใช้เรซิ่น 0.9 กิโลกรัม
3. ราคาเรซิ่นมีราคา กิโลกรัมละ 65 บาท
4. เรซิ่นที่ใช้มีมูลค่า 58.5 ต่อลูกถ้วย 1 ลูก

แนวทางการศึกษาต่อไป

1. ทำการพัฒนาแบบของลูกถ้วยให้มีประสิทธิภาพสำหรับในการหล่อลูกถ้วยจากเรซิ่น
2. ทำการพัฒนาส่วนผสมโดยเติมสารอื่นลงในเนื้อเรซิ่นเพื่อแก้ไขคุณสมบัติที่ไม่ดี
3. ทดสอบลูกถ้วยที่ผลิตได้โดยใช้ไฟกระแสตรง กระแสสลับ และ อิมพัลส์ ตลอดจนถึงการทดสอบทางกล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

1. ขอขอบคุณ นายประสาน เต็มเจริญ

2. ขอขอบคุณ นางสาวทีมะรัตน์ เลิศภูมิปัญญา ภาควิชาศิลปอุตสาหกรรม คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. ดร. สำรวย สังข์สะอาด หนังสือวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย หน้า 307-337
2. JST LOOM , " Insulator For High Voltage " , Peter Peregrinus Ltd. pp. 1-67
3. NGK Insulator Ltd , "NGK Insulator Catalog Number 65" , Dia Nippon Printing Co. , Ltd. , Tokyo , pp. 1-108
4. The lapp Insulator Company , "Insulator Catalog" pp.1-8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้