

ผลกระทบของแรงดันอิมพัลส์น้ำหนักขึ้นชั้นต่อถูกด้วยฉนวนพอร์ซเลน

นายณรงค์ชัย ถิมเศรษฐกานต์



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2541

ISBN 974-331-277-3

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

EFFECT OF STEEP FRONT IMPULSE VOLTAGE ON PORCELAIN INSULATORS



Mr. Narongchai Limsettagan

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering**

Department of Electrical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 1998

ISBN 974-331-277-3

หัวข้อวิทยานิพนธ์

ผลกระทบของแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้นต่อ

ถูกด้วยฉนวนพอร์ซเลน

โดย

นายณรงค์ชัย ถิมเศรษฐกานต์

ภาควิชา

วิศวกรรมไฟฟ้า

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร.สำรวย สังข์สะอาด

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

อาจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาดมงคล

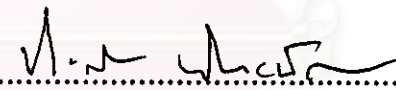
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต



.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ ศุภวัฒน์ ชุตินวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



.....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประสิทธิ์ พิทยพัฒน์)



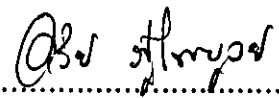
.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร.สำรวย สังข์สะอาด)



.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(อาจารย์ ดร.ชาญณรงค์ บาดมงคล)



.....กรรมการ

(คุณ อารีย์ ภูไพบูลย์)

ณรงค์ชัย ถิ่นเศรษฐกานต์ : ผลกระทบของแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันต่อถูกด้วยฉนวนพอร์ซเลน
(Effect of Steep Front Impulse Voltage on Porcelain Insulators)

อ. ที่ปรึกษา : รศ. ดร.สำรวย ตั้งษ์สะอาด, อ. ที่ปรึกษาร่วม : ดร.ชาญณรงค์ บาลมงคล, 87 หน้า.
ISBN 974-331-277-3.

ถูกด้วยฉนวนที่ใช้ในระบบไฟฟ้าแบบชิงในอากาศจะมีโอกาสได้รับแรงดันเกินฟ้าผ่าที่มีค่าสูง
เกิดเป็นแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน ทำให้ถูกด้วยฉนวนเกิดการเจาะทะลุได้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้รายงานการ
ศึกษาวิจัยผลของแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันต่อความคงทนของถูกด้วยฉนวน ความชันของแรงดันอิมพัลส์
ปรับได้ตั้งแต่ 2500 ถึง 9200 kV/ μ s ทดสอบกับถูกด้วยฉนวนที่มีแนวเจาะทะลุเนื้อฉนวนแข็งน้อยกว่าครึ่ง
หนึ่งของระยะทางวาบไฟตามผิว ได้แก่ถูกด้วยแขวนและถูกด้วยก้านตรง และจะใช้เฉพาะ ANSI Class.52-1,
52-4 และ 56-2 เนื้อพอร์ซเลนมี 2 ชนิดคือ ชนิดอะลูมินา (Alumina porcelain) และชนิดธรรมดา (Normal
porcelain) ตัวอย่างถูกด้วยที่นำมาทดสอบ Class ละ 10 ถูก การทดสอบเริ่มต้นที่ความชัน 2500 kV/ μ s ผล
การทดสอบถูกด้วยฉนวนพอร์ซเลนทั้ง 3 Class พบว่าเนื้อพอร์ซเลนชนิดธรรมดามีความคงทนทางไฟฟ้าต่อ
แรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชันสูงกว่าชนิดอะลูมินา ความชันที่ทำให้เกิดเจาะทะลุขึ้นแตกต่างกันไป โดยที่
Class. 52-1, 52-4 และ 56-2 ใช้ความชัน 6500, 2500 และ 9200 kV/ μ s ตามลำดับ ถูกด้วยแขวนเกิดการ
เจาะทะลุเฉพาะภายในกรอบโลหะเท่านั้น และไม่มีการแตกกระจายของชิ้นส่วนพอร์ซเลนแต่อย่างใด ส่วน
Class. 56-2 มีการแตกกระจายบางส่วนบริเวณปีกบนสุดของถูกด้วย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า
สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง
ปีการศึกษา 2541

ลายมือชื่อนิสิต นรทชัย
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ศ.ดร. รศ.
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ชาญณรงค์ บาลมงคล

4070267921 : MAJOR ELECTRICAL ENGINEERING
KEY WORD: Steep Front / Porcelain insulators / Puncture test

NARONGCHAI LIMESETTAGAN : Effect of Steep Front Impulse Voltage on Porcelain

Insulators. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. SAMRUAY SANGKASAAD, Dr. Sc.Techn.

THESIS CO-ADVISOR : CHANNARONG BANMONGKOL, Dr. 87 pp. ISBN 974-331-277-3.

Insulators which are used in overhead transmission and distribution systems have a chance to face steep front lightning overvoltage, which can cause insulator puncture. This thesis reports the investigation on the effects of steep front impulse voltage on the dielectric strength of insulators. The steepness of the impulse test voltage can be adjusted from 2500 to 9200 kV/ μ s. The tests were conducted on suspension insulators and pin insulators, i.e., ANSI Class. 52-1, 52-4 and 56-2 which have a solid dielectric puncture path shorter than a half of the arcing distance in air. Two kinds of porcelain, i.e., alumina porcelain and normal porcelain were tested. Ten units of insulator samples for each class were tested with a steepness of 2500 up to 9200 kV/ μ s. The results show that the normal porcelain has dielectric strength greater than the alumina porcelain. The steepness that caused insulator puncture on classes 52-1, 52-4 and 56-2 were 6500, 2500 and 9200 kV/ μ s, respectively. Suspension insulators have internal puncture inside the metal cap and do not break out. On the other hand, pin insulators have partial crack on the upper shed.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้า

สาขาวิชา.....วิศวกรรมไฟฟ้ากำลัง

ปีการศึกษา..... 2541

ลายมือชื่อนิสิต..... ทราภชัย

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... ทวีระ ฐิติ...

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม..... ชัยวัฒน์ อิศร...



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดีก็ด้วยได้รับความช่วยเหลือหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม คือรองศาสตราจารย์ ดร.สำราญ สังข์สะอาด และอาจารย์ ดร.ชาตมรงค์ บาลมงคล ที่คอยกรุณาให้คำปรึกษาทั้งภาคทฤษฎีและภาคปฏิบัติการทดลอง และได้กรุณาตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้เป็นที่เรียบร้อย จึงขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้ ขอขอบคุณ คุณอารีย์ ภูไพบูลย์ ซึ่งเป็นคณะกรรมการวิทยานิพนธ์และเป็นผู้ให้ความอนุเคราะห์ถูกด้วยฉนวนพอร์ซเลนที่ใช้ในการทำวิจัย ขอขอบคุณ คุณอนุรักษ์ ศรีนาคเรือง ที่ให้ความช่วยเหลือทางด้านการประสานงานและนำส่งถูกด้วยฉนวนพอร์ซเลนให้ทันตามกำหนดเวลา ขอขอบคุณ อาจารย์ ดร.คมสัน เพ็ชรรัตน์ ที่คอยให้คำแนะนำเพิ่มเติมที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัย ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการไฟฟ้าแรงสูงต่างๆ ท่าน โดยเฉพาะคุณถาวร เอื้อดี และคุณวิวัฒน์ งามประดิษฐ์ ที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือทางด้านการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลองเพื่อให้เกิดความปลอดภัยแก่ผู้วิจัย ขอขอบคุณ คุณณรงค์ ทองฉิม นักวิจัยสาขา EMC ศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง ที่ได้ให้คำแนะนำในการติดตั้งระบบกราวด์ของวงจรที่ใช้ในการทดลองแรงดันอิมพัลส์น้ำหนักลิ้นซึ่งช่วยลดสัญญาณรบกวนต่ออุปกรณ์การทดลองเป็นอย่างมาก และขอขอบคุณ นิสิตปริญญาตรีและปริญญาโทอีกหลายท่านที่คอยให้ความช่วยเหลือ ขอขอบคุณสำนักงาน สกว. โครงการเมธีวิจัยอาวุโส ที่ให้ความสนับสนุนด้านทุนสำหรับการวิจัย และขอบคุณศูนย์เชี่ยวชาญพิเศษเฉพาะด้านเทคโนโลยีไฟฟ้ากำลัง ที่ให้ความสนับสนุนเงินทุนการศึกษาแก่ผู้วิจัย

สุดท้ายนี้ทางผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดามารดา ที่คอยสนับสนุนและส่งเสริมในการเรียนต่อระดับปริญญาโทมาตลอด ทั้งทางด้านการเงินและกำลังใจเสมอมา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ผ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 บทนำทั่วไป.....	1
1.2 ที่มาของปัญหา.....	1
1.3 ผลงานที่เกี่ยวข้อง.....	2
1.4 ขอบข่ายงานวิจัย.....	2
2. แรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้น.....	3
2.1 ข้อกำหนดแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้น.....	3
2.1.1 ความชันหน้าคลื่นแรงดันอิมพัลส์.....	3
2.1.2 ขนาดแรงดันทดสอบ.....	3
2.2 การสร้างแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้น.....	3
2.2.1 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่ามาตรฐาน 1.2/50 μ s.....	4
2.2.2 วงจรเสริมเพื่อสร้างแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้น.....	5
2.2.3 สปาร์กแกปตัดรูปคลื่น SG.....	5
2.2.4 อิมพัลส์ไวต์เตจดีไวเซอร์.....	7
2.3 การออกแบบวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้น.....	7
2.3.1 เครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์รูปคลื่นมาตรฐาน.....	7
2.3.2 ตัวเก็บประจุโทลคคัมปลิง C_p	8
2.3.3 สปาร์กแกปตัดรูปคลื่น.....	8
2.3.4 ไวต์เตจดีไวเซอร์และออกซิดัลโอสโคป.....	8
2.4 ผลการสร้างแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้น.....	8

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.4.1 การสร้างแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้นที่ C ₀ ค่าต่างๆ.....	8
2.4.2 การสร้างแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้นที่ใช้สปาร์กแกปอัดก๊าซ N ₂ ที่ความ ดันต่างๆ.....	9
3. เงื่อนไขการเกิดควาไฟฟ้าตามผิวและเจาะทะลุ.....	11
3.1 การเกิดเบรกดาว์ของแรงดันอิมพัลส์.....	11
3.2 การประสานสัมพันธ์การฉนวนของฉนวนภายนอกกับฉนวนภายใน.....	12
4. การเกิดเบรกดาว์ในฉนวนแข็ง.....	14
4.1 การเกิดเบรกดาว์แบบบริสุทธิหรือแบบไอออนิก.....	14
4.2 การเกิดเบรกดาว์เนื่องจากแรงกลไฟฟ้า.....	16
4.3 การเกิดเบรกดาว์แบบสตรีมเมอร์.....	17
5. ถูกด้วยฉนวน.....	18
5.1 ส่วนผสมถูกด้วยฉนวนพอร์ซเลน.....	18
5.1.1 ดินเหนียว.....	18
5.1.2 หินฟันม้า.....	18
5.1.3 ทรายแก้ว.....	19
5.2 ปัจจัยที่มีผลต่อความคงทนทางกลและทางไฟฟ้าของเนื้อพอร์ซเลน.....	20
5.2.1 ความพรุนของเนื้อพอร์ซเลน.....	20
5.2.2 ขนาดของส่วนผสมเนื้อพอร์ซเลน.....	21
5.3 กระบวนการผลิตถูกด้วยฉนวนพอร์ซเลน.....	23
6. การทดสอบและวิเคราะห์ผล.....	29
6.1 การทดสอบ.....	29
6.2 ผลการทดสอบถูกด้วยแฉวนพอร์ซเลน Class. 52-1.....	31
6.2.1 ผลการทดสอบเบื้องต้น.....	31
6.2.2 ผลการทดสอบเพิ่มเติม.....	33
6.2.3 วิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	33
6.3 ผลการทดสอบถูกด้วยแฉวนพอร์ซเลน Class. 52-4.....	35
6.3.1 ผลการทดสอบเบื้องต้น.....	35

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
6.3.2 ผลการทดสอบเพิ่มเติม.....	36
6.3.3 วิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	38
6.4 ผลการทดสอบถูกด้วยกำนตรงพอร์ชเลน Class. 56-2.....	40
6.4.1 ผลการทดสอบเบื้องต้น.....	40
6.4.2 วิเคราะห์ผลการทดสอบ.....	42
7. สรุปและข้อเสนอแนะ.....	45
7.1 สรุป.....	45
7.2 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	46
7.3 ข้อเสนอแนะ.....	46
รายการอ้างอิง.....	47
ภาคผนวก ก. ตารางการทดสอบแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้นบนถูกด้วยแฉวน Class. 52-1.....	49
ภาคผนวก ข. ตารางการทดสอบแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้นบนถูกด้วยแฉวน Class. 52-4.....	67
ภาคผนวก ค. ตารางการทดสอบแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้นบนถูกด้วยกำนตรง Class. 56-2.....	75
ประวัติผู้เขียน.....	83

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
5.1 คุณสมบัติทางกลของลูกถ้วยฉนวนที่มีเนื้อฉนวนต่างกัน.....	22
5.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของลูกถ้วยฉนวนที่มีเนื้อฉนวนต่างกัน.....	23
6.1 สรุปผลการทดสอบแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้นของลูกถ้วยแขวนพอร์ซเลน Class. 52-1.....	33
6.2 แรงดันเฉลี่ยที่เกิดความไวตามผิวและเจาะทะลุของลูกถ้วยแขวนพอร์ซเลน Class. 52-1.....	34
6.3 สรุปผลการทดสอบแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้นของลูกถ้วยแขวนพอร์ซเลน Class. 52-4.....	38
6.4 แรงดันเฉลี่ยที่เกิดความไวตามผิวและเจาะทะลุของลูกถ้วยแขวนพอร์ซเลน Class. 52-4.....	38
6.5 สรุปผลการทดสอบแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชั้นของลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน Class. 56-2.....	42
6.6 แรงดันเฉลี่ยที่เกิดความไวตามผิวและเจาะทะลุของลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลน Class. 56-2.....	42



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ส่วนประกอบวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นขั้น.....	4
2.2 วงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์ฟ้าผ่า.....	4
2.3 Crowbar spark gap แบบติดตั้งในบรรยากาศ.....	6
2.4 Crowbar spark gap ติดตั้งภายในท่อฉนวนพีวีซีอัดความดันก๊าซ.....	6
2.5 ส่วนประกอบวงจรสร้างแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นขั้นจากเครื่องกำเนิดแรงดันอิมพัลส์ปกติ.....	7
2.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความชันกับค่าเก็บประจุที่ปลิง (C_p).....	9
2.7 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นขั้น ที่ได้จาก $C_p = 8 \text{ nF}$	9
2.8 กราฟแสดงความชันของหน้าคลื่นแรงดันอิมพัลส์ในเทอมของความดันก๊าซในท่อ ฉนวนติดตั้งสปาร์กแก๊ป SG.....	10
3.1 เวลาต่ำซ้ำการเกิดเบรกความถี่ของแรงดันอิมพัลส์.....	12
3.2 ลูกถ้วยฉนวนประเภท A และ B.....	13
3.3 กราฟลักษณะแรงดัน-เวลาของลูกถ้วยฉนวน.....	13
4.1 ความทนต่อแรงดันไฟฟ้าของฉนวนเชิงแปรตามช่วงเวลาป้อนแรงดัน.....	15
4.2 ภาพแถบวาเลนซ์และแถบนำไฟฟ้าของฉนวนแข็ง โดยจะมีแถบของจุดบกพร่องแทรกอยู่.....	16
5.1 กราฟการขยายตัวระหว่างเนื้อพอร์ซเลนกับสารเคลือบผิวที่อุณหภูมิต่างๆ.....	19
5.2 ภาพจำลองโครงสร้างเนื้อพอร์ซเลนซึ่งยังมีส่วนผสมบางชนิดหลงเหลืออยู่.....	20
5.3 ขั้นตอนกระบวนการผลิตลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนแบบเปียกสำหรับลูกถ้วยแขวน และก้านตรง.....	24
5.4 ตัวอย่างภาพการผลิตลูกถ้วยด้วยวิธีการกระบวนการเปียก	
ก) การขึ้นรูปโดยการกดอัด.....	25
ข) การขึ้นรูปโดยการกึ่ง.....	25
5.5 กราฟความต้านทานเชิงผิวที่เปลี่ยนแปลงตามความชื้นระหว่าง เนื้อพอร์ซเลนที่มี สารเคลือบผิวและไม่มีสารเคลือบผิว.....	26
5.6 เส้นกราฟอุณหภูมิ-เวลา ของการเผาเนื้อพอร์ซเลน.....	28
6.1 ภาพลูกถ้วยฉนวนพอร์ซเลนที่ใช้ในงานวิจัย.....	29
6.2 ตัวอย่างภาพการคำนวณความชัน.....	30
6.3 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นขั้น 2500 kV/ μs เนื้อพอร์ซเลนชนิดธรรมดา.....	31

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.4 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน 5500 kV/ μ s เนื้อพอร์ซเลนชนิดอะลูมินา.....	32
6.5 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน โดยเปรียบเทียบระหว่างขณะเกิดวาบไฟตามผิว(1) และขณะเกิดเจาะทะลุ(2) ที่ความชัน 6500 kV/ μ s เนื้อพอร์ซเลนชนิดอะลูมินา.....	32
6.6 กราฟลักษณะแรงดัน-เวลาเฉพาะการเกิดวาบไฟตามผิวผ่านอากาศของลูกถ้วยฉนวน Class.52-1	
ก) เนื้อพอร์ซเลนชนิดอะลูมินา.....	34
ข) เนื้อพอร์ซเลนชนิดธรรมดา.....	35
6.7 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน 2500 kV/ μ s เนื้อพอร์ซเลนชนิดอะลูมินา.....	36
6.8 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน โดยเปรียบเทียบระหว่างขณะเกิดวาบไฟตามผิว(1) ขณะเกิดเจาะทะลุ(2) และหลังจากเกิดเจาะทะลุ(3)ที่ความชัน 2500 kV/ μ s ที่ความชัน 2500 kV/ μ s	
ก) เนื้อพอร์ซเลนชนิดอะลูมินา.....	37
ข) เนื้อพอร์ซเลนชนิดธรรมดา.....	37
6.9 กราฟลักษณะแรงดัน-เวลาเฉพาะการเกิดวาบไฟตามผิวผ่านอากาศของลูกถ้วยฉนวน Class.52-4	
ก) เนื้อพอร์ซเลนชนิดอะลูมินา.....	39
ข) เนื้อพอร์ซเลนชนิดธรรมดา.....	39
6.10 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน 2500 kV/ μ s เนื้อพอร์ซเลนชนิดธรรมดา.....	41
6.11 ตัวอย่างรูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน โดยเปรียบเทียบระหว่างขณะเกิดวาบไฟตามผิว(1) ขณะเกิดเจาะทะลุ(2) และหลังจากเกิดเจาะทะลุ(3) ลูกถ้วยฉนวน Class. 56-2 ที่ความชัน 9200 kV/ μ s	
ก) เนื้อพอร์ซเลนชนิดอะลูมินา.....	41
ข) เนื้อพอร์ซเลนชนิดธรรมดา.....	41
6.12 รูปคลื่นแรงดันอิมพัลส์หน้าคลื่นชัน โดยมีระยะเวลาห่างระหว่างแรงดันแตกต่างกัน.....	42
6.13 กราฟลักษณะแรงดัน-เวลาเฉพาะการเกิดวาบไฟตามผิวของลูกถ้วยฉนวน Class. 56-2	
ก) เนื้อพอร์ซเลนชนิดอะลูมินา.....	43
ข) เนื้อพอร์ซเลนชนิดธรรมดา.....	44