

# การศึกษาผลของรูปลักษณะตัวนำล่อฟ้าและค่าความต้านทานดินต่อประสิทธิภาพตัวนำล่อฟ้า

## Study on Air-termination Configuration and Earth Resistance to Air-termination Efficiency

ธนากร น้ำหอมจันทร์\* อติกร เสรีพัฒนานนท์ และ พงษ์สวัสดิ์ คชภูมิ

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย

เลขที่ 200 ถนนรังสิต-นครนายก (คลอง5) ตำบลรังสิต อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี รหัสไปรษณีย์ 12110

โทรศัพท์ 0-2577-1028 ต่อ 452 โทรสาร 0-2577-1023 E-mail: thanakorn@eau.ac.th\*

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการศึกษาผลของรูปลักษณะตัวนำล่อฟ้าและค่าความต้านทานดินต่อประสิทธิภาพตัวนำล่อฟ้า โดยใช้ตัวนำล่อฟ้า 5 รูปลักษณะ ในการทดสอบ ในช่วงค่าความต้านทานดิน 0 – 5 โอห์ม ทำการทดสอบและวัดด้วยแรงดันสูง กระแสตรงชั่วเวลาตามมาตรฐาน IEC 60060-1, IEC 60060-2 และ IEEE 4-1995 ผลการทดสอบพบว่าเมื่อค่าความต้านทานดินเพิ่มขึ้น 1 โอห์ม ประสิทธิภาพการล่อฟ้าของตัวนำล่อฟ้าแบบ (a), (b), (c), (d) และ (e) มีประสิทธิภาพต่ำลง 0.11-0.27, 0.10-1.10, 0.29-1.30, 1.08-5.36 และ 0.33-1.56 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ประสิทธิภาพการล่อฟ้าอันเนื่องมาจากรูปลักษณะตัวนำล่อฟ้าแบบ (b), (c), (d) และ (e) มีประสิทธิภาพต่ำลงจากตัวนำล่อฟ้าแบบ (a) 6.74, 0.27, 4.84 และ 22.20 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ประสิทธิภาพการล่อฟ้าอันเป็นผลมาจากรูปลักษณะตัวนำล่อฟ้าและค่าความต้านทานดินพบว่า ตัวนำล่อฟ้าแบบ (a) มีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบ (b), (c), (d) และ (e) ในทุกค่าความต้านทานที่ทำการทดสอบ

**คำสำคัญ :** ตัวนำล่อฟ้า, ค่าความต้านทานดิน, สตรีมเมอร์, ประสิทธิภาพตัวนำล่อฟ้า

### Abstract

This research presents the study on air-termination configuration and earth resistance to air-termination efficiency. The air-terminations used in the experiments have 5 configurations with earth resistance in the range of 0-5 ohms. The experiments and measurement used negative polarity DC high voltage test according to the IEC 60060-1, IEC 60060-2 and IEEE 4-1995 standards. The test result shows that if the earth resistances increase 1 ohm, the efficiency of (a), (b), (c), (d) and (e) air-termination configuration decrease by 0.11-0.27, 0.10-1.10, 0.29-1.30, 1.08-5.36 and 0.33-1.56 percent respectively. The efficiency of (b), (c), (d) and (e) air-termination configuration are lower than (a) for 6.74, 0.27, 4.84 and 22.20 percent respectively. The efficiency of air-termination configuration and earth resistances of (a) is higher than (b), (c), (d) and (e) for all resistance ranges in the test.

**Keywords :** air-termination, earth resistance, streamer, air-termination efficiency

## 1. บทนำ

ปรากฏการณ์ฟ้าผ่า เป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติที่ทำให้เกิดความเสียหายและเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งปลูกสร้าง โดย Benjamin Franklin ได้พิสูจน์ให้เห็นอย่างชัดเจน ที่เมืองฟิลาเดเฟีย สหรัฐอเมริกา ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1752 ด้วยการชักว่าวที่ผูกกุญแจโลหะเพื่อพิสูจน์ว่า ฟ้าผ่าเป็นปรากฏการณ์ทางไฟฟ้าหรือเป็นการสปาร์คทางไฟฟ้า ซึ่งเป็นผลจากการเกิดดีสชาร์จของประจุไฟฟ้าในก้อนเมฆ นับเป็นจุดเริ่มต้นของการศึกษาเชิงวิทยาศาสตร์ เป็นต้นมา [1]

การวิจัยเกี่ยวกับระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอกในปัจจุบัน มุ่งหาประสิทธิภาพของระบบป้องกันฟ้าผ่าจากรูปลักษณะของตัวนำล่อฟ้า ขนาดของตัวนำล่อฟ้า รวมไปถึงความหนาของทองแดงที่หุ้มตัวนำล่อฟ้า [2-5] แต่ประสิทธิภาพของระบบป้องกันฟ้าผ่ามิได้ขึ้นกับรูปลักษณะของตัวนำล่อฟ้าเพียงอย่างเดียว หากแต่รวมถึงค่าความต้านทานของดินรอบระบบรากสายดินด้วย [1, 6] กล่าวคือ ในทางปฏิบัติการติดตั้งรากสายดินของระบบป้องกันฟ้าผ่า ค่าความต้านทานดินที่ยอมรับได้อยู่ในช่วง 0 – 5 โอห์ม

จึงมีแนวคิดที่จะทดสอบหาประสิทธิภาพการล่อฟ้าอันเป็นผลจากรูปลักษณะตัวนำล่อฟ้าและค่าความต้านทานดิน โดยจะทำการทดสอบเปรียบเทียบผลจากรูปลักษณะตัวนำล่อฟ้า ที่ใช้ป้องกันฟ้าผ่าตามสถานที่ต่างๆ หรือสามารถพบเห็นได้ทั่วไป 5 รูปลักษณะ ในช่วงค่าความต้านทานดิน 0 ถึง 5 โอห์ม

เพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพการล่อฟ้าอันเนื่องมาจากผลของค่าความต้านทานดิน และรูปลักษณะตัวนำล่อฟ้า

## 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ปรากฏการณ์ฟ้าผ่า

ปรากฏการณ์ฟ้าผ่าคล้ายกับการเกิดไฟฟ้าสถิตแต่มีขนาดใหญ่กว่ามาก ทั้งฟ้าผ่าและไฟฟ้าสถิตเกิดจากสาเหตุเดียวกัน คือ การดึงดูดระหว่างประจุบวกและประจุลบ โดยทั่วไปประจุไฟฟ้าที่มีศักย์ต่างกันจะไม่เกิดการเคลื่อนที่เมื่ออยู่ในสภาวะสมดุล แต่จะเคลื่อนที่หรือดึงดูดกันก็ต่อเมื่อประจุทั้งสองต้องการกลับคืนสู่สภาวะสมดุล ไฟฟ้าสถิตที่เกิดขึ้นในชีวิตประจำวัน เช่น การใส่รองเท้ายางเดินบนพื้นพรม เมื่อเดินบนพื้นพรมรองเท้าจะเก็บอิเล็กตรอนขึ้นมาสะสมในร่างกายทำให้ร่างกายสะสมประจุลบ และเมื่อเข้าใกล้กับโลหะ เช่น ลูกบิดประตู จะทำให้อิเล็กตรอนกระโดดข้ามช่องว่างอากาศไปสู่โลหะที่มีโปรตอนหรือมีประจุบวกสะสมอยู่ การถ่ายโอนประจุดังกล่าว จะเกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น ทำให้อุณหภูมิเหมือนถูกไฟดูด [7-8] สำหรับปรากฏการณ์ฟ้าผ่าจะเป็นการถ่ายโอนประจุระหว่างก้อนเมฆสู่พื้นดิน ซึ่งจะต้องมีปริมาณประจุไฟฟ้ามากพอ จึงจะทำให้ประจุไฟฟ้ากระโดดข้ามจากก้อนเมฆลงสู่พื้นดินได้

การสะสมประจุในก้อนเมฆมีปริมาณมาก ทำให้ก้อนเมฆมีศักย์ไฟฟ้าสูง ตั้งแต่ 10 เมกะโวลต์ ถึง 100 เมกะโวลต์ และเกิดดีสชาร์จระหว่างก้อนเมฆกับพื้นโลกเป็น วาบฟ้าผ่า (ground flash) หรือระหว่างก้อนเมฆกับก้อนเมฆ หรือภายในก้อนเมฆเดียวกัน เป็น ฟ้าแลบ (air discharge) ฟ้าผ่าและฟ้าแลบมีโอกาสเกิดขึ้นพร้อมกัน ดังในรูปที่ 1 ตามธรรมชาติ

ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น ส่วนใหญ่จะเป็นฟ้าแลบ การศึกษาวิจัยของมนุษย์ส่วนมากจะให้ความสนใจเกี่ยวกับฟ้าผ่ามากกว่า



รูปที่ 1 ฟ้าแลบกับฟ้าผ่ารวมกัน

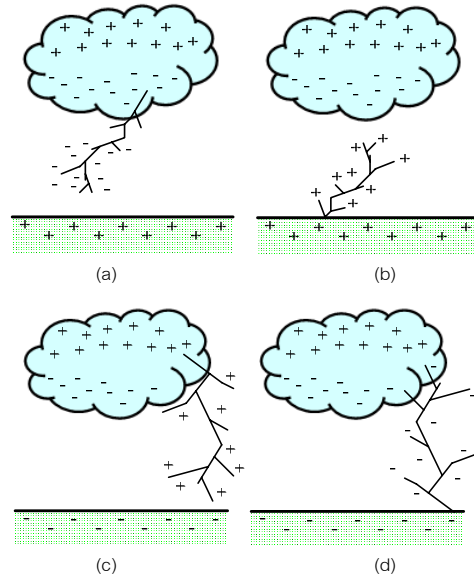
ที่มา : <http://www.strangedangers.com/content/item/135439.html>

## 2.2 ประเภทของฟ้าผ่า

จากที่ได้กล่าวไปแล้วว่า ฟ้าผ่าเกิดจากการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้า หรืออาจจะเรียกได้ว่าเป็นการดีสชาร์จทางไฟฟ้า การดีสชาร์จที่เกิดขึ้นจากก้อนเมฆ สามารถจำแนกได้ 4 ประเภท ดังนี้

1. ดีสชาร์จภายในก้อนเมฆ (IC)
2. ดีสชาร์จจากก้อนเมฆลงดิน (CG)
3. ดีสชาร์จระหว่างก้อนเมฆ (CC)
4. ดีสชาร์จจากก้อนเมฆสู่อากาศ (CA)

ดีสชาร์จส่วนใหญ่เป็นการดีสชาร์จภายในก้อนเมฆ (IC) สำหรับดีสชาร์จจากก้อนเมฆลงดิน (CG) หรือฟ้าผ่า เป็นปรากฏการณ์ดีสชาร์จที่มีการศึกษาวิจัยมากที่สุด เนื่องจากก่อให้เกิดอันตรายและความเสียหายแก่สิ่งมีชีวิตและสิ่งปลูกสร้างมากที่สุด โดยที่ IC, CC และ CA เรียกรวมกันว่า ฟ้าแลบ



รูปที่ 2 ชนิดของฟ้าผ่า

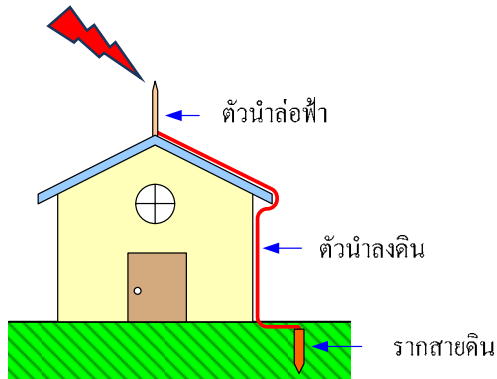
ฟ้าผ่าสามารถแบ่งได้ 4 ประเภท ตามลักษณะการเกิดและการเคลื่อนตัวของประจุ ดังรูปที่ 2 โดยฟ้าผ่าแบบฟ้าผ่าลงชั่วคราวเกิดขึ้นประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ของจำนวนฟ้าผ่าทั่วโลก ดังรูปที่ 2.2 (a) ขณะที่ฟ้าผ่าลงชั่วคราว ดังรูปที่ 2 (c) เกิดขึ้นน้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ ในกรณีฟ้าผ่าขึ้นส่วนมากจะเกิดบริเวณยอดภูเขาสูงหรือสิ่งปลูกสร้างที่มีความสูงมาก ๆ [9]

## 2.3 ส่วนประกอบของระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอก

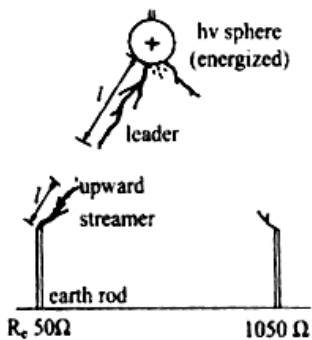
ระบบป้องกันฟ้าผ่า (Lightning Protection System : LPS) ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ ตัวนำล่อฟ้า ตัวนำลงดิน และรากสายดิน รวมถึงอุปกรณ์จับยึดสายตัวนำลงดิน [1, 6, 10-11] แสดงดังรูปที่ 3

ประสิทธิภาพของระบบล่อฟ้าขึ้นอยู่กับอัตราการเกิดและความยาวของสตรีมเมอร์จากปลายตัวนำล่อฟ้า ถ้าสตรีมเมอร์เกิดขึ้นและขยายตัวออกไปได้เร็ว สตรีมเมอร์จะมีโอกาสขึ้นไปพบกับฟ้าผ่า นำเป็นขั้น (Stepped leader) ได้เร็วขึ้น ประสิทธิภาพของระบบ

ล่อฟ้าก็จะมากขึ้น การขยายตัวและความยาวของ สตรีมเมอร์ขึ้นอยู่กับความต้านทานดินของระบบ ป้องกันฟ้าผ่า ค่าความต้านทานดินยิ่งต่ำ สตรีมเมอร์ก็ ยิ่งเกิดขึ้นและขยายตัวได้เร็วขึ้น ผลของความต้านทาน ดินต่อประสิทธิภาพการล่อฟ้า แสดงดังรูปที่ 4 [1]



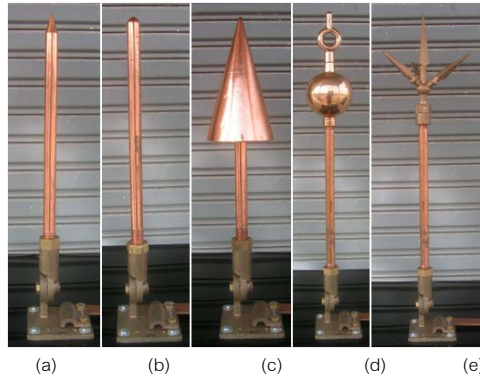
รูปที่ 3 ส่วนประกอบของระบบป้องกันฟ้าผ่า



รูปที่ 4 ผลของความต้านทานดินต่อประสิทธิภาพของเสา ล่อฟ้า

### 3. อุปกรณ์และวงจรการทดสอบ

ตัวนำล่อฟ้าที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นตัวนำล่อฟ้า ที่มีใช้ตามสถานที่ต่างๆ หรือสามารถพบเห็นได้ทั่วไป 5 รูปลักษณะ ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 รูปลักษณะของตัวนำล่อฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ

รูปที่ 5 (a) คือ ตัวนำล่อฟ้าปลายแหลม ขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร ปลายยอดมีมุม 36 องศา

รูปที่ 5 (b) คือ ตัวนำล่อฟ้าปลายมน ขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร ปลายยอดมีรัศมี 0.75 เซนติเมตร

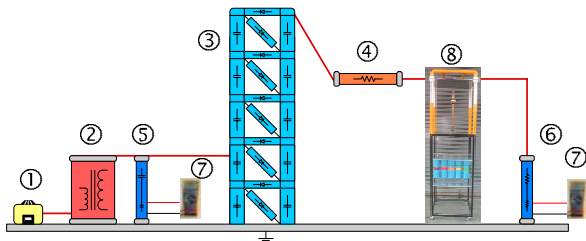
รูปที่ 5 (c) คือ ตัวนำล่อฟ้าปลายกรวย ขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร กรวยมีขนาดเส้น ผ่านศูนย์กลางที่ฐาน 8 เซนติเมตร สูง 15 เซนติเมตร ปลายยอดมีมุม 30 องศา

รูปที่ 5 (d) คือ ตัวนำล่อฟ้าทรงกลมปลายมน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร ทรงกลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.5 เซนติเมตร ปลายยอดมี รัศมี 0.4 เซนติเมตร

รูปที่ 5 (e) คือ ตัวนำล่อฟ้าปลายแหลม 3 แฉก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร ปลาย ยอดมีมุม 11 องศา

ตัวนำล่อฟ้าทั้ง 5 แบบทำจากทองแดง โดยใน การกล่าวถึงรูปลักษณะของตัวนำล่อฟ้าในเนื้อหาส่วน ถัดไป จะกำหนดให้เป็นตัวนำล่อฟ้าแบบ (a), (b), (c), (d) และ (e) ตามลำดับ

งานวิจัยนี้จะทำการทดสอบโดยใช้ไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงชั่วเวลา เนื่องจากฟ้าผ่าแบบฟ้าผ่าลงชั่วเวลาเกิดขึ้นประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ของจำนวนฟ้าผ่าทั่วโลก โดยที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงชั่วเวลาที่ใช้ในการทดสอบมีพิกัดแรงดัน 100 กิโลโวลต์ ซึ่งในภาคปฏิบัติฉนวนอากาศจะเบรกดาวนที่ระดับความเครียดสนามไฟฟ้าประมาณ 25 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร [1, 6, 12-13] เพื่อให้สามารถสังเกตเห็นอัตราการเกิดและความยาวของสตรีมเมอร์ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ใช้พิจารณาประสิทธิภาพของการล่อฟ้าขณะทำการทดสอบจึงจะทำการทดสอบที่ระยะแกประหว่างอิเล็กโตรดแรงสูงและตัวนำล่อฟ้าแต่ละรูปลักษณะที่ 8 เซนติเมตร ระบบสร้างแรงดันสูงและระบบวัดแรงดันสูงที่ใช้ในการทดสอบจะเป็นไปตามมาตรฐาน IEC std. 60060-1, IEC std. 60060-2 และ IEEE Std. 4 – 1995 กำหนด [14-16] วงจรที่ใช้ในการทดสอบ แสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 วงจรที่ใช้ในการทดสอบ

- โดยที่ 1 คือ หม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้พิกัด 0-250 V, 50 Hz, 3 kVA
- 2 คือ หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง พิกัด 220 V / 20 kV, 50 Hz, 5 kVA
- 3 คือ แหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรง

แบบขั้นบันได 5 ชั้น พิกัด  $\pm 100$  kV, 3 mA

- 4 คือ ความต้านทานจำกัดกระแส 100 kV, 3 mA,  $33.33 \text{ M}\Omega$
- 5 คือ โวลเตจดีไวเดอร์ แบบตัวเก็บประจุ พิกัด 150 kV, 50 Hz ratio 1111:1 [17]
- 6 คือ โวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวต้านทาน พิกัด 100 kV ratio 1000:1
- 7 คือ ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ Fluke 177
- 8 คือ ชุดทดสอบเปรียบเทียบประสิทธิภาพการล่อฟ้าอันเป็นผลจากรูปลักษณะตัวนำล่อฟ้าและค่าความต้านทานดิน [18]

ชุดทดสอบเปรียบเทียบประสิทธิภาพการล่อฟ้าอันเป็นผลจากรูปลักษณะตัวนำล่อฟ้าและค่าความต้านทานดินที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 7 โดยมีรายละเอียดดังนี้

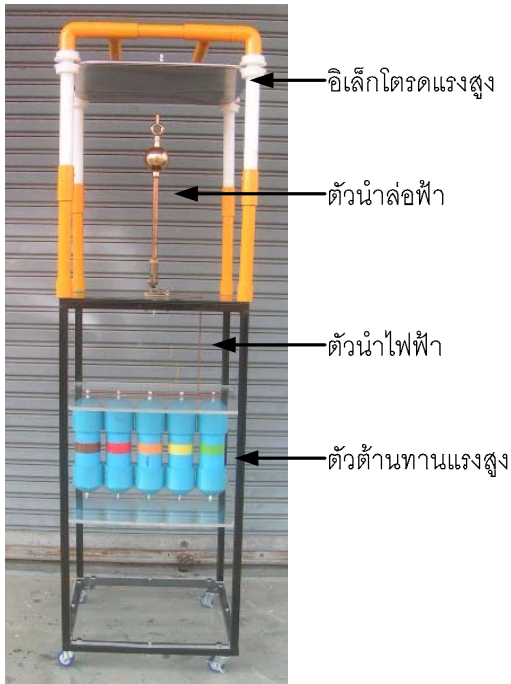
อิเล็กโตรดแรงสูง ออกแบบสร้างจากสแตนเลส ขนาดกว้าง 50 เซนติเมตร ยาว 50 เซนติเมตรหนา 0.1 เซนติเมตร พร้อมทำการลบขอบคมของมุมทั้ง 4 ออก เพื่อลดความเครียดสนามไฟฟ้าบริเวณขอบคมของอิเล็กโตรดขณะทำการทดสอบ

ตัวต้านทานแรงสูง เป็นส่วนที่ใช้จำลองความต้านทานดินในช่วง 0 – 5 โอห์ม พิกัดกำลัง 30 วัตต์ โดยติดตั้งในฉนวน PVC ขนาด 2.5 นิ้ว

โครงสร้างสำหรับติดตั้งอิเล็กโตรดแรงสูง ออกแบบสร้างโดยใช้ท่อ PVC ขนาด 1 นิ้ว บริเวณที่ติดตั้งอิเล็กโตรดแรงสูงออกแบบสร้างโดยใช้ซูเปอร์

ลื่นไหลจนถึงขั้นรูปให้เป็นเกลียว สำหรับปรับความสูงของอิเล็กโตรดแรงสูงในการทดสอบ

ตัวนำไฟฟ้าที่ต่อระหว่างตัวนำล่อฟ้าและความต้านทานแรงสูง ออกแบบสร้างโดยใช้บาร์ทองแดงกว้าง 2.5 เซนติเมตร หนา 0.3 เซนติเมตร



รูปที่ 7 ชุดทดสอบเปรียบเทียบประสิทธิภาพการล่อฟ้าอันเป็นผลจากรูปลักษณะตัวนำล่อฟ้าและค่าความต้านทานดินที่ใช้ในการทดสอบ

#### 4. การทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดสอบ

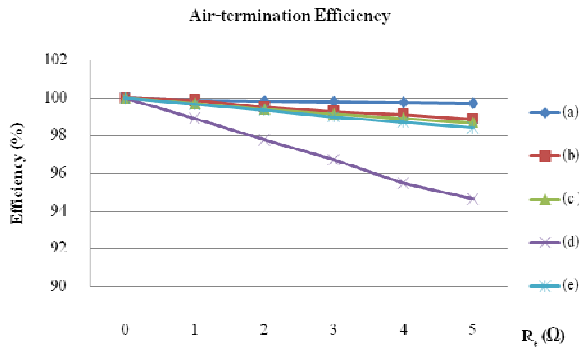
ในการทดสอบหาประสิทธิภาพการล่อฟ้าของแต่ละรูปลักษณะตัวนำล่อฟ้าที่แต่ละค่าความต้านทานดิน จะทำการทดสอบจำนวน 5 ครั้ง และหาค่าเฉลี่ยเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการล่อฟ้าอันเป็นผลจากรูปลักษณะตัวนำล่อฟ้าและค่าความต้านทานดิน ค่าเฉลี่ยผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 1 ในภาคผนวก

จากตารางที่ 1 จะพบว่า เมื่อค่าความต้านทานดินเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เกิดโคโรนาดีสชาร์จ การสร้างสตรีมเมอร์ รวมทั้งการเบรกดาวนั้ต้องใช้ระดับแรงดันสูงขึ้น

จากหัวข้อที่ 2.3 กล่าวว่า ประสิทธิภาพของระบบ ล่อฟ้าขึ้นอยู่กับอัตราการเกิดและความยาวของสตรีมเมอร์จากปลายตัวนำล่อฟ้า เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 1 โดยกำหนดให้ระดับแรงดันที่สร้างสตรีมเมอร์ที่ค่าความต้านทานดิน 0 โอห์มเป็นระดับแรงดันอ้างอิง เพื่อพิจารณาประสิทธิภาพการล่อฟ้าเมื่อค่าความต้านทานดินเพิ่มขึ้น 1 โอห์ม จะส่งผลให้ประสิทธิภาพการล่อฟ้าเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการล่อฟ้าเมื่อค่าความต้านทานดินเพิ่มขึ้น 1 โอห์ม แสดงดังตารางที่ 2 ในภาคผนวก

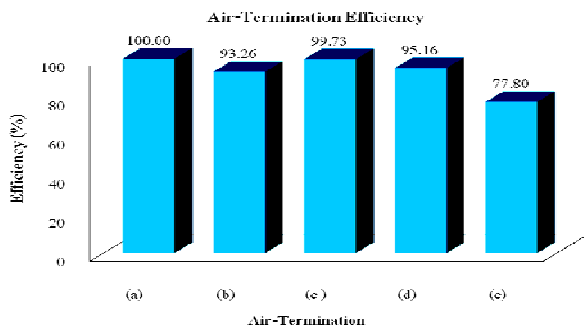
#### 5. สรุปและอภิปรายผล

จากการทดสอบหาประสิทธิภาพการล่อฟ้าอันเป็นผลจากค่าความต้านทานดินในช่วง 0 – 5 โอห์ม โดยอ้างอิงประสิทธิภาพการล่อฟ้าที่ค่าความต้านทานดิน 0 โอห์ม พบว่าเมื่อค่าความต้านทานดินเพิ่มขึ้น 1 โอห์ม ประสิทธิภาพการ ล่อฟ้ามีการเปลี่ยนแปลง ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการล่อฟ้าอันเนื่องมาจาก ค่าความต้านทานดิน

จากการทดสอบหาประสิทธิภาพการล่อฟ้าอันเป็นผลจากรูปลักษณะตัวนำล่อฟ้า 5 รูปลักษณะ โดยอ้างอิงประสิทธิภาพการล่อฟ้าของตัวนำล่อฟ้าแบบ (a) ที่ค่าความต้านทานดิน 0 โอห์ม พบว่าประสิทธิภาพการล่อฟ้าอันเนื่องจากรูปลักษณะตัวนำล่อฟ้ามีประสิทธิภาพแตกต่างกัน ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการล่อฟ้าอันเนื่องจากรูปลักษณะตัวนำล่อฟ้า

จากการทดสอบหาประสิทธิภาพการล่อฟ้าอันเป็นผลจากรูปลักษณะตัวนำล่อฟ้าและค่าความต้านทานดิน โดยทดสอบเปรียบเทียบระหว่างตัวนำล่อฟ้า 5 รูปลักษณะ ที่ระยะแกป 8 เซนติเมตร จะพบว่าที่ระยะแกปเท่ากันเมื่อค่าความต้านทานดินเพิ่มขึ้น 1 โอห์ม ในช่วงค่าความต้านทาน 0-5 โอห์ม เมื่อ

เปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการล่อฟ้าที่ค่าความต้านทานดิน 0 โอห์ม ประสิทธิภาพการล่อฟ้าของตัวนำล่อฟ้าแบบ (a), (b), (c), (d) และ (e) มีประสิทธิภาพต่ำลง 0.11-0.27, 0.10-1.10, 0.29-1.30, 1.08-5.36 และ 0.33-1.56 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ประสิทธิภาพการล่อฟ้าอันเนื่องจากรูปลักษณะตัวนำล่อฟ้าแบบ (a), (b), (c), (d) และ (e) มีประสิทธิภาพแตกต่างกัน เมื่อเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการล่อฟ้าของตัวนำล่อฟ้าแบบ (a) มีประสิทธิภาพต่ำลง 6.74, 0.27, 4.84 และ 22.20 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

## 6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย ประจำภาคการศึกษาที่ 2 ปีการศึกษา 2552 คณะผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์ และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] ส้ารวย สังข์สะอาด. (2549). วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง. ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [2] นรเศรษฐ์ พัฒนเดช, ภูชิต ถึงสุข และ ศรัณย์ ชีวทวิทรัพย์. (2552). การศึกษาและวิเคราะห์คุณลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำล่อฟ้าตอนที่ 1. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 32. หน้า 323-326.
- [3] นรเศรษฐ์ พัฒนเดช, ภูชิต ถึงสุข และ ศรัณย์ ชีวทวิทรัพย์. (2552). การศึกษาและวิเคราะห์

- คุณลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำล่อฟ้าตอน  
ที่ 2. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่  
ที่ 32. หน้า 327-330.
- [4] ศรัณย์ ชิวทวิทรัพย์, นรเศรษฐ์ พัฒนเดช และ  
ภพ จันทรเจริญสุข. (2551). คุณลักษณะทาง  
ไฟฟ้าของเสาหล่อฟ้าชนิดต่างๆ. การประชุม  
วิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 31. หน้า 251-  
254.
- [5] ศรัณย์ ชิวทวิทรัพย์, นรเศรษฐ์ พัฒนเดช และ ภพ  
จันทรเจริญสุข. (2552). การศึกษาและวิเคราะห์  
คุณลักษณะทางไฟฟ้าของวัสดุที่ใช้ทำเสาหล่อฟ้า.  
การประชุ ม ทาง วิ ช า ก า ร ข อ ง  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 47. หน้า 199-  
206.
- [6] ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล. (2546). เอกสาร  
ประกอบการสอนวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงชั้นสูง.  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร  
ลาดกระบัง.
- [7] Srinivasan, K., & Gu, J. (2006). Lightning as  
atmospheric electricity. Proceedings of IEEE  
CCECE/CCGEL, Ottawa Canada, pp. 2258-  
2261.
- [8] ธนากร น้ำหอมจันทร์. (2552). เอกสารคำสอน  
วิชาทฤษฎีวงจรไฟฟ้า 1. มหาวิทยาลัยอีสเทิร์น  
เอเซีย.
- [9] ธนากร น้ำหอมจันทร์ และ กาญจนา ภัคดี  
บุญญานุกุล. (2553). ฟ้าผ่า (Lightning) : ตอนที่  
1 การเกิดและความเสียหาย ตอนที่ 2 อันตราย  
จากฟ้าผ่า. วารสารความปลอดภัยและสุขภาพ  
มสธ.ปีที่ 3 ฉบับที่ 9 ธันวาคม 2552 – กุมภาพันธ์  
2553. หน้า 60-66.
- [10] สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ใน  
พระบรมราชูปถัมภ์. (2546). มาตรฐานการ  
ป้องกัน ฟ้าผ่าสำหรับสิ่งปลูกสร้าง (พิมพ์ครั้งที่  
ที่ 2). มาตรฐาน ว.ส.ท. 2003-43.
- [11] International Electrotechnical  
Commission. (1998). Protection of structures  
against lightning Part 1-2. IEC std. 61024-1-  
2.
- [12] Kuffel, E. Zaengl, W. S. and Kuffel, J.  
(2000). High Voltage Engineering  
:Fundamentals. (2<sup>nd</sup> ed.). Great Britain:  
Newnes.
- [13] Naidu, M. S. and Kamaraju, V. (1996).  
High Voltage Engineering (2<sup>nd</sup> ed.). McGraw-  
Hill.
- [14] International Electrotechnical  
Commission. (1989). High – voltage test  
techniques Part 1: General definitions and  
test requirements. IEC std. 60060-1, Second  
edition 1989 – 11
- [15] International Electrotechnical  
Commission. (1994). High – voltage test  
techniques Part 2: Measuring  
System. IEC std. 60060-2, Second edition  
1994–11
- [16] Institute of Electrical and Electronics  
Engineers. (1995). IEEE Standard



Techniques for High-Voltage Testing. IEEE Std. 4 – 1995

ปีที่ 2 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน 2551 หน้า 19-25.

[17] อติกร เสรีพัฒนานนท์, ธนากร น้ำหอมจันทร์, พงษ์สวัสดิ์ คชภูมิ และสุพิศ บุญรัตน์. (2551). การออกแบบและสร้างโวลเตจดีไวเดอร์แบบตัวเก็บประจุขนาด 150 กิโลโวลท์สำหรับใช้วัดแรงดันสูงกระแสสลับ, วารสาร EAU Heritage Journal,






[18] ธนากร น้ำหอมจันทร์, อติกร เสรีพัฒนานนท์, พงษ์สวัสดิ์ คชภูมิ. (2553). รายงานการวิจัย การศึกษาผลของค่าความต้านทานดินต่อประสิทธิภาพตัวนำล่อฟ้า. ทุนวิจัย มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย ประจำปีการศึกษา 2552.

### ภาคผนวก

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบหาประสิทธิภาพการล่อฟ้าของแต่ละรูปลักษณะตัวนำล่อฟ้าที่ค่าความต้านทานดินในช่วง 0-5 โอห์ม

| Air-termination Configuration                                                       | Phenomena  | DC High Voltage Negative Polarity (kV) |                |                |                |                |                |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------|----------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                                                                                     |            | $R_e 0 \Omega$                         | $R_e 1 \Omega$ | $R_e 2 \Omega$ | $R_e 3 \Omega$ | $R_e 4 \Omega$ | $R_e 5 \Omega$ |
|   | (a) Corona | 16.44                                  | 16.68          | 16.92          | 17.34          | 17.61          | 17.89          |
|                                                                                     | Streamer   | 45.23                                  | 45.28          | 45.30          | 45.31          | 45.33          | 45.35          |
|                                                                                     | Breakdown  | 52.55                                  | 52.67          | 52.80          | 53.14          | 53.25          | 53.45          |
|  | (b) Corona | 41.43                                  | 41.45          | 41.49          | 41.51          | 41.53          | 41.55          |
|                                                                                     | Streamer   | 48.28                                  | 48.33          | 48.50          | 48.62          | 48.70          | 48.81          |
|                                                                                     | Breakdown  | 54.47                                  | 54.48          | 54.49          | 54.51          | 54.52          | 54.53          |
|  | (c) Corona | 26.11                                  | 26.14          | 26.17          | 26.21          | 26.25          | 26.30          |
|                                                                                     | Streamer   | 45.35                                  | 45.48          | 45.61          | 45.73          | 45.83          | 45.94          |
|                                                                                     | Breakdown  | 52.77                                  | 53.01          | 53.34          | 53.68          | 54.01          | 54.34          |
|  | (d) Corona | 37.65                                  | 37.97          | 38.28          | 38.59          | 38.89          | 39.17          |
|                                                                                     | Streamer   | 47.42                                  | 47.93          | 48.46          | 48.97          | 49.55          | 49.96          |
|                                                                                     | Breakdown  | 58.45                                  | 59.00          | 59.62          | 60.34          | 61.00          | 62.07          |
|  | (e) Corona | 16.28                                  | 16.44          | 16.60          | 16.75          | 16.88          | 17.05          |
|                                                                                     | Streamer   | 55.27                                  | 55.45          | 55.62          | 55.81          | 55.97          | 56.13          |
|                                                                                     | Breakdown  | 58.70                                  | 58.88          | 59.04          | 59.23          | 59.46          | 59.69          |

ตารางที่ 2 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการล่อฟ้าเมื่อค่าความต้านทานดินเพิ่มขึ้น 1 โอห์ม

| Air-termination Configuration                                                           | Phenomena | Air-termination Efficiency (%) |                |                |                |                |                |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|--------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                                                                                         |           | $R_e 0 \Omega$                 | $R_e 1 \Omega$ | $R_e 2 \Omega$ | $R_e 3 \Omega$ | $R_e 4 \Omega$ | $R_e 5 \Omega$ |
|  (a)   | Streamer  | 100.00                         | 99.89          | 99.85          | 99.82          | 99.78          | 99.73          |
|  (b)   | Streamer  | 100.00                         | 99.90          | 99.54          | 99.30          | 99.13          | 98.90          |
|  (c)   | Streamer  | 100.00                         | 99.71          | 99.43          | 99.16          | 98.94          | 98.70          |
|  (d)  | Streamer  | 100.00                         | 98.92          | 97.81          | 96.73          | 95.51          | 94.64          |
|  (e) | Streamer  | 100.00                         | 99.67          | 99.37          | 99.02          | 98.73          | 98.44          |