

## การศึกษาผลของรูปลักษณะตัวนำล่อฟ้าต่อคุณสมบัติในการทำงานของตัวนำล่อฟ้า A Study on the Effects of Air-terminal Shape to Performance of Air-terminal

ธนากร น้ำหอมจันทร์<sup>1</sup> อติกร เสรีพัฒนานนท์<sup>2</sup> และ พงษ์สวัสดิ์ คชภูมิ<sup>3</sup>

### บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาผลของรูปลักษณะตัวนำล่อฟ้าต่อคุณสมบัติในการทำงานของตัวนำล่อฟ้า โดยใช้ตัวนำล่อฟ้า 5 รูปลักษณะ ค่าความต้านทานดินจำลอง 0 – 5 โอห์มในการทดสอบ ทำการทดสอบและวัดด้วยแรงดันสูงกระแสตรง ขั้วลบ ตามมาตรฐาน IEC 60060-1, IEC 60060-2 และ IEEE 4-1995 กำหนด ผลการทดสอบพบว่าเมื่อค่าความต้านทานดินเพิ่มขึ้น 1 โอห์ม คุณสมบัติในการทำงานของตัวนำล่อฟ้าแบบ (a) ปลายแหลม, (b) ปลายมน, (c) ปลายกรวย, (d) ทรงกลม ปลายมน และ (e) ปลายแหลม 3 แฉก มีคุณสมบัติในการทำงานต่ำลง 0.11-0.27, 0.10-1.10, 0.29-1.30, 1.08-5.36 และ 0.33-1.56 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ คุณสมบัติในการทำงานของตัวนำล่อฟ้าแบบ (b), (c), (d) และ (e) ที่ค่าความต้านทานดิน 0 โอห์ม มีคุณสมบัติในการทำงานต่ำกว่าตัวนำล่อฟ้าแบบ (a) 6.74, 0.27, 4.84 และ 22.20 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และคุณสมบัติในการทำงานอันเป็นผลมาจากรูปลักษณะตัวนำล่อฟ้าและค่าความต้านทานดินพบว่า ตัวนำล่อฟ้าแบบ (a) มีคุณสมบัติในการทำงานสูงกว่าแบบ (b), (c), (d) และ (e) ในทุกค่าความต้านทานที่ทำการทดสอบ

**คำสำคัญ:** ตัวนำล่อฟ้า, ค่าความต้านทานดิน, สตรีมเมอร์, คุณสมบัติในการทำงานของตัวนำล่อฟ้า

### Abstract

This paper presents the study on the effects of air-terminal shape to performance of air-terminal. The air-terminal used in the experiments has 5 shapes and simulate earth resistance in range 0-5 ohms. The experiments and measurement use negative polarity DC high voltage test according to IEC 60060-1, IEC 60060-2 and IEEE 4-1995 standards. The test results show the earth resistances are increase 1 ohm the performance of (a) sharp, (b) blunt, (c) cone, (d) round shape and (e) multi point air-terminal shape are decrease in 0.11-0.27, 0.10-1.10, 0.29-1.30, 1.08-5.36 and 0.33-1.56 percent respectively. The performance of (b), (c), (d) and (e) air-terminal shape at 0 ohm earth resistance are lower than (a) air-terminal shape are 6.74, 0.27, 4.84 and 22.20 percent respectively. The performance of air-terminal shape and earth resistances of (a) air-terminal shape are higher from (b), (c), (d) and (e) air-terminal shape for all resistance range in test.

**Keywords:** air-terminal, earth resistance, streamer, performance of air-terminal

<sup>1, 2, 3</sup>อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย

## 1. บทนำ

ปรากฏการณ์ฟ้าผ่า เป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติที่ทำให้เกิดความเสียหายและเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งปลูกสร้าง โดย Benjamin Franklin ได้พิสูจน์ให้เห็นอย่างชัดเจน ที่เมืองฟิลาเดเฟีย สหรัฐอเมริกา ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1752 ด้วยการชักว่าวที่ผูกกุญแจโลหะเพื่อพิสูจน์ว่าฟ้าผ่าเป็นปรากฏการณ์ทางไฟฟ้าหรือเป็นการสปาร์กทางไฟฟ้า ซึ่งเป็นผลจากการเกิดดิสชาร์จของประจุไฟฟ้าในก้อนเมฆ นับเป็นจุดเริ่มต้นของการศึกษาเชิงวิทยาศาสตร์เป็นต้นมา [1]

การวิจัยเกี่ยวกับระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอกในปัจจุบัน มุ่งหาคุณสมบัติในการทำงานของระบบป้องกันฟ้าผ่าจากรูปลักษณะของตัวนำล่อฟ้า ขนาดของตัวนำล่อฟ้า รวมไปถึงความหนาของทองแดงที่หุ้มตัวนำล่อฟ้า [2 - 5] แต่คุณสมบัติในการทำงานของระบบป้องกันฟ้าผ่ามิได้ขึ้นกับรูปลักษณะของตัวนำล่อฟ้าเพียงอย่างเดียว โดยจะรวมไปถึงค่าความต้านทานของดินรอบระบบรากสายดินด้วย [1, 6] กล่าวคือ ในทางปฏิบัติการติดตั้งรากสายดินของระบบป้องกันฟ้าผ่า ค่าความต้านทานดินที่ยอมรับได้อยู่ในช่วง 0 - 5 โอห์ม

จึงมีแนวคิดที่จะทดสอบหาคุณสมบัติในการทำงานของตัวนำล่อฟ้าที่เกิดจากรูปลักษณะตัวนำล่อฟ้า โดยจะทำการทดสอบเปรียบเทียบผลจากรูปลักษณะตัวนำล่อฟ้าที่สามารถพบเห็นได้ทั่วไป 5 รูปลักษณะ ในช่วงค่าความต้านทานดินจำลอง 0 ถึง 5 โอห์ม เพื่อให้ทราบถึงคุณสมบัติในการทำงานของตัวนำล่อฟ้าจากรูปลักษณะตัวนำล่อฟ้าและผลของค่าความต้านทานดิน

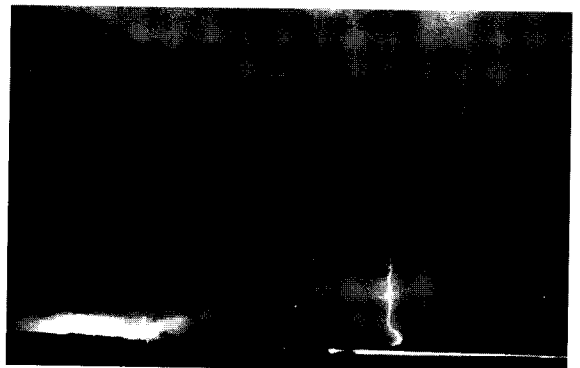
## 2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ปรากฏการณ์ฟ้าผ่า

ปรากฏการณ์ฟ้าผ่าคล้ายกับการเกิดไฟฟ้าสถิต แต่มีขนาดใหญ่กว่ามาก ฟ้าผ่าเกิดจากการดึงดูดระหว่างประจุบวกและประจุลบ โดยทั่วไปประจุไฟฟ้าที่มีศักย์ต่างกันจะไม่เกิดการเคลื่อนที่เมื่ออยู่ในสภาวะสมดุลแต่จะ

เคลื่อนที่หรือดึงดูดกันก็ต่อเมื่อประจุทั้งสองต้องการกลับคืนสู่สภาวะสมดุล [7-8] ซึ่งปรากฏการณ์ฟ้าผ่าจะเป็นการถ่ายโอนประจุระหว่างก้อนเมฆสู่พื้นดิน ซึ่งจะต้องมีปริมาณประจุไฟฟ้ามากพอ จึงจะทำให้ประจุไฟฟ้ากระโดดข้ามจากก้อนเมฆลงสู่พื้นดินได้

การสะสมประจุในก้อนเมฆมีปริมาณมาก ทำให้ก้อนเมฆมีศักย์ไฟฟ้าสูง ตั้งแต่ 10 เมกะโวลต์ ถึง 100 เมกะโวลต์ และเกิดดิสชาร์จระหว่างก้อนเมฆกับพื้นโลกเป็นวาบฟ้าผ่า (ground flash) หรือระหว่างก้อนเมฆกับก้อนเมฆ หรือภายในก้อนเมฆเดียวกันเป็น ฟ้าแลบ (air discharge) ฟ้าผ่าและฟ้าแลบมีโอกาสเกิดขึ้นพร้อมกันดังในรูปที่ 1 ตามธรรมชาติปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น ส่วนใหญ่จะเป็นฟ้าแลบ



รูปที่ 1 ฟ้าแลบกับฟ้าผ่ารวมกัน [9]

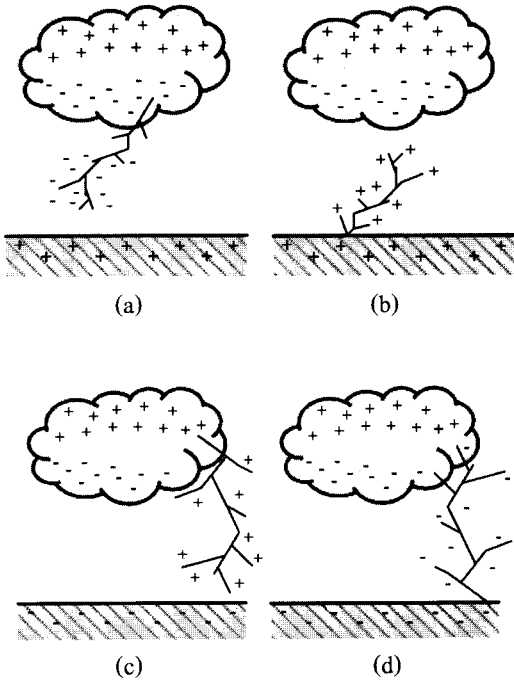
### 2.2 ประเภทของฟ้าผ่า

จากที่ได้กล่าวไปแล้วว่า ฟ้าผ่าเกิดจากการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้า หรืออาจจะเรียกได้ว่าเป็นการดิสชาร์จทางไฟฟ้า การดิสชาร์จที่เกิดขึ้นจากก้อนเมฆสามารถจำแนกได้ 4 ประเภท ดังนี้

1. ดิสชาร์จภายในก้อนเมฆ (Intracloud discharge; IC)
2. ดิสชาร์จจากก้อนเมฆลงดิน (Cloud-to-ground discharge; CG)
3. ดิสชาร์จระหว่างก้อนเมฆ (Cloud-to-cloud discharge; CC)

4. คีลซาร์จจากก้อนเมฆสู่อากาศ (Cloud-to-air discharge; CA)

คีลซาร์จส่วนใหญ่เป็นการคีลซาร์จภายในก้อนเมฆ (IC) สำหรับคีลซาร์จจากก้อนเมฆลงดิน (CG) หรือฟ้าผ่า เป็นปรากฏการณ์คีลซาร์จที่มีการศึกษาวิจัยมากที่สุด เนื่องจากก่อให้เกิดอันตรายและความเสียหายแก่สิ่งมีชีวิตและสิ่งปลูกสร้างมากที่สุด โดยที่ IC, CC และ CA เรียกรวมกันว่า ฟ้าแลบ

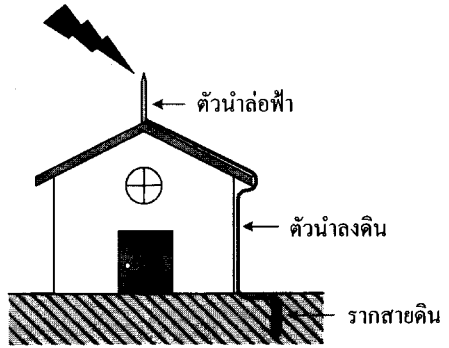


รูปที่ 2 ชนิดของฟ้าผ่า

ฟ้าผ่าสามารถแบ่งได้ 4 ประเภท ตามลักษณะการเกิดและการเคลื่อนตัวของประจุ ดังรูปที่ 2 โดยฟ้าผ่าแบบฟ้าผ่าลงข้างลบเกิดขึ้นประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ของจำนวนฟ้าผ่าทั่วโลก ดังรูปที่ 2 (a) ขณะที่ฟ้าผ่าลงข้างบวก ดังรูปที่ 2 (c) เกิดขึ้นน้อยกว่า 10 เปอร์เซ็นต์ ในกรณีฟ้าผ่าขึ้นส่วนมากจะเกิดบริเวณยอดภูเขาสูงหรือสิ่งปลูกสร้างที่มีความสูงมาก ๆ [10]

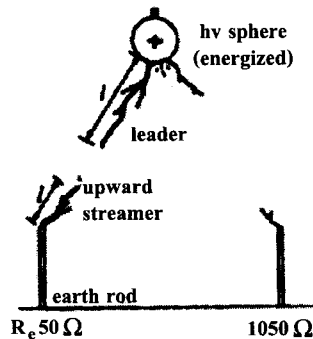
2.3 ส่วนประกอบของระบบป้องกันฟ้าผ่าภายนอก

ระบบป้องกันฟ้าผ่า (Lightning Protection System : LPS) ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก คือ ตัวนำล่อฟ้า ตัวนำลงดิน และรากสายดิน รวมถึงอุปกรณ์จับยึดสายตัวนำลงดิน [1, 6, 11-12] แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ส่วนประกอบของระบบป้องกันฟ้าผ่า

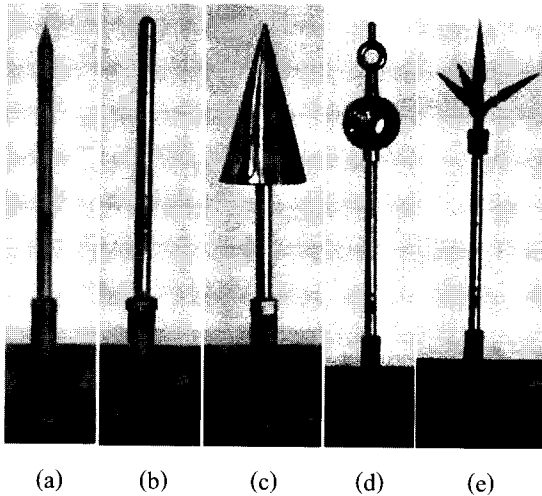
คุณสมบัติในการทำงานของระบบล่อฟ้าขึ้นอยู่กับอัตราการเกิดและความยาวของสตรีมเมอร์จากปลายตัวนำล่อฟ้า ถ้าสตรีมเมอร์เกิดขึ้นและขยายตัวออกไปได้เร็ว สตรีมเมอร์จะมีโอกาสขึ้นไปพบกับฟ้าผ่ามาเป็นขั้น (Stepped leader) ได้เร็วขึ้น คุณสมบัติในการทำงานของระบบล่อฟ้าก็จะมากขึ้น การขยายตัวและความยาวของสตรีมเมอร์ขึ้นอยู่กับความต้านทานดินของระบบป้องกันฟ้าผ่า ค่าความต้านทานดินยิ่งต่ำสตรีมเมอร์ก็ยิ่งเกิดขึ้นและขยายตัวได้เร็วขึ้น ผลของความต้านทานดินต่อคุณสมบัติในการทำงานของตัวนำล่อฟ้า แสดงดังรูปที่ 4 [1, 13]



รูปที่ 4 ผลของความต้านทานดินต่อคุณสมบัติในการทำงานของตัวนำล่อฟ้า

### 3. อุปกรณ์และวงจรการทดสอบ

ตัวนำล่อฟ้าที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นตัวนำล่อฟ้าที่สามารถพบเห็นได้ทั่วไป 5 รูปลักษณะ ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 รูปลักษณะของตัวนำล่อฟ้าที่ใช้ในการทดสอบ

จากรูปที่ 5 (a) คือ ตัวนำล่อฟ้าปลายแหลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร ปลายยอดมีมุม 36 องศา

(b) คือ ตัวนำล่อฟ้าปลายมน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร ปลายยอดมีรัศมี 0.75 เซนติเมตร

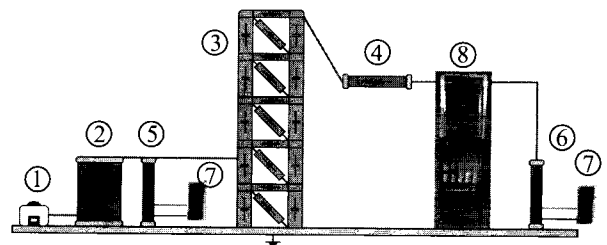
(c) คือ ตัวนำล่อฟ้าปลายกรวย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร กรวยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ฐาน 8 เซนติเมตร สูง 15 เซนติเมตร ปลายยอดมีมุม 30 องศา

(d) คือ ตัวนำล่อฟ้าทรงกลมปลายมน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร ทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.5 เซนติเมตร ปลายยอดมีรัศมี 0.4 เซนติเมตร

(e) คือ ตัวนำล่อฟ้าปลายแหลม 3 แฉก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร ปลายยอดมีมุม 11 องศา

ตัวนำล่อฟ้าทั้ง 5 แบบสร้างจากวัสดุตัวนำทองแดง โดยในการกล่าวถึงรูปลักษณะของตัวนำล่อฟ้าในเนื้อหาส่วนถัดไปจะกำหนดให้เป็นตัวนำล่อฟ้าแบบ (a), (b), (c), (d) และ (e) ตามลำดับ

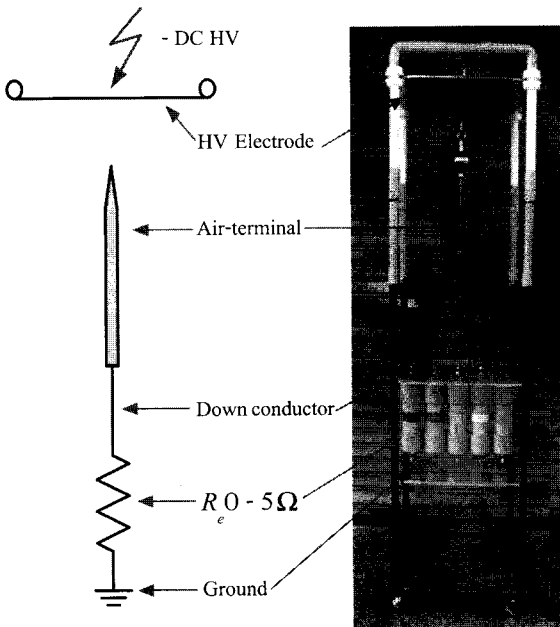
งานวิจัยนี้ทำการทดสอบ โดยใช้ไฟฟ้าแรงดันสูง กระแสตรงชั่วพลบ เนื่องจากฟ้าผ่าแบบฟ้าผ่าลงชั่วพลบเกิดขึ้นประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ของจำนวนฟ้าผ่าทั่วโลก โดยที่แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงชั่วพลบที่ใช้ในการทดสอบมีพิกัดแรงดัน 100 กิโลโวลต์ ซึ่งในภาคปฏิบัติ ฉนวนอากาศจะเบรคความถี่ระดับความเครียดสนามไฟฟ้าประมาณ 25 กิโลโวลต์ต่อเซนติเมตร [1, 6, 14 - 15] เพื่อให้สามารถสังเกตเห็นการเกิดและความยาวของสตริมเมอร์ ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่ใช้พิจารณาคุณสมบัติในการทำงานของตัวนำล่อฟ้าขณะทำการทดสอบจึงทำการทดสอบที่ระยะแกป ระหว่างอิเล็กโตรดแรงสูงและตัวนำล่อฟ้าแต่ละรูปลักษณะที่ 8 เซนติเมตร ระบบสร้างแรงดันสูง ระบบวัดแรงดันสูงและสภาวะบรรยากาศที่ใช้ในการทดสอบจะเป็นไปตามมาตรฐาน IEC std. 60060-1, IEC std. 60060-2 และ IEEE Std. 4-1995 กำหนด [16-18] วงจรที่ใช้ในการทดสอบ แสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 วงจรที่ใช้ในการทดสอบ

- โดยที่ 1 คือ แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับปรับค่าได้ควบคุมด้วยโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรล พิกัด 0-250 V, 50 Hz, 1 kVA [19]
- 2 คือ หม้อแปลงไฟฟ้าแรงดันสูง พิกัด 220 V / 20 kV, 50 Hz, 5 kVA
- 3 คือ แหล่งกำเนิดไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงแบบ斬斷 5 ชั้น พิกัด  $\pm 100$  kV, 3 mA
- 4 คือ ความต้านทานจำกัดกระแส 100 kV, 3 mA, 33.33 M $\Omega$

- 5 คือ โวลต์เดจดีไวเดอร์ แบบตัวเก็บประจุ พิกัด 20 kV, 50 Hz ratio 107:1 [20]
- 6 คือ โวลต์เดจดีไวเดอร์แบบตัวต้านทาน พิกัด 100 kV ratio 1000:1
- 7 คือ ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ Fluke 177
- 8 คือ ชุดทดสอบเปรียบเทียบคุณสมบัติในการทำงานของตัวนำล่อฟ้าจากรูปลักษณะตัวนำล่อฟ้าและความต้านทานดิน แสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ชุดทดสอบเปรียบเทียบคุณสมบัติในการทำงานของตัวนำล่อฟ้าจากรูปลักษณะตัวนำล่อฟ้าและความต้านทานดิน [21]

#### 4. การทดสอบและการวิเคราะห์ผลการทดสอบ

การทดสอบหาคุณสมบัติในการทำงานของตัวนำ ล่อฟ้าของแต่ละรูปลักษณะตัวนำล่อฟ้าที่แต่ละค่าความต้านทานดิน จะทำการทดสอบจำนวน 5 ครั้ง และหาค่าเฉลี่ยเพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติในการทำงานของตัวนำ

ล่อฟ้าจากรูปลักษณะตัวนำล่อฟ้าและค่าความต้านทานดิน ค่าเฉลี่ยผลการทดสอบหาประสิทธิภาพการล่อฟ้าของแต่ละรูปลักษณะตัวนำล่อฟ้าที่ค่าความต้านทานดินจำลองในช่วง 0-5 โอห์ม แสดงดังตารางที่ 1

จากตารางที่ 1 จะพบว่า เมื่อค่าความต้านทานดินเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เกิดโคโรนาดีสชาร์จ การสร้างสตริมเมอร์ รวมทั้งการเบรกคาวนต้องใช้ระดับแรงดันสูงขึ้น

จากหัวข้อที่ 2.3 กล่าวว่า คุณสมบัติในการทำงานของตัวนำล่อฟ้าขึ้นอยู่กับอัตราการเกิดและความยาวของสตริมเมอร์จากปลายตัวนำล่อฟ้า เมื่อพิจารณาจากตารางที่ 1 โดยกำหนดให้ระดับแรงดันที่สร้างสตริมเมอร์ที่ค่าความต้านทานดิน 0 โอห์มเป็นระดับแรงดันอ้างอิง เพื่อพิจารณาคุณสมบัติในการทำงานของตัวนำล่อฟ้าเมื่อค่าความต้านทานดินเพิ่มขึ้น 1 โอห์ม จะส่งผลให้คุณสมบัติในการทำงานของตัวนำล่อฟ้าเปลี่ยนแปลงไปอย่างไร ผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติในการทำงานของตัวนำล่อฟ้าเมื่อค่าความต้านทานดินเพิ่มขึ้น 1 โอห์ม แสดงดังตารางที่ 2

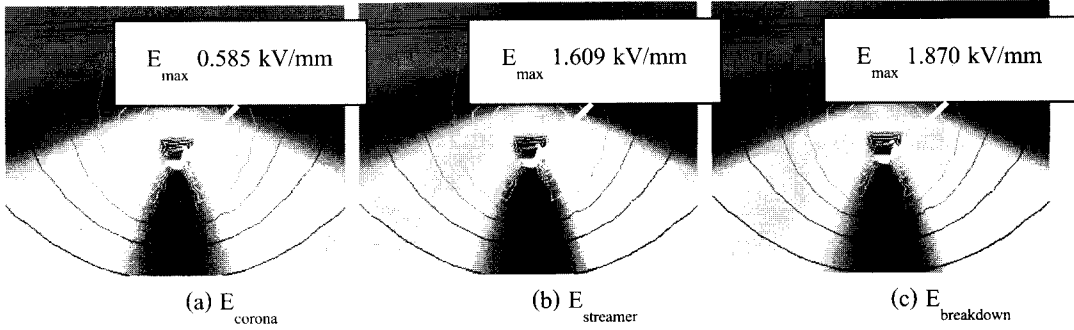
การเปรียบเทียบคุณสมบัติในการทำงานของตัวนำ ล่อฟ้าจากรูปลักษณะตัวนำล่อฟ้า จะเปรียบเทียบคุณสมบัติในการทำงานที่ค่าความต้านทานดิน 0 โอห์ม โดยเปรียบเทียบจากระดับแรงดันและค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่โคโรนาเริ่มเกิด การสร้างสตริมเมอร์และการเบรกคาวน ค่าความเครียดสนามไฟฟ้าสูงสุดได้จากการจำลองการกระจายสนามไฟฟ้าบนโปรแกรมไฟในด้อลิเมนต์สำเร็จรูป [22] โดยจำลองแบบ 2 มิติและไม่คำนึงถึงประจุค้าง ในการจำลองจะกำหนดให้อิเล็กโตรดแรงสูงมีระดับแรงดันไฟฟ้าตามตารางที่ 1 และตัวนำล่อฟ้ากำหนดให้เป็นกราวด์ ผลการจำลองการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าของตัวนำล่อฟ้าทั้ง 5 รูปลักษณะ แสดงดังรูปที่ 8-12

**ตารางที่ 1 ผลการทดสอบคุณสมบัติในการทำงานของหัวนำล่อฟ้าที่ค่าความต้านทานดินในช่วง 0-5 โอห์ม**

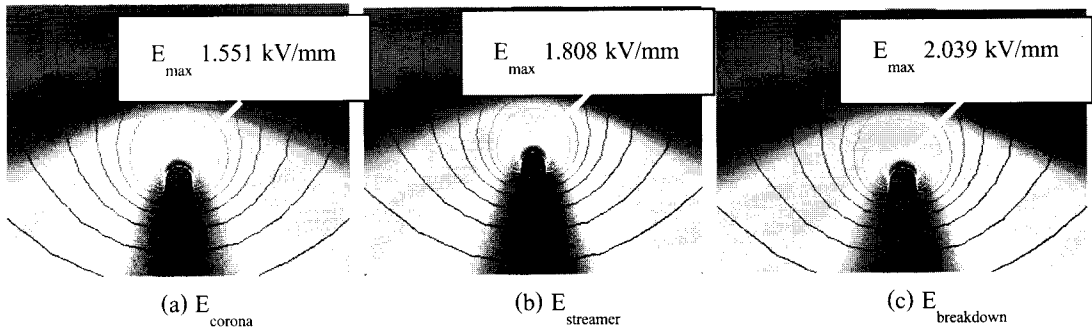
Air-terminal types	Phenomena	DC High Voltage Negative Polarity (kV)					
		R <sub>c</sub> 0 Ω	R <sub>c</sub> 1 Ω	R <sub>c</sub> 2 Ω	R <sub>c</sub> 3 Ω	R <sub>c</sub> 4 Ω	R <sub>c</sub> 5 Ω
(a)	Corona	16.44	16.68	16.92	17.34	17.61	17.89
	Streamer	45.23	45.28	45.30	45.31	45.33	45.35
	Breakdown	52.55	52.67	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 ผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติในการทำงานของหัวนำล่อฟ้าเมื่อค่าความต้านทานดินเพิ่มขึ้น 1 โอห์ม**

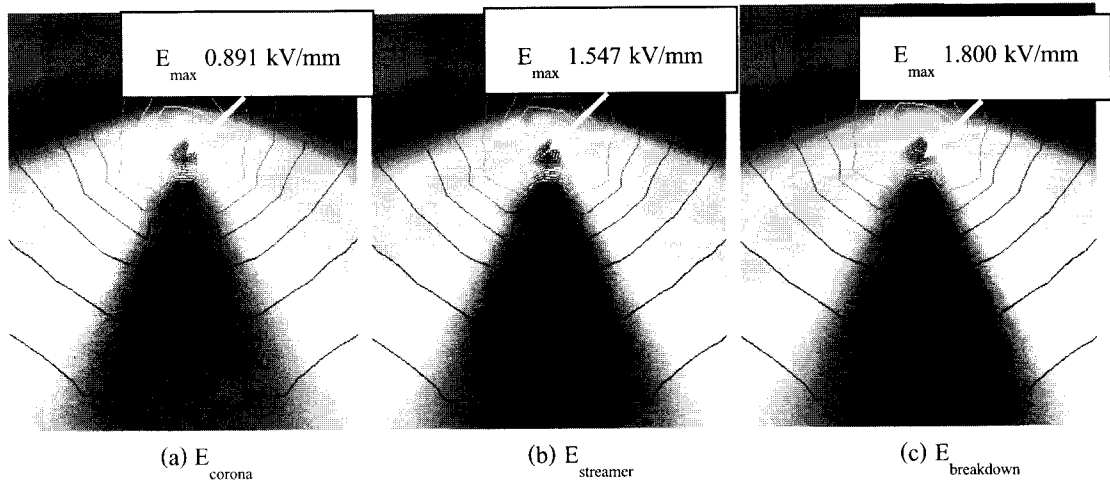
Air-terminal types	Phenomena	DC High Voltage Negative Polarity (kV)					
		R <sub>c</sub> 0 Ω	R <sub>c</sub> 1 Ω	R <sub>c</sub> 2 Ω	R <sub>c</sub> 3 Ω	R <sub>c</sub> 4 Ω	R <sub>c</sub> 5 Ω
(a)	Streamer	100.00	99.89	99.85	99.82	99.78	99.73
(b)	Streamer	100.00	99.90	99.54	99.30	99.13	98.90
(c)	Streamer	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



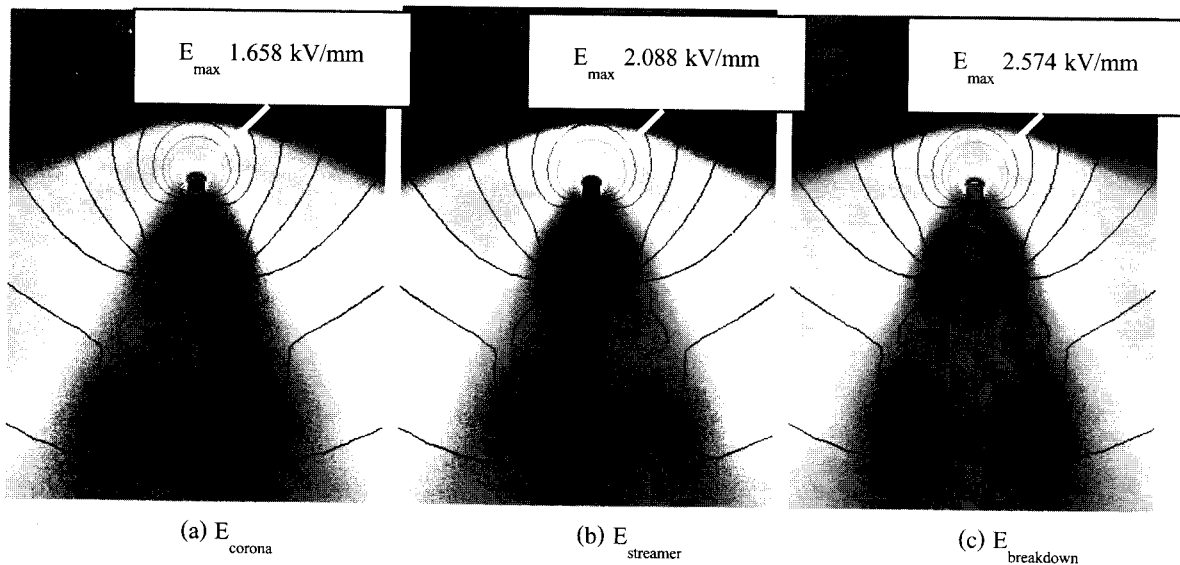
รูปที่ 8 ผลการจำลองการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าของตัวนำล่อฟ้าแบบ (a)



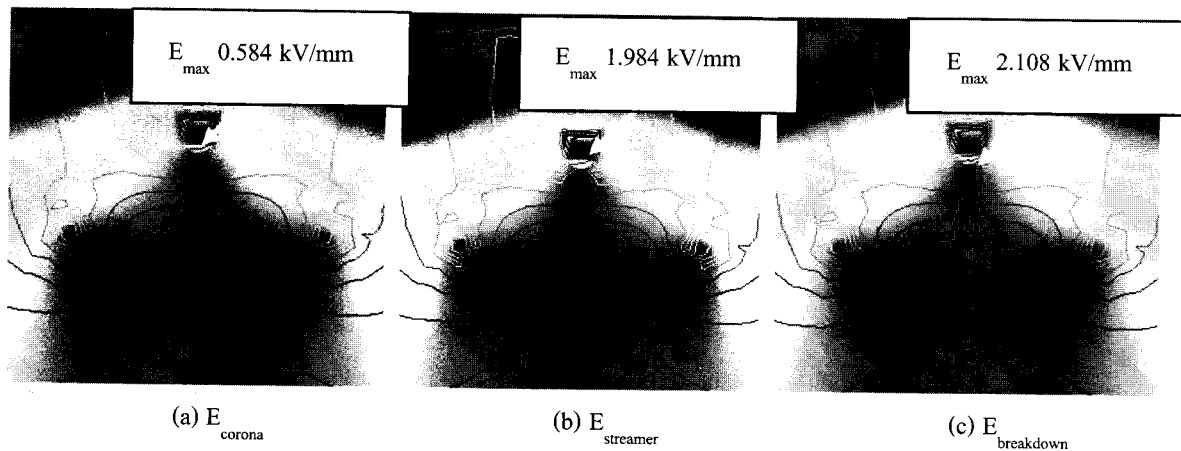
รูปที่ 9 ผลการจำลองการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าของตัวนำล่อฟ้าแบบ (b)



รูปที่ 10 ผลการจำลองการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าของตัวนำล่อฟ้าแบบ (c)



รูปที่ 11 ผลการจำลองการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าของตัวนำล่อฟ้าแบบ (d)



รูปที่ 12 ผลการจำลองการกระจายความเครียดสนามไฟฟ้าของตัวนำล่อฟ้าแบบ (e)

จากรูปที่ 8-12 สามารถแสดงระดับแรงดันและค่าความเครียดสนามไฟฟ้าที่โคโรนาเริ่มเกิดการสร้างสตรีมเมอร์และการเบรกดาวน์ของตัวนำล่อฟ้าทั้ง 5 รูปลักษณะได้ ดังตารางที่ 3



ตารางที่ 3 ผลการจำลองค่าความเครียดสนามไฟฟ้าของตัวนำล่อฟ้าทั้ง 5 รูปลักษณะ

Air-terminal types	Phenomena	Earth Resistance $R_e$ 0 $\Omega$	
		Voltage Level (kV)	Electric Field Stress (kV/mm)
(a)	Corona	16.44	0.585
	Streamer	45.23	1.609
	Breakdown	52.55	1.870
(b)	Corona	41.43	1.551
	Streamer	48.28	1.808
	Breakdown	54.47	2.039
(c)	Corona	26.11	0.891
	Streamer	45.35	1.547
	Breakdown	52.77	1.800
(d)	Corona	37.65	1.658
	Streamer	47.42	2.088
	Breakdown	58.45	2.574
(e)	Corona	16.28	0.584
	Streamer	55.27	1.984
	Breakdown	58.70	2.108

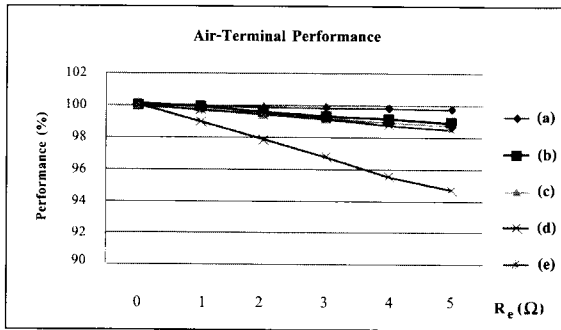
จากผลการจำลองความเครียดสนามไฟฟ้าด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์สำเร็จรูป ดังตารางที่ 3 พบว่าความเครียดสนามไฟฟ้าของตัวนำล่อฟ้าแบบ (a) มีค่าต่ำกว่าแบบ (b), (c), (d) และ (e) ในทุกปรากฏการณ์ที่ทำการทดสอบซึ่งสอดคล้องกับ ผลการทดสอบคุณสมบัติในการทำงานของตัวนำล่อฟ้าที่ค่าความต้านทานดินในช่วง 0-5 โอห์ม ด้วยไฟฟ้าแรงดันสูงกระแสตรงชั่วพล ดังตารางที่ 1

## 5. สรุป

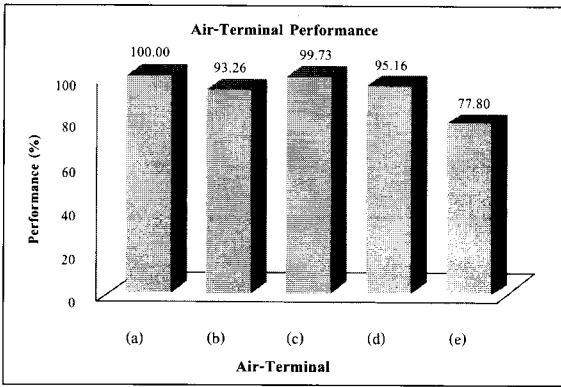
จากการทดสอบหาคุณสมบัติในการทำงานของตัวนำ ล่อฟ้าจากค่าความต้านทานดินในช่วง 0 – 5 โอห์ม

ดังตารางที่ 1 และ 2 โดยอ้างอิงคุณสมบัติในการทำงานที่ค่าความต้านทานดิน 0 โอห์ม พบว่าเมื่อค่าความต้านทานดินเพิ่มขึ้น 1 โอห์ม คุณสมบัติในการทำงานของตัวนำล่อฟ้ามีการเปลี่ยนแปลง ดังรูปที่ 13

จากการทดสอบหาคุณสมบัติในการทำงานจากรูปลักษณะตัวนำล่อฟ้า 5 รูปลักษณะ โดยอ้างอิงคุณสมบัติในการทำงานของตัวนำล่อฟ้าแบบ (a) ที่ค่าความต้านทานดิน 0 โอห์ม ดังตารางที่ 3 พบว่าคุณสมบัติในการทำงานของตัวนำ ล่อฟ้าอันเนื่องมาจากรูปลักษณะตัวนำล่อฟ้ามีคุณสมบัติในการทำงานแตกต่างกัน ดังรูปที่ 14



รูปที่ 13 ผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติในการทำงานของตัวนำ ล้อฟ้าจากค่าความต้านทานดิน



รูปที่ 14 ผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติในการทำงานของตัวนำ ล้อฟ้าจากรูปลักษณะตัวนำ ล้อฟ้า

จากการทดสอบหาคุณสมบัติในการทำงานของตัวนำ ล้อฟ้าอันเป็นผลจากรูปลักษณะตัวนำ ล้อฟ้าและค่าความต้านทานดิน โดยทดสอบเปรียบเทียบระหว่างตัวนำ ล้อฟ้า 5 รูปลักษณะ ที่ระยะแกป 8 เซนติเมตร จะพบว่าที่ระยะแกปเท่ากันเมื่อค่าความต้านทานดินเพิ่มขึ้น 1 โอห์ม ในช่วงค่าความต้านทาน 0-5 โอห์ม เมื่อเปรียบเทียบกับคุณสมบัติในการทำงานที่ค่าความต้านทานดิน 0 โอห์ม คุณสมบัติในการทำงานของตัวนำ ล้อฟ้าแบบ (a), (b), (c), (d) และ (e) มีคุณสมบัติในการทำงานต่ำลง 0.11-0.27, 0.10-1.10, 0.29-1.30, 1.08-5.36 และ 0.33-1.56 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ คุณสมบัติในการทำงานของตัวนำ ล้อฟ้าแบบ (a), (b), (c), (d) และ (e) มีคุณสมบัติในการทำงานแตกต่างกัน เมื่อเปรียบเทียบกับคุณสมบัติในการทำงานของตัวนำ

ล้อฟ้าแบบ (a) มีคุณสมบัติในการทำงานต่ำลง 6.74, 0.27, 4.84 และ 22.20 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ คุณสมบัติในการทำงานอันเป็นผลมาจากรูปลักษณะตัวนำ ล้อฟ้าและค่าความต้านทานดินพบว่า ตัวนำ ล้อฟ้าแบบ (a) มีคุณสมบัติในการทำงานสูงกว่าแบบ (b), (c), (d) และ (e) ในทุกค่าความต้านทานที่ทำการทดสอบ

### 6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย ประจำปีการศึกษา 2552 งานวิจัยลำดับที่ 05-2553 คณะผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์ และขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้

### เอกสารอ้างอิง

- [1] สำรวย สังข์สะอาด, 2549. วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง. ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [2] นรเศรษฐ พัฒนเดช, ภูจิต ถึงสุข และ ศรีณย์ ชิวทวีทรัพย์, 2552. การศึกษาและวิเคราะห์คุณลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำ ล้อฟ้าตอนที่ 1. EECON 32. หน้า 323-326.
- [3] นรเศรษฐ พัฒนเดช, ภูจิต ถึงสุข และ ศรีณย์ ชิวทวีทรัพย์, 2552. การศึกษาและวิเคราะห์คุณลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวนำ ล้อฟ้าตอนที่ 2. EECON 32. หน้า 327-330.
- [4] ศรีณย์ ชิวทวีทรัพย์, นรเศรษฐ พัฒนเดช และ ภพ จันท์เจริญสุข, 2551. คุณลักษณะทางไฟฟ้าของเสา ล้อฟ้าชนิดต่างๆ. EECON 31. หน้า 251-254.
- [5] ศรีณย์ ชิวทวีทรัพย์, นรเศรษฐ พัฒนเดช และ ภพ จันท์เจริญสุข, 2552. การศึกษาและวิเคราะห์คุณลักษณะทางไฟฟ้าของวัสดุที่ใช้ทำเสา ล้อฟ้า. KUCON 47. หน้า 199-206.
- [6] ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล, 2546. เอกสารประกอบการสอน วิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูงขั้นสูง. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

- [7] Srinivasan, K., & Gu, J., 2006. **Lightning as atmospheric electricity**. Proceedings of IEEE CCECE/CCGEL, Ottawa Canada, pp. 2258-2261.
- [8] ชนากร น้ำหอมจันทร์, 2552. เอกสารคำสอนวิชา **ทฤษฎีวงจรไฟฟ้า 1**. มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย.
- [9] **Amazing Wall Cloud – Lightning strike! – Storm coming!**. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก : <http://www.strangedangers.com/content/item/135439.htht> (19 กรกฎาคม 2553).
- [10] ชนากร น้ำหอมจันทร์ และ กาญจนา ภักดีบุญญานุกูล, 2553. **ฟ้าผ่า (Lightning)**. วารสารความปลอดภัย และสุขภาพ มสธ.ปีที่ 3 ฉบับที่ 9 ธันวาคม 2552 – กุมภาพันธ์ 2553. หน้า 60-66.
- [11] สมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์, 2546. **มาตรฐานการป้องกันฟ้าผ่าสำหรับสิ่งปลูกสร้าง**. พิมพ์ครั้งที่ 2. มาตรฐาน ว.ส.ท. 2003-43.
- [12] International Electrotechnical Commission, 1998. **Protection of structures against lightning Part 1- 2**. IEC std. 61024-1-2.
- [13] ชนากร น้ำหอมจันทร์ และ กาญจนา ภักดีบุญญานุกูล, 2553. **ฟ้าผ่า (Lightning) (2)**. วารสารความปลอดภัย และสุขภาพ มสธ.ปีที่ 3 ฉบับที่ 11 มิถุนายน-สิงหาคม 2553. หน้า 48-58.
- [14] Kuffel, E. Zaengl, W. S. and Kuffel, J., 2000. **High Voltage Engineering :Fundamentals**. 2<sup>nd</sup> ed., Great Britain: Newnes.
- [15] Naidu, M. S. and Kamaraju, V., 1996. **High Voltage Engineering**, 2<sup>nd</sup> ed., McGraw-Hill.
- [16] International Electrotechnical Commission, 1989. **High – voltage test techniques Part 1: General definitions and test requirements**. IEC std. 60060-1, Second edition, 1989 – 11.
- [17] International Electrotechnical Commission, 1994. **High – voltage test techniques Part 2: Measuring System**. IEC std. 60060-2, Second edition, 1994–11.
- [18] Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1995. **IEEE Standard Techniques for High-Voltage Testing**. IEEE Std. 4 – 1995.
- [19] ชนากร น้ำหอมจันทร์ และคณะ, 2550. **แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับปรับค่าได้ควบคุมด้วยโปรแกรม เมเบิลลอจิกคอนโทรล**. วารสาร RSU JET มหาวิทยาลัยรังสิต, ปีที่ 10 ฉบับที่ 1 กันยายน 2550, หน้า 32 – 37, 2550.
- [20] ชนากร น้ำหอมจันทร์ และคณะ, 2551. **โพรบวัดแรงดันสูงกระแสสลับแบบประหยัด พิกัด 20 กิโลโวลต์ 50 เฮิรตซ์**. วารสารวิชาการสมาคมสถาบันอุดมศึกษาเอกชนแห่งประเทศไทย, ปีที่ 14 ฉบับที่ 1 พฤษภาคม 2551, หน้า 172 – 183.
- [21] ชนากร น้ำหอมจันทร์ และคณะ, 2553. **การศึกษาผลของค่าความต้านทานดินต่อประสิทธิภาพตัวนำต่อฟ้า**. รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ ทุนวิจัยมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย ประจำปีการศึกษา 2552.
- [22] **Multiphysics Modeling and Simulation Software-COMSOL**, <http://www.comsol.com/>