

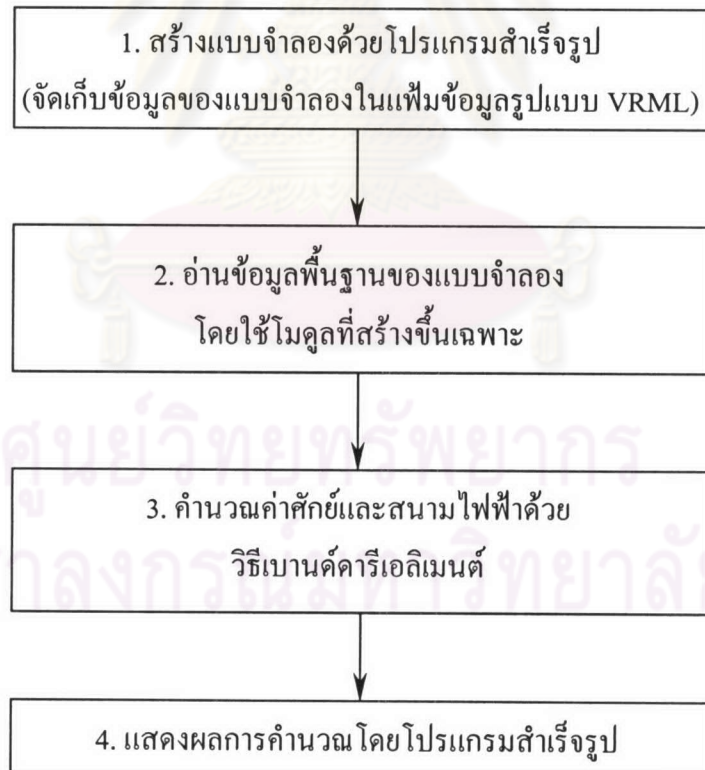
## บทที่ 6

### ตัวอย่างการประยุกต์ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับการคำนวณ สนามไฟฟ้าในปัญหาทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง

ในการวิเคราะห์ปัญหาที่มีรูปร่างซับซ้อน การคำนวณหาค่าพิกัดและการป้อนค่าพิกัดของขอบเขตย่อยจะเสียเวลามากและเกิดความผิดพลาดได้ง่าย. ถ้าเราสามารถสร้างแบบจำลองบนโปรแกรมสำเร็จรูปและนำเอาข้อมูลของขอบเขตย่อยมาใช้คำนวณได้โดยตรง ก็จะช่วยลดปัญหาของการป้อนข้อมูลลงได้มาก. บทที่ 6 นี้กล่าวถึงตัวอย่างการประยุกต์ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับการคำนวณสนามไฟฟ้าในปัญหาทางวิศวกรรมไฟฟ้าแรงสูง.

#### 6.1 ขั้นตอนการประยุกต์ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป

รูปที่ 6.1 แสดงขั้นตอนการประยุกต์ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป โดยมีรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนมีดังนี้.



รูปที่ 6.1 ขั้นตอนการประยุกต์ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป

- 1) สร้างแบบจำลองที่ต้องการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป. โปรแกรมสำเร็จรูปที่ใช้ต้องสามารถสร้างตาข่าย(Mesh) ของพื้นผิวและจัดเก็บข้อมูลในแฟ้มข้อมูลรูปแบบ VRML ได้. ตัวอย่างแบบจำลองที่แสดงในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถูกสร้างโดยโปรแกรม GiD[14]. โปรแกรม GiD นี้มีข้อดีหลายประการ เช่น
  - สามารถสร้างเอลิเมนต์พื้นผิวได้ทั้งรูปสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยม ซึ่งทำให้เราสามารถเลือกใช้การคำนวณที่มีทั้งพื้นผิวรูปสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยม เช่น เอลิเมนต์สามเหลี่ยมพื้นผิวโค้งแบบเก้าระดับชั้นความเสริกับเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมพื้นผิวโค้งแบบสิบสองระดับชั้นความเสริปนกันได้,
  - สามารถบอกถึงลำดับปมบนเอลิเมนต์โดยอาศัยการแสดงเวกเตอร์ตั้งฉากบนเอลิเมนต์ ซึ่งทำให้สะดวกในการนำไปใช้กำหนดทิศทางของสนามไฟฟ้าในการคำนวณด้วยวิธีเบานด์คาร์เอลิเมนต์ และ
  - สามารถจัดเก็บข้อมูลในแฟ้มข้อมูลรูปแบบ VRML และรูปแบบมาตรฐานอื่นๆ. อีกทั้งยังสามารถจัดเก็บข้อมูลในลักษณะโครงสร้างที่ผู้ใช้กำหนดขึ้นเองได้อีกด้วย เช่น กำหนดให้ไม่ต้องจัดเก็บข้อมูลเรื่องแสง และอื่นๆ ซึ่งทำให้ขนาดของแฟ้มข้อมูลที่น่าไปใช้งานมีขนาดเล็ก และตรงกับความต้องการของผู้ใช้. (โครงสร้างแฟ้มข้อมูล VRML แสดงในภาคผนวก ก.)
 อีกทั้งยังสามารถสร้างเอลิเมนต์กำลังสองแบบเซเรนดิพิตีเพื่อนำไปใช้คำนวณเป็นค่าเปรียบเทียบได้ด้วย.
- 2) ใช้โมดูลอ่านข้อมูลพื้นฐานของแบบจำลองจากแฟ้มข้อมูลรูปแบบ VRML เช่น ลำดับปมบนเอลิเมนต์ พิกัดของปมบนเอลิเมนต์ ชนิดของเอลิเมนต์ และอื่นๆ. ในขั้นตอนนี้เราสามารถกำหนดฟังก์ชันรูปร่างของเอลิเมนต์แบบต่างๆ เพื่อใช้ในการคำนวณลำดับชั้นตอนต่อไปได้อีกด้วย โดยฟังก์ชันรูปร่างที่กำหนดในขั้นตอนนี้อาจจะแตกต่างจากฟังก์ชันรูปร่างเดิมของเอลิเมนต์ที่ได้จากขั้นตอนที่ 1) ได้ เช่น โมดูลที่สร้างเอลิเมนต์สามเหลี่ยมผิวโค้งแบบ 9 ระดับชั้นความเสริจากเอลิเมนต์สามเหลี่ยมเชิงเส้น.
- 3) นำข้อมูลที่ได้จากขั้นตอนที่ 2) ไปคำนวณค่าศักย์และสนามไฟฟ้าด้วยวิธีเบานด์คาร์เอลิเมนต์ ซึ่งขั้นตอนนี้เป็นส่วนที่ต้องกำหนดข้อมูลเฉพาะปัญหาเอง เช่น ค่าขอบเขตค่าคงตัวไดอิเล็กตริก รวมไปถึงฟังก์ชันการประมาณค่าศักย์และสนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉาก.
- 4) แสดงผลการคำนวณที่ได้จากขั้นตอนที่ 3) ในรูปกราฟฟิคสามมิติด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป.

## 6.2 สเปซเซอร์ในตัวนำทรงกระบอกซ้อนกัน

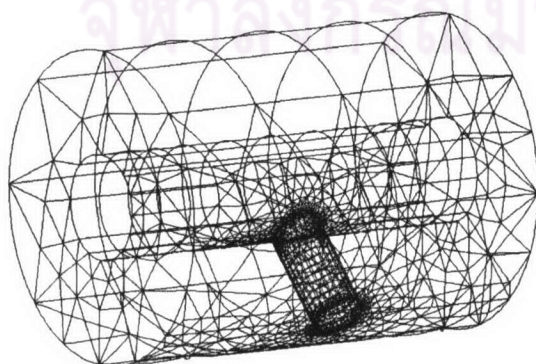
ตัวอย่างนี้เป็นการคำนวณค่าศักย์และสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนสเปซเซอร์อย่างง่ายรูปแท่งทรงกระบอกที่อยู่ในสวิตช์เกียร์ไฟฟ้าแรงสูงที่คำนวณด้วยก๊าซ[15] ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างดังรูปที่ 6.2 และมีรายละเอียดดังนี้

### เงื่อนไขการคำนวณ

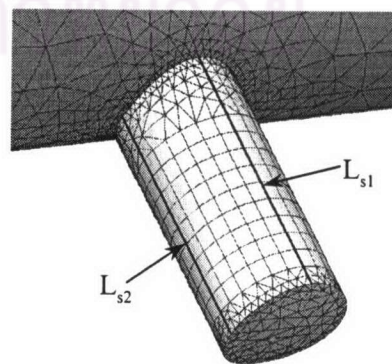
- 1) ตัวนำภายในมีลักษณะเป็นทรงกระบอกรัศมี 1 cm. และมีแรงดันไฟฟ้า 1 kV.
- 2) ตัวนำภายนอกมีลักษณะเป็นทรงกระบอกรัศมี 3 cm. และมีแรงดันไฟฟ้า 0 kV.
- 3) สเปซเซอร์รูปทรงกระบอกระหว่างตัวนำภายในและภายนอกมีรัศมี 0.5 cm. และมีค่าคงตัวไดอิเล็กตริก( $\epsilon_r$ ) เท่ากับ 4.
- 4) ฉนวนระหว่างตัวนำภายในและภายนอกเป็นก๊าซซึ่งมีค่าคงตัวไดอิเล็กตริกเท่ากับ 1.
- 5) บริเวณรอยต่อระหว่างสเปซเซอร์กับตัวนำภายในและตัวนำภายนอก ซึ่งเป็นบริเวณที่มีลักษณะของรอยต่อสามตัวกลาง(Triple-Junction)มีค่าสนามไฟฟ้าตั้งฉากบนทุกเอลิเมนต์เท่ากับศูนย์.[16]
- 6) เอลิเมนต์ที่ต่อระหว่างตัวนำภายในและนอก(เอลิเมนต์ที่ปลายด้านซ้ายสุดและขวาสุด) มีเงื่อนไขขอบเขตแบบนอยมันน์(Neumann Condition).

### ลักษณะการแบ่งเอลิเมนต์บนสเปซเซอร์

- 1) ขอบด้านบนของสเปซเซอร์ที่ติดกับตัวนำภายในประกอบด้วยเอลิเมนต์สามเหลี่ยมโดยรอบทั้งหมด 56 เอลิเมนต์.
- 2) ขอบด้านล่างของสเปซเซอร์ที่ติดกับตัวนำภายนอกประกอบด้วยเอลิเมนต์สามเหลี่ยมโดยรอบทั้งหมด 48 เอลิเมนต์.
- 3) ตามแนวยาวของสเปซเซอร์ประกอบด้วยเอลิเมนต์ทั้งหมด 17 เอลิเมนต์.
- 4) บริเวณกลางของสเปซเซอร์แบ่งเป็นเอลิเมนต์สี่เหลี่ยม.



ก. ลักษณะตาข่ายของแบบจำลอง



ข. ลักษณะภายในแบบจำลอง

รูปที่ 6.2 สเปซเซอร์รูปแท่งทรงกระบอกในตัวนำทรงกระบอกซ้อนกัน

การคำนวณค่าศักย์และสนามไฟฟ้าบนสเปซเซอร์โดยการประยุกต์ใช้ฟังก์ชันรูปร่างแบบต่างๆ แบ่งเป็นทั้งหมด 3 กรณี คือ

- 1) การใช้เอลิเมนต์และฟังก์ชันการประมาณแบบเชิงเส้น(S1M-I1),
- 2) การใช้เอลิเมนต์ผิวโค้งแบบกึ่งระดับชั้นความถี่และสิบสองระดับชั้นความถี่และฟังก์ชันการประมาณแบบกำลังสอง[S12M(w)-I2] และ
- 3) การใช้เอลิเมนต์และฟังก์ชันการประมาณแบบกำลังสอง(S2M-I2).

รูปที่ 6.3 แสดงผลการคำนวณในรูปการกระจายของศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉากบนสเปซเซอร์โดยใช้เอลิเมนต์และฟังก์ชันการประมาณแบบกำลังสอง(S2M-I2). ในที่นี้จะเปรียบเทียบผลการคำนวณในกรณี S1M-I1 และ S12M(w)-I2 กับค่าในกรณี S2M-I2. ทั้งนี้เนื่องจากผลการคำนวณในบทที่ 5 แสดงให้เห็นว่าค่าความผิดพลาดในกรณีที่ใช้เอลิเมนต์และฟังก์ชันการประมาณแบบกำลังสองมีค่าต่ำที่สุดและต่ำกว่าความผิดพลาดในกรณีอื่นๆ มาก. สมการที่ใช้ในการเปรียบเทียบค่าศักย์ไฟฟ้า, สนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉาก, สนามไฟฟ้าในแนวสัมผัส และสนามไฟฟ้าโดยรวมคือ

$$\text{ความแตกต่าง (\%)} = \sum_{k=1}^{m_p} \int_{\Gamma_k} \frac{|v - v_{S2}|}{|v_{S2}|} d\Gamma \times 100 \quad (6.1)$$

โดยที่  $v$  คือค่าที่คำนวณได้จากกรณี S1M-I1 หรือ S12M(w)-I2,

$v_{S2}$  คือค่าที่คำนวณได้จากกรณี S2M-I2,

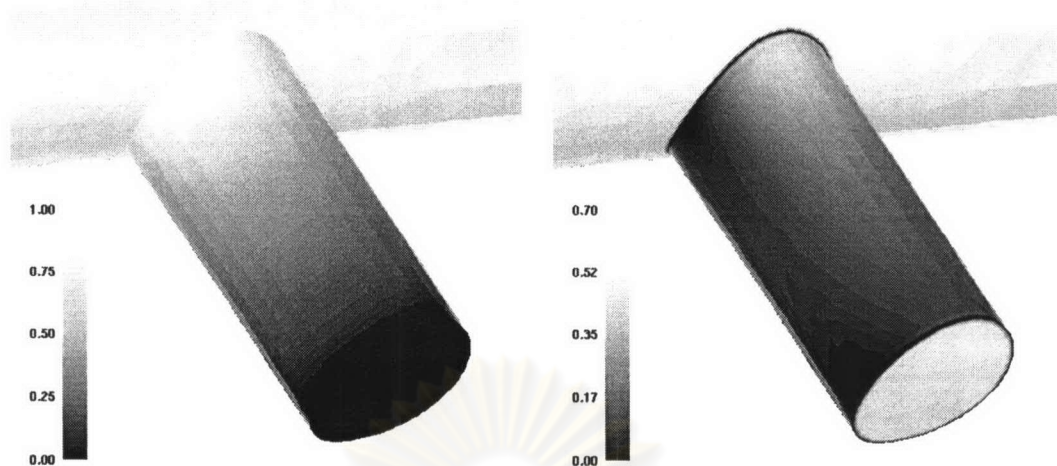
$m_p$  คือจำนวนเอลิเมนต์ที่อยู่บนสเปซเซอร์ และ

$\Gamma_k$  คือเอลิเมนต์ลำดับที่  $k$  ที่อยู่บนสเปซเซอร์.

ตารางที่ 6.1 แสดงผลการคำนวณค่าความแตกต่างตามสมการที่ 6.1 สำหรับกรณี S1M-I1 และ S12M(w)-I2 เทียบกับ S2M-I2.

ตารางที่ 6.1 ความแตกต่างของศักย์และสนามไฟฟ้าบนสเปซเซอร์

กรณี	ค่าความแตกต่าง (%)			
	ศักย์ไฟฟ้า	สนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉาก	สนามไฟฟ้าในแนวสัมผัส	สนามไฟฟ้ารวม
S1M-I1	1.29	17.18	7.06	6.38
S12M(w)-I2	0.31	12.48	0.80	0.84



ก. ศักย์ไฟฟ้า

ข. สนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉาก

รูปที่ 6.3 การกระจายศักย์ไฟฟ้าและสนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉากบนสเปซเซอร์

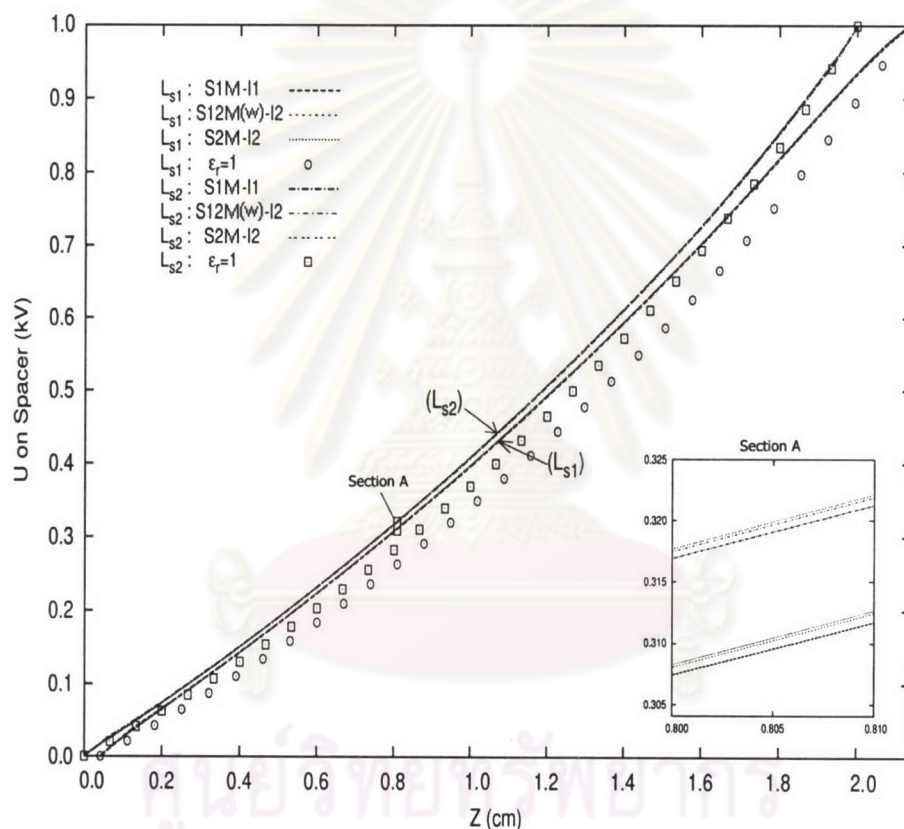
จากตารางที่ 6.1 เห็นได้ว่า เมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณของกรณี S2M-I2 ค่าความแตกต่างของศักย์, สนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉาก, สนามไฟฟ้าในแนวสัมผัส และสนามไฟฟ้าโดยรวมที่คำนวณได้จากกรณี S12M(w)-I2 มีค่าต่ำกว่ากรณี S1M-I1 ถึง 0.98%, 4.70%, 6.26% และ 5.54% ตามลำดับ

รูปที่ 6.4 ถึง 6.7 แสดงผลการคำนวณค่าศักย์และสนามไฟฟ้าตามแนว  $L_{s1}$  และ  $L_{s2}$  (แสดงในรูปที่ 6.2 ข.) เมื่อใช้เอลิเมนต์และฟังก์ชันการประมาณตามกรณีขั้นต้น. (แนว  $L_{s1}$  และ  $L_{s2}$  เป็นเส้นแบ่งความสมมาตรและมีค่าศักย์และสนามไฟฟ้าที่เด่นชัดที่สุด.) แกนนอนในรูปคือพิกัดในแนวแกน Z บนสเปซเซอร์ โดยพิกัดของเส้น  $L_{s1}$  อยู่ในช่วง  $(0.5, 0, 0.042)$  ถึง  $(0.5, 0, 2.134)$  และเส้น  $L_{s2}$  อยู่ในช่วง  $(0, -0.5, 0)$  ถึง  $(0, -0.5, 2.0)$  และให้ขอบล่างสุดของสเปซเซอร์ที่ติดกับตัวนำภายนอกมีค่า  $Z = 0$  cm. สัญลักษณ์ย่อ  $\epsilon_r = 1$  ในรูปหมายถึง การคำนวณค่าศักย์และสนามไฟฟ้าในกรณีที่ไม่มีสเปซเซอร์ หรือสเปซเซอร์มีค่า  $\epsilon_r = 1$  เพื่อใช้เป็นค่าเปรียบเทียบผลของ  $\epsilon_r$  เมื่อมีสเปซเซอร์ต่ออยู่.

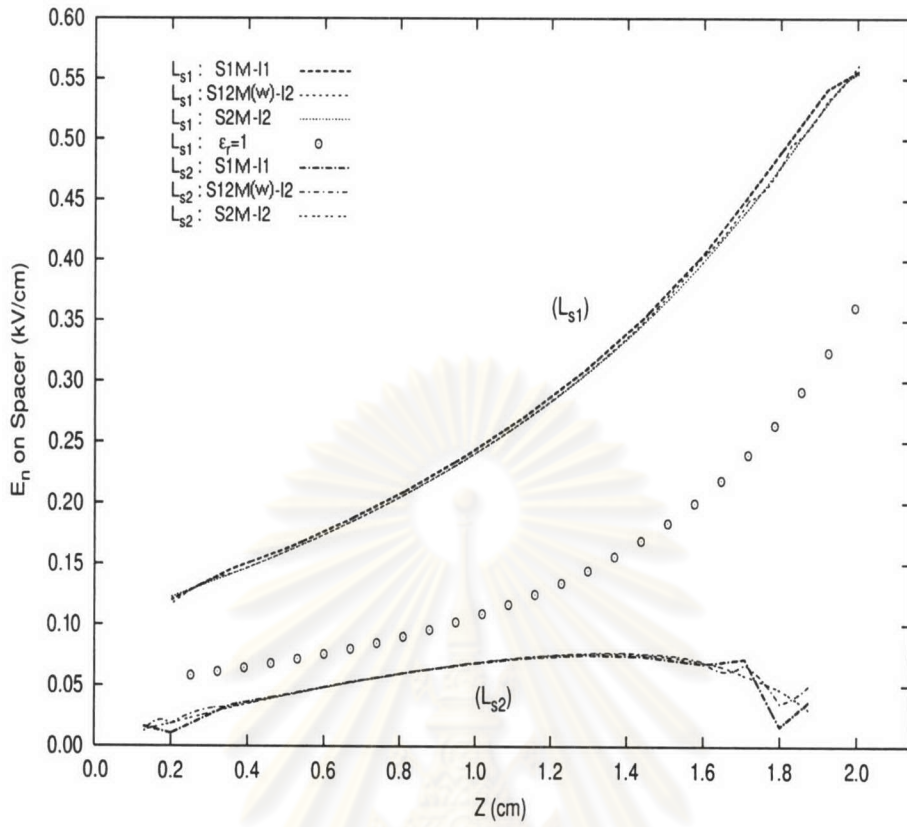
รูปที่ 6.4 แสดงค่าศักย์ไฟฟ้า ( $U$ ) บนสเปซเซอร์ตามแนว  $L_{s1}$  และ  $L_{s2}$ . จากรูปจะเห็นว่า ค่าศักย์ที่ได้จากทั้ง 3 กรณีมีค่าใกล้เคียงกันมาก โดยเมื่อเทียบกับผลที่ได้ดังตารางที่ 6.1 คือแตกต่างกันไม่เกิน 1.29 % และมีค่าสูงขึ้นตลอดแนว เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีสเปซเซอร์ต่ออยู่.

รูปที่ 6.5 แสดงค่าสนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉาก ( $E_n$ ) บนสเปซเซอร์ตามแนว  $L_{s1}$  และ  $L_{s2}$ . จากรูปจะเห็นว่า ค่าสนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉากในกรณี S12M(w)-I2 จะมีการแกว่งในช่วงเอลิเมนต์ด้านบนและล่างของสเปซเซอร์น้อยกว่ากรณี S1M-I1 ซึ่งเป็นผลเนื่องจากการจำลองพื้นผิวที่มีความถูกต้องสูงกว่า. เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีสเปซเซอร์ต่ออยู่ ปรากฏว่า ค่าสนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉากของทั้ง 3 กรณีสูงเพิ่มขึ้น.

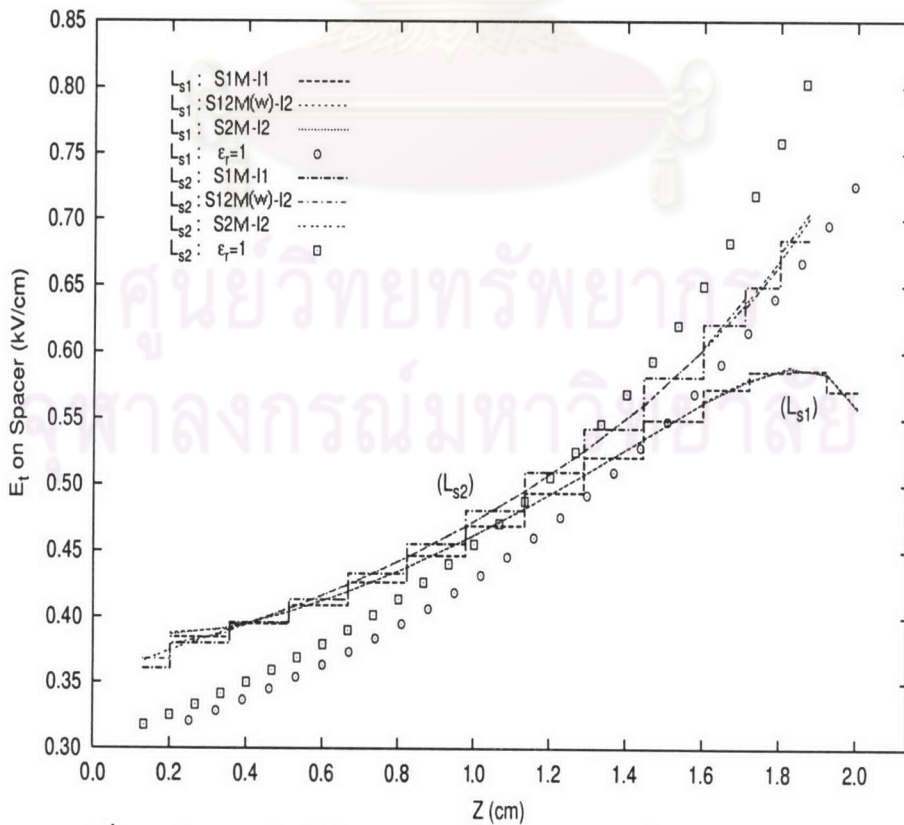
รูปที่ 6.6 แสดงค่าสนามไฟฟ้าในแนวสัมผัส( $E$ )บนสเปซเซอร์ตามแนว  $L_{s1}$  และ  $L_{s2}$ . จากรูปจะเห็นได้ว่า ค่าสนามไฟฟ้าในแนวสัมผัสในกรณี S12M(w)-I2 แตกต่างกับกรณี S1M-I1 มาก. ผลการคำนวณที่ได้จากเอลิเมนต์เชิงเส้น(S1M-I1)มีลักษณะเป็นขั้นบันได ซึ่งแตกต่างกับการใช้เอลิเมนต์พื้นผิวโค้ง 9 และ 12 ระดับชั้นความถี่ที่มีผลการคำนวณเป็นเส้นโค้ง. ลักษณะกราฟรูปขั้นบันไดนี้ จะมีค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดผิดพลาดไปจากความเป็นจริง ซึ่งเมื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ปรากฏการณ์เกิดการเสียดทานฉนวนหรือการปล่อยประจุบางส่วนจะทำให้เกิดความผิดพลาดขึ้น.



รูปที่ 6.4 ค่าศักย์ไฟฟ้าบนสเปซเซอร์ตามแนว  $L_{s1}$  และ  $L_{s2}$

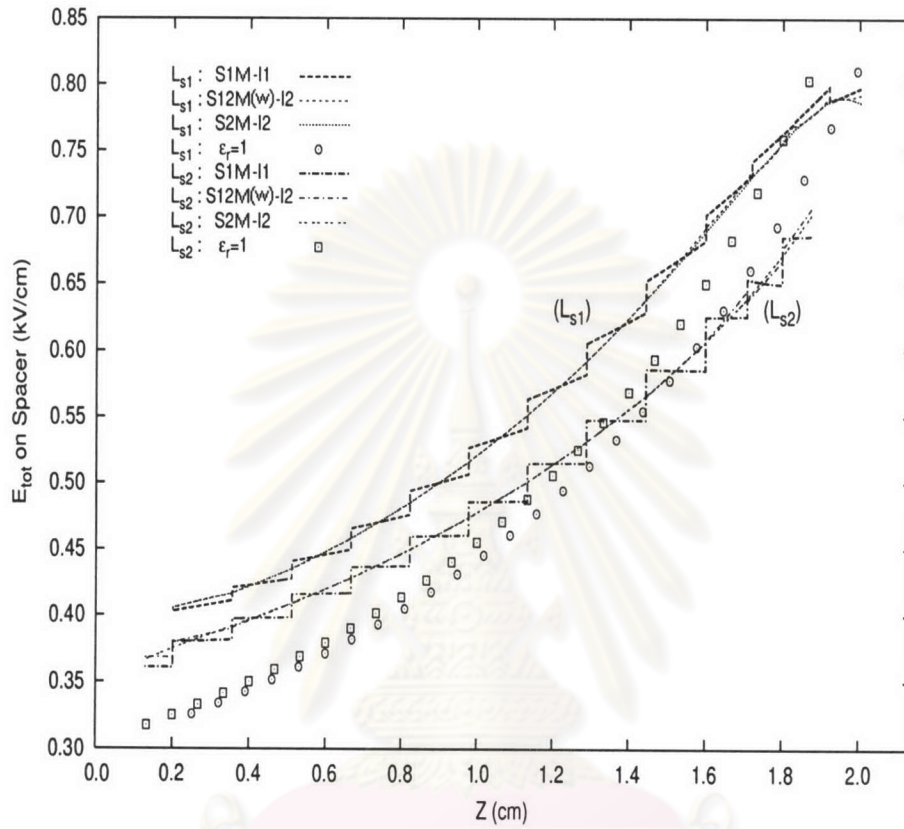


รูปที่ 6.5 ค่าสนามไฟฟ้าในแนวตั้งฉากบนสเปซเซอร์ตามแนว  $L_{s1}$  และ  $L_{s2}$



รูปที่ 6.6 ค่าสนามไฟฟ้าในแนวสัมผัสบนสเปซเซอร์ตามแนว  $L_{s1}$  และ  $L_{s2}$

รูปที่ 6.7 แสดงค่าสนามไฟฟ้ารวม( $E_{tot}$ ) บนสเปซเซอร์ตามแนว  $L_{s1}$  และ  $L_{s2}$ . จากรูปจะเห็นได้ว่า ค่าสนามไฟฟ้ารวมในกรณี S12M(w)-I2 มีความผิดพลาดน้อยกว่ากรณี S1M-I1 และมีผลที่ใกล้เคียงกับกรณี S2M-I2.



รูปที่ 6.7 ค่าสนามไฟฟ้ารวมบนสเปซเซอร์ตามแนว  $L_{s1}$  และ  $L_{s2}$

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย