

อิทธิพลของคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่ไม่อยู่ในระนาบที่มีผลต่อค่าตัว
ประกอบความเข้มในตัวกลางโพสิซีอิลิกทริก

นายเมธัส แสงสว่าง

นายชัยณรงค์ เบญจพรทวี

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยบูรพา

ปีการศึกษา 2560

INFLUENCE OF PERMITTIVITY OF MEDIUM INSIDE NON-PLANAR CRACKS ON
INTENSITY FACTORS IN PIEZOELECTRIC MEDIA

MR.MATHAS SANGSAWANG

MR.CHAINARONG BENJAPORNTHAVEE

AN ENGINEERING PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

BURAPHA UNIVERSITY 2017

หัวข้อโครงการ อิทธิพลของคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่ไม่อยู่ในระนาบที่มีผลต่อ
ค่าตัวประกอบความเข้มในตัวกลางโพธิ์โซอิเล็กทริก

โดย นายเมธีธ แสงสว่าง
 นายชัยณรงค์ เบญจพรทวี

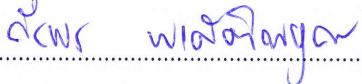
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.วีรพร พงศ์ตินบุตร

ปีการศึกษา 2560

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา อนุมัติโครงการทางวิศวกรรมนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

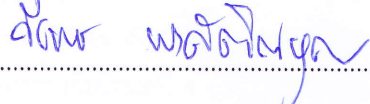

.....หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมโยธา

(ดร.ชาญยุทธ กาฬกาญจน์)

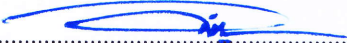

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร.วีรพร พงศ์ตินบุตร)

คณะกรรมการสอบโครงการ


.....ประธานกรรมการ

(ดร.วีรพร พงศ์ตินบุตร)


.....กรรมการ

(ดร.จรัญ ศรีชัย)


.....กรรมการ

(ดร.อมรชัย ไยงค์)

หัวข้อโครงการ	อิทธิพลของคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่ไม่อยู่ในระนาบที่มีผลต่อค่าตัวประกอบความเข้มในตัวกลางโพสิซีโออิเล็กทริก
	INFLUENCE OF PERMITTIVITY OF MEDIUM INSIDE NON-PLANAR CRACKS ON INTENSITY FACTORS IN PIEZOELECTRIC MEDIA
นักศึกษา	นายเมธัส แสงสว่าง นายชัยณรงค์ เบญจพรทวี
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.วีรพร พงศ์ติณบุตร
ระดับการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา

บทคัดย่อ

โครงการนี้ศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลของคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีผลต่อค่าตัวประกอบความเข้มของรอยร้าวที่ไม่อยู่ในระนาบ ได้แก่ รอยร้าวผิวทรงกลมและรอยร้าวผิวทรงกระบอกในตัวกลางโพสิซีโออิเล็กทริก ภายใต้ทฤษฎีเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้และเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน ถึงแม้ว่า โครงการฉบับนี้ ต้องการศึกษากฎการของรอยร้าวที่ไม่อยู่ในระนาบ แต่ก็ได้ศึกษากฎการของรอยร้าวที่อยู่ในระนาบ (รอยร้าววงกลม) ด้วยเช่นกัน ผลการศึกษาค่าตัวประกอบความเข้มโหมดที่ 1 (K_I) ของเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ ของรอยร้าวผิวทรงกระบอกที่จุดล่างสุด จุดกึ่งกลาง และจุดสูงสุด พบว่ามีความคล้ายกับรอยร้าวผิวทรงกลม กล่าวคือ K_I อยู่ระหว่างเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ และแบบซึมผ่านได้ สำหรับทุกค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้า ส่วนผลการศึกษาค่าตัวประกอบความเข้มโหมดที่ 1 (K_I) ของเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน ของรอยร้าวผิวทรงกระบอกที่จุดล่างสุด และจุดกึ่งกลาง พบว่ามีความคล้ายกับรอยร้าวผิวทรงกลม กล่าวคือ K_I จะไม่อยู่ระหว่างเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ และแบบซึมผ่านได้ เมื่อค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าน้อยๆ แต่เมื่อค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น K_I จะอยู่ระหว่างค่าตอบของเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าทั้งสองดังกล่าวข้างต้น และกรณีของรอยร้าวผิวทรงกระบอกที่จุดสูงสุด พบว่ามีความคล้ายกับรอยร้าววงกลม กล่าวคือ เมื่อคุณสมบัติการนำไฟฟ้าไม่เท่ากับศูนย์ K_I จะไม่อยู่ระหว่างเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ กับแบบซึมผ่านได้ และผลการศึกษาค่าตัวประกอบความเข้มโหมดที่ 4 (K_{IV}) ของเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ ของรอยร้าวผิวทรงกระบอกที่จุดล่างสุด จุดกึ่งกลาง และจุดสูงสุด พบว่ามีความคล้ายกับรอยร้าวผิวทรงกลม กล่าวคือ K_{IV} อยู่ระหว่างเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ และแบบซึมผ่านได้ สำหรับทุกค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้า ส่วนผลการศึกษาค่าตัวประกอบความเข้มโหมดที่ 4 (K_{IV}) ของเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงานของรอยร้าวผิวทรงกระบอกที่จุดล่างสุด จุดกึ่งกลาง และจุดสูงสุด พบว่ามีความคล้ายกับรอยร้าวผิวทรงกลม กล่าวคือ K_{IV} จะไม่อยู่ระหว่างเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ และแบบซึมผ่านได้ เมื่อค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าน้อยๆ แต่เมื่อค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น K_{IV} จะอยู่ระหว่างค่าตอบของเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าทั้งสองดังกล่าวข้างต้น

Abstract

This project investigates the influence of permittivity of medium inside non-planar cracks on intensity factors in piezoelectric media. Two types of non-planar cracks (viz. a spherical cap crack and a cylindrical crack) under two different types of crack-face conditions (viz. semi-permeable and energetically consistent conditions) are examined. Although this project aims to examine the intensity factors of non-planar cracks, fracture behavior of planar crack (i.e., penny-shaped crack) are also presented.

Numerical studies show that the intensity factors K_I and K_{IV} for semi-permeable conditions at three different points (viz. top, middle and bottom points of the cylindrical crack) are similar to the case of the spherical cap crack. More specifically, the intensity factors, K_I and K_{IV} , for semi-permeable condition fall between the permeable and impermeable solutions for all range of the permittivity of medium inside the crack gap. Moreover, it is also found that the intensity factors K_I for energetically consistent conditions at two different points (viz., bottom and middle points of the cylindrical crack) and the intensity factors K_{IV} at three different points (viz., top, middle and bottom points of the cylindrical crack) are similar to those of the spherical cap crack. More specifically, K_I and K_{IV} for energetically consistent condition fall between the permeable and impermeable solutions for the entire range of the permittivity of medium, except when the permittivity of medium is relatively small in which K_I and K_{IV} of energetically consistent condition do not fall between the permeable and impermeable solutions. In addition, it is observed that, similar to K_I for the penny-shaped crack, K_I for energetically consistent condition at the top point of the cylindrical does not fall between the permeable and impermeable solutions when the permittivity of medium inside the crack gap is not equal to zero.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการเพื่อศึกษาอิทธิพลคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางในรอยร้าวที่มีต่อค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น ในรอยร้าววงกลม ผิวทรงกลม และผิวทรงกระบอก ภายใต้เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบต่างๆ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีต้องขอขอบพระคุณ ดร.วีรพร พงศ์ตินบุตร อาจารย์ที่ปรึกษาที่ให้คำแนะนำแนวความคิด และการแก้ไขปัญหาต่างๆ ตลอดระยะเวลาที่ทำโครงการ

สุดท้ายนี้ คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณท่านอาจารย์และเจ้าหน้าที่ รวมทั้งผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่าน ในคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือด้านสถานที่ ในการทำงานแก่ทางคณะผู้จัดทำโครงการทางวิศวกรรมด้วยดีเสมอมา ขอขอบพระคุณ บิดามารดา ประโยชน์อันใดที่เกิดจากโครงการนี้ ล้วนเป็นผลมาจากความกรุณาของท่าน คณะผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ข
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ค
กิตติกรรมประกาศ	ง
สารบัญ	จ
สารบัญรูปภาพ	ฉ
สารบัญตาราง	ฎ
รายการสัญลักษณ์ที่ใช้	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 ทบทวนวรรณกรรม	1
1.3 วัตถุประสงค์	2
1.4 ขอบเขตการศึกษา	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 สมการพื้นฐาน	3
2.2 เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าที่เกี่ยวข้อง	4
2.2.1 เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านได้	4
2.2.2 เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้	4
2.2.3 เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้	5
2.2.4 เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน	5
2.3 องค์ประกอบความเค้นทั่วไปบริเวณปลายรอยร้าวของวัสดุโพสิซีโออิเล็กทรอนิกส์	6
บทที่ 3 ผลการศึกษา	
3.1 รอยร้าววงกลมในตัวยางรีไซเคิล	9
3.2 รอยร้าวผิวทรงกลมในตัวยางรีไซเคิล	12
3.3 รอยร้าวผิวทรงกระบอกในตัวยางรีไซเคิล	16
บทที่ 4 สรุปผลการศึกษา	
บรรณานุกรม	38
ภาคผนวก ก	39
ประวัติผู้จัดทำโครงการ	115

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1	3
รูปที่ 2.2	6
รูปที่ 2.3	7
รูปที่ 3.1	9
รูปที่ 3.2	10
รูปที่ 3.3	11
รูปที่ 3.4	12
รูปที่ 3.5	13
รูปที่ 3.6	14
รูปที่ 3.7	15

รูปที่ 3.8	(ก) รอยร้าวผิวทรงกระบอกในตัวกลางโพธิโซอิเล็กทริกไร้ขอบเขตที่มีความเค้นและ สนามไฟฟ้าระยะไกลมากกระทำ (ข) แบบจำลองของรอยร้าวผิวทรงกระบอก (mesh) ที่ใช้ในการคำนวณด้วยวิธีของ Rungamornrat และ คณะ (2015)	16
รูปที่ 3.9	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น โหมดที่ 1 (K_I) กับค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่า ตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท่าของอากาศ สำหรับรอยร้าวผิวทรงกระบอกในตัวกลางโพธิโซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต	17
รูปที่ 3.10	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น โหมดที่ 1 (K_I) กับค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่า ตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท่าของอากาศ สำหรับจุดล่างสุดของรอยร้าวผิวทรงกระบอกใน ตัวกลางโพธิโซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต	18
รูปที่ 3.11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น โหมดที่ 1 (K_I) กับค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่า ตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท่าของอากาศ สำหรับจุดกึ่งกลางของรอยร้าวผิวทรงกระบอกใน ตัวกลางโพธิโซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต	19
รูปที่ 3.12	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น โหมดที่ 1 (K_I) กับค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่า ตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท่าของอากาศ สำหรับจุดสูงสุดของรอยร้าวผิวทรงกระบอกใน ตัวกลางโพธิโซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต	20
รูปที่ 3.13	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น โหมดที่ 2 (K_{II}) กับค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่า ตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท่าของอากาศ สำหรับรอยร้าวผิวทรงกระบอกในตัวกลางโพธิโซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต	21
รูปที่ 3.14	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น โหมดที่ 2 (K_{II}) กับค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่า ตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท่าของอากาศ สำหรับจุดล่างสุดของรอยร้าวผิวทรงกระบอกใน ตัวกลางโพธิโซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต	22
รูปที่ 3.15	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น โหมดที่ 2 (K_{II}) กับค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่า ตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท่าของอากาศ สำหรับจุดกึ่งกลางของรอยร้าวผิวทรงกระบอกใน ตัวกลางโพธิโซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต	23

รูปที่ 3.16	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น โมเมนต์ที่ 2 (K_{II}) กับค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่า ตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท่าของอากาศ สำหรับจุดสูงสุดของรอยร้าวผิวทรงกระบอกใน ตัวกลางไฟอ์โซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต	24
รูปที่ 3.17	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น โมเมนต์ที่ 3 (K_{III}) กับค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่า ตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท่าของอากาศ สำหรับจุดกึ่งกลางของรอยร้าวผิวทรงกระบอกใน ตัวกลางไฟอ์โซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต	25
รูปที่ 3.18	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น โมเมนต์ที่ 4 (K_{IV}) กับค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่า ตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท่าของอากาศ สำหรับรอยร้าวผิวทรงกระบอกในตัวกลางไฟอ์โซ อิเล็กทริกไร้ขอบเขต	26
รูปที่ 3.19	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น โมเมนต์ที่ 4 (K_{IV}) กับค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่า ตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท่าของอากาศ สำหรับจุดล่างสุดของรอยร้าวผิวทรงกระบอกใน ตัวกลางไฟอ์โซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต	27
รูปที่ 3.20	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น โมเมนต์ที่ 4 (K_{IV}) กับค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่า ตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท่าของอากาศ สำหรับจุดกึ่งกลางของรอยร้าวผิวทรงกระบอกใน ตัวกลางไฟอ์โซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต	28
รูปที่ 3.21	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น โมเมนต์ที่ 4 (K_{IV}) กับค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่า ตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท่าของอากาศ สำหรับจุดสูงสุดของรอยร้าวผิวทรงกระบอกใน ตัวกลางไฟอ์โซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต	29

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของวัสดุไพโซอิเล็กทริกชนิด PZT-4	8
ตารางที่ 4.1 ค่าตัวประกอบความเข้มที่มีค่าไม่เท่ากับศูนย์	30
ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบพฤติกรรม K_I ของรอยร้าวผิวทรงกระบอก รอยร้าววงกลม และรอยร้าวผิวทรงกลม ภายใต้เงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้	32
ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบพฤติกรรม K_I ของรอยร้าวผิวทรงกระบอก รอยร้าววงกลม และรอยร้าวผิวทรงกลม ภายใต้เงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน	33
ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบพฤติกรรม K_{II} ของรอยร้าวผิวทรงกระบอก รอยร้าววงกลม และรอยร้าวผิวทรงกลม ภายใต้เงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้	34
ตารางที่ 4.5 การเปรียบเทียบพฤติกรรม K_{II} ของรอยร้าวผิวทรงกระบอก รอยร้าววงกลม และรอยร้าวผิวทรงกลม ภายใต้เงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน	35
ตารางที่ 4.6 การเปรียบเทียบพฤติกรรม K_{IV} ของรอยร้าวผิวทรงกระบอก รอยร้าววงกลม และรอยร้าวผิวทรงกลม ภายใต้เงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้	37
ตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบพฤติกรรม K_{IV} ของรอยร้าวผิวทรงกระบอก รอยร้าววงกลม และรอยร้าวผิวทรงกลม ภายใต้เงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน	37

รายการสัญลักษณ์ที่ใช้

E_0^∞	คือ	สนามไฟฟ้าระยะไกล
σ_0^∞	คือ	ความเค้นระยะไกล
σ_{ij}	คือ	เทนเซอร์ความเค้น (stress tensor)
ε_{ij}	คือ	เทนเซอร์ความเครียด (strain tensor)
u_i	คือ	เวกเตอร์การขจัด (displacement vector)
D_i	คือ	เวกเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้า (electric induction vector) หรือ เวกเตอร์การกระจัดไฟฟ้า (electric displacement vector) หรือ เวกเตอร์ความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้า (electric flux density)
E_i	คือ	สนามไฟฟ้า (electric field)
ϕ	คือ	ศักย์ไฟฟ้า (electric potential)
E_{ijkn}	คือ	ค่าคงที่อีลาสติก (elastic constants)
e_{mij}	คือ	ค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริก (piezoelectric constants)
κ_{im}	คือ	คุณสมบัติการนำทางไฟฟ้า (dielectric permittivities)
ε_a	คือ	คุณสมบัติการนำไฟฟ้าของอากาศ
ϕ^+	คือ	ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวบนของรอยร้าว
ϕ^-	คือ	ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวล่างของรอยร้าว
U_n^+	คือ	การกระจัดตั้งฉาก (normal displacement) ของผิวบนรอยร้าว (upper crack face)
U_n^-	คือ	การกระจัดตั้งฉากของผิวล่างรอยร้าว (lower crack face)
$U_n^+ - U_n^-$	คือ	ระยะเปิดออกของรอยร้าว (crack opening displacement)
σ_{nn}^+	คือ	องค์ประกอบ (component) ของความเค้น (stress) ที่ตั้งฉากกับผิวบนของรอยร้าว
σ_{nn}^-	คือ	องค์ประกอบของความเค้นที่ตั้งฉากกับผิวล่างของรอยร้าว
κ_a	คือ	คุณสมบัติการนำไฟฟ้าของอากาศ

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

วัสดุไพโซอิเล็กทริก (piezoelectric material) เป็นวัสดุจำพวกเซรามิกที่มีคุณสมบัติพิเศษ คือเมื่อวัสดุชนิดนี้ได้รับพลังงานกลจะสามารถเปลี่ยนพลังงานกลให้เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ ปรากฏการณ์นี้ถูกค้นพบโดย ปีแอร์ กูรี (Pierre Curie) ในปี ค.ศ.1880 เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ปรากฏการณ์ไพโซอิเล็กทริก (Piezoelectric effect) ต่อมาในปี ค.ศ. 1881 กาเบรียล ลิพพ์มานน์ (Gabriel Lippmann) ได้ค้นพบปรากฏการณ์ผลย้อนกลับ คือ เมื่อวัสดุไพโซอิเล็กทริกได้รับพลังงานไฟฟ้า ก็จะสามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานกลได้เช่นกัน ด้วยคุณสมบัติเหล่านี้ วัสดุไพโซอิเล็กทริกจึงถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการวัดค่าการบิดตัว แรงสั่นสะเทือน แรงดัน และแรงกระแทกได้ เป็นต้น ตลอดจนสามารถนำไปผลิตเป็นอุปกรณ์ต่างๆได้หลากหลาย เช่น หัวฉีดน้ำมันในรถยนต์ รถจักรยานยนต์ ระบบการควบคุมถุงลมนิรภัย (air bag) ระบบเบรก ระบบป้องกันขโมย และหัวฉีดหมึกพิมพ์ เป็นต้น อย่างไรก็ตามวัสดุไพโซอิเล็กทริก มีข้อเสียที่สำคัญคือมีความแข็งแต่เปราะ ซึ่งอาจทำให้วัสดุชนิดนี้เกิดการแตกร้าวได้ในระหว่างกระบวนการผลิตหรือการใช้งาน ส่งผลให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีวัสดุไพโซอิเล็กทริกเป็นส่วนประกอบไม่อาจใช้งานได้อีกต่อไป ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องศึกษาพฤติกรรมการแตกร้าวในวัสดุไพโซอิเล็กทริก

ในปัจจุบันค่าตัวประกอบความเข้ม (Intensity Factor) เป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่มีความสำคัญในการอธิบายพฤติกรรมที่ปลายรอยร้าวในวัสดุไพโซอิเล็กทริก

1.2 ทบทวนวรรณกรรม

จากการทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมาพบว่า งานวิจัยส่วนใหญ่ที่ใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ (mathematical model) คำนวณค่าตัวประกอบความเข้มของรอยร้าวในวัสดุไพโซอิเล็กทริก มักเป็นรอยร้าวที่อยู่ในระนาบ เช่น รอยร้าววงกลม เป็นต้น หรือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำเสนอขึ้นมักจำกัดอยู่ภายใต้เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าบางชนิดเท่านั้น (Chen และ คณะ, 2000; Xu และ Rajapakse, 2001; Chen และ Lim, 2005; Li และ Lee, 2004; Chiang และ Weng, 2007; Li และ คณะ, 2011) อย่างไรก็ตาม เมื่อไม่นานมานี้ Rungamornrat และ คณะ (2015) นำเสนอระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขที่เรียกว่า ระเบียบวิธีบาวดารีเอลเมนต์แบบสมมาตรกาลอร์คินที่มีความเป็นเอกฐานอย่างอ่อน (weakly singular, symmetric Galerkin boundary element method, SGBEM) มาใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาการร้าว 3 มิติ (ทั้งที่อยู่ในระนาบและไม่อยู่ในระนาบ) ในตัวกลางไพโซอิเล็กทริกที่มีพฤติกรรมเป็นแบบเชิงเส้นภายใต้คุณสมบัติแอนไอโซทรอปิก ในโดเมนแบบไร้ขอบเขต ภายใต้เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบต่างๆ 4 ประเภท คือ เงื่อนไขแบบซึมผ่านได้ แบบซึมผ่านไม่ได้ แบบซึมผ่านได้บางส่วน และแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน ต่อมา Chansavang (2015) นำระเบียบวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขที่พัฒนาโดย Rungamornrat และ คณะ (2015) มาศึกษาอิทธิพลของพารามิเตอร์ต่างๆ

ที่ส่งผลต่อค่าตัวประกอบความเข้มของรอยร้าวในตัวกลางไพโอโซอิเล็กทริกเชิงเส้นไร้ขอบเขตสามมิติ เช่น อิทธิพลของเรขาคณิต และเงื่อนไขผิวรอยร้าว เป็นต้น

1.3 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาอิทธิพลคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่ไม่อยู่ในระนาบที่มีผลต่อค่าตัวประกอบความเข้มในตัวกลางไพโอโซอิเล็กทริก

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

1. ศึกษาพฤติกรรมของรอยร้าวภายใต้เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้า 4 ประเภท คือ เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ (impermeable boundary condition) เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านได้ (permeable boundary condition) เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ (semi-permeable boundary condition) และเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน (energetically consistent boundary condition)
2. ตัวกลางไพโอโซอิเล็กทริกมีคุณสมบัติเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) และมีพฤติกรรมเชิงเส้น (linear behavior)
3. ศึกษาพฤติกรรมของรอยร้าวในตัวกลางไพโอโซอิเล็กทริก PZT-4
4. สนามไฟฟ้าระยะไกล E_0^∞ มีค่า 0.5 เมกะโวลต์ต่อเมตร
5. ความเค้นระยะไกล σ_0^∞ มีค่า 50 เมกะปาสคาล
6. คุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าว มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท่า ของคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของอากาศ
7. รอยร้าวที่อยู่ในระนาบ คือ รอยร้าววงกลม (penny-shaped crack)
8. รอยร้าวที่ไม่อยู่ในระนาบ คือ รอยร้าวผิวทรงกลม (spherical cap crack) และ รอยร้าวผิวทรงกระบอก (cylindrical crack)

1.5 ประโยชน์ที่จะได้รับ

1. ทราบถึงอิทธิพลคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่ไม่อยู่ในระนาบ ที่มีผลต่อค่าตัวประกอบความเข้ม ในตัวกลางไพโอโซอิเล็กทริกภายใต้เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าประเภทต่างๆ

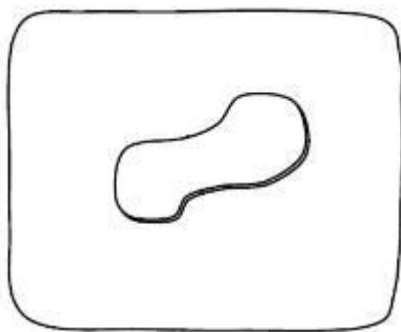
บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงสมการพื้นฐาน เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าที่เกี่ยวข้อง และองค์ประกอบความเค้นทั่วไปบริเวณปลายรอยร้าวของวัสดุโพสิซีอิลิกทริก ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้

2.1 สมการพื้นฐาน

พิจารณารอยร้าวรูปร่างใดๆ ในตัวกลางโพสิซีอิลิกทริกที่มีคุณสมบัติเป็นเนื้อเดียวกัน (homogeneous) และมีพฤติกรรมเชิงเส้น ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 รอยร้าวในตัวกลางโพสิซีอิลิกทริก

สมการพื้นฐานสำหรับการวิเคราะห์ปัญหาการแตกร้าวในวัสดุโพสิซีอิลิกทริกเชิงเส้น ได้แก่ (1) สมการสมดุล (equilibrium equation) โดยไม่คิดผลของ body forces และ body electric charges (2) สมการความสัมพันธ์ระหว่าง ความเครียดกับการขจัด และสนามไฟฟ้ากับความต่างศักย์ทางไฟฟ้า (strain-displacement and electric field-electric potential relations) และ (3) กฎแห่งวัสดุ (constitutive law) โดยมีรายละเอียดดังนี้

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} = 0; \quad \frac{\partial D_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.1)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad E_i = -\phi_{,i} \quad (2.2)$$

$$\sigma_{ij} = E_{ijkm} \varepsilon_{km} + e_{mij} \phi_{,m}; \quad D_i = e_{ikm} \varepsilon_{km} - \kappa_{im} \phi_{,m} \quad (2.3)$$

เมื่อ σ_{ij} คือ เทนเซอร์ความเค้น (stress tensor) ε_{ij} คือ เทนเซอร์ความเครียด (strain tensor) u_i คือ เวกเตอร์การขจัด (displacement vector) D_{ij} คือ เวกเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้า (electric induction vector) หรือ เวกเตอร์การกระจัดไฟฟ้า (electric displacement vector) หรือ เวกเตอร์ความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้า (electric flux density) E_i คือ สนามไฟฟ้า (electric field) ϕ คือ ศักย์ไฟฟ้า (electric potential) E_{ijk} คือ ค่าคงที่อีลาสติก (elastic constants) e_{mij} คือ ค่าคงที่ไพเอโซอิเล็กทริก (piezoelectric constants) และ κ_{im} คือ คุณสมบัติการนำทางไฟฟ้า (dielectric permittivities)

2.2 เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าที่เกี่ยวข้อง

ปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อพฤติกรรม การแตกตัวของวัสดุไพเอโซอิเล็กทริก คือ เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้า (electrical boundary conditions) ซึ่งถ้าเลือกใช้เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าที่ต่างกัน พฤติกรรม การแตกตัวของวัสดุไพเอโซอิเล็กทริกก็จะแตกต่างกัน ในปัจจุบันมีเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าทั้งหมด 4 ประเภทดังนี้

2.2.1 เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านได้ (permeable boundary condition)

Parton (1976) เสนอว่า ศักย์ไฟฟ้า (electric potential, ϕ) และ เวกเตอร์การกระจัดไฟฟ้า (electric displacement vector) (หรือ เวกเตอร์ความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้า (electric flux density)) ที่ตั้งฉากกับผิวรอยร้าว (D_n) มีค่าต่อเนื่องกันทั้งที่ผิวบน และผิวล่างของรอยร้าว ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.4) และ (2.5)

$$\phi^+ = \phi^- \quad (2.4)$$

$$D_n^+ = D_n^- \quad (2.5)$$

เมื่อตัวห้อย (subscript) n หมายถึงองค์ประกอบ (component) ที่ตั้งฉากกับผิวรอยร้าว และตัวยกกำลัง (superscript) เครื่องหมายบวก (+) และลบ (-) หมายถึงผิวบน และผิวล่างของรอยร้าว

2.2.2 เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ (impermeable boundary condition)

Deeg (1980) เสนอว่า เวกเตอร์การกระจัดไฟฟ้า (หรือ เวกเตอร์ความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้า) ที่ตั้งฉากกับผิวบนและผิวล่างของรอยร้าว มีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.6)

$$D_n^+ = D_n^- = 0 \quad (2.6)$$

2.2.3 เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ (semi-permeable boundary condition)

Hao และ Shen (1994) เสนอเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ โดยพิจารณาคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของอากาศ (permittivity of air) ที่อยู่ภายในรอยร้าว ซึ่งสามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.7) และ (2.8)

$$D_n^+ = D_n^- \quad (2.7)$$

$$D_n^+(U_n^- - U_n^-) = -\varepsilon_a(\phi^+ - \phi^-) \quad (2.8)$$

โดยที่	ε_a	คือ	คุณสมบัติการนำไฟฟ้าของอากาศ
	ϕ^+	คือ	ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวบนของรอยร้าว
	ϕ^-	คือ	ศักย์ไฟฟ้าที่ผิวล่างของรอยร้าว
	U_n^+	คือ	การกระจัดตั้งฉาก (normal displacement) ของผิวบนรอยร้าว (upper crack face)
	U_n^-	คือ	การกระจัดตั้งฉากของผิวล่างรอยร้าว (lower crack face)
	$U_n^+ - U_n^-$	คือ	ระยะเปิดออกของรอยร้าว (crack opening displacement)

2.2.4 เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน (energetically consistent boundary condition)

Landis (2004) ได้เสนอเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้า ซึ่งสามารถเขียนอธิบายได้ดังสมการที่ (2.9) และ (2.10)

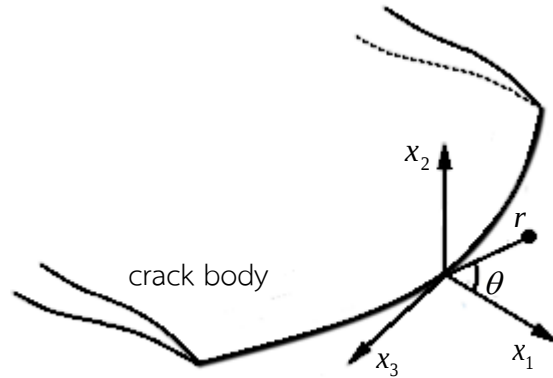
$$D_n^+(U_n^- - U_n^-) = -\kappa_a(\phi^+ - \phi^-) \quad (2.9)$$

$$\sigma_{nn}^+ = \sigma_{nn}^- = \frac{1}{2}\kappa_a\left(\frac{\phi^+ - \phi^-}{U_n^+ - U_n^-}\right)^2 \quad (2.10)$$

โดยที่	σ_{nn}^+	คือ	องค์ประกอบ (component) ของความเค้น (stress) ที่ตั้งฉากกับผิวบนของรอยร้าว
	σ_{nn}^-	คือ	องค์ประกอบของความเค้นที่ตั้งฉากกับผิวล่างของรอยร้าว
	κ_a	คือ	คุณสมบัติการนำไฟฟ้าของอากาศ

2.3 องค์ประกอบความเค้นทั่วไปบริเวณปลายรอยร้าวของวัสดุโพธิโซอิเล็กทริก

ในหัวข้อนี้ จะพิจารณาองค์ประกอบความเค้นทั่วไป (generalized stress field) ที่ขอบหน้ารอยร้าว (crack front) หรือที่ปลายรอยร้าว (crack tip) ตรงจุด x_c ดังแสดงในรูปที่ 2.2 เมื่อ (r, θ) และ (x_1, x_2, x_3) คือ ระบบพิกัดเชิงขั้ว (polar coordinate system) และระบบพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian coordinate system) โดยมีจุดกำเนิดที่จุด x_c ตามลำดับ และจากรูปที่ 2.2 จะเห็นได้ว่า ระนาบ $x_1 - x_2$ ตั้งฉากกับขอบหน้ารอยร้าวที่จุด x_c ในขณะที่ระนาบ $x_2 - x_3$ และ $x_1 - x_3$ สัมผัสกับขอบหน้ารอยร้าวตรงจุด x_c



รูปที่ 2.2 ระบบพิกัดที่ขอบหน้ารอยร้าวในตัวกลางโพธิโซอิเล็กทริก

ผลเฉลยขององค์ประกอบความเค้นทั่วไปของรอยร้าวในตัวกลางโพธิโซอิเล็กทริกเชิงเส้น แสดงดังสมการที่ (2.11)

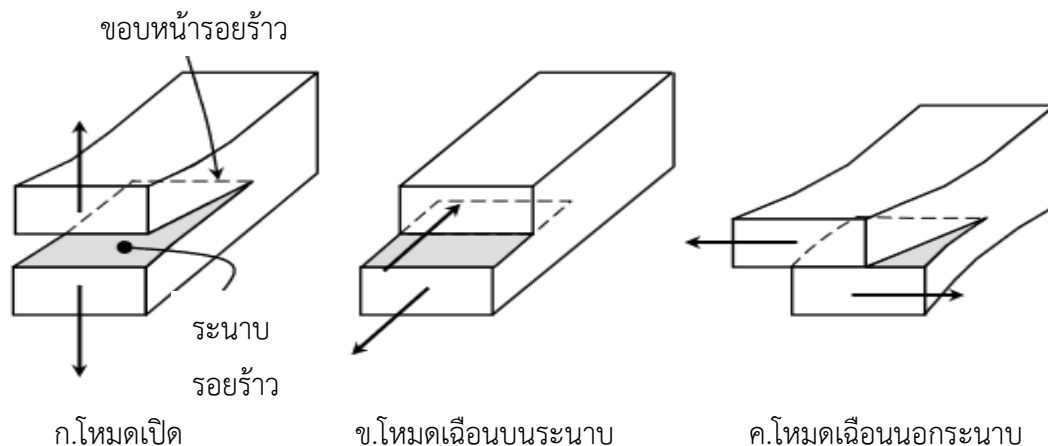
$$\sigma_{ij}(x_c; r, \theta) = \sum_{n=1}^4 \left\{ \frac{K_n(x_c, f_{co})}{\sqrt{2\pi r}} \sigma_{ij}^{(n)}(\theta) + \sum_{m=0}^{\infty} A_m(x_c, f_{co}) r^{\frac{m}{2}} \sigma_{ij}^{(m)}(\theta) \right\} \quad (2.11)$$

เมื่อ σ_{ij} คือ เทนเซอร์ความเค้นทั่วไป (generalized stress tensor) โดยที่ $i = 1, 2, 3$ และ $J = 1, 2, 3, 4$ ในขณะที่ $D_i = \sigma_{i4}$ คือ เวกเตอร์เหนี่ยวนำไฟฟ้า (electric induction vector) หรือ เวกเตอร์การกระจัดไฟฟ้า (electric displacement) หรือ เวกเตอร์ความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้า (electric flux density) ส่วน K_n และ A_m คือ ค่าคงที่ซึ่งขึ้นอยู่กับตำแหน่ง x_c และเงื่อนไขของฟังก์ชัน f_{co} (เมื่อ f_{co} คือ ฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กับแรงที่มากระทำ (loadings) เงื่อนไขขอบ (boundary conditions) เรขาคณิต (geometries) และคุณสมบัติของวัสดุ (material properties)) และ $\sigma_{ij}^{(n)}$ คือ ฟังก์ชันความเค้นของพจน์แรกที่ยื่นอยู่กับมุม θ (แต่ไม่ขึ้นกับรัศมี r) และขึ้นอยู่กับโหมดการเสียรูปที่ปลายรอยร้าว ในขณะที่ $\sigma_{ij}^{(m)}$ คือฟังก์ชันความเค้นของพจน์ที่สอง (สำหรับพจน์ m) ที่ขึ้นกับมุม θ และขึ้นอยู่กับรูปทรงเรขาคณิต

พจน์แรกของสมการที่ (2.11) เกี่ยวข้องกับ $1/\sqrt{r}$ และพจน์ที่สองเกี่ยวข้องกับรัศมี r ยกกำลัง $m/2$ พิจารณาที่จุด x_c จะเห็นได้ว่า เมื่อรัศมี r มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ($r \rightarrow 0$) ความเค้นของพจน์แรกจะมีค่าเข้าใกล้อนันต์ (infinity) หรือที่เรียกว่า ความเค้นของพจน์แรกมีความเป็นเอกฐาน (singular) ตรงจุด x_c และสำหรับ

K_n เรียกว่า ตัวประกอบความเข้ม (intensity factors) ซึ่งแสดงถึง แอมพลิจูด (amplitude) ของความเป็นเอกฐานที่ขอบหน้ารอยร้าว (หรือที่ปลายรอยร้าว) ตรงจุด x_c นอกจากนี้ ตัวประกอบความเข้ม ยังแสดงถึงโหมดการเสียรูปที่ปลายรอยร้าว สำหรับวัสดุโพธิโซอิเล็กทริก โหมดการเสียรูปที่ปลายรอยร้าวจะมีอยู่ 4 โหมดด้วยกัน คือ

- 1) โหมดเปิด (opening mode) หรือโหมดที่ 1 (K_I) ในโหมดนี้ ผิวรอยร้าวจะเคลื่อนตัวตั้งฉากกับระนาบรอยร้าว
- 2) โหมดเฉือนบนระนาบ (in-plane shear mode) หรือโหมดไถล (sliding mode) หรือโหมดที่ 2 (K_{II}) ในโหมดนี้ผิวรอยร้าวจะเคลื่อนที่สัมผัสกันในทิศตั้งฉากกับขอบหน้ารอยร้าว
- 3) โหมดเฉือนนอกระนาบ (out-of-plane shear mode) หรือโหมดฉีก (tearing mode) หรือโหมดที่ 3 (K_{III}) ในโหมดนี้ ผิวรอยร้าวจะเคลื่อนที่สัมผัสกันในทิศขนานกับขอบหน้ารอยร้าว
- 4) โหมดการเสียรูปเชิงไฟฟ้า หรือ โหมดที่ 4 (K_{IV}) ในโหมดนี้จะไม่มีลักษณะเชิงกายภาพ



รูปที่ 2.3 โหมดการเสียรูปที่ปลายรอยร้าว

สำหรับโครงการนี้ต้องการคำนวณหาค่าตัวประกอบความเข้ม (intensity factors) ซึ่งบอกถึงแอมพลิจูด (amplitude) ของความเป็นเอกฐาน (ของพจน์แรกสมการที่ (2.11)) ที่ปลายรอยร้าว (หรือขอบหน้ารอยร้าว) รายละเอียดของค่าตัวประกอบความเข้ม สามารถศึกษาได้จากหนังสือกลศาสตร์การแตกหัก (Anderson, 2005)

บทที่ 3

ผลการศึกษา

เมื่อเกิดรอยร้าวในวัสดุไพโซอิเล็กทริก โดยทั่วไปมักจะมีอากาศแทรกตัวอยู่ในรอยร้าว นั้น (ซึ่งอากาศมีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้า เท่ากับ $8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$) คำถามที่ตามมาคือ ถ้าตัวกลางที่อยู่ภายในรอยร้าวไม่ใช่อากาศ แต่เป็นสสารบางอย่างที่มีคุณสมบัติในการนำไฟฟ้าที่ต่างจากอากาศ อิทธิพลของคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางที่อยู่ภายในรอยร้าว นั้นจะส่งผลต่อค่าตัวประกอบความเข้มยังง้าง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ถ้ารอยร้าว นั้นเป็นรอยร้าวที่ไม่อยู่ในระนาบ (non-planar crack) จึงเป็นที่มาของวัตถุประสงค์โครงการนี้

ในการศึกษาโครงการนี้จะใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่เรียกว่า ระเบียบวิธีบาวดารีเอเลเมนต์แบบสมมาตรกากลอร์คินที่มีความเป็นเอกฐานอย่างอ่อน (weakly singular, symmetric Galerkin boundary element method, SGBEM) ที่พัฒนาโดย Rungamornrat และ คณะ (2015) มาใช้ในการคำนวณค่าตัวประกอบความเข้มในตัวกลางไพโซอิเล็กทริกภายใต้เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าต่างๆ 4 ประเภทคือ คือ เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านได้ เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ และเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน เป็นต้น สำหรับลักษณะของรอยร้าวที่ใช้ในการศึกษาแบ่งเป็น 2 ประเภท กล่าวคือ ประเภทแรกคือรอยร้าวที่อยู่ในระนาบ (planar crack) ซึ่งได้แก่ รอยร้าววงกลม (penny-shaped crack) เป็นต้น และประเภทที่สองคือ รอยร้าวที่ไม่อยู่ในระนาบ (non-planar crack) ซึ่งได้แก่ รอยร้าวผิวทรงกลม (spherical cap crack) และรอยร้าวผิวทรงกระบอก (cylindrical crack) เป็นต้น

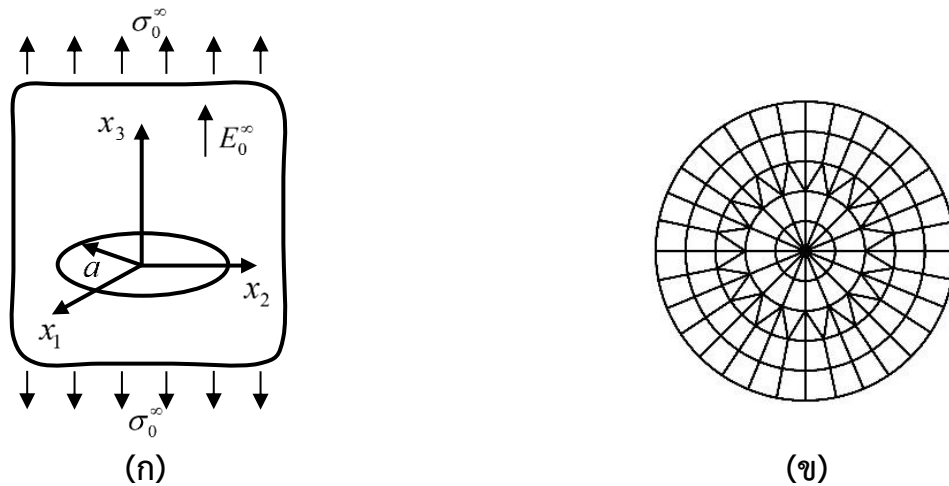
สำหรับชนิดของตัวกลางไพโซอิเล็กทริกที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ คือ PZT-4 โดยมีคุณสมบัติต่างๆ แสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติวัสดุไพโซอิเล็กทริกชนิด PZT-4 (Li และคณะ 2011)

ค่าคงที่ยืดหยุ่น (Elastic constants) ($\times 10^9 \text{ Pa}$)	E_{1111}	139
	E_{1122}	77.8
	E_{1133}	74.3
	E_{3333}	113
	E_{1313}	25.6
ค่าคงที่ไพโซอิเล็กทริก (Piezoelectric constants) (C/m^2)	E_{1143}	-6.98
	E_{3343}	13.8
	E_{1341}	13.4
ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric Permittivities) ($\times 10^{-9} \text{ C/(Vm)}$)	$-E_{1441}$	6.0
	$-E_{3443}$	5.47

3.1 รอยร้าววงกลมในตัวยางยืด

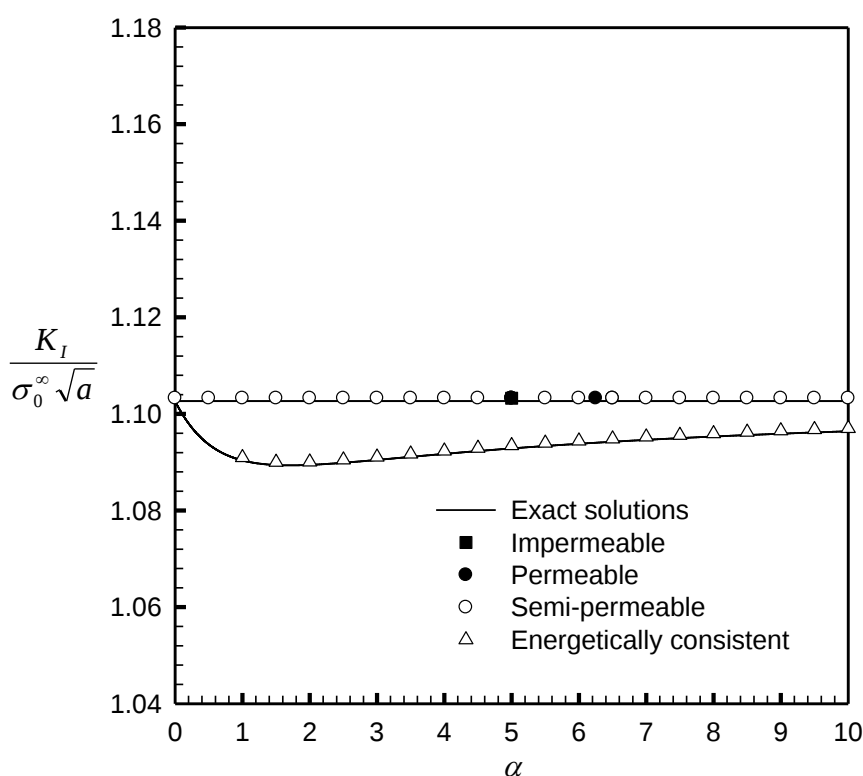
พิจารณารอยร้าววงกลมรัศมี $a = 1$ ในตัวยางยืดโพซิทีฟอิเล็กทริกไร้ขอบเขต โดยมีความเค้นระยะไกล $\sigma_0^\infty = 50$ เมกะปาสคาล (MPa) และสนามไฟฟ้าระยะไกล $E_0^\infty = 0.5$ เมกะโวลต์ต่อเมตร (MV/m) ปรากฏการณ์แสดงในรูปที่ 3.1 (ก) กำหนดให้คุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวยางยืดภายในรอยร้าววงกลมมีค่าตั้งแต่ 0 จนถึง 10 เท่าของอากาศ และแบบจำลอง (mesh) ของรอยร้าววงกลมมีจำนวนทั้งสิ้น 144 เอลิเมนต์ (element) ดังแสดงในรูปที่ 3.1 (ข)



รูปที่ 3.1 (ก) รอยร้าววงกลมในตัวยางยืดโพซิทีฟอิเล็กทริกไร้ขอบเขตที่มีความเค้นและสนามไฟฟ้าระยะไกลปรากฏ (ข) แบบจำลองของรอยร้าววงกลม (mesh) ที่ใช้ในการคำนวณด้วยวิธีของ Rungamornrat และ คณะ (2015)

ผลการคำนวณพบว่า ค่าตัวประกอบความเข้มที่มีค่าไม่เท่ากับศูนย์คือ K_I และ K_{IV} ดังรูปที่ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ

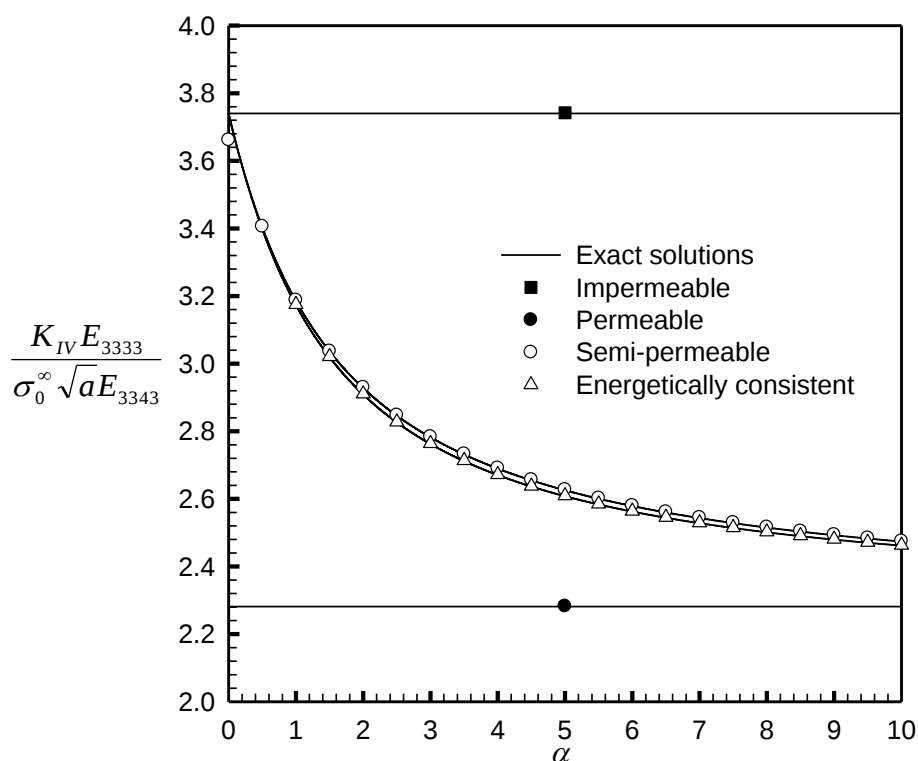
โดยกำหนดให้ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับศูนย์เท่าของอากาศ ($\alpha = 0$) ในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ ใช้ $\alpha = 0.1 \times 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ และในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน ใช้ $\alpha = 0.1 \times 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$



รูปที่ 3.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโหมดที่ 1 (Normalized mode-I stress intensity factor) (K_I) กับค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท่าของอากาศ สำหรับรอยร้าววงกลมในตัวกลางไฟโอโซอิกเล็กทริกไร้ขอบเขต

จากรูปที่ 3.2 เมื่อนำคำตอบจากผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact solutions) ของ Li และ Lee (2004) ในกรณีของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ แบบซึมผ่านได้ และแบบกึ่งซึมผ่านได้ และของ Li และ คณะ (2011) ในกรณีของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน มาเปรียบเทียบกับระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่พัฒนาโดย Rungamornrat และ คณะ (2015) พบว่าเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้มีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.05% ส่วนเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านได้มีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.05% ในขณะที่เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้มีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.05% และเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงานมีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.05%

นอกจากนี้ จากรูป 3.2 พบว่าที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้ามีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท่าของอากาศ ค่าตัวประกอบความเข้มโหมดที่ 1 (K_I) ของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ แบบซึมผ่านได้ และแบบกึ่งซึมผ่านได้จะมีค่าเท่ากัน แต่เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงานจะมีค่าต่างออกไปโดยมีแนวโน้มเข้าสู่เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านได้เมื่อค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น และจากรูปที่ 3.2 ค่า K_I มีค่าเป็นบวกทุกเงื่อนไข แสดงถึงรอยร้าวนั้นเปิดออก



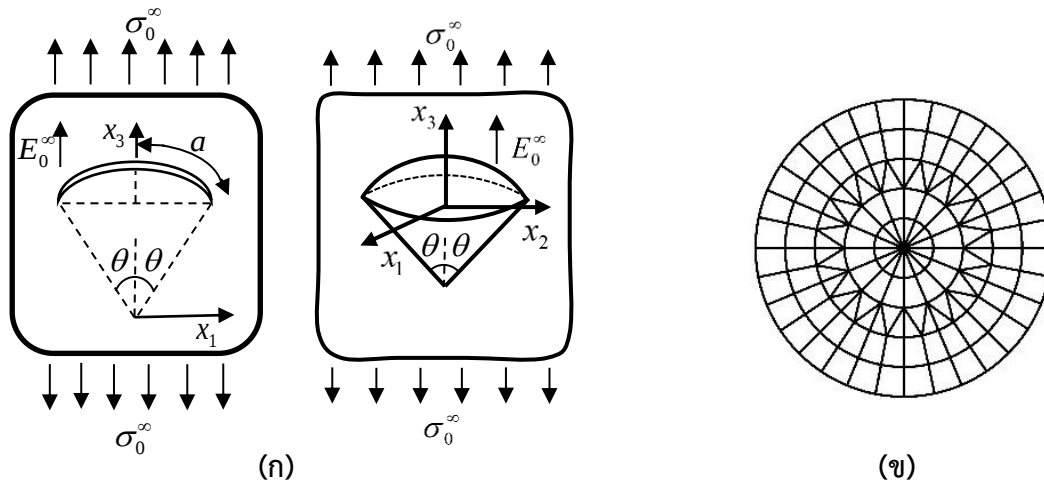
รูปที่ 3.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโหมดที่ 4 (K_{IV}) กับ ค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท่าของอากาศ สำหรับรอย ร้าววงกลมในตัวกลางไฟอไอโซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต

จากรูปที่ 3.3 เมื่อนำคำตอบจากผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact solutions) ของ Li และ Lee (2004) ในกรณี ของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ แบบซึมผ่านได้ และแบบกึ่งซึมผ่านได้ และของ Li และ คณะ (2011) ในกรณีของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน มาเปรียบเทียบกับระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่พัฒนา โดย Rungamornrat และ คณะ (2015) พบว่าเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้มีค่าความคลาดเคลื่อน เท่ากับ 0.06% ส่วนเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านได้มีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.05% ในขณะที่เงื่อนไข ขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้มีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 2.15% (ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับ 0 เท่า ของอากาศ) และเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงานมีค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.06%

จากรูป 3.3 ค่า K_{IV} ของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ และแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน มีค่า ใกล้เคียงกัน และมีค่าอยู่ในช่วงของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ และแบบซึมผ่านได้ และเป็นที่น่า สังเกตว่า เมื่อค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้ามีค่าเพิ่มมากขึ้น ค่า K_{IV} ของเงื่อนไขแบบกึ่งซึมผ่านได้และแบบสอดคล้อง เชิงพลังงาน จะมีแนวโน้มเข้าสู่เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านได้

3.2 รอยร้าวผิวทรงกลมในตัวยางใรรีขบเซต

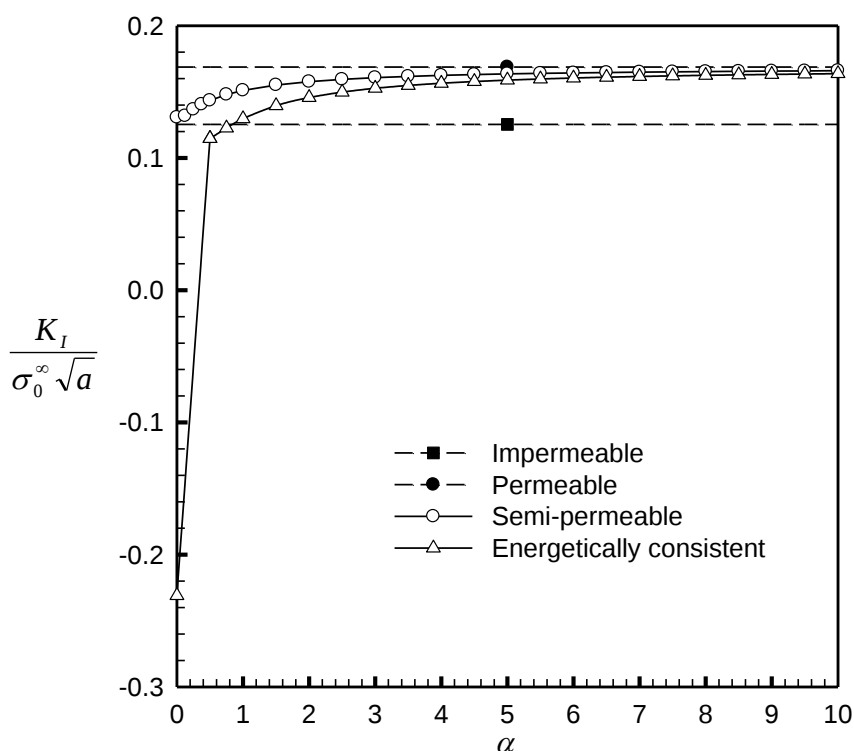
พิจารณารอยร้าววงผิวทรงกลมที่มีรัศมี $R=1$ ความยาวส่วนโค้ง $2a=2.094$ ที่มุม $\theta=60^\circ$ ในตัวยางใรรีขบเซต ไฟโอโซอีเล็กทริกไรขบเซต โดยมีความเค้นระยะไกล $\sigma_0^\infty=50$ เมกะปาสกาล (MPa) และสนามไฟฟ้าระยะไกล $E_0^\infty=0.5$ เมกะโวลต์ต่อเมตร (MV/m) มากระทำการแสดงในรูปที่ 3.4 (ก) กำหนดให้คุณสมบัติการนำไฟฟ้าของ ตัวยางใรรีขบเซตมีค่าตั้งแต่ 0 จนถึง 10 เทาของอากาศ และแบบจำลอง (mesh) ของรอยร้าววงผิว ทรงกลมมีจำนวนทั้งสิ้น 144 เอลเมนต์ (element) ดังแสดงในรูปที่ 3.4 (ข)



รูปที่ 3.4 (ก) รอยร้าวทรงกลมในตัวยางไฟโอโซอีเล็กทริกไรขบเซตที่มีความเค้นและสนามไฟฟ้าระยะไกลมากระทำ (ข) แบบจำลองของรอยร้าววงกลม (mesh) ที่ใช้ในการคำนวณด้วยวิธีของ Rungamornrat และ คณะ (2015)

ผลการศึกษาพบว่ามีความค่าตัวประกอบความเข้ม 3 โหมด ที่มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ คือ K_I , K_{II} และ K_{IV} ดังรูปที่ 3.5-3.7 ตามลำดับ

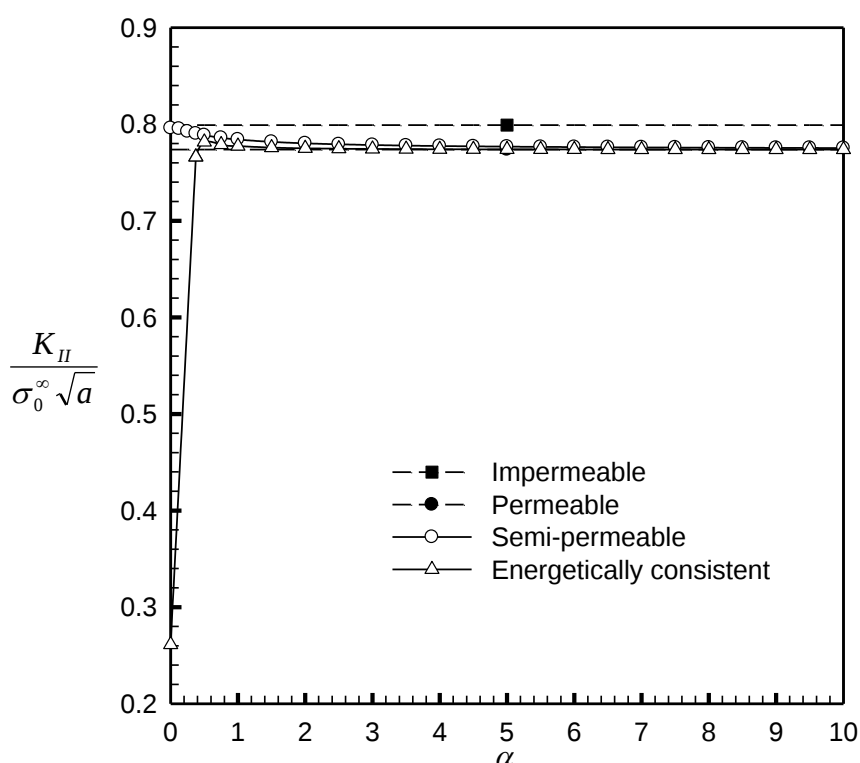
โดยกำหนดให้ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับศูนย์เท่าของอากาศ ($\alpha=0$) ในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ ใช้ $\alpha=0.1 \times 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ และในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน ใช้ $\alpha=0.0001 \times 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$



รูปที่ 3.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโหมดที่ (K_I) กับค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท่าของอากาศอากาศ สำหรับรอยร้าวผิวทรงกลมในตัวกลางโพธิ์โซลิดเล็ทริกไร้ขอบเขต

จากรูปที่ 3.5 ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับ 0 เท่าของอากาศ เมื่อนำค่าตัวประกอบความเข้ม K_I ของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ มาเปรียบเทียบกับค่าตัวประกอบความเข้มของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ จะพบค่าความแตกต่างกันเท่ากับ 4.23%

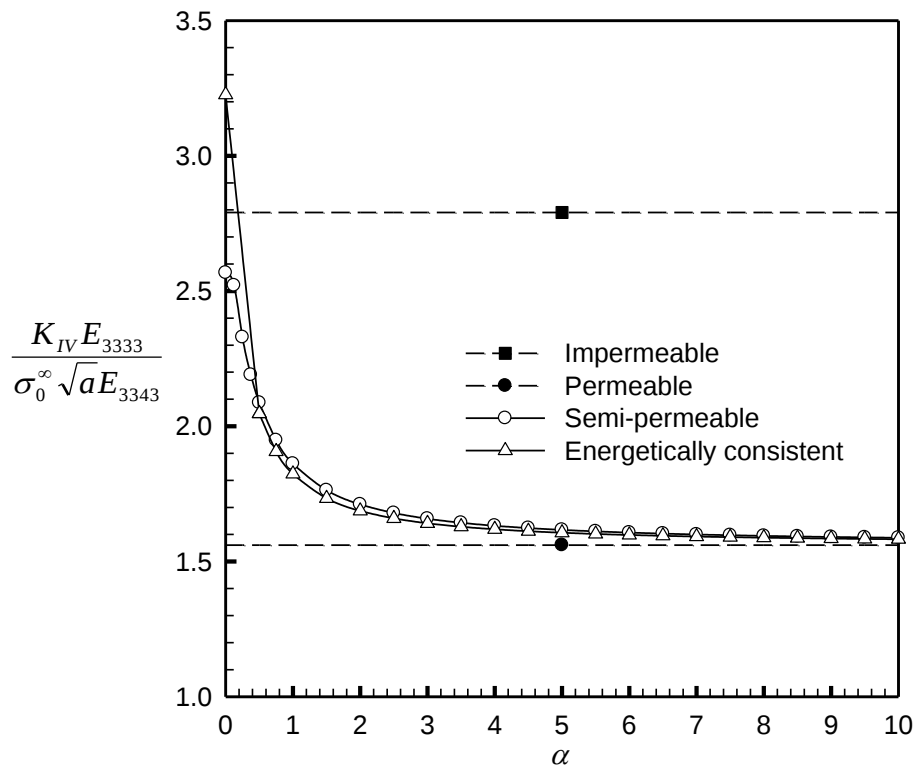
จากรูป 3.5 ค่า K_I ของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ และแบบสอดคลองเชิงพลังงาน จะมีค่าอยู่ในขอบเขตของเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ และแบบซึมผ่านได้ ทุกค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้า ยกเว้นที่ค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับ 0-0.75 เท่าของอากาศ K_I ของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบสอดคลองเชิงพลังงานจะไม่อยู่ในขอบเขตดังกล่าว อย่างไรก็ตามเป็นที่น่าสังเกตว่า เมื่อค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น K_I ของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ และแบบสอดคลองเชิงพลังงาน จะมีค่าลู่เข้าสู่คำตอบของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านได้ และจากรูปที่ 3.5 ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับ 0 เท่าของอากาศ ค่า K_I ของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ และแบบซึมผ่านได้ มีค่าเป็นบวกแสดงถึงรอยร้าวที่นั้นเปิดออก แต่ค่า K_I ของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบสอดคลองเชิงพลังงาน มีค่าเป็นลบแสดงถึงรอยร้าวที่นั้นยังปิดอยู่



รูปที่ 3.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโหมดที่ 2 (K_{II}) กับ ค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท่าของอากาศ สำหรับรอย ร้าวผิวทรงกลมในตัวกลางโพธิโซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต

จากรูปที่ 3.6 ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับ 0 เท่าของอากาศ เมื่อนำค่าตัวประกอบความเข้ม K_{II} ของ เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ มาเปรียบเทียบกับค่าตัวประกอบความเข้มของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้า แบบซึมผ่านไม่ได้ จะพบค่าความแตกต่างกันเท่ากับ 0.39%

จากรูป 3.6 ค่า K_{II} ของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ และแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน จะมี ค่าอยู่ในขอบเขตของเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ และแบบซึมผ่านได้ ทุกค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้า ยกเว้นที่ ค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับ 0-0.375 เท่าของอากาศ K_{II} ของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิง พลังงานจะไม่อยู่ในขอบเขตดังกล่าว อย่างไรก็ตามเป็นที่น่าสังเกตว่า เมื่อค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น K_{II} ของ เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ และแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน จะมีค่าลู่เข้าสู่ค่าตอบของเงื่อนไข ขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านได้



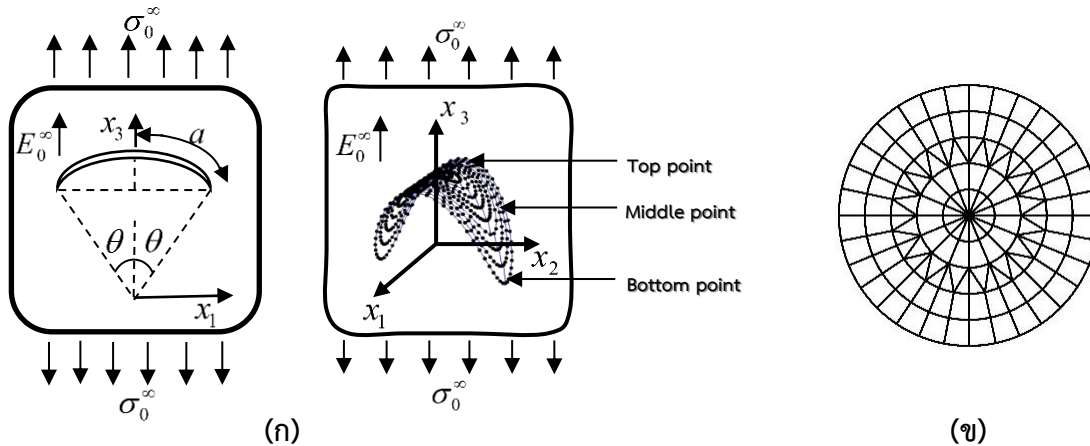
รูปที่ 3.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโหมดที่ 4 (K_{IV}) กับ ค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท่าของอากาศสำหรับรอย ร้าวผิวทรงกลมในตัวกลางโพสิซีโออิเล็กทรอนิกส์ไร้ขอบเขต

จากรูปที่ 3.7 ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับ 0 เท่าของอากาศ เมื่อนำค่าตัวประกอบความเข้ม K_{IV} ของ เงื่อนโซขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ มาเปรียบเทียบกับค่าตัวประกอบความเข้มของเงื่อนโซขอบเขตเชิงไฟฟ้า แบบซึมผ่านไม่ได้ จะพบค่าความแตกต่างกันเท่ากับ 8.00%

จากรูป 3.7 ค่า K_{IV} ของเงื่อนโซขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ และแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน จะมี ค่าอยู่ในขอบเขตของเงื่อนโซเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ และแบบซึมผ่านได้ ทุกค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้า ยกเว้นที่ ค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับ 0 เท่าของอากาศ K_{IV} ของเงื่อนโซขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน จะไม่อยู่ในขอบเขตดังกล่าว อย่างไรก็ตามเป็นที่น่าสังเกตว่า เมื่อค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น K_{IV} ของเงื่อนโซ ขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ และแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน จะมีค่าลู่เข้าสู่คำตอบของเงื่อนโซขอบเขตเชิง ไฟฟ้าแบบซึมผ่านได้

3.3 รอยร้าวผิวทรงกระบอกในตัวยกกลางไรซ์ขอบเขต

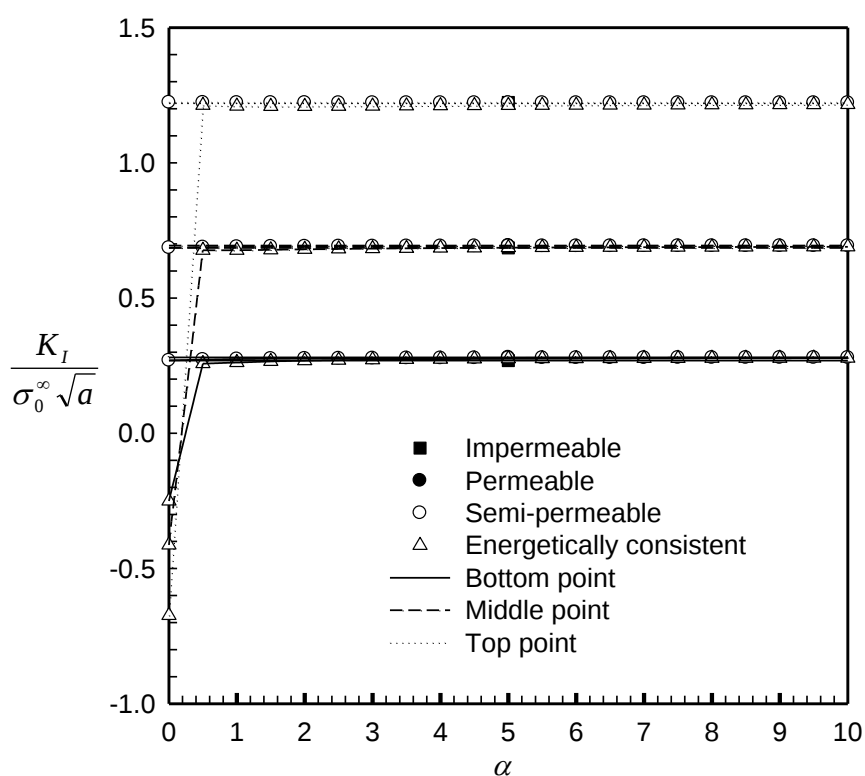
พิจารณารอยร้าวผิวทรงกระบอกรัศมี $R=1$ ความยาวส่วนโค้ง $2a=2.094$ ที่มุม $\theta=60^\circ$ ในตัวยกกลางไฟโอโซอิเล็กทริกไรซ์ขอบเขต โดยมีความเค้นระยะไกล $\sigma_0^\infty=50$ เมกะปาสคาล (MPa) และสนามไฟฟ้าระยะไกล $E_0^\infty=0.5$ เมกะโวลต์ต่อเมตร (MV/m) มากระทำการแสดงในรูปที่ 3.8 (ก) กำหนดให้คุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวยกกลางภายในรอยร้าวผิวทรงกระบอก มีค่าตั้งแต่ 0 จนถึง 10 เท่าของอากาศ และแบบจำลอง (mesh) ของรอยร้าวผิวทรงกระบอกมีจำนวนทั้งสิ้น 144 เอลิเมนต์ (element) ดังแสดงในรูปที่ 3.8 (ข)



รูปที่ 3.8 (ก) รอยร้าวทรงกระบอกในตัวยกกลางไฟโอโซอิเล็กทริกไรซ์ขอบเขตที่มีความเค้นและสนามไฟฟ้าระยะไกลมากระทำ (ข) แบบจำลองของรอยร้าววงกลม (mesh) ที่ใช้ในการคำนวณด้วยวิธีของ Rungamornrat และ คณะ (2015)

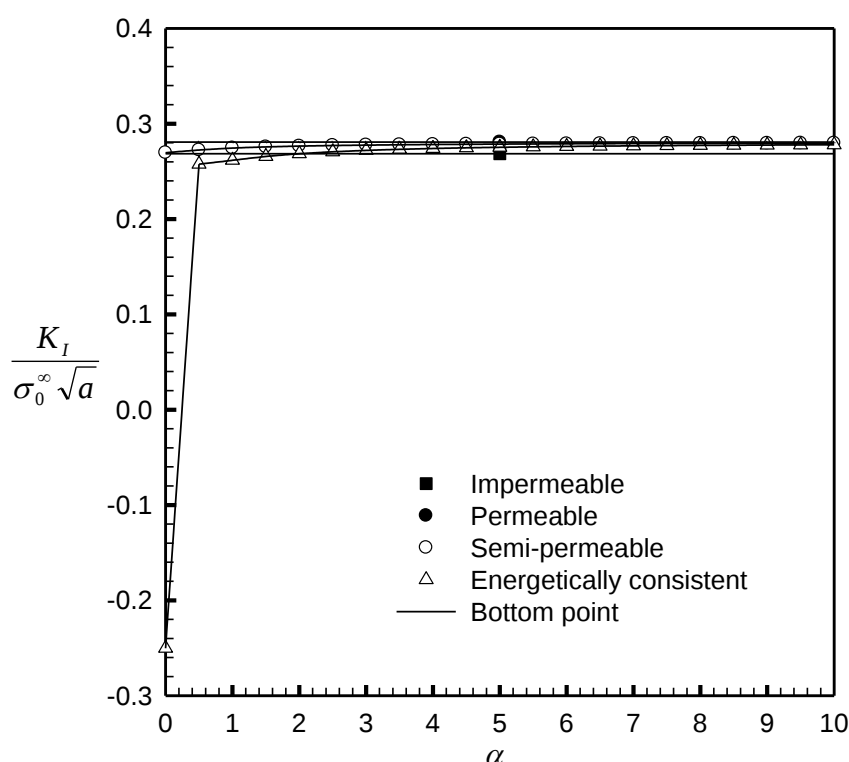
การคำนวณหาค่าตัวประกอบความเข้มของรอยร้าวผิวทรงกระบอกจะแตกต่างกับกรณีอื่น ๆ คือ กรณีนี้จะสนใจค่าตัวประกอบความเข้มที่จุด 3 จุด คือ จุดล่างสุด (Bottom point) จุดกึ่งกลาง (Middle point) และจุดสูงสุด (Top point) โดย จุดล่างสุด และจุดสูงสุด จะมีค่าตัวประกอบความเข้มที่ไม่เท่ากับศูนย์ 3 ค่า ได้แก่ K_I K_{II} และ K_{IV} ส่วน จุดกึ่งกลาง จะมีค่าตัวประกอบความเข้มที่มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ 4 ค่า ได้แก่ K_I K_{II} K_{III} และ K_{IV} โดยจะแสดงดังรูปที่ 3.9 ถึงรูปที่ 3.21

โดยกำหนดให้ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับศูนย์เท่าของอากาศ ($\alpha=0$) ในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ ใช้ $\alpha=0.1 \times 8.85 \times 10^{-12}$ F/m และในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน ใช้ $\alpha=0.0001 \times 8.85 \times 10^{-12}$ F/m



รูปที่ 3.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโหมดที่ 1 (K_I) กับ ค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท่าของอากาศ สำหรับรอย ร้าวผิวทรงกระบอกในตัวกลางโพธิ์โซลิดิกทริกไรร่วมเขต

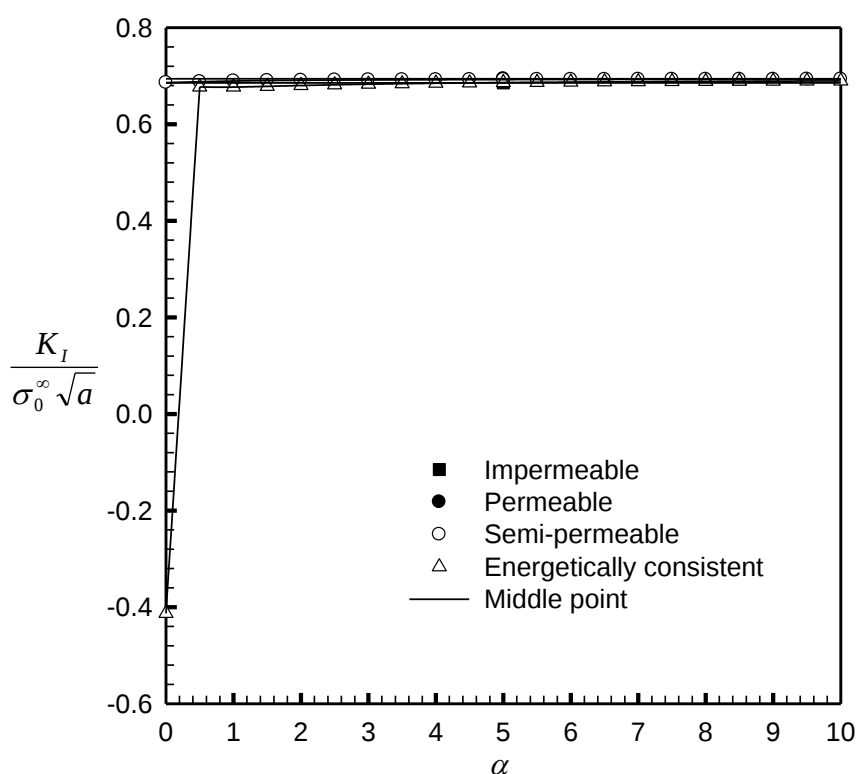
จากรูปที่ 3.9 เป็นรูปที่แสดงถึงค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโหมดที่ 1 (K_I) เปรียบเทียบกัน พบว่า ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโหมดที่ 1 (K_I) ของ จุดสูงสุด (Top point) มากกว่า จุดกึ่งกลาง (Middle point) และจุดล่างสุด (Bottom point) ตามลำดับ



รูปที่ 3.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโหมดที่ 1 (K_I) กับ ค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท่าของอากาศ สำหรับจุดล่างสุดของรอยร้าวผิวทรงกระบอกในตัวกลางโพธิ์ไอโซเล็กทริกไร้ขอบเขต

จากรูปที่ 3.10 ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับ 0 เท่าของอากาศ เมื่อนำค่าตัวประกอบความเข้ม K_I ของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ มาเปรียบเทียบกับค่าตัวประกอบความเข้มของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ จะพบค่าความแตกต่างกันเท่ากับ 0.37%

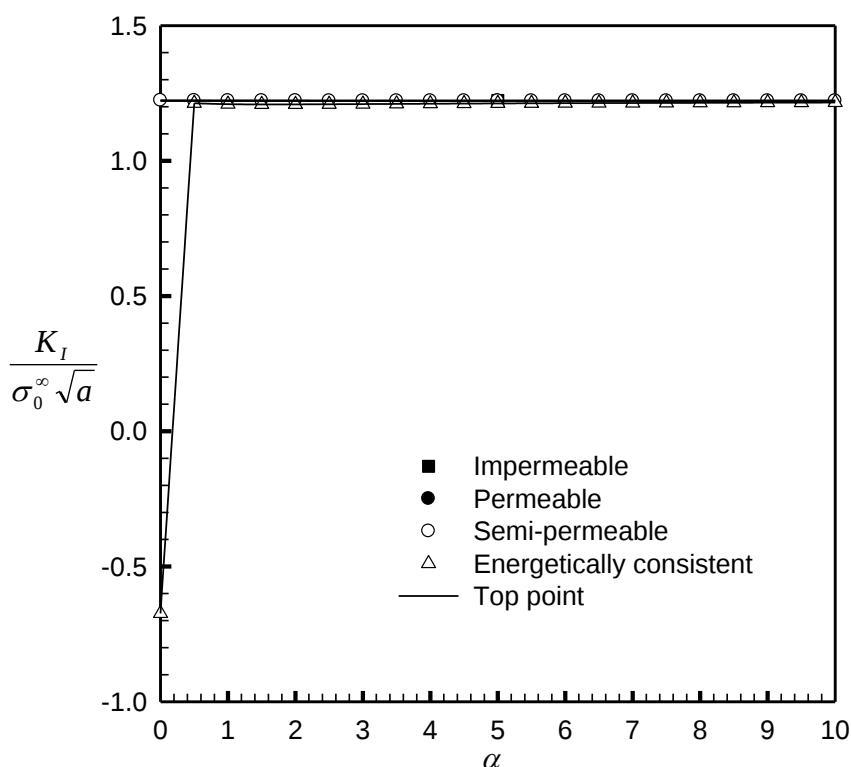
จากรูป 3.10 ค่า K_I ของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ และแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน จะมีค่าอยู่ในขอบเขตของเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ และแบบซึมผ่านได้ ทุกค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้า ยกเว้นที่ค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับ 0-2 เท่าของอากาศ K_I ของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน จะไม่อยู่ในขอบเขตดังกล่าว อย่างไรก็ตามเป็นที่น่าสังเกตว่า เมื่อค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น K_I ของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ และแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน จะมีค่าอยู่เข้าสู่ค่าขอบของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านได้ และจากรูปที่ 3.10 ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับ 0 เท่าของอากาศ ค่า K_I ของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ และแบบซึมผ่านได้ มีค่าเป็นบวกแสดงถึงรอยร้าวที่นั้นเปิดออก แต่ค่า K_I ของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน มีค่าเป็นลบแสดงถึงรอยร้าวที่นั้นยังปิดอยู่



รูปที่ 3.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโหมดที่ 1 (K_I) กับค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท่าของอากาศ สำหรับจุดกึ่งกลางของรอยร้าวผิวทรงกระบอกในตัวกลางโพธิ์โซลิดอิเล็กทริกไร้ขอบเขต

จากรูปที่ 3.11 ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับ 0 เท่าของอากาศ เมื่อนำค่าตัวประกอบความเข้ม K_I ของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ มาเปรียบเทียบกับค่าตัวประกอบความเข้มของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ จะพบค่าความแตกต่างกันเท่ากับ 0.10%

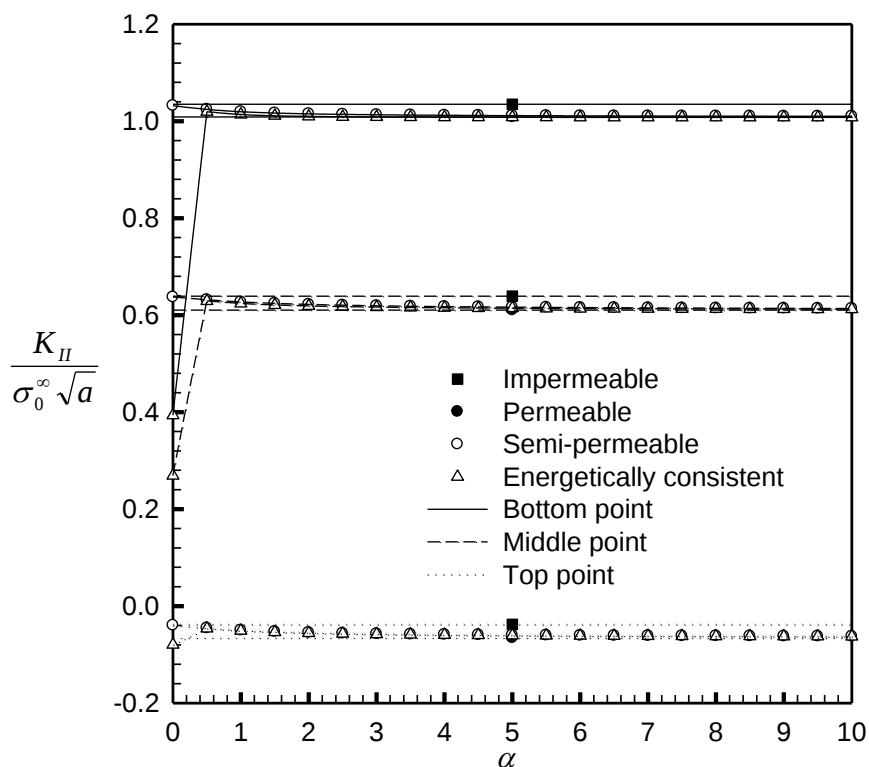
จากรูป 3.11 ค่า K_I ของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ และแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน จะมีค่าอยู่ในขอบเขตของเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ และแบบซึมผ่านได้ ทุกค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้า ยกเว้นที่ค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับ 0-4 เท่าของอากาศ K_I ของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน จะไม่อยู่ในขอบเขตดังกล่าว อย่างไรก็ตามเป็นที่น่าสังเกตว่า เมื่อค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น K_I ของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ และแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน จะมีค่าคู่เข้าสู่คำตอบของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านได้ และจากรูปที่ 3.11 ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับ 0 เท่าของอากาศ ค่า K_I ของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ และแบบซึมผ่านได้ มีค่าเป็นบวกแสดงถึงรอยร้าวที่นั้นเปิดออก แต่ค่า K_I ของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน มีค่าเป็นลบแสดงถึงรอยร้าวที่นั้นยังปิดอยู่



รูปที่ 3.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโหมดที่ 1 (K_I) กับ ค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท่าของอากาศ สำหรับ จุดสูงสุดของรอยร้าวผิวทรงกระบอกในตัวกลางไฟอ์โซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต

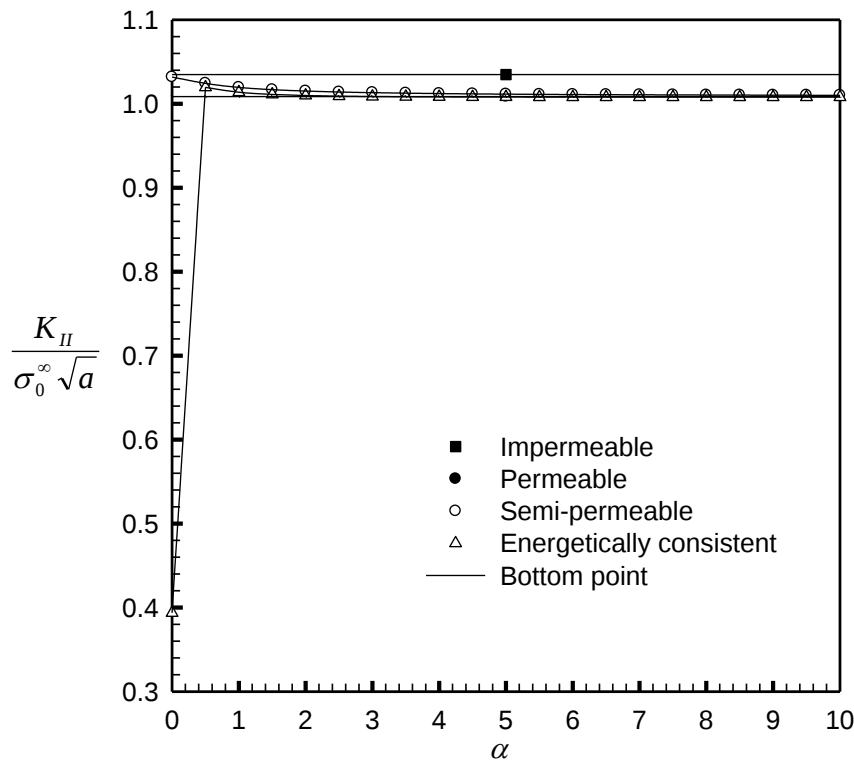
จากรูปที่ 3.12 ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับ 0 เท่าของอากาศ เมื่อนำค่าตัวประกอบความเข้ม K_I ของ เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ มาเปรียบเทียบกับค่าตัวประกอบความเข้มของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้า แบบซึมผ่านไม่ได้ จะพบค่าความแตกต่างกันเท่ากับ 0.01%

จากรูป 3.12 ค่า K_I ของเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงานมีค่าไม่อยู่ในขอบเขตของเงื่อนไขเชิง ไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ และแบบซึมผ่านได้ ทุกค่าของคุณสมบัติการนำไฟฟ้า และมีแนวโน้มเข้าสู่เงื่อนไขเชิงไฟฟ้า แบบซึมผ่านได้ เมื่อค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้ามีค่าเพิ่มมากขึ้น และที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับ 0 เท่า ของอากาศ ค่า K_I ของเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ และแบบกึ่งซึมผ่านได้ จะมีค่าเท่ากัน ส่วนค่า K_I ของเงื่อนไขเชิง ไฟฟ้าแบบซึมผ่านได้ และแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน จะมีค่าไม่เท่ากัน เป็นที่น่าสังเกตว่า K_I ของเงื่อนไขเชิงไฟฟ้า แบบกึ่งซึมผ่านได้ อยู่ในขอบเขตของเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ และแบบซึมผ่านได้ ทุกค่าของคุณสมบัติการ นำไฟฟ้า



รูปที่ 3.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโหมดที่ 2 (K_{II}) กับ ค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท่าของอากาศ สำหรับรอย ร้าวผิวทรงกระบอกในตัวกลางไฟอ์โซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต

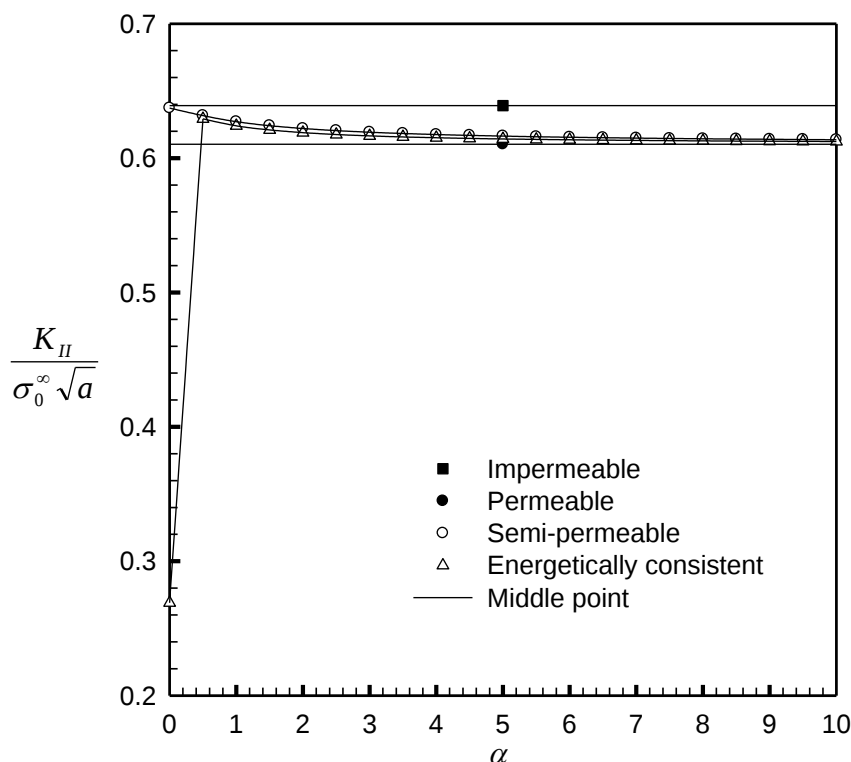
จากรูป 3.13 เป็นรูปที่แสดงถึงค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโหมดที่ 2 (K_{II}) เปรียบเทียบกัน พบว่า ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโหมดที่ 2 (K_{II}) ของ จุดล่างสุด (Bottom point) มากกว่า จุดกึ่งกลาง (Middle point) และจุดสูงสุด (Top point) ตามลำดับ



รูปที่ 3.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโหมดที่ 2 (K_{II}) กับค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท่าของอากาศ สำหรับจุดล่างสุดของรอยร้าวผิวทรงกระบอกในตัวกลางไฟอ์โซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต

จากรูปที่ 3.14 ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับ 0 เท่าของอากาศ เมื่อนำค่าตัวประกอบความเข้ม K_{II} ของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ มาเปรียบเทียบกับค่าตัวประกอบความเข้มของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ จะพบค่าความแตกต่างกันเท่ากับ 0.28%

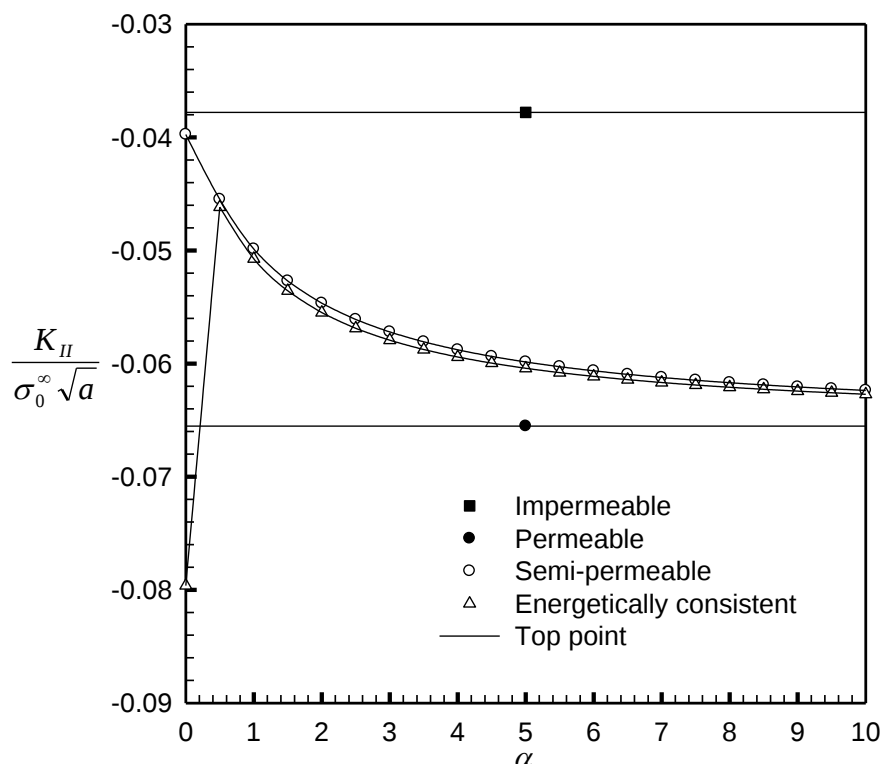
จากรูป 3.14 ค่า K_{II} ของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ และแบบสอดคลองเชิงพลังงาน จะมีค่าอยู่ในขอบเขตของเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ และแบบซึมผ่านได้ ทุกค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้า ยกเว้นที่ค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับ 0 เท่าของอากาศ K_{II} ของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบสอดคลองเชิงพลังงานจะไม่อยู่ในขอบเขตดังกล่าว อย่างไรก็ตามเป็นที่น่าสังเกตว่า เมื่อค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น K_{II} ของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ และแบบสอดคลองเชิงพลังงาน จะมีค่าอยู่เข้าสู่คำตอบของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านได้



รูปที่ 3.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโหมดที่ 2 (K_{II}) กับค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท่าของอากาศ สำหรับจุดกึ่งกลางของรอยร้าวผิวทรงกระบอกในตัวกลางไฟอ์โซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต

จากรูปที่ 3.15 ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับ 0 เท่าของอากาศ เมื่อนำค่าตัวประกอบความเข้ม K_{II} ของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ มาเปรียบเทียบกับค่าตัวประกอบความเข้มของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ จะพบค่าความแตกต่างกันเท่ากับ 0.29%

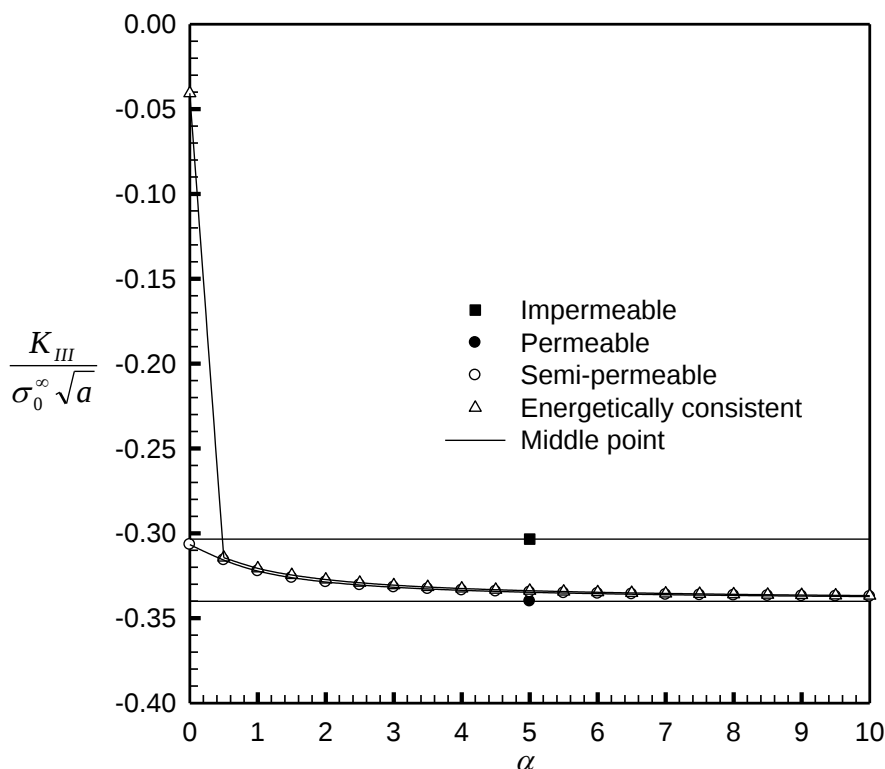
จากรูป 3.15 ค่า K_{II} ของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ และแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน จะมีค่าอยู่ในขอบเขตของเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ และแบบซึมผ่านได้ ทุกค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้า ยกเว้นที่ค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับ 0 เท่าของอากาศ K_{II} ของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงานจะไม่อยู่ในขอบเขตดังกล่าว อย่างไรก็ตามเป็นที่น่าสังเกตว่า เมื่อค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น K_{II} ของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ และแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน จะมีค่าลู่เข้าสู่คำตอบของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านได้



รูปที่ 3.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโหมดที่ 2 (K_{II}) กับค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท่าของอากาศ สำหรับจุดสูงสุดของรอยร้าวผิวทรงกระบอกในตัวกลางโพธิ์โซลิดเล็กทริกไร้ขอบเขต

จากรูปที่ 3.16 ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับ 0 เท่าของอากาศ เมื่อนำค่าตัวประกอบความเข้ม K_{II} ของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ มาเปรียบเทียบกับค่าตัวประกอบความเข้มของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ จะพบค่าความแตกต่างกันเท่ากับ 5.17%

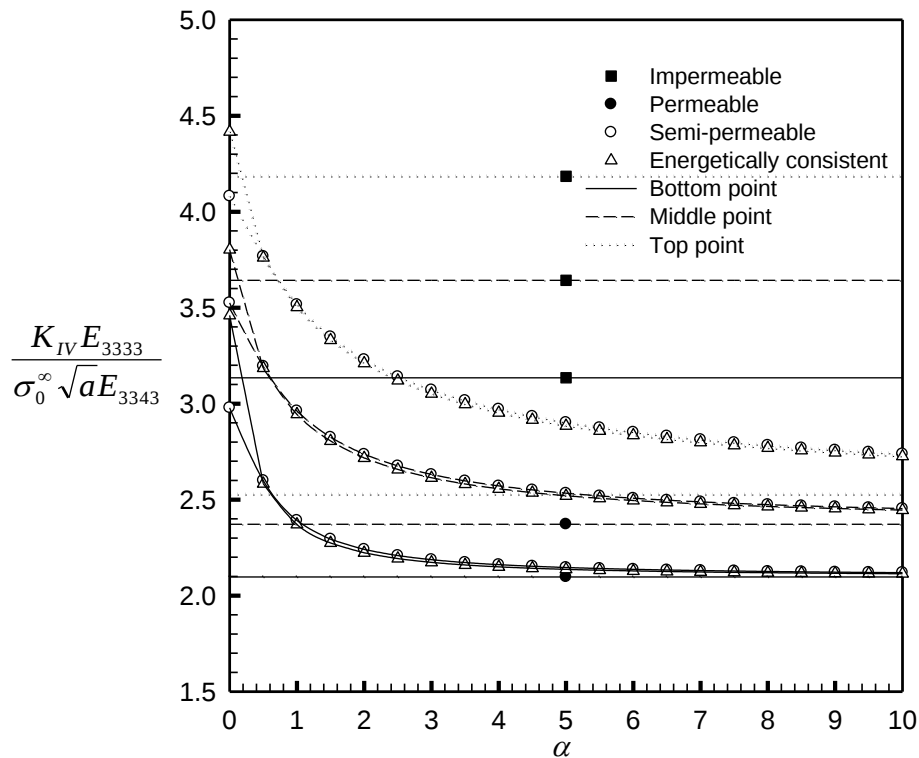
จากรูป 3.16 ค่า K_{II} ของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ และแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน จะมีค่าอยู่ในขอบเขตของเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ และแบบซึมผ่านได้ ทุกค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้า ยกเว้นที่ค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับ 0 เท่าของอากาศ K_{II} ของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงานจะไม่อยู่ในขอบเขตดังกล่าว อย่างไรก็ตามเป็นที่น่าสังเกตว่า เมื่อค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น K_{II} ของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ และแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน จะมีค่าลู่เข้าสู่คำตอบของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านได้



รูปที่ 3.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโหมดที่ 3 (K_{III}) กับค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท่าของอากาศ สำหรับจุดกึ่งกลางของรอยร้าวผิวทรงกระบอกในตัวกลางโพธิ์โซลิดที่หักเหได้

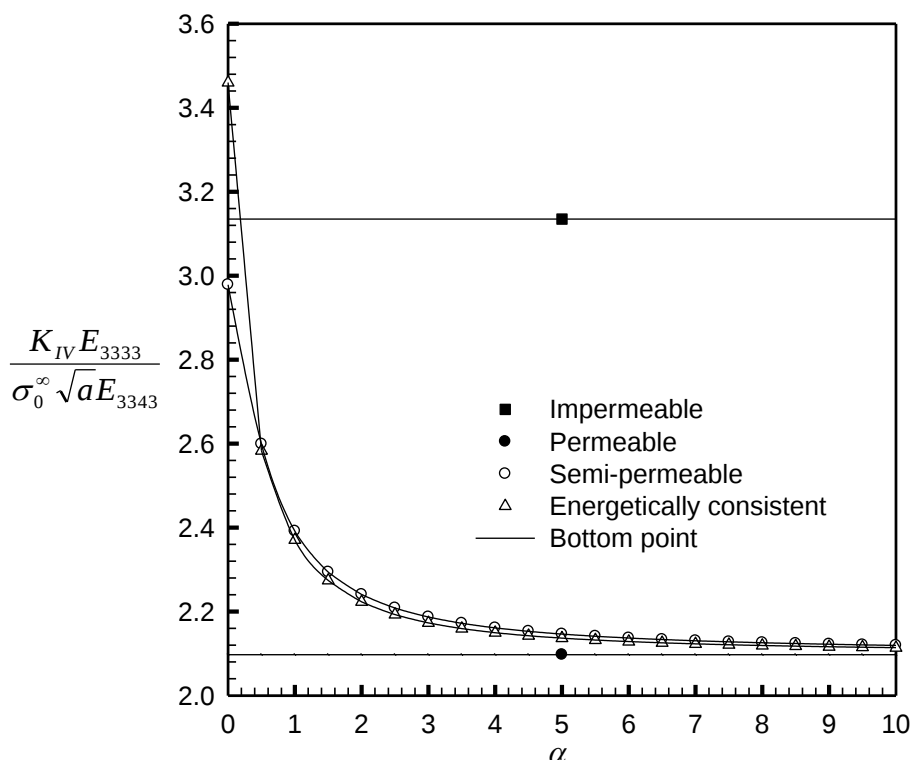
จากรูปที่ 3.17 ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับ 0 เท่าของอากาศ เมื่อนำค่าตัวประกอบความเข้ม K_{III} ของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ มาเปรียบเทียบกับค่าตัวประกอบความเข้มของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ จะพบค่าความแตกต่างกันเท่ากับ 1.07%

จากรูป 3.17 ค่า K_{III} ของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ และแบบสอดคลองเชิงพลังงาน จะมีค่าอยู่ในขอบเขตของเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ และแบบซึมผ่านได้ ทุกค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้า ยกเว้นที่ค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับ 0 เท่าของอากาศ K_{III} ของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบสอดคลองเชิงพลังงาน จะไม่อยู่ในขอบเขตดังกล่าว อย่างไรก็ตามเป็นที่น่าสังเกตว่า เมื่อค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น K_{III} ของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ และแบบสอดคลองเชิงพลังงาน จะมีค่าลู่เข้าสู่คำตอบของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านได้



รูปที่ 3.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโหมดที่ 4 (K_{IV}) กับค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท่าของอากาศ สำหรับรอยร้าวผิวทรงกระบอกในตัวกลางโพธิ์โซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต

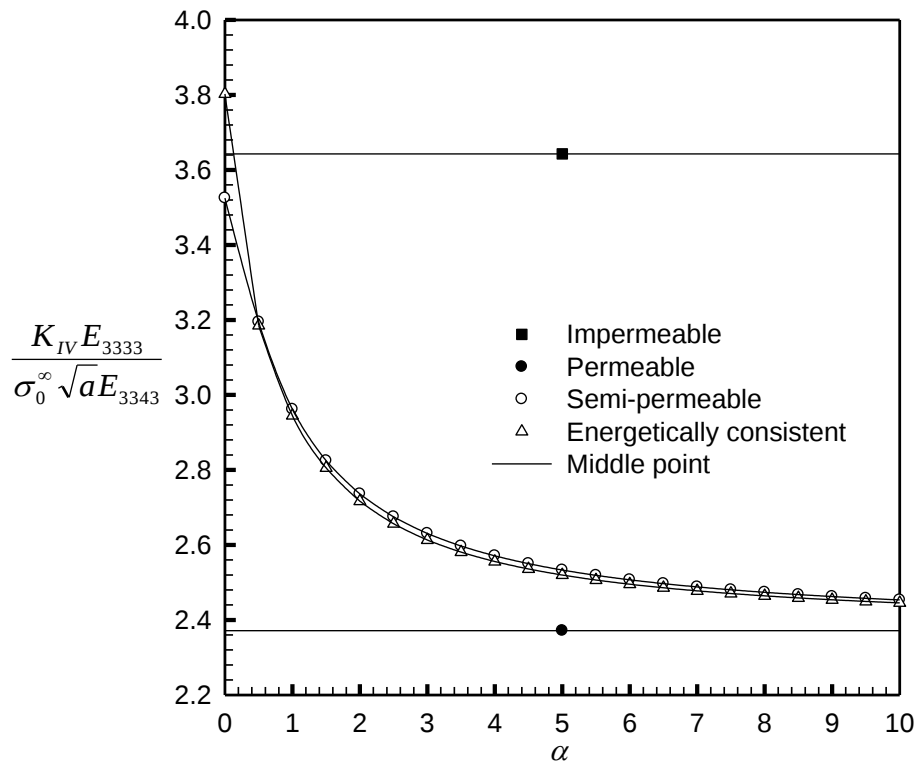
จากรูป 3.18 เป็นรูปที่แสดงถึงค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโหมดที่ 4 (K_{IV}) เปรียบเทียบกันพบว่า ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโหมดที่ 1 (K_{IV}) ของ จุดสูงสุด (Top point) มากกว่า จุดกึ่งกลาง (Middle point) และจุดต่ำสุด (Bottom point) ตามลำดับ



รูปที่ 3.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโหมดที่ 4 (K_{IV}) กับค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท่าของอากาศ สำหรับจุดล่างสุดของรอยร้าวผิวทรงกระบอกในตัวกลางไฟอ์โซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต

จากรูปที่ 3.19 ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับ 0 เท่าของอากาศ เมื่อนำค่าตัวประกอบความเข้ม K_{IV} ของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ มาเปรียบเทียบกับค่าตัวประกอบความเข้มของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ จะพบค่าความแตกต่างกันเท่ากับ 4.99%

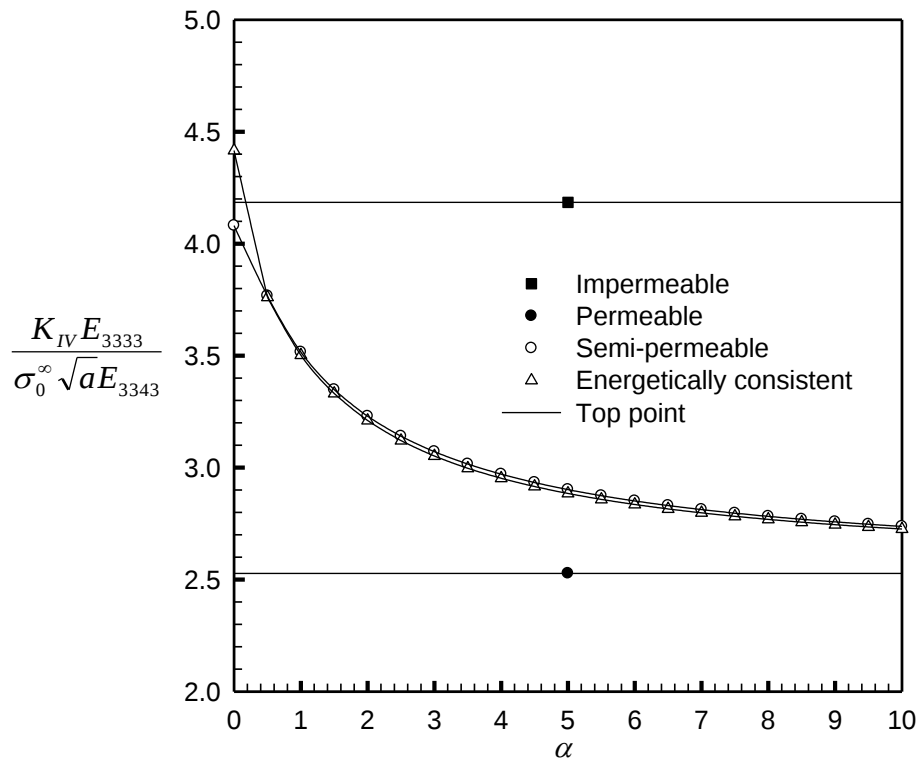
จากรูป 3.19 ค่า K_{IV} ของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ และแบบสอดคลองเชิงพลังงาน จะมีค่าอยู่ในขอบเขตของเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ และแบบซึมผ่านได้ ทุกค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้า ยกเว้นที่ค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับ 0 เท่าของอากาศ K_{IV} ของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบสอดคลองเชิงพลังงาน จะไม่อยู่ในขอบเขตดังกล่าว อย่างไรก็ตามเป็นที่น่าสังเกตว่า เมื่อค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น K_{IV} ของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ และแบบสอดคลองเชิงพลังงาน จะมีค่าลู่เข้าสู่คำตอบของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านได้



รูปที่ 3.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโหมดที่ 4 (K_{IV}) กับค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท่าของอากาศ สำหรับจุดกึ่งกลางของรอยร้าวผิวทรงกระบอกในตัวกลางโพไอโซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต

จากรูปที่ 3.20 ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับ 0 เท่าของอากาศ เมื่อนำค่าตัวประกอบความเข้ม K_{IV} ของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ มาเปรียบเทียบกับค่าตัวประกอบความเข้มของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ จะพบค่าความแตกต่างกันเท่ากับ 3.23%

จากรูป 3.20 ค่า K_{IV} ของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ และแบบสอดคลองเชิงพลังงาน จะมีค่าอยู่ในขอบเขตของเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ และแบบซึมผ่านได้ ทุกค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้า ยกเว้นที่ค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับ 0 เท่าของอากาศ K_{IV} ของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบสอดคลองเชิงพลังงาน จะไม่อยู่ในขอบเขตดังกล่าว อย่างไรก็ตามเป็นที่น่าสังเกตว่า เมื่อค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น K_{IV} ของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ และแบบสอดคลองเชิงพลังงาน จะมีค่าอยู่เข้าสู่คำตอบของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านได้



รูปที่ 3.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโหมดที่ 4 (K_{IV}) กับค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท่าของอากาศ สำหรับจุดสูงสุดของรอยร้าวผิวทรงกระบอกในตัวกลางโพธิ์โซลิดเล็กทริกไร้ขอบเขต

จากรูปที่ 3.21 ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับ 0 เท่าของอากาศ เมื่อนำค่าตัวประกอบความเข้ม K_{IV} ของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ มาเปรียบเทียบกับค่าตัวประกอบความเข้มของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ จะพบค่าความแตกต่างกันเท่ากับ 2.48%

จากรูปที่ 3.21 ค่า K_{IV} ของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ และแบบสอดคลองเชิงพลังงาน จะมีค่าอยู่ในขอบเขตของเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ และแบบซึมผ่านได้ ทุกค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้า ยกเว้นที่ค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับ 0 เท่าของอากาศ K_{IV} ของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบสอดคลองเชิงพลังงานจะไม่อยู่ในขอบเขตดังกล่าว อย่างไรก็ตามเป็นที่น่าสังเกตว่า เมื่อค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น K_{IV} ของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ และแบบสอดคลองเชิงพลังงาน จะมีค่าลู่เข้าสู่ค่าตอบของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านได้

บทที่ 4

สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาอิทธิพลของคุณสมบัติการนำไฟฟ้าที่มีผลต่อพฤติกรรมของค่าตัวประกอบความเข้มภายใน รอยร้าวที่ไม่อยู่ในระนาบ ได้แก่ รอยร้าวผิวทรงกลม และรอยร้าวผิวทรงกระบอกที่มีรัศมี $R=1$ มีความยาว ส่วนโค้ง $2a=2.094$ มีมุม $\theta=60^\circ$ ในตัวกลางไพอีโซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต โดยมีความเค้นระยะไกล $\sigma_0^\infty=50$ เมกะปาสคาล (MPa) และสนามไฟฟ้าระยะไกล $E_0^\infty=0.5$ เมกะโวลต์ต่อเมตร (MV/m) ผลการ คำนวณพบว่าค่าตัวประกอบความเข้มที่เกิดขึ้นที่มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าตัวประกอบความเข้มที่มีค่าไม่เท่ากับศูนย์

ชนิดของรอยร้าว	ค่าตัวประกอบความเข้ม			
	K_I	K_{II}	K_{III}	K_{IV}
รอยร้าววงกลม	✓			✓
รอยร้าวผิวทรงกลม	✓	✓		✓
รอยร้าวผิวทรงกระบอก ที่จุดล่างสุด	✓	✓		✓
รอยร้าวผิวทรงกระบอก ที่จุดกึ่งกลาง	✓	✓	✓	✓
รอยร้าวผิวทรงกระบอก ที่จุดสูงสุด	✓	✓		✓

4.1 ค่าตัวประกอบความเข้ม K_I ของรอยร้าววงกลม รอยร้าวผิวทรงกลม และรอยร้าวผิวทรงกระบอก

4.1.1 รอยร้าววงกลม

- ค่าตัวประกอบความเข้ม K_I ของเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ แบบซึมผ่านได้ และแบบกึ่งซึมผ่านได้จะมีค่าเท่ากัน ทุกค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าว แต่ค่า K_I ของเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงานจะมีค่าน้อยกว่าเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ แบบซึมผ่านได้และแบบกึ่งซึมผ่านได้ โดยจะมีแนวโน้มเข้าสู่เงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านได้ (หรือเงื่อนไขแบบซึมผ่านไม่ได้ หรือเงื่อนไขแบบกึ่งซึมผ่านได้) เมื่อค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้ามีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเป็นที่น่าสังเกตว่า ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับศูนย์เท่าของอากาศ K_I ของทั้ง 4 เงื่อนไขมีค่าเท่ากัน

4.1.2 รอยร้าวผิวทรงกลม

- ค่าตัวประกอบความเข้ม K_I ของเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ แบบซึมผ่านได้ และแบบกึ่งซึมผ่านได้จะมีค่าแตกต่างกัน กล่าวคือ ค่าตัวประกอบความเข้มของเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ และแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน อยู่ในขอบเขตของเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ และแบบซึมผ่านได้ ยกเว้นที่ คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับ 0-0.75 เท่าของอากาศ เงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงานจะไม่อยู่ในขอบเขตของเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ และแบบซึมผ่านได้ และเป็นที่น่าสังเกตว่า ที่คุณสมบัติการนำ

ผลการเปรียบเทียบ K_I ของจุดล่างสุด จุดกึ่งกลาง และจุดสูงสุด ของรอยร้าวผิวทรงกระบอก

- พบว่า K_I ของเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ ทั้ง 3 จุด (จุดล่างสุด จุดกึ่งกลาง และจุดสูงสุด) อยู่ระหว่าง เงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ กับเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านได้ สำหรับทุกค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้า ซึ่งคล้ายกับพฤติกรรม K_I ของรอยร้าวผิวทรงกลม

- ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับ 0 เท่าของอากาศ K_I ของเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้และแบบซึมผ่านไม่ได้ ที่จุดล่างสุดและจุดกึ่งกลาง มีค่าไม่เท่ากัน แต่ที่จุดสูงสุดค่าตอบของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าทั้งสองดังกล่าวมีค่า K_I เท่ากัน

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบพฤติกรรม K_I ของรอยร้าวผิวทรงกระบอก รอยร้าววงกลม และรอยร้าวผิวทรงกลม ภายใต้เงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้

		รอยร้าววงกลม	รอยร้าวผิวทรงกลม
รอยร้าวผิวทรงกระบอก	จุดล่างสุด	-	คล้ายกัน (K_I อยู่ระหว่างเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ กับแบบซึมผ่านได้ สำหรับทุกค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้า)
	จุดกึ่งกลาง	-	คล้ายกัน (K_I อยู่ระหว่างเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ กับแบบซึมผ่านได้ สำหรับทุกค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้า)
	จุดสูงสุด	-	คล้ายกัน (K_I อยู่ระหว่างเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ กับแบบซึมผ่านได้ สำหรับทุกค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้า)

ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบพฤติกรรม K_I ของรอยร้าวผิวทรงกระบอก รอยร้าววงกลม และรอยร้าวผิวทรงกลม ภายใต้เงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน

		รอยร้าววงกลม	รอยร้าวผิวทรงกลม
รอยร้าวผิวทรงกระบอก	จุดล่างสุด	-	คล้ายกัน (K_I จะไม่อยู่ระหว่างเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ กับแบบซึมผ่านได้ เมื่อค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าน้อยๆ แต่เมื่อค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น K_I จะอยู่ระหว่างเงื่อนไขทั้งสองดังกล่าวข้างต้น)
	จุดกึ่งกลาง	-	คล้ายกัน (K_I จะไม่อยู่ระหว่างเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ กับแบบซึมผ่านได้ เมื่อค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าน้อยๆ แต่เมื่อค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น K_I จะอยู่ระหว่างเงื่อนไขทั้งสองดังกล่าวข้างต้น)
	จุดสูงสุด	คล้ายกัน (เมื่อคุณสมบัติการนำไฟฟ้าไม่เท่ากับศูนย์ K_I จะไม่อยู่ระหว่างเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ กับแบบซึมผ่านได้)	-

4.2 ค่าค้ำประกอบความเข้ม K_{II} ของรอยร้าวผิวทรงกลม และรอยร้าวผิวทรงกระบอก

4.2.1 รอยร้าวผิวทรงกลม

- ค่า K_{II} ของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ และแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน อยู่ในขอบเขตของเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ และแบบซึมผ่านได้ ยกเว้นที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับ 0-0.375 เท่าของอากาศ ค่า K_{II} ของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงานจะไม่อยู่ในขอบเขตของเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ และแบบซึมผ่านได้ และมีแนวโน้มเข้าสู่เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านได้ เมื่อค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้ามีค่าเพิ่มมากขึ้น

4.2.2 รอยร้าวผิวทรงกระบอก

- **จุดล่างสุด** มีพฤติกรรมคล้ายรอยร้าวผิวทรงกลมคือ ค่า K_{II} ของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ และแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน อยู่ในขอบเขตของเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ และแบบซึมผ่านได้ แต่มีความแตกต่างกับรอยร้าวผิวทรงกลมคือ ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับ 0 เท่าของอากาศ ค่า K_{II} ของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน จะไม่อยู่ในขอบเขตของเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ และแบบซึมผ่านได้

- **จุดกึ่งกลาง** มีพฤติกรรมคล้ายรอยร้าวผิวทรงกลมคือ ค่า K_{II} ของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ และแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน อยู่ในขอบเขตของเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ และแบบซึมผ่านได้

ผ่านได้ แต่มีความแตกต่างกับรอยร้าวผิวทรงกลมคือ ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับ 0 เท่าของอากาศ ค่า K_{II} ของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน จะไม่อยู่ในขอบเขตของเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ และแบบซึมผ่านได้

- **จุดสูงสุด** มีพฤติกรรมคล้ายรอยร้าวผิวทรงกลมคือ ค่า K_{II} ของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ และแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน อยู่ในขอบเขตของเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ และแบบซึมผ่านได้ แต่มีความแตกต่างกับรอยร้าวผิวทรงกลมคือ ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับ 0 เท่าของอากาศ ค่า K_{II} ของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน จะไม่อยู่ในขอบเขตของเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ และแบบซึมผ่านได้ อย่างไรก็ตาม เป็นที่น่าสังเกตว่า K_{II} ของทั้ง 4 เงื่อนไขเชิงไฟฟ้ามีค่าน้อยมากจนเกือบเป็นศูนย์

ผลการเปรียบเทียบ K_{II} ของจุดล่างสุด จุดกึ่งกลาง และจุดสูงสุด ของรอยร้าวผิวทรงกระบอก

- จากการสังเกตพบว่า K_{II} ของรอยร้าวผิวทรงกระบอก ทั้ง 3 จุด (จุดล่างสุด จุดกึ่งกลาง และจุดสูงสุด) ของเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ อยู่ระหว่าง เงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ กับเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านได้ สำหรับทุกค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้า ซึ่งคล้ายกับพฤติกรรม K_{II} ของรอยร้าวผิวทรงกลม

ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบพฤติกรรม K_{II} ของรอยร้าวผิวทรงกระบอก รอยร้าววงกลม และรอยร้าวผิวทรงกลม ภายใต้เงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้

		รอยร้าววงกลม	รอยร้าวผิวทรงกลม
รอยร้าวผิวทรงกระบอก	จุดล่างสุด	-	คล้ายกัน (K_{II} อยู่ระหว่างเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ กับแบบซึมผ่านได้ สำหรับทุกค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้า)
	จุดกึ่งกลาง	-	คล้ายกัน (K_{II} อยู่ระหว่างเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ กับแบบซึมผ่านได้ สำหรับทุกค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้า)
	จุดสูงสุด	-	คล้ายกัน (K_{II} อยู่ระหว่างเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ กับแบบซึมผ่านได้ สำหรับทุกค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้า) อย่างไรก็ตามเป็นที่น่าสนใจที่ K_{II} ของทั้ง 4 เงื่อนไขเชิงไฟฟ้ามีค่าน้อยมากจนเกือบเป็นศูนย์

ตารางที่ 4.5 การเปรียบเทียบพฤติกรรม K_{II} ของรอยร้าวผิวทรงกระบอก รอยร้าววงกลม และรอยร้าวผิวทรงกลม ภายใต้เงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน

		รอยร้าววงกลม	รอยร้าวผิวทรงกลม
รอยร้าวผิวทรงกระบอก	จุดล่างสุด	-	คล้ายกัน (K_{II} จะไม่อยู่ระหว่างเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ กับแบบซึมผ่านได้ เมื่อค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าน้อยๆ แต่เมื่อค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น K_{II} จะอยู่ระหว่างเงื่อนไขทั้งสองดังกล่าวข้างต้น)
	จุดกึ่งกลาง	-	คล้ายกัน (K_{II} จะไม่อยู่ระหว่างเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ กับแบบซึมผ่านได้ เมื่อค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าน้อยๆ แต่เมื่อค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น K_{II} จะอยู่ระหว่างเงื่อนไขทั้งสองดังกล่าวข้างต้น)
	จุดสูงสุด	-	คล้ายกัน (K_{II} จะไม่อยู่ระหว่างเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ กับแบบซึมผ่านได้ เมื่อค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าน้อยๆ แต่เมื่อค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น K_{II} จะอยู่ระหว่างเงื่อนไขทั้งสองดังกล่าวข้างต้น) อย่างไรก็ตามเป็นที่น่าสังเกตว่า K_{II} ของทั้ง 4 เงื่อนไขเชิงไฟฟ้ามีค่าน้อยมากจนเกือบเป็นศูนย์

4.3 ค่าค้ำประกอบความเข้ม K_{III} ของรอยร้าวผิวทรงกระบอก

4.3.1 รอยร้าวผิวทรงกระบอก

- จุดกึ่งกลาง ค่า K_{III} ของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ และแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน อยู่ในขอบเขตของเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ และแบบซึมผ่านได้ ยกเว้นที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับ 0 เท่าของอากาศ ค่า K_{III} ของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน จะไม่อยู่ในขอบเขตของเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ และแบบซึมผ่านได้

4.4 ค่าค้ำประกอบความเข้ม K_{IV} ของรอยร้าววงกลม รอยร้าวผิวทรงกลม และรอยร้าวผิวทรงกระบอก

4.4.1 รอยร้าววงกลม

- ค่า K_{IV} ของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ และแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน อยู่ในขอบเขตของเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ และแบบซึมผ่านได้ จะมีแนวโน้มเข้าสู่เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านได้ ทุกค่าของคุณสมบัติการนำไฟฟ้า อย่างไรก็ตามเป็นที่น่าสังเกตว่า ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับ 0 เท่าของอากาศ ค่า K_{IV} ของเงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ แบบกึ่งซึมผ่านได้ และแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน จะมีค่า K_{IV} เท่ากัน

- ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับ 0 เท่าของอากาศ K_{IV} ของเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ มีค่าไม่เท่ากับคำตอบของเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้

ตารางที่ 4.6 การเปรียบเทียบพฤติกรรม K_{IV} ของรอยร้าวผิวทรงกระบอก รอยร้าววงกลม และรอยร้าวผิวทรงกลม ภายใต้เงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้

		รอยร้าววงกลม	รอยร้าวผิวทรงกลม
รอยร้าวผิวทรงกระบอก	จุดล่างสุด	-	คล้ายกัน (K_{IV} อยู่ระหว่างเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ กับแบบซึมผ่านได้ สำหรับทุกค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้า)
	จุดกึ่งกลาง	-	คล้ายกัน (K_{IV} อยู่ระหว่างเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ กับแบบซึมผ่านได้ สำหรับทุกค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้า)
	จุดสูงสุด	-	คล้ายกัน (K_{IV} อยู่ระหว่างเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ กับแบบซึมผ่านได้ สำหรับทุกค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้า)

ตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบพฤติกรรม K_{IV} ของรอยร้าวผิวทรงกระบอก รอยร้าววงกลม และรอยร้าวผิวทรงกลม ภายใต้เงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน

		รอยร้าววงกลม	รอยร้าวผิวทรงกลม
รอยร้าวผิวทรงกระบอก	จุดล่างสุด	-	คล้ายกัน (K_{IV} จะไม่อยู่ระหว่างเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ กับแบบซึมผ่านได้ เมื่อค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าน้อยๆ แต่เมื่อค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น K_{IV} จะอยู่ระหว่างเงื่อนไขทั้งสองดังกล่าวข้างต้น)
	จุดกึ่งกลาง	-	คล้ายกัน (K_{IV} จะไม่อยู่ระหว่างเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ กับแบบซึมผ่านได้ เมื่อค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าน้อยๆ แต่เมื่อค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น K_{IV} จะอยู่ระหว่างเงื่อนไขทั้งสองดังกล่าวข้างต้น)
	จุดสูงสุด	-	คล้ายกัน (K_{IV} จะไม่อยู่ระหว่างเงื่อนไขเชิงไฟฟ้าแบบซึมผ่านไม่ได้ กับแบบซึมผ่านได้ เมื่อค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าน้อยๆ แต่เมื่อค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น K_{IV} จะอยู่ระหว่างเงื่อนไขทั้งสองดังกล่าวข้างต้น)

บรรณานุกรม

- Anderson TL (2005) Fracture mechanics: Fundamentals and applications. Taylor & Francis group
- Chansavang B (2015) Influence of geometry, crack-face conditions and loading on intensity factors of cracks in 3D linear piezoelectric media. Master Thesis, Chulalongkorn University, Thailand.
- Chen WQ, Lim CW (2005) 3D point force solution for a permeable penny-shaped crack embedded in an infinite transversely isotropic piezoelectric medium. *Int J Fract* 131:231-246
- Chen WQ, Shioya T, Ding HJ (2000) A penny-shaped crack in piezoelectrics: resolved. *Int J Fract* 105:49-56
- Chiang CR, Weng GJ (2007) Nonlinear behavior and critical state of a penny-shaped dielectric crack in a piezoelectric solid. *J Appl Mech* 74:852-860
- Deeg WFJ (1980) The analysis of dislocation, crack and inclusion problems in piezoelectric solids. Dissertation, Stanford University.
- Hao TH, Shen ZY (1994) A new electric boundary condition of electric fracture mechanics and its applications. *Eng Fract Mech* 47:793-802
- Landis CM (2004) Energetically consistent boundary conditions for electromechanical fracture. *Int J Solids Struct* 41:6291-6315
- Li Q, Ricoeur A, Kuna M (2011) Coulomb traction on a penny-shaped crack in a three dimensional piezoelectric body. *Arch Appl Mech* 81:685-700
- Li XF, Lee KY (2004) Three-dimensional electroelastic analysis of a piezoelectric material with a penny-shaped dielectric crack. *J Appl Mech* 71:866-878
- Parton VZ (1976) Fracture mechanics of piezoelectric materials. *Acta Astron* 3:671-683
- Rungamornrat J, Phongtinnaboot W, and Wijeyewickrema AC (2015) Analysis of cracks in 3D piezoelectric media with various electrical boundary conditions. *Int. J. Fract.* 192:133-153
- Williams ML (1957) On the stress distribution at the base of a stationary crack. *J Appl Mech* 24: 109–114
- Xu XL, Rajapakse RKND (2001) On a Plane Crack in Piezoelectric Solids. *Int J Solids Struct* 38:7643-7658

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

กราฟและผลการคำนวณค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น

1. ค่าตัวประกอบความเข้มใช้ประกอบกราฟในบทที่ 3

ในภาคผนวกนี้จะแสดงผลการคำนวณตัวประกอบความเข้มในรอยร้าววงกลม รอยร้าวผิวทรงกลม และ รอยร้าวผิวทรงกระบอก เพื่อใช้ดูควบคู่กันไปกับกราฟในบทที่ 3 และทำให้เข้าใจกราฟได้ง่ายขึ้น

ตารางที่ ก.1 ตารางแสดงค่าผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact solutions) ของนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้ม (Normalized intensity factor) $K_I / \sigma_0^\infty \sqrt{a}$ สำหรับรอยร้าววงกลมในตัวกลาง โพธิ์โซอิลิกทริกไรซ์ขอบเขต ใช้ประกอบรูปที่ 3.2

จำนวนเท่าของ คุณสมบัติ การนำไฟฟ้าของ อากาศ (α)	$K_I / \sigma_0^\infty \sqrt{a}$			
	เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้า			
	แบบซึมผ่านไม่ได้	แบบซึมผ่านได้	แบบกึ่งซึมผ่านได้	แบบสอดคล้องเชิงพลังงาน
0	1.102657791	1.102657791	1.102657791	1.102657791
0.5	1.102657791	1.102657791	1.102657791	1.093698038
1	1.102657791	1.102657791	1.102657791	1.090381265
1.5	1.102657791	1.102657791	1.102657791	1.089426696
2	1.102657791	1.102657791	1.102657791	1.089458132
2.5	1.102657791	1.102657791	1.102657791	1.089894992
3	1.102657791	1.102657791	1.102657791	1.090484449
3.5	1.102657791	1.102657791	1.102657791	1.091113569
4	1.102657791	1.102657791	1.102657791	1.091731785
4.5	1.102657791	1.102657791	1.102657791	1.092317369
5	1.102657791	1.102657791	1.102657791	1.092862258
5.5	1.102657791	1.102657791	1.102657791	1.093364899
6	1.102657791	1.102657791	1.102657791	1.093826772
6.5	1.102657791	1.102657791	1.102657791	1.094250673
7	1.102657791	1.102657791	1.102657791	1.09463985
7.5	1.102657791	1.102657791	1.102657791	1.094997581
8	1.102657791	1.102657791	1.102657791	1.095326973
8.5	1.102657791	1.102657791	1.102657791	1.095630881
9	1.102657791	1.102657791	1.102657791	1.095911878
9.5	1.102657791	1.102657791	1.102657791	1.096172263
10	1.102657791	1.102657791	1.102657791	1.096414079

หมายเหตุ : (1) ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับศูนย์เท่าของอากาศ ($\alpha = 0$) ในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ ใช้ $\alpha = 0 \times 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ และในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน ใช้ $\alpha = 10^{-12} \times 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$

ตารางที่ ก.2 ผลการคำนวณนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้ม $K_I/\sigma_0^\infty \sqrt{a}$ สำหรับรอยร้าว วงกลม ใช้ประกอบรูปที่ 3.2

จำนวนเท่าของ คุณสมบัติ การนำไฟฟ้าของ อากาศ (α)	$K_I/\sigma_0^\infty \sqrt{a}$			
	เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้า			
	แบบซึมผ่านไม่ได้	แบบซึมผ่านได้	แบบกึ่งซึมผ่านได้	แบบสอดคล้องเชิงพลังงาน
0	1.103250999	1.1032552	1.103250674	NaN
0.5	1.103250999	1.1032552	1.103251591	NaN
1	1.103250999	1.1032552	1.103252375	1.090966238
1.5	1.103250999	1.1032552	1.103252916	1.090010305
2	1.103250999	1.1032552	1.103253301	1.090043932
2.5	1.103250999	1.1032552	1.103253596	1.090483976
3	1.103250999	1.1032552	1.103253825	1.091072574
3.5	1.103250999	1.1032552	1.103254008	1.091703244
4	1.103250999	1.1032552	1.103254158	1.092321785
4.5	1.103250999	1.1032552	1.103254282	1.092907379
5	1.103250999	1.1032552	1.103254387	1.093454573
5.5	1.103250999	1.1032552	1.103254478	1.093956982
6	1.103250999	1.1032552	1.103254556	1.094418824
6.5	1.103250999	1.1032552	1.103254624	1.094842807
7	1.103250999	1.1032552	1.103254684	1.095232127
7.5	1.103250999	1.1032552	1.103254737	1.095590031
8	1.103250999	1.1032552	1.103254784	1.095919607
8.5	1.103250999	1.1032552	1.103254827	1.09622354
9	1.103250999	1.1032552	1.103254866	1.096504772
9.5	1.103250999	1.1032552	1.103254901	1.096765224
10	1.103250999	1.1032552	1.103254933	1.097007239

หมายเหตุ : (1) NaN ย่อมาจาก Not a Number

(2) ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับศูนย์เท่าของอากาศ ($\alpha = 0$) ในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ ใช้ $\alpha = 0.1 \times 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ และในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน ใช้ $\alpha = 0.1 \times 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$

ตารางที่ ก.3 ตารางแสดงค่าผลเฉลยแน่นอนตรง (Exact solutions) ของนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้ม $K_{IV}/\sigma_0^\infty \sqrt{a}$ สำหรับรอยร้าววงกลมในตัวกลางโพธิโซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต ใช้ประกอบรูปที่ 3.3

จำนวนเท่าของ คุณสมบัติ การนำไฟฟ้าของ อากาศ (α)	$K_{IV}/\sigma_0^\infty \sqrt{a}$			
	เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้า			
	แบบซึมผ่านไม่ได้	แบบซึมผ่านได้	แบบกึ่งซึมผ่านได้	แบบสอดคล้องเชิงพลังงาน
0	3.740072319	2.281396723	3.740072319	3.740072319
0.5	3.740072319	2.281396723	3.403529286	3.397656051
1	3.740072319	2.281396723	3.186023589	3.173234132
1.5	3.740072319	2.281396723	3.036324808	3.019355113
2	3.740072319	2.281396723	2.927879205	2.908849012
2.5	3.740072319	2.281396723	2.846058287	2.826244602
3	3.740072319	2.281396723	2.782291841	2.762414435
3.5	3.740072319	2.281396723	2.731278254	2.71172999
4	3.740072319	2.281396723	2.689582179	2.670569157
4.5	3.740072319	2.281396723	2.65488842	2.636510304
5	3.740072319	2.281396723	2.625583804	2.60787951
5.5	3.740072319	2.281396723	2.600511818	2.583485718
6	3.740072319	2.281396723	2.578822737	2.562459867
6.5	3.740072319	2.281396723	2.559878791	2.544153775
7	3.740072319	2.281396723	2.543192279	2.528074601
7.5	3.740072319	2.281396723	2.528384079	2.513841195
8	3.740072319	2.281396723	2.515155138	2.501154308
8.5	3.740072319	2.281396723	2.503266468	2.489775809
9	3.740072319	2.281396723	2.492524839	2.479513895
9.5	3.740072319	2.281396723	2.482772355	2.470212389
10	3.740072319	2.281396723	2.473878753	2.461742858

หมายเหตุ : (1) ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับศูนย์เท่าของอากาศ ($\alpha = 0$) ในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ ใช้ $\alpha = 0 \times 8.85 \times 10^{-12}$ F/m และในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน ใช้ $\alpha = 10^{-12} \times 8.85 \times 10^{-12}$ F/m

ตารางที่ ก.4 ผลการคำนวณนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้ม $K_{IV}/\sigma_0^\infty \sqrt{a}$ สำหรับรอยร้าว วงกลม ใช้ประกอบรูปที่ 3.3

จำนวนเท่าของ คุณสมบัติ การนำไฟฟ้าของ อากาศ (α)	$K_{IV}/\sigma_0^\infty \sqrt{a}$			
	เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้า			
	แบบซึมผ่านไม่ได้	แบบซึมผ่านได้	แบบกึ่งซึมผ่านได้	แบบสอดคล้องเชิงพลังงาน
0	3.742228835	2.28263276	3.66148461	NaN
0.5	3.742228835	2.28263276	3.405992276	NaN
1	3.742228835	2.28263276	3.187633984	3.174994418
1.5	3.742228835	2.28263276	3.036933677	3.020975684
2	3.742228835	2.28263276	2.929613718	2.910442764
2.5	3.742228835	2.28263276	2.847625206	2.827874028
3	3.742228835	2.28263276	2.783845933	2.763950447
3.5	3.742228835	2.28263276	2.732835532	2.713276287
4	3.742228835	2.28263276	2.691105151	2.672082322
4.5	3.742228835	2.28263276	2.656509604	2.637978507
5	3.742228835	2.28263276	2.627143861	2.609437079
5.5	3.742228835	2.28263276	2.601965386	2.584996662
6	3.742228835	2.28263276	2.580305039	2.563936408
6.5	3.742228835	2.28263276	2.561336318	2.545604598
7	3.742228835	2.28263276	2.544630666	2.529505734
7.5	3.742228835	2.28263276	2.529807251	2.515256839
8	3.742228835	2.28263276	2.516548046	2.502557435
8.5	3.742228835	2.28263276	2.504654661	2.491154302
9	3.742228835	2.28263276	2.493890961	2.480888008
9.5	3.742228835	2.28263276	2.484134103	2.471567935
10	3.742228835	2.28263276	2.475236698	2.463094371

หมายเหตุ : (1) NaN ย่อมาจาก Not a Number

(2) ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับศูนย์เท่าของอากาศ ($\alpha = 0$) ในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ ใช้ $\alpha = 0.1 \times 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ และในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน ใช้ $\alpha = 0.1 \times 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$

ตารางที่ ก.5 ผลการคำนวณนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้ม $K_I/\sigma_0^\infty \sqrt{a}$ สำหรับรอยร้าวผิวทรงกลม ใช้ประกอบรูปที่ 3.5

จำนวนเท่าของ คุณสมบัติ การนำไฟฟ้าของ อากาศ (α)	$K_I/\sigma_0^\infty \sqrt{a}$			
	เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้า			
	แบบซึมผ่านไม่ได้	แบบซึมผ่านได้	แบบกึ่งซึมผ่านได้	แบบสอดคล้องเชิงพลังงาน
0	0.125354482	0.168764032	0.130660524	-0.230911616
0.125	0.125354482	0.168764032	0.131806722	NaN
0.25	0.125354482	0.168764032	0.13668893	NaN
0.375	0.125354482	0.168764032	0.140474898	NaN
0.5	0.125354482	0.168764032	0.143480585	0.11469896
0.75	0.125354482	0.168764032	0.147929901	0.122663217
1	0.125354482	0.168764032	0.151054024	0.129666827
1.5	0.125354482	0.168764032	0.155140879	0.139534268
2	0.125354482	0.168764032	0.157693472	0.145700743
2.5	0.125354482	0.168764032	0.159439087	0.149804563
3	0.125354482	0.168764032	0.160708383	0.152702351
3.5	0.125354482	0.168764032	0.161673048	0.154847149
4	0.125354482	0.168764032	0.162431049	0.1564946
4.5	0.125354482	0.168764032	0.163042487	0.157797522
5	0.125354482	0.168764032	0.163546143	0.158852971
5.5	0.125354482	0.168764032	0.163968175	0.159724512
6	0.125354482	0.168764032	0.164327016	0.160456276
6.5	0.125354482	0.168764032	0.164635855	0.161079109
7	0.125354482	0.168764032	0.164904498	0.161615602
7.5	0.125354482	0.168764032	0.165140259	0.162082336
8	0.125354482	0.168764032	0.165348855	0.162492088
8.5	0.125354482	0.168764032	0.165534738	0.162854682
9	0.125354482	0.168764032	0.165701379	0.163177774
9.5	0.125354482	0.168764032	0.165851701	0.163467419
10	0.125354482	0.168764032	0.16598795	0.163728636

หมายเหตุ : (1) NaN ย่อมาจาก Not a Number

- (2) ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับศูนย์เท่าของอากาศ ($\alpha = 0$) ในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ ใช้ $\alpha = 0.1 \times 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ และในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน ใช้ $\alpha = 0.0001 \times 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$

ตารางที่ ก.6 ผลการคำนวณนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้ม $K_{II}/\sigma_0\sqrt{a}$ สำหรับรอยร้าวผิวทรงกลม ใช้ประกอบรูปที่ 3.6

จำนวนเท่าของ คุณสมบัติ การนำไฟฟ้าของ อากาศ (α)	$K_{II}/\sigma_0\sqrt{a}$			
	เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้า			
	แบบซึมผ่านไม่ได้	แบบซึมผ่านได้	แบบกึ่งซึมผ่านได้	แบบสอดคล้องเชิงพลังงาน
0	0.799018317	0.773693922	0.795940692	0.261215335
0.125	0.799018317	0.773693922	0.795275618	NaN
0.25	0.799018317	0.773693922	0.792441372	NaN
0.375	0.799018317	0.773693922	0.790241717	0.766070127
0.5	0.799018317	0.773693922	0.788493943	0.781602415
0.75	0.799018317	0.773693922	0.78590388	0.778890791
1	0.799018317	0.773693922	0.784082727	0.777361654
1.5	0.799018317	0.773693922	0.781696492	0.775783487
2	0.799018317	0.773693922	0.780203397	0.775023617
2.5	0.799018317	0.773693922	0.779180977	0.774599986
3	0.799018317	0.773693922	0.778436728	0.774340502
3.5	0.799018317	0.773693922	0.777870632	0.774170744
4	0.799018317	0.773693922	0.77742552	0.774054077
4.5	0.799018317	0.773693922	0.777066253	0.773970876
5	0.799018317	0.773693922	0.776770159	0.773909671
5.5	0.799018317	0.773693922	0.776521975	0.773863626
6	0.799018317	0.773693922	0.776310856	0.773828187
6.5	0.799018317	0.773693922	0.776129101	0.773800489
7	0.799018317	0.773693922	0.775970942	0.77377848
7.5	0.799018317	0.773693922	0.775832122	0.773760846
8	0.799018317	0.773693922	0.775709272	0.773746539
8.5	0.799018317	0.773693922	0.775599774	0.773734805
9	0.799018317	0.773693922	0.775501607	0.773725111
9.5	0.799018317	0.773693922	0.775413025	0.773717083
10	0.799018317	0.773693922	0.775332723	0.773710324

หมายเหตุ : (1) NaN ย่อมาจาก Not a Number

(2) ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับศูนย์เท่าของอากาศ ($\alpha = 0$) ในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ ใช้ $\alpha = 0.1 \times 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ และในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน ใช้ $\alpha = 0.0001 \times 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$

ตารางที่ ก.7 ผลการคำนวณนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้ม $K_{IV}E_{3333}/\sigma_0^\infty \sqrt{a}E_{3343}$ สำหรับ รอยร้าวผิวทรงกลม ใช้ประกอบรูปที่ 3.7

จำนวนเท่าของ คุณสมบัติ การนำไฟฟ้าของ อากาศ (α)	$K_{IV}E_{3333}/\sigma_0^\infty \sqrt{a}E_{3343}$			
	เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้า			
	แบบซึมผ่านไม่ได้	แบบซึมผ่านได้	แบบกึ่งซึมผ่านได้	แบบสอดคล้องเชิงพลังงาน
0	2.790791184	1.560770081	2.567615261	3.22591403
0.125	2.790791184	1.560770081	2.520877884	NaN
0.25	2.790791184	1.560770081	2.329103369	NaN
0.375	2.790791184	1.560770081	2.190086137	NaN
0.5	2.790791184	1.560770081	2.08697682	2.046817873
0.75	2.790791184	1.560770081	1.94806446	1.906749815
1	2.790791184	1.560770081	1.861501634	1.823671069
1.5	2.790791184	1.560770081	1.763243223	1.733362004
2	2.790791184	1.560770081	1.710869665	1.686896269
2.5	2.790791184	1.560770081	1.679073441	1.6592381
3	2.790791184	1.560770081	1.65798835	1.641124496
3.5	2.790791184	1.560770081	1.643085271	1.628435912
4	2.790791184	1.560770081	1.632033976	1.619104113
4.5	2.790791184	1.560770081	1.623545892	1.611967709
5	2.790791184	1.560770081	1.61683299	1.606355223
5.5	2.790791184	1.560770081	1.611389668	1.601821172
6	2.790791184	1.560770081	1.60689909	1.598095122
6.5	2.790791184	1.560770081	1.603131234	1.594978523
7	2.790791184	1.560770081	1.599928697	1.592337557
7.5	2.790791184	1.560770081	1.597169508	1.590067322
8	2.790791184	1.560770081	1.594770255	1.588097689
8.5	2.790791184	1.560770081	1.592665726	1.58637372
9	2.790791184	1.560770081	1.590803409	1.584852155
9.5	2.790791184	1.560770081	1.589146373	1.583498321
10	2.790791184	1.560770081	1.587661637	1.582288445

หมายเหตุ : (1) NaN ย่อมาจาก Not a Number

(2) ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับศูนย์เท่าของอากาศ ($\alpha = 0$) ในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ ใช้ $\alpha = 0.1 \times 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ และในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน ใช้ $\alpha = 0.0001 \times 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$

ตารางที่ ก.8 ผลการคำนวณนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้ม $K_I/\sigma_0^\infty \sqrt{a}$ สำหรับจุดล่างสุดของรอยร้าวผิวทรงกระบอก ใช้ประกอบรูปที่ 3.9 และ 3.10

จำนวนเท่าของ คุณสมบัติ การนำไฟฟ้าของ อากาศ (α)	$K_I/\sigma_0^\infty \sqrt{a}$			
	เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้า			
	แบบซึมผ่านไม่ได้	แบบซึมผ่านได้	แบบกึ่งซึมผ่านได้	แบบสอดคล้องเชิงพลังงาน
0	0.268553169	0.280714644	0.269549393	-0.250337241
0.5	0.268553169	0.280714644	0.272368946	0.257539359
1	0.268553169	0.280714644	0.274411667	0.261600012
1.5	0.268553169	0.280714644	0.275664139	0.265606764
2	0.268553169	0.280714644	0.276504699	0.26847552
2.5	0.268553169	0.280714644	0.277107573	0.270511036
3	0.268553169	0.280714644	0.277560315	0.271999523
3.5	0.268553169	0.280714644	0.277912571	0.273124658
4	0.268553169	0.280714644	0.278194417	0.274000451
4.5	0.268553169	0.280714644	0.278424811	0.274699703
5	0.268553169	0.280714644	0.278616782	0.275269531
5.5	0.268553169	0.280714644	0.278779198	0.275742603
6	0.268553169	0.280714644	0.278918276	0.276141013
6.5	0.268553169	0.280714644	0.279038684	0.27648104
7	0.268553169	0.280714644	0.279144051	0.276774429
7.5	0.268553169	0.280714644	0.279236976	0.277030224
8	0.268553169	0.280714644	0.279319536	0.277255092
8.5	0.268553169	0.280714644	0.279393373	0.277454283
9	0.268553169	0.280714644	0.279459849	0.277631996
9.5	0.268553169	0.280714644	0.279519918	0.277791391
10	0.268553169	0.280714644	0.279574506	0.2779352

หมายเหตุ : (1) ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับศูนย์เท่าของอากาศ ($\alpha = 0$) ในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ ใช้ $\alpha = 0.1 \times 8.85 \times 10^{-12}$ F/m และในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน ใช้ $\alpha = 0.0001 \times 8.85 \times 10^{-12}$ F/m

ตารางที่ ก.9 ผลการคำนวณนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้ม $K_I/\sigma_0^\infty \sqrt{a}$ สำหรับจุดกึ่งกลางของรอยร้าวผิวทรงกระบอก ใช้ประกอบรูปที่ 3.9 และ 3.11

จำนวนเท่าของ คุณสมบัติ การนำไฟฟ้าของ อากาศ (α)	$K_I/\sigma_0^\infty \sqrt{a}$			
	เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้า			
	แบบซึมผ่านไม่ได้	แบบซึมผ่านได้	แบบกึ่งซึมผ่านได้	แบบสอดคล้องเชิงพลังงาน
0	0.685361699	0.69391276	0.686034624	-0.413037035
0.5	0.685361699	0.69391276	0.687970857	0.676956903
1	0.685361699	0.69391276	0.689406418	0.676836917
1.5	0.685361699	0.69391276	0.690298832	0.678389136
2	0.685361699	0.69391276	0.690901596	0.680080489
2.5	0.685361699	0.69391276	0.691335105	0.681579816
3	0.685361699	0.69391276	0.691660952	0.682847063
3.5	0.685361699	0.69391276	0.691914472	0.683908341
4	0.685361699	0.69391276	0.692117184	0.684800258
4.5	0.685361699	0.69391276	0.692282814	0.685555628
5	0.685361699	0.69391276	0.692420669	0.686201221
5.5	0.685361699	0.69391276	0.692537173	0.686757845
6	0.685361699	0.69391276	0.692636879	0.687242064
6.5	0.685361699	0.69391276	0.692723161	0.687666585
7	0.685361699	0.69391276	0.692798558	0.68804151
7.5	0.685361699	0.69391276	0.692865002	0.68837481
8	0.685361699	0.69391276	0.692923994	0.688672932
8.5	0.685361699	0.69391276	0.692976717	0.688941067
9	0.685361699	0.69391276	0.693024124	0.689183454
9.5	0.685361699	0.69391276	0.69306697	0.689403581
10	0.685361699	0.69391276	0.693105883	0.689604344

หมายเหตุ : (1) ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับศูนย์เท่าของอากาศ ($\alpha = 0$) ในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ ใช้ $\alpha = 0.1 \times 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ และในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน ใช้ $\alpha = 0.0001 \times 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$

ตารางที่ ก.10 ผลการคำนวณนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้ม $K_I/\sigma_0^\infty \sqrt{a}$ สำหรับจุดสูงสุดของรอยร้าวผิวทรงกระบอก ใช้ประกอบรูปที่ 3.9 และ 3.12

จำนวนเท่าของ คุณสมบัติ การนำไฟฟ้าของ อากาศ (α)	$K_I/\sigma_0^\infty \sqrt{a}$			
	เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้า			
	แบบซึมผ่านไม่ได้	แบบซึมผ่านได้	แบบกึ่งซึมผ่านได้	แบบสอดคล้องเชิงพลังงาน
0	1.223364971	1.221576786	1.223213086	-0.673577475
0.5	1.223364971	1.221576786	1.222780781	1.21286559
1	1.223364971	1.221576786	1.222466884	1.209513256
1.5	1.223364971	1.221576786	1.222275858	1.208681629
2	1.223364971	1.221576786	1.222149221	1.20879773
2.5	1.223364971	1.221576786	1.222059644	1.209273902
3	1.223364971	1.221576786	1.221993311	1.209873847
3.5	1.223364971	1.221576786	1.22194239	1.210497263
4	1.223364971	1.221576786	1.221902184	1.211101197
4.5	1.223364971	1.221576786	1.221869667	1.211668778
5	1.223364971	1.221576786	1.221842888	1.212193958
5.5	1.223364971	1.221576786	1.221820475	1.212676791
6	1.223364971	1.221576786	1.221801446	1.213119505
6.5	1.223364971	1.221576786	1.221785102	1.213525159
7	1.223364971	1.221576786	1.221770925	1.213897191
7.5	1.223364971	1.221576786	1.221758515	1.214238874
8	1.223364971	1.221576786	1.221747566	1.214553355
8.5	1.223364971	1.221576786	1.221737837	1.214843428
9	1.223364971	1.221576786	1.221729136	1.215111555
9.5	1.223364971	1.221576786	1.221721314	1.215360058
10	1.223364971	1.221576786	1.221714242	1.215590835

หมายเหตุ : (1) ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับศูนย์เท่าของอากาศ ($\alpha = 0$) ในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ ใช้ $\alpha = 0.1 \times 8.85 \times 10^{-12}$ F/m และในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน ใช้ $\alpha = 0.0001 \times 8.85 \times 10^{-12}$ F/m

ตารางที่ ก.11 ผลการคำนวณนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้ม $K_{II}/\sigma_0^\infty \sqrt{a}$ สำหรับค่าต่ำสุดของรอยร้าวผิวทรงกระบอก ใช้ประกอบรูปที่ 3.13 และ 3.14

จำนวนเท่าของ คุณสมบัติ การนำไฟฟ้าของ อากาศ (α)	$K_{II}/\sigma_0^\infty \sqrt{a}$			
	เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้า			
	แบบซึมผ่านไม่ได้	แบบซึมผ่านได้	แบบกึ่งซึมผ่านได้	แบบสอดคล้องเชิงพลังงาน
0	1.034766362	1.008545811	1.031872249	0.393705264
0.5	1.034766362	1.008545811	1.024278407	1.019550793
1	1.034766362	1.008545811	1.01943027	1.013738442
1.5	1.034766362	1.008545811	1.016763786	1.011132443
2	1.034766362	1.008545811	1.01511088	1.009803753
2.5	1.034766362	1.008545811	1.013994195	1.009064567
3	1.034766362	1.008545811	1.013193754	1.008627857
3.5	1.034766362	1.008545811	1.012593749	1.008359131
4	1.034766362	1.008545811	1.012127995	1.008189598
4.5	1.034766362	1.008545811	1.011757015	1.008080758
5	1.034766362	1.008545811	1.011454405	1.008011345
5.5	1.034766362	1.008545811	1.011202982	1.007967226
6	1.034766362	1.008545811	1.010991202	1.007940579
6.5	1.034766362	1.008545811	1.010810509	1.007925731
7	1.034766362	1.008545811	1.010654252	1.007919216
7.5	1.034766362	1.008545811	1.010517966	1.007918214
8	1.034766362	1.008545811	1.010398075	1.007921205
8.5	1.034766362	1.008545811	1.010291809	1.007926987
9	1.034766362	1.008545811	1.010196828	1.007934556
9.5	1.034766362	1.008545811	1.010111713	1.007943617
10	1.034766362	1.008545811	1.010034885	1.007953556

หมายเหตุ : (1) ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับศูนย์เท่าของอากาศ ($\alpha = 0$) ในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ ใช้ $\alpha = 0.1 \times 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ และในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน ใช้ $\alpha = 0.0001 \times 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$

ตารางที่ ก.12 ผลการคำนวณนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้ม $K_{II}/\sigma_0^\infty \sqrt{a}$ สำหรับจุดกึ่งกลางของรอยร้าวผิวทรงกระบอก ใช้ประกอบรูปที่ 3.13 และ 3.15

จำนวนเท่าของ คุณสมบัติ การนำไฟฟ้าของ อากาศ (α)	$K_{II}/\sigma_0^\infty \sqrt{a}$			
	เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้า			
	แบบซึมผ่านไม่ได้	แบบซึมผ่านได้	แบบกึ่งซึมผ่านได้	แบบสอดคล้องเชิงพลังงาน
0	0.639112601	0.610351247	0.637262642	0.269017133
0.5	0.639112601	0.610351247	0.631644136	0.629226883
1	0.639112601	0.610351247	0.627130234	0.624050767
1.5	0.639112601	0.610351247	0.624144405	0.620974415
2	0.639112601	0.610351247	0.622040834	0.618970382
2.5	0.639112601	0.610351247	0.620481858	0.617573946
3	0.639112601	0.610351247	0.619283742	0.61655144
3.5	0.639112601	0.610351247	0.618335468	0.615773583
4	0.639112601	0.610351247	0.617567609	0.615163199
4.5	0.639112601	0.610351247	0.616932227	0.614673363
5	0.639112601	0.610351247	0.616399204	0.614271062
5.5	0.639112601	0.610351247	0.615945749	0.61393628
6	0.639112601	0.610351247	0.615554777	0.61365269
6.5	0.639112601	0.610351247	0.615214282	0.613409836
7	0.639112601	0.610351247	0.614915661	0.613199418
7.5	0.639112601	0.610351247	0.614651426	0.613015851
8	0.639112601	0.610351247	0.614415981	0.612854164
8.5	0.639112601	0.610351247	0.61420488	0.612710704
9	0.639112601	0.610351247	0.614014695	0.612582736
9.5	0.639112601	0.610351247	0.613842191	0.61246762
10	0.639112601	0.610351247	0.613685152	0.612363661

หมายเหตุ : (1) ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับศูนย์เท่าของอากาศ ($\alpha = 0$) ในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ ใช้ $\alpha = 0.1 \times 8.85 \times 10^{-12}$ F/m และในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน ใช้ $\alpha = 0.0001 \times 8.85 \times 10^{-12}$ F/m

ตารางที่ ก.13 ผลการคำนวณนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้ม $K_{II}/\sigma_0^\infty \sqrt{a}$ สำหรับจุดสูงสุดของรอยร้าวผิวทรงกระบอก ใช้ประกอบรูปที่ 3.13 และ 3.16

จำนวนเท่าของ คุณสมบัติ การนำไฟฟ้าของ อากาศ (α)	$K_{II}/\sigma_0^\infty \sqrt{a}$			
	เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้า			
	แบบซึมผ่านไม่ได้	แบบซึมผ่านได้	แบบกึ่งซึมผ่านได้	แบบสอดคล้องเชิงพลังงาน
0	-0.037798316	-0.065523779	-0.039751808	-0.079619421
0.5	-0.037798316	-0.065523779	-0.045480362	-0.046155669
1	-0.037798316	-0.065523779	-0.049873423	-0.050730065
1.5	-0.037798316	-0.065523779	-0.052696133	-0.053565975
2	-0.037798316	-0.065523779	-0.054655395	-0.055489926
2.5	-0.037798316	-0.065523779	-0.05609644	-0.056879571
3	-0.037798316	-0.065523779	-0.057199978	-0.057930238
3.5	-0.037798316	-0.065523779	-0.058072061	-0.058752534
4	-0.037798316	-0.065523779	-0.058778798	-0.059413535
4.5	-0.037798316	-0.065523779	-0.059362676	-0.059956831
5	-0.037798316	-0.065523779	-0.059853591	-0.060410949
5.5	-0.037798316	-0.065523779	-0.060272099	-0.060796616
6	-0.037798316	-0.065523779	-0.060632906	-0.06112793
6.5	-0.037798316	-0.065523779	-0.060947185	-0.061415743
7	-0.037798316	-0.065523779	-0.061223577	-0.061668024
7.5	-0.037798316	-0.065523779	-0.061468464	-0.061891134
8	-0.037798316	-0.065523779	-0.061686945	-0.062089792
8.5	-0.037798316	-0.065523779	-0.061883072	-0.062267811
9	-0.037798316	-0.065523779	-0.062060157	-0.062428301
9.5	-0.037798316	-0.065523779	-0.062220761	-0.062573645
10	-0.037798316	-0.065523779	-0.06236712	-0.062705931

หมายเหตุ : (1) ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับศูนย์เท่าของอากาศ ($\alpha = 0$) ในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ ใช้ $\alpha = 0.1 \times 8.85 \times 10^{-12}$ F/m และในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน ใช้ $\alpha = 0.0001 \times 8.85 \times 10^{-12}$ F/m

ตารางที่ ก.14 ผลการคำนวณนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้ม $K_{III}/\sigma_0^\infty \sqrt{a}$ สำหรับจุดกึ่งกลางของรอยร้าวผิวทรงกระบอก ใช้ประกอบรูปที่ 3.17

จำนวนเท่าของ คุณสมบัติ การนำไฟฟ้าของ อากาศ (α)	$K_{III}/\sigma_0^\infty \sqrt{a}$			
	เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้า			
	แบบซึมผ่านไม่ได้	แบบซึมผ่านได้	แบบกึ่งซึมผ่านได้	แบบสอดคล้องเชิงพลังงาน
0	-0.303369655	-0.340013321	-0.306614448	-0.040713665
0.5	-0.303369655	-0.340013321	-0.315742966	-0.314304083
1	-0.303369655	-0.340013321	-0.32224245	-0.320616807
1.5	-0.303369655	-0.340013321	-0.326129167	-0.324561893
2	-0.303369655	-0.340013321	-0.328673288	-0.327218964
2.5	-0.303369655	-0.340013321	-0.330456912	-0.329116568
3	-0.303369655	-0.340013321	-0.331769677	-0.330534021
3.5	-0.303369655	-0.340013321	-0.332773209	-0.331630615
4	-0.303369655	-0.340013321	-0.333563807	-0.332502905
4.5	-0.303369655	-0.340013321	-0.334201535	-0.333212786
5	-0.303369655	-0.340013321	-0.334726563	-0.333801192
5.5	-0.303369655	-0.340013321	-0.335165978	-0.334296871
6	-0.303369655	-0.340013321	-0.335538793	-0.334719761
6.5	-0.303369655	-0.340013321	-0.335858939	-0.335084796
7	-0.303369655	-0.340013321	-0.33613689	-0.335402961
7.5	-0.303369655	-0.340013321	-0.336380335	-0.335682817
8	-0.303369655	-0.340013321	-0.336595277	-0.335930801
8.5	-0.303369655	-0.340013321	-0.336786412	-0.336152043
9	-0.303369655	-0.340013321	-0.336957516	-0.33635069
9.5	-0.303369655	-0.340013321	-0.337111461	-0.336529914
10	-0.303369655	-0.340013321	-0.337250739	-0.336692474

หมายเหตุ : (1) ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับศูนย์เท่าของอากาศ ($\alpha = 0$) ในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ ใช้ $\alpha = 0.1 \times 8.85 \times 10^{-12}$ F/m และในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน ใช้ $\alpha = 0.0001 \times 8.85 \times 10^{-12}$ F/m

ตารางที่ ก.15 ผลการคำนวณนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้ม $K_{IV}E_{3333}/\sigma_0^\infty \sqrt{a}E_{3343}$ สำหรับจุดล่างสุดของรอยร้าวผิวทรงกระบอก ใช้ประกอบรูปที่ 3.18 และ 3.19

จำนวนเท่าของ คุณสมบัติ การนำไฟฟ้าของ อากาศ (α)	$K_{IV}E_{3333}/\sigma_0^\infty \sqrt{a}E_{3343}$			
	เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้า			
	แบบซึมผ่านไม่ได้	แบบซึมผ่านได้	แบบกึ่งซึมผ่านได้	แบบสอดคล้องเชิงพลังงาน
0	3.134863236	2.097394267	2.978499346	3.459962561
0.5	3.134863236	2.097394267	2.599095582	2.583193721
1	3.134863236	2.097394267	2.391580452	2.370727396
1.5	3.134863236	2.097394267	2.294020653	2.274380165
2	3.134863236	2.097394267	2.240821499	2.223245201
2.5	3.134863236	2.097394267	2.208419878	2.192810264
3	3.134863236	2.097394267	2.187077921	2.173125691
3.5	3.134863236	2.097394267	2.172156547	2.159579472
4	3.134863236	2.097394267	2.161247547	2.149796183
4.5	3.134863236	2.097394267	2.152949212	2.142471119
5	3.134863236	2.097394267	2.146475644	2.136801081
5.5	3.134863236	2.097394267	2.141300045	2.132323216
6	3.134863236	2.097394267	2.13706505	2.128692474
6.5	3.134863236	2.097394267	2.133541302	2.125703876
7	3.134863236	2.097394267	2.130579523	2.123201262
7.5	3.134863236	2.097394267	2.128052665	2.121088284
8	3.134863236	2.097394267	2.125873327	2.119278916
8.5	3.134863236	2.097394267	2.123975737	2.117713995
9	3.134863236	2.097394267	2.122313153	2.116352178
9.5	3.134863236	2.097394267	2.12083858	2.115150758
10	3.134863236	2.097394267	2.119525317	2.1140867

หมายเหตุ : (1) ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับศูนย์เท่าของอากาศ ($\alpha = 0$) ในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ ใช้ $\alpha = 0.1 \times 8.85 \times 10^{-12}$ F/m และในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน ใช้ $\alpha = 0.0001 \times 8.85 \times 10^{-12}$ F/m

ตารางที่ ก.16 ผลการคำนวณนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้ม $K_{IV}E_{3333}/\sigma_0^\infty \sqrt{a}E_{3343}$ สำหรับจุดกึ่งกลางของรอยร้าวผิวทรงกระบอก ใช้ประกอบรูปที่ 3.18 และ 3.20

จำนวนเท่าของ คุณสมบัติ การนำไฟฟ้าของ อากาศ (α)	$K_{IV}E_{3333}/\sigma_0^\infty \sqrt{a}E_{3343}$			
	เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้า			
	แบบซึมผ่านไม่ได้	แบบซึมผ่านได้	แบบกึ่งซึมผ่านได้	แบบสอดคล้องเชิงพลังงาน
0	3.642870166	2.371529288	3.525142481	3.802504103
0.5	3.642870166	2.371529288	3.194820907	3.185176745
1	3.642870166	2.371529288	2.961868159	2.944896329
1.5	3.642870166	2.371529288	2.824587721	2.805390478
2	3.642870166	2.371529288	2.736111211	2.716820725
2.5	3.642870166	2.371529288	2.674992279	2.656518034
3	3.642870166	2.371529288	2.630610703	2.613230248
3.5	3.642870166	2.371529288	2.597095094	2.580842548
4	3.642870166	2.371529288	2.570967204	2.555807511
4.5	3.642870166	2.371529288	2.550106523	2.535924674
5	3.642870166	2.371529288	2.533073223	2.519799739
5.5	3.642870166	2.371529288	2.518924656	2.506460475
6	3.642870166	2.371529288	2.507007927	2.495272804
6.5	3.642870166	2.371529288	2.496840459	2.485757773
7	3.642870166	2.371529288	2.488062005	2.477576162
7.5	3.642870166	2.371529288	2.480412677	2.470463234
8	3.642870166	2.371529288	2.473690583	2.464228231
8.5	3.642870166	2.371529288	2.467738736	2.458720174
9	3.642870166	2.371529288	2.462431864	2.453819087
9.5	3.642870166	2.371529288	2.457673755	2.449432917
10	3.642870166	2.371529288	2.453383622	2.44548492

หมายเหตุ : (1) ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับศูนย์เท่าของอากาศ ($\alpha = 0$) ในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ ใช้ $\alpha = 0.1 \times 8.85 \times 10^{-12}$ F/m และในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน ใช้ $\alpha = 0.0001 \times 8.85 \times 10^{-12}$ F/m

ตารางที่ ก.17 ผลการคำนวณนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้ม $K_{IV}E_{3333}/\sigma_0^\infty \sqrt{a}E_{3343}$ สำหรับ
จุดสูงสุดของรอยร้าวผิวทรงกระบอก ใช้ประกอบรูปที่ 3.18 และ 3.21

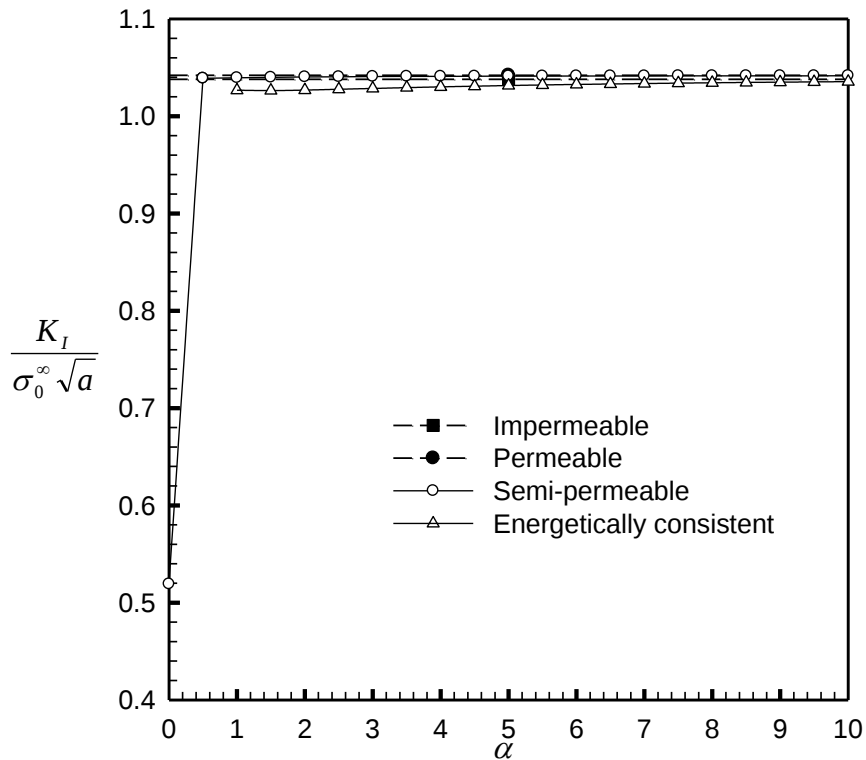
จำนวนเท่าของ คุณสมบัติ การนำไฟฟ้าของ อากาศ (α)	$K_{IV}E_{3333}/\sigma_0^\infty \sqrt{a}E_{3343}$			
	เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้า			
	แบบซึมผ่านไม่ได้	แบบซึมผ่านได้	แบบกึ่งซึมผ่านได้	แบบสอดคล้องเชิงพลังงาน
0	4.184625016	2.527442101	4.080685038	4.416511098
0.5	4.184625016	2.527442101	3.767026129	3.760961431
1	4.184625016	2.527442101	3.515650108	3.502456238
1.5	4.184625016	2.527442101	3.348344389	3.331354657
2	4.184625016	2.527442101	3.229337982	3.210516903
2.5	4.184625016	2.527442101	3.14025443	3.120860825
3	4.184625016	2.527442101	3.07113977	3.05180429
3.5	4.184625016	2.527442101	3.015973968	2.997027457
4	4.184625016	2.527442101	2.970932848	2.95253456
4.5	4.184625016	2.527442101	2.933463688	2.915709157
5	4.184625016	2.527442101	2.901810354	2.884716806
5.5	4.184625016	2.527442101	2.874723292	2.85828658
6	4.184625016	2.527442101	2.851282605	2.835487055
6.5	4.184625016	2.527442101	2.830800863	2.815615551
7	4.184625016	2.527442101	2.812743285	2.798145304
7.5	4.184625016	2.527442101	2.796710673	2.782662758
8	4.184625016	2.527442101	2.782380851	2.76885135
8.5	4.184625016	2.527442101	2.769496514	2.756454798
9	4.184625016	2.527442101	2.757846655	2.745262802
9.5	4.184625016	2.527442101	2.74726896	2.735116591
10	4.184625016	2.527442101	2.737618094	2.725871506

หมายเหตุ : (1) ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับศูนย์เท่าของอากาศ ($\alpha = 0$) ในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ ใช้ $\alpha = 0.1 \times 8.85 \times 10^{-12}$ F/m และในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน ใช้ $\alpha = 0.0001 \times 8.85 \times 10^{-12}$ F/m

2. กราฟและผลการคำนวณค่าตัวประกอบความเข้มที่ใช้ประกอบกราฟในภาคผนวก

กราฟค่าตัวประกอบของรอยร้าวผิวทรงกลมและผิวกระบอก ที่กำหนดค่าความเค้นระยะไกล เท่ากับ 50 เมกะปาสกาล ค่าสนามไฟฟ้าระยะไกลเท่ากับ 0.5 เมกะโวลต์ต่อเมตร และมีมุมตั้งแต่ $\theta = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ เป็นค่าเพิ่มเติมที่ไม่ได้นำเสนอในบทที่ 3

2.1 กราฟและผลการคำนวณค่าตัวประกอบความเข้มของรอยร้าวผิวทรงกลม



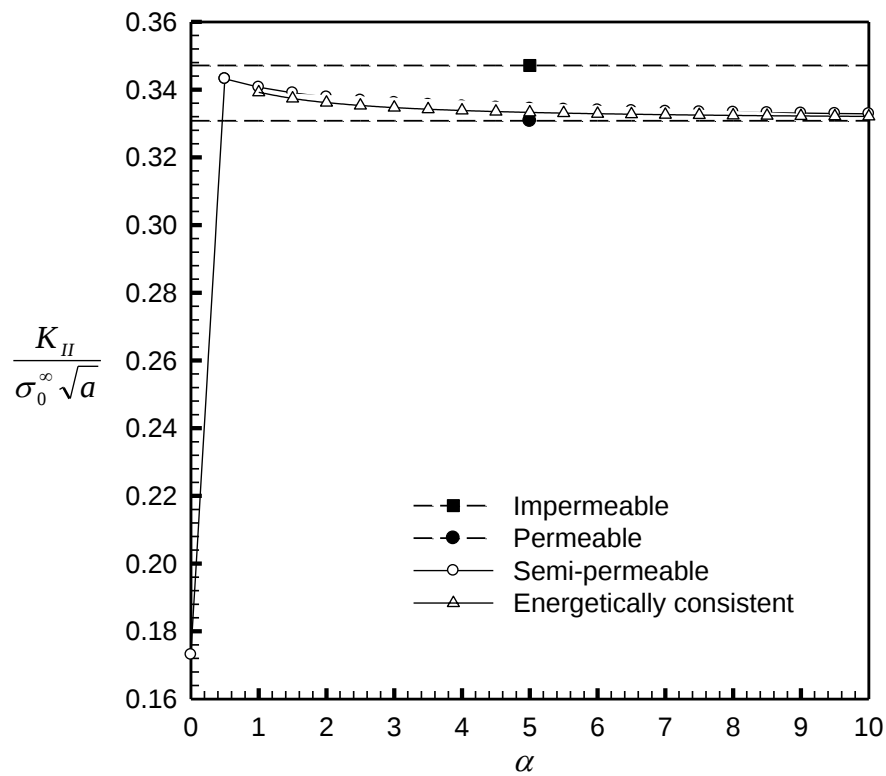
รูปที่ ก.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโหมดที่ 1 (K_I) กับค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท่าของอากาศ และมี $\theta = 15^\circ$ สำหรับรอยร้าวผิวทรงกลมในตัวกลางไพเอโซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต

ตารางที่ ก.18 ตารางแสดงนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้ม $K_I/\sigma_0^\infty \sqrt{a}$ สำหรับรอยร้าวผิวทรงกลมในตัวกลางไฟอ์โซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต ใช้ประกอบรูปที่ ก.1

จำนวนเท่าของ คุณสมบัติ การนำไฟฟ้าของ อากาศ (α)	$K_I/\sigma_0^\infty \sqrt{a}$			
	เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้า			
	แบบซึมผ่านไม่ได้	แบบซึมผ่านได้	แบบกึ่งซึมผ่านได้	แบบสอดคล้องเชิงพลังงาน
0	1.037887802	1.04208531	0.51906613	NaN
0.5	1.037887802	1.04208531	1.038897891	NaN
1	1.037887802	1.04208531	1.039538086	1.026739264
1.5	1.037887802	1.04208531	1.039970334	1.026342235
2	1.037887802	1.04208531	1.040281387	1.026845099
2.5	1.037887802	1.04208531	1.040517279	1.027662778
3	1.037887802	1.04208531	1.040697239	1.028505217
3.5	1.037887802	1.04208531	1.040839783	1.029355907
4	1.037887802	1.04208531	1.040957118	1.030143415
4.5	1.037887802	1.04208531	1.041054454	1.030858788
5	1.037887802	1.04208531	1.041137944	1.031504565
5.5	1.037887802	1.04208531	1.041207424	1.032097235
6	1.037887802	1.04208531	1.041263989	1.032631989
6.5	1.037887802	1.04208531	1.041317167	1.033117905
7	1.037887802	1.04208531	1.041363904	1.033559625
7.5	1.037887802	1.04208531	1.041405296	1.033962271
8	1.037887802	1.04208531	1.041442205	1.034330376
8.5	1.037887802	1.04208531	1.04147532	1.034667904
9	1.037887802	1.04208531	1.041505195	1.034978832
9.5	1.037887802	1.04208531	1.041532282	1.035266243
10	1.037887802	1.04208531	1.041556953	1.035530559

หมายเหตุ : (1) NaN ย่อมาจาก Not a Number

(2) ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับศูนย์เท่าของอากาศ ($\alpha = 0$) ในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ ใช้ $\alpha = 0.1 \times 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ และในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน ใช้ $\alpha = 0.1 \times 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$



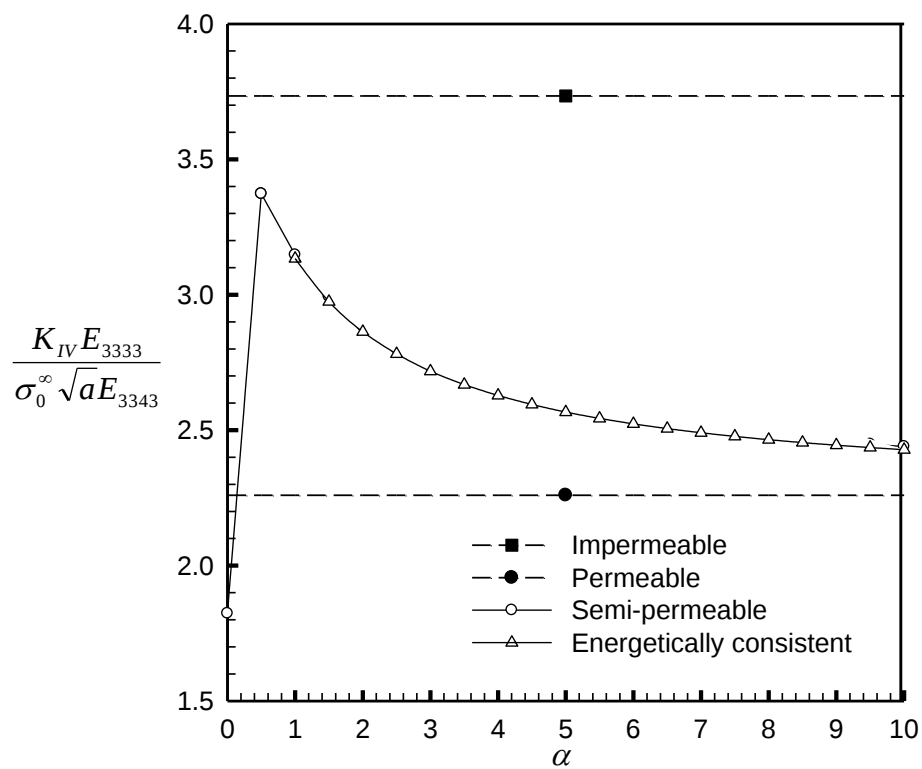
รูปที่ ก.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโหมดที่ 2 (K_{II}) กับค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท่าของอากาศ และมี $\theta = 15^\circ$ สำหรับรอยร้าวผิวทรงกลมในตัวกลางไฟอ์โซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต

ตารางที่ ก.19 ตารางแสดงนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้ม $K_{II}/\sigma_0^\infty \sqrt{a}$ สำหรับรอยร้าวผิวทรงกลมในตัวกลางไฟอ์โซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต ใช้ประกอบรูปที่ ก.2

จำนวนเท่าของ คุณสมบัติ การนำไฟฟ้าของ อากาศ (α)	$K_{II}/\sigma_0^\infty \sqrt{a}$			
	เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้า			
	แบบซึมผ่านไม่ได้	แบบซึมผ่านได้	แบบกึ่งซึมผ่านได้	แบบสอดคล้องเชิงพลังงาน
0	0.347132803	0.330808108	0.173091373	NaN
0.5	0.347132803	0.330808108	0.343205186	NaN
1	0.347132803	0.330808108	0.340715348	0.339216423
1.5	0.347132803	0.330808108	0.339034175	0.337389048
2	0.347132803	0.330808108	0.337824401	0.336173414
2.5	0.347132803	0.330808108	0.336907085	0.335319758
3	0.347132803	0.330808108	0.336207131	0.334685289
3.5	0.347132803	0.330808108	0.335652613	0.334212857
4	0.347132803	0.330808108	0.335196262	0.333829423
4.5	0.347132803	0.330808108	0.334817685	0.333523455
5	0.347132803	0.330808108	0.334492986	0.333264763
5.5	0.347132803	0.330808108	0.334222738	0.333057894
6	0.347132803	0.330808108	0.334002702	0.332885542
6.5	0.347132803	0.330808108	0.333795867	0.332733491
7	0.347132803	0.330808108	0.33361408	0.332601963
7.5	0.347132803	0.330808108	0.333453083	0.332487076
8	0.347132803	0.330808108	0.333309522	0.332385875
8.5	0.347132803	0.330808108	0.33318072	0.332296064
9	0.347132803	0.330808108	0.333064518	0.332218672
9.5	0.347132803	0.330808108	0.332959159	0.332147507
10	0.347132803	0.330808108	0.332863194	0.332081818

หมายเหตุ : (1) NaN ย่อมาจาก Not a Number

(2) ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับศูนย์เท่าของอากาศ ($\alpha = 0$) ในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ ใช้ $\alpha = 0.1 \times 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ และในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน ใช้ $\alpha = 0.1 \times 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$



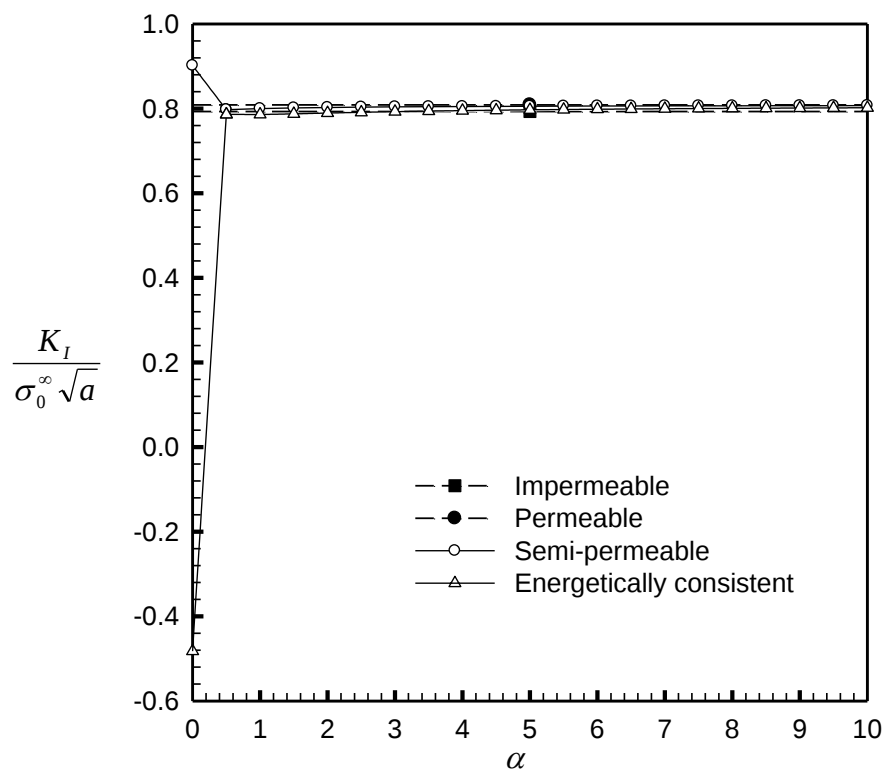
รูปที่ ก.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโหมดที่ 4 (K_{IV}) กับค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท่าของอากาศ และมี $\theta = 15^\circ$ สำหรับรอยร้าวผิวทรงกลมในตัวกลางไฟอ์โซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต

ตารางที่ ก.20 ตารางแสดงนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้ม $K_{IV} E_{3333} / \sigma_0^\infty \sqrt{a} E_{3343}$ สำหรับรอย
ร้าวผิวทรงกลมในตัวกลางโพธิโซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต ใช้ประกอบรูปที่ ก.3

จำนวนเท่าของ คุณสมบัติ การนำไฟฟ้าของ อากาศ (α)	$K_{IV} E_{3333} / \sigma_0^\infty \sqrt{a} E_{3343}$			
	เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้า			
	แบบซึมผ่านไม่ได้	แบบซึมผ่านได้	แบบกึ่งซึมผ่านได้	แบบสอดคล้องเชิงพลังงาน
0	3.734204583	2.259726916	1.823221706	NaN
0.5	3.734204583	2.259726916	3.372752688	NaN
1	3.734204583	2.259726916	3.147072835	3.133654932
1.5	3.734204583	2.259726916	2.993373735	2.974767638
2	3.734204583	2.259726916	2.883905575	2.863119757
2.5	3.734204583	2.259726916	2.800622974	2.781438038
3	3.734204583	2.259726916	2.737808017	2.71750434
3.5	3.734204583	2.259726916	2.688259538	2.668268017
4	3.734204583	2.259726916	2.647240845	2.628211008
4.5	3.734204583	2.259726916	2.613329251	2.595008153
5	3.734204583	2.259726916	2.584492102	2.566838676
5.5	3.734204583	2.259726916	2.560373968	2.543478151
6	3.734204583	2.259726916	2.540634884	2.523343288
6.5	3.734204583	2.259726916	2.522229357	2.505842331
7	3.734204583	2.259726916	2.506079722	2.49050903
7.5	3.734204583	2.259726916	2.491797506	2.476964689
8	3.734204583	2.259726916	2.479077783	2.464914265
8.5	3.734204583	2.259726916	2.467678155	2.45412428
9	3.734204583	2.259726916	2.45740366	2.444528972
9.5	3.734204583	2.259726916	2.448095795	2.435878144
10	3.734204583	2.259726916	2.439624417	2.427834132

หมายเหตุ : (1) NaN ย่อมาจาก Not a Number

(2) ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับศูนย์เท่าของอากาศ ($\alpha = 0$) ในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ ใช้ $\alpha = 0.1 \times 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ และในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน ใช้ $\alpha = 0.1 \times 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$

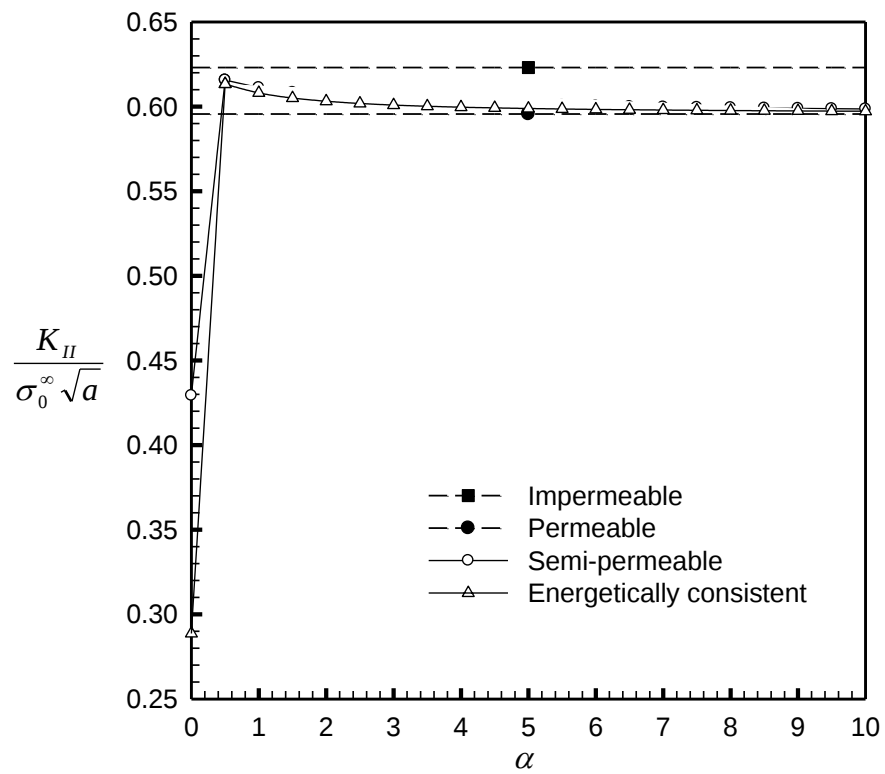


รูปที่ ก.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโหมดที่ 1 (K_I) กับค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท่าของอากาศ และมี $\theta = 30^\circ$ สำหรับรอยร้าวผิวทรงกลมในตัวกลางไพเอโซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต

ตารางที่ ก.21 ตารางแสดงนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้ม $K_I/\sigma_0^\infty \sqrt{a}$ สำหรับรอยร้าวผิวทรงกลมในตัวกลางไฟอ์โซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต ใช้ประกอบรูปที่ ก.4

จำนวนเท่าของ คุณสมบัติ การนำไฟฟ้าของ อากาศ (α)	$K_I/\sigma_0^\infty \sqrt{a}$			
	เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้า			
	แบบซึมผ่านไม่ได้	แบบซึมผ่านได้	แบบกึ่งซึมผ่านได้	แบบสอดคล้องเชิงพลังงาน
0	0.793196849	0.808569759	0.901668113	-0.48222328
0.5	0.793196849	0.808569759	0.797364099	0.786380952
1	0.793196849	0.808569759	0.799843293	0.786081041
1.5	0.793196849	0.808569759	0.801454398	0.787550424
2	0.793196849	0.808569759	0.802575305	0.789389105
2.5	0.793196849	0.808569759	0.803396682	0.791106948
3	0.793196849	0.808569759	0.804022345	0.792647494
3.5	0.793196849	0.808569759	0.804514889	0.793975636
4	0.793196849	0.808569759	0.804912232	0.795133026
4.5	0.793196849	0.808569759	0.805238861	0.796131111
5	0.793196849	0.808569759	0.805512008	0.796997623
5.5	0.793196849	0.808569759	0.805744199	0.797761188
6	0.793196849	0.808569759	0.805943868	0.798434051
6.5	0.793196849	0.808569759	0.806117277	0.799030631
7	0.793196849	0.808569759	0.806269271	0.799562885
7.5	0.793196849	0.808569759	0.806404025	0.800041991
8	0.793196849	0.808569759	0.806523433	0.800471972
8.5	0.793196849	0.808569759	0.806630406	0.800861526
9	0.793196849	0.808569759	0.806726785	0.801215969
9.5	0.793196849	0.808569759	0.806814054	0.801539384
10	0.793196849	0.808569759	0.806893471	0.801836368

หมายเหตุ : (1) ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับศูนย์เท่าของอากาศ ($\alpha = 0$) ในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ ใช้ $\alpha = 0.0001 \times 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ และในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน ใช้ $\alpha = 0.0001 \times 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$

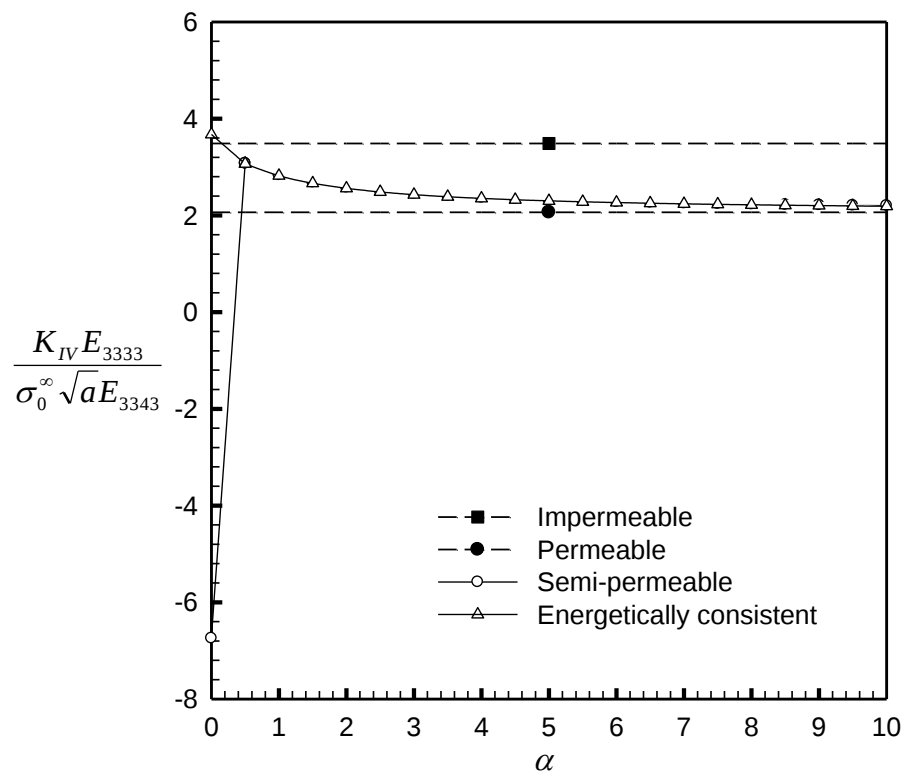


รูปที่ ก.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโหมดที่ 2 (K_{II}) กับค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท่าของอากาศ และมี $\theta = 30^\circ$ สำหรับรอยร้าวผิวทรงกลมในตัวกลางไฟอ์โซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต

ตารางที่ ก.22 ตารางแสดงนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้ม $K_{II}/\sigma_0^\infty \sqrt{a}$ สำหรับรอยร้าวผิวทรงกลมในตัวกลางไฟอ์โซอีเล็กทริกไร้ขอบเขต ใช้ประกอบรูปที่ ก.5

จำนวนเท่าของ คุณสมบัติ การนำไฟฟ้าของ อากาศ (α)	$K_{II}/\sigma_0^\infty \sqrt{a}$			
	เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้า			
	แบบซึมผ่านไม่ได้	แบบซึมผ่านได้	แบบกึ่งซึมผ่านได้	แบบสอดคล้องเชิงพลังงาน
0	0.623084602	0.595618377	0.429312552	0.288764814
0.5	0.623084602	0.595618377	0.615643751	0.613273852
1	0.623084602	0.595618377	0.611215733	0.608069208
1.5	0.623084602	0.595618377	0.608337768	0.605040434
2	0.623084602	0.595618377	0.606335198	0.60311782
2.5	0.623084602	0.595618377	0.604867568	0.601811775
3	0.623084602	0.595618377	0.603749588	0.600874434
3.5	0.623084602	0.595618377	0.602869336	0.600174272
4	0.623084602	0.595618377	0.60215914	0.599631788
4.5	0.623084602	0.595618377	0.601575332	0.599202046
5	0.623084602	0.595618377	0.601087126	0.598853919
5.5	0.623084602	0.595618377	0.600672041	0.598564991
6	0.623084602	0.595618377	0.600315099	0.598322635
6.5	0.623084602	0.595618377	0.600005087	0.598116251
7	0.623084602	0.595618377	0.599733349	0.597938624
7.5	0.623084602	0.595618377	0.599492398	0.597783175
8	0.623084602	0.595618377	0.59927891	0.597648031
8.5	0.623084602	0.595618377	0.599087647	0.597528526
9	0.623084602	0.595618377	0.598915323	0.597422126
9.5	0.623084602	0.595618377	0.59875929	0.597326878
10	0.623084602	0.595618377	0.598617283	0.597240983

หมายเหตุ : (1) ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับศูนย์เท่าของอากาศ ($\alpha = 0$) ในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ ใช้ $\alpha = 0.0001 \times 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ และในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน ใช้ $\alpha = 0.0001 \times 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$

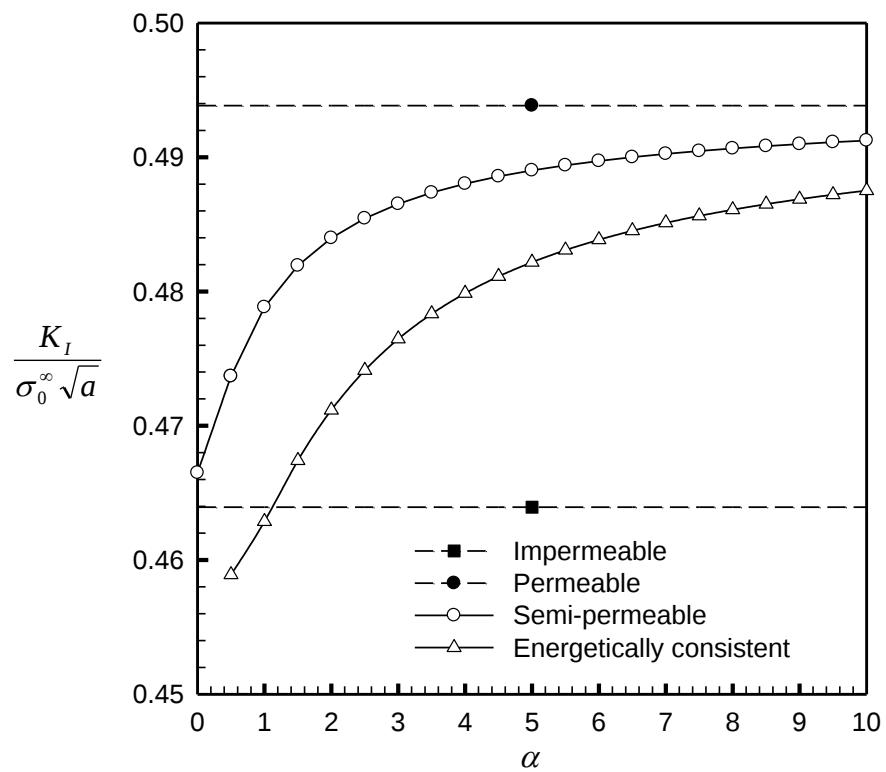


รูปที่ ก.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโหมดที่ 4 (K_{IV}) กับค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท่าของอากาศ และมี $\theta = 30^\circ$ สำหรับรอยร้าวผิวทรงกลมในตัวกลางไฟอ์โซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต

ตารางที่ ก.23 ตารางแสดงนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้ม $K_{IV}E_{3333}/\sigma_0^\infty \sqrt{a}E_{3343}$ สำหรับรอย
ร้าวผิวทรงกลมในตัวกลางโพธิโซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต ใช้ประกอบรูปที่ ก.6

จำนวนเท่าของ คุณสมบัติ การนำไฟฟ้าของ อากาศ (α)	$K_{IV}E_{3333}/\sigma_0^\infty \sqrt{a}E_{3343}$			
	เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้า			
	แบบซึมผ่านไม่ได้	แบบซึมผ่านได้	แบบกึ่งซึมผ่านได้	แบบสอดคล้องเชิงพลังงาน
0	3.486745627	2.06494457	-6.744583936	3.674510247
0.5	3.486745627	2.06494457	3.0752957	3.067797446
1	3.486745627	2.06494457	2.836120673	2.820418877
1.5	3.486745627	2.06494457	2.683855505	2.663898031
2	3.486745627	2.06494457	2.579673249	2.559130688
2.5	3.486745627	2.06494457	2.504630461	2.483804756
3	3.486745627	2.06494457	2.447823057	2.428209545
3.5	3.486745627	2.06494457	2.403999321	2.385017391
4	3.486745627	2.06494457	2.369120287	2.351124504
4.5	3.486745627	2.06494457	2.340500616	2.323452658
5	3.486745627	2.06494457	2.316600268	2.300432511
5.5	3.486745627	2.06494457	2.296635402	2.281298504
6	3.486745627	2.06494457	2.279534284	2.265007237
6.5	3.486745627	2.06494457	2.264763217	2.250955345
7	3.486745627	2.06494457	2.251878678	2.238732591
7.5	3.486745627	2.06494457	2.240628352	2.228096244
8	3.486745627	2.06494457	2.23056012	2.218587029
8.5	3.486745627	2.06494457	2.221576927	2.210119127
9	3.486745627	2.06494457	2.213513245	2.202531282
9.5	3.486745627	2.06494457	2.20620441	2.195659015
10	3.486745627	2.06494457	2.199611864	2.189475594

หมายเหตุ : (1) ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับศูนย์เท่าของอากาศ ($\alpha = 0$) ในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ ใช้ $\alpha = 0.0001 \times 8.85 \times 10^{-12}$ F/m และในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน ใช้ $\alpha = 0.0001 \times 8.85 \times 10^{-12}$ F/m



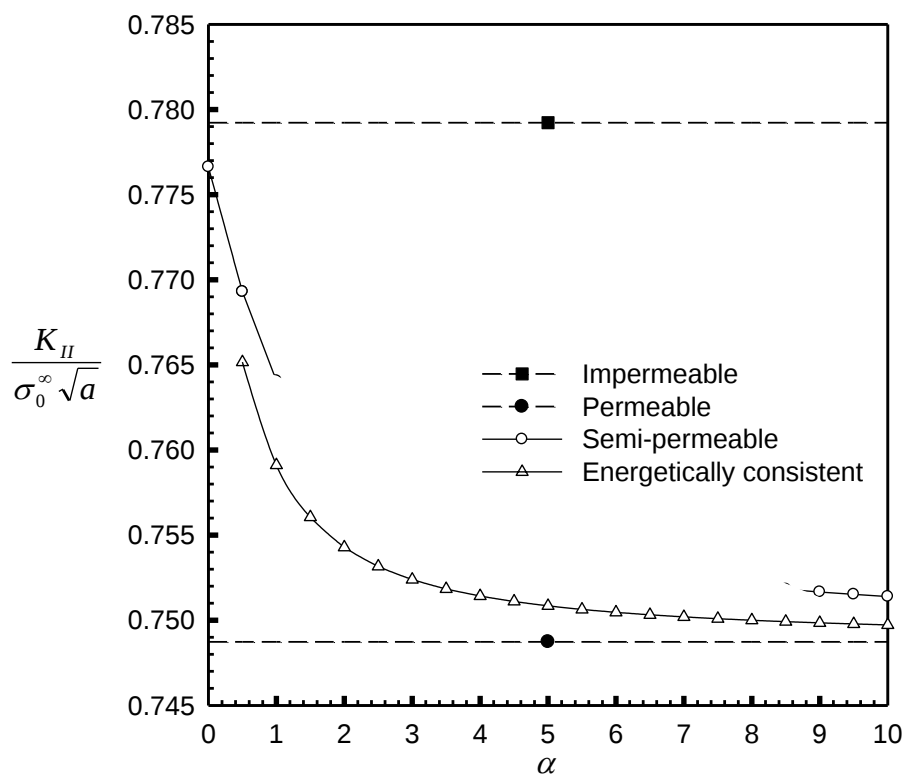
รูปที่ ๓.๗ กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโหมดที่ 1 (K_I) กับค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 10 เทาของอากาศ และมี $\theta = 45^\circ$ สำหรับรอยร้าวผิวทรงกลมในตัวกลางไพอีโซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต

ตารางที่ ก.24 ตารางแสดงนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้ม $K_I/\sigma_0^\infty \sqrt{a}$ สำหรับรอยร้าวผิวทรงกลมในตัวกลางไฟอ์โซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต ใช้ประกอบรูปที่ ก.7

จำนวนเท่าของ คุณสมบัติ การนำไฟฟ้าของ อากาศ (α)	$K_I/\sigma_0^\infty \sqrt{a}$			
	เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้า			
	แบบซึมผ่านไม่ได้	แบบซึมผ่านได้	แบบกึ่งซึมผ่านได้	แบบสอดคล้องเชิงพลังงาน
0	0.463939266	0.493843685	0.466497082	NaN
0.5	0.463939266	0.493843685	0.473693098	0.458905407
1	0.463939266	0.493843685	0.478832475	0.462863439
1.5	0.463939266	0.493843685	0.481930623	0.467409686
2	0.463939266	0.493843685	0.483984541	0.471170175
2.5	0.463939266	0.493843685	0.485440739	0.474130836
3	0.463939266	0.493843685	0.486524978	0.47647127
3.5	0.463939266	0.493843685	0.487363003	0.478342689
4	0.463939266	0.493843685	0.488029509	0.479867502
4.5	0.463939266	0.493843685	0.488572279	0.481128013
5	0.463939266	0.493843685	0.489022747	0.48218563
5.5	0.463939266	0.493843685	0.489402381	0.483084402
6	0.463939266	0.493843685	0.489726723	0.48385694
6.5	0.463939266	0.493843685	0.490006987	0.484527614
7	0.463939266	0.493843685	0.490251542	0.485115057
7.5	0.463939266	0.493843685	0.490466908	0.485633453
8	0.463939266	0.493843685	0.490657943	0.486094485
8.5	0.463939266	0.493843685	0.490828544	0.486506935
9	0.463939266	0.493843685	0.490981822	0.486878035
9.5	0.463939266	0.493843685	0.491120284	0.48721366
10	0.463939266	0.493843685	0.491246005	0.487518639

หมายเหตุ : (1) NaN ย่อมาจาก Not a Number

(2) ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับศูนย์เท่าของอากาศ ($\alpha = 0$) ในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ ใช้ $\alpha = 0.1 \times 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ และในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน ใช้ $\alpha = 0.1 \times 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$



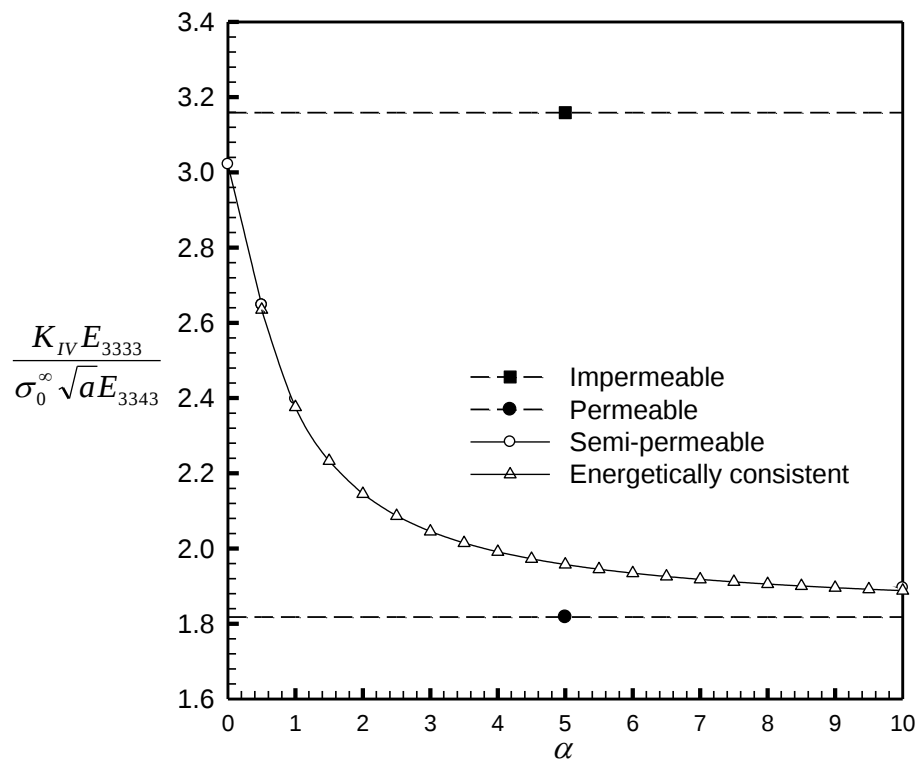
รูปที่ 8.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโหมดที่ 2 (K_{II}) กับค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท้าของอากาศ และมี $\theta = 45^\circ$ สำหรับรอยร้าวผิวทรงกลมในตัวกลางไฟอ์โซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต

ตารางที่ ก.25 ตารางแสดงนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้ม $K_{II}/\sigma_0^\infty \sqrt{a}$ สำหรับรอยร้าวผิวทรงกลมในตัวกลางไฟอ์โซอีเล็กทริกไร้ขอบเขต ใช้ประกอบรูปที่ ก.8

จำนวนเท่าของ คุณสมบัติ การนำไฟฟ้าของ อากาศ (α)	$K_{II}/\sigma_0^\infty \sqrt{a}$			
	เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้า			
	แบบซึมผ่านไม่ได้	แบบซึมผ่านได้	แบบกึ่งซึมผ่านได้	แบบสอดคล้องเชิงพลังงาน
0	0.779228165	0.748731386	0.776626121	NaN
0.5	0.779228165	0.748731386	0.769301749	0.765166189
1	0.779228165	0.748731386	0.764066647	0.759111645
1.5	0.779228165	0.748731386	0.760908305	0.756054923
2	0.779228165	0.748731386	0.75881313	0.754289409
2.5	0.779228165	0.748731386	0.757326889	0.753165008
3	0.779228165	0.748731386	0.756219825	0.752396811
3.5	0.779228165	0.748731386	0.755363784	0.751842848
4	0.779228165	0.748731386	0.754682798	0.751427415
4.5	0.779228165	0.748731386	0.75412805	0.751105149
5	0.779228165	0.748731386	0.753667506	0.750848616
5.5	0.779228165	0.748731386	0.753279336	0.750640357
6	0.779228165	0.748731386	0.75294764	0.750468045
6.5	0.779228165	0.748731386	0.752660981	0.750323303
7	0.779228165	0.748731386	0.752410823	0.750200161
7.5	0.779228165	0.748731386	0.752190476	0.750094251
8	0.779228165	0.748731386	0.751995001	0.750002114
8.5	0.779228165	0.748731386	0.751820415	0.749921353
9	0.779228165	0.748731386	0.751663544	0.749850016
9.5	0.779228165	0.748731386	0.751521823	0.74978657
10	0.779228165	0.748731386	0.751393129	0.749729749

หมายเหตุ : (1) NaN ย่อมาจาก Not a Number

- (2) ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับศูนย์เท่าของอากาศ ($\alpha = 0$) ในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ ใช้ $\alpha = 0.1 \times 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ และในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน ใช้ $\alpha = 0.1 \times 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$



รูปที่ ก.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโหมดที่ 4 (K_{IV}) กับค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท่าของอากาศ และมี $\theta = 45^\circ$ สำหรับรอยร้าวผิวทรงกลมในตัวกลางโพอ์โซนิคเลกทริกไร้ขอบเขต

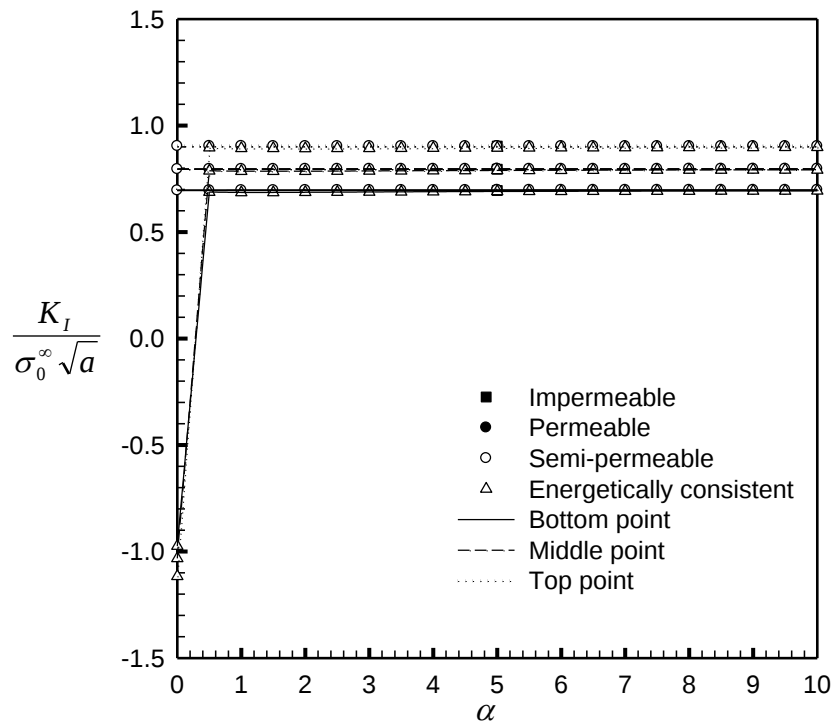
ตารางที่ ก.25 ตารางแสดงนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้ม $K_{IV}E_{3333}/\sigma_0^\infty \sqrt{a}E_{3343}$ สำหรับรอย
ร้าวผิวทรงกลมในตัวกลางโพธิโซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต ใช้ประกอบรูปที่ ก.9

จำนวนเท่าของ คุณสมบัติ การนำไฟฟ้าของ อากาศ (α)	$K_{IV}E_{3333}/\sigma_0^\infty \sqrt{a}E_{3343}$			
	เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้า			
	แบบซึมผ่านไม่ได้	แบบซึมผ่านได้	แบบกึ่งซึมผ่านได้	แบบสอดคล้องเชิงพลังงาน
0	3.158761917	1.817848577	3.021488907	NaN
0.5	3.158761917	1.817848577	2.647869222	2.635149613
1	3.158761917	1.817848577	2.397640816	2.376019775
1.5	3.158761917	1.817848577	2.256335953	2.233085543
2	3.158761917	1.817848577	2.167678758	2.145319792
2.5	3.158761917	1.817848577	2.10762753	2.086796355
3	3.158761917	1.817848577	2.064612674	2.045486308
3.5	3.158761917	1.817848577	2.032325739	2.014760084
4	3.158761917	1.817848577	2.007376667	1.991218081
4.5	3.158761917	1.817848577	1.987488635	1.972564449
5	3.158761917	1.817848577	1.97129804	1.957455541
5.5	3.158761917	1.817848577	1.957889251	1.944995923
6	3.158761917	1.817848577	1.946605339	1.934549089
6.5	3.158761917	1.817848577	1.936989744	1.925667967
7	3.158761917	1.817848577	1.928678081	1.918032597
7.5	3.158761917	1.817848577	1.921450326	1.911385173
8	3.158761917	1.817848577	1.915098573	1.905564096
8.5	3.158761917	1.817848577	1.909473994	1.90041862
9	3.158761917	1.817848577	1.904459416	1.895838497
9.5	3.158761917	1.817848577	1.899961387	1.891736064
10	3.158761917	1.817848577	1.895901104	1.888037259

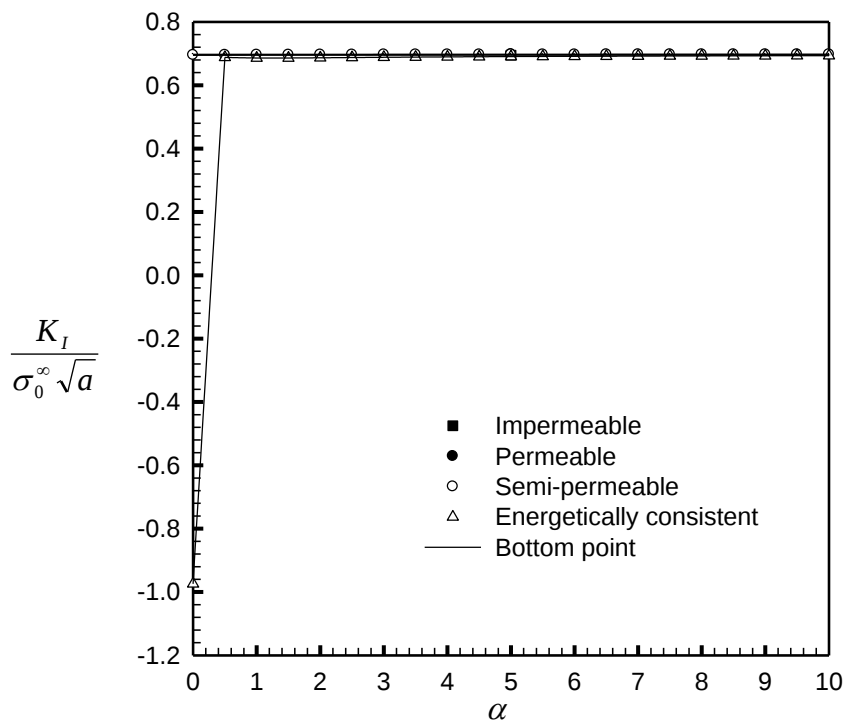
หมายเหตุ : (1) NaN ย่อมาจาก Not a Number

(2) ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับศูนย์เท่าของอากาศ ($\alpha = 0$) ในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ ใช้ $\alpha = 0.1 \times 8.85 \times 10^{-12}$ F/m และในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน ใช้ $\alpha = 0.1 \times 8.85 \times 10^{-12}$ F/m

2.2 กราฟและผลการคำนวณค่าตัวประกอบความเข้มของรอยร้าวผิวทรงกระบอก



รูปที่ ก.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโหมดที่ 1 (K_I) กับค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท่าของอากาศ และมี $\theta = 30^\circ$ สำหรับรอยร้าวผิวทรงกระบอกในตัวกลางไฟอ์โซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต

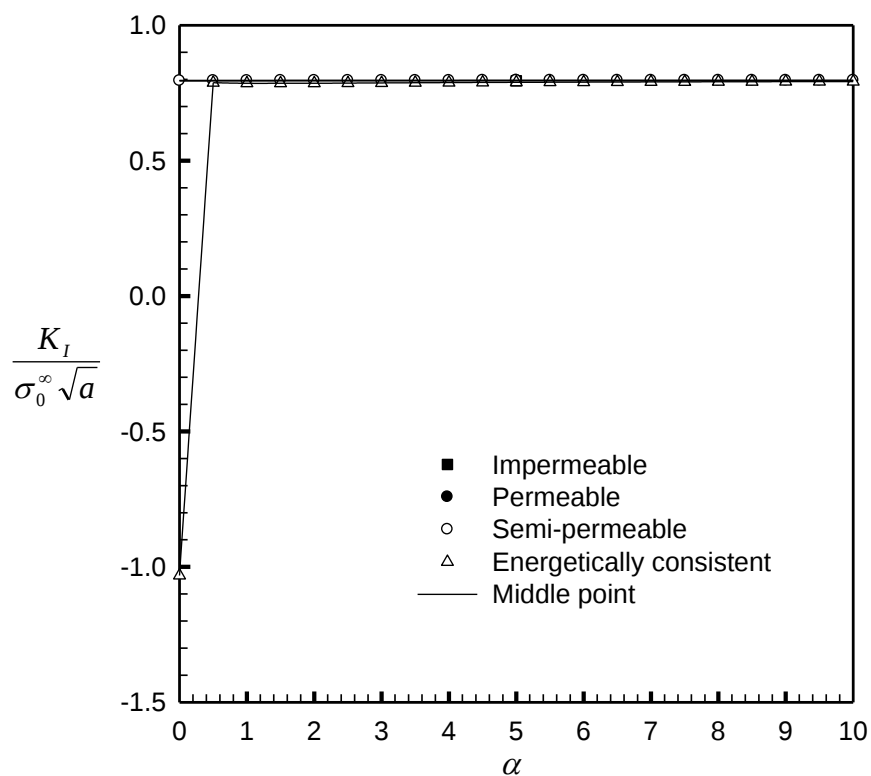


รูปที่ ก.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโหมดที่ 1 (K_I) กับค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท่าของอากาศ และมี $\theta = 30^\circ$ สำหรับจุดล่างสุดของรอยร้าวผิวทรงกระบอกในตัวกลางไฟอ์โซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต

ตารางที่ ก.26 ตารางแสดงนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้ม $K_I/\sigma_0^\infty \sqrt{a}$ สำหรับจุดล่างสุดของรอยร้าวผิวทรงกระบอกในตัวกลางโพธิโซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต ใช้ประกอบรูปที่ ก.10 และ ก.11

จำนวนเท่าของ คุณสมบัติ การนำไฟฟ้าของ อากาศ (α)	$K_I/\sigma_0^\infty \sqrt{a}$			
	เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้า			
	แบบซึมผ่านไม่ได้	แบบซึมผ่านได้	แบบกึ่งซึมผ่านได้	แบบสอดคล้องเชิงพลังงาน
0	0.695003824	0.697665916	0.695164063	-0.974182815
0.5	0.695003824	0.697665916	0.695661549	0.687923252
1	0.695003824	0.697665916	0.696072324	0.686134187
1.5	0.695003824	0.697665916	0.696348228	0.686134187
2	0.695003824	0.697665916	0.696544715	0.686753864
2.5	0.695003824	0.697665916	0.696691227	0.687504924
3	0.695003824	0.697665916	0.696804098	0.68825701
3.5	0.695003824	0.697665916	0.696894031	0.688941458
4	0.695003824	0.697665916	0.696967245	0.689565951
4.5	0.695003824	0.697665916	0.69702772	0.69011853
5	0.695003824	0.697665916	0.697078464	0.690608154
5.5	0.695003824	0.697665916	0.697121947	0.691043797
6	0.695003824	0.697665916	0.697159456	0.691433924
6.5	0.695003824	0.697665916	0.697192143	0.691783305
7	0.695003824	0.697665916	0.697220879	0.69209747
7.5	0.695003824	0.697665916	0.69724639	0.69238167
8	0.695003824	0.697665916	0.697269179	0.692639344
8.5	0.695003824	0.697665916	0.697289529	0.692873099
9	0.695003824	0.697665916	0.6973079	0.693086686
9.5	0.695003824	0.697665916	0.697324542	0.693282244
10	0.695003824	0.697665916	0.697339737	0.693472225

หมายเหตุ : (1) ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับศูนย์เท่าของอากาศ ($\alpha = 0$) ในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ ใช้ $\alpha = 0.1 \times 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ และในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน ใช้ $\alpha = 0.1 \times 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$

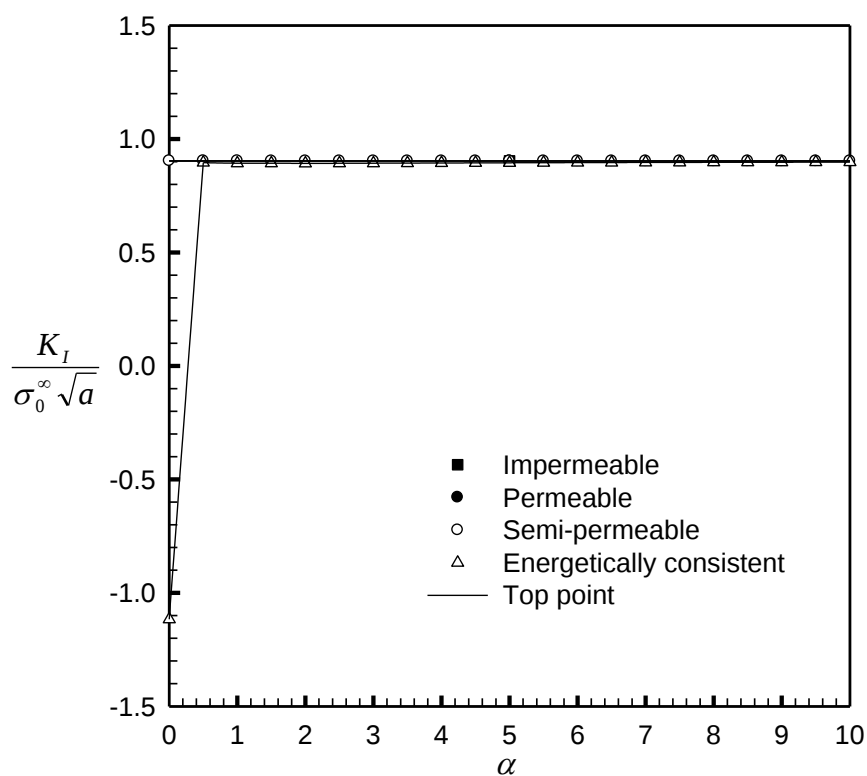


รูปที่ ก.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโหมดที่ 1 (K_I) กับค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท่าของอากาศ และมี $\theta = 30^\circ$ สำหรับจุดกึ่งกลางของรอยร้าวผิวทรงกระบอกในตัวกลางไฟอ์โซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต

ตารางที่ ก.27 ตารางแสดงนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้ม $K_I/\sigma_0^\infty \sqrt{a}$ สำหรับจุดกึ่งกลางของรอยร้าวผิวทรงกระบอกในตัวยกกลางโพธิ์โซลิดเหล็กไร้ขอบเขต ใช้ประกอบรูปที่ ก.10 และ ก.12

จำนวนเท่าของ คุณสมบัติ การนำไฟฟ้าของ อากาศ (α)	$K_I/\sigma_0^\infty \sqrt{a}$			
	เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้า			
	แบบซึมผ่านไม่ได้	แบบซึมผ่านได้	แบบกึ่งซึมผ่านได้	แบบสอดคล้องเชิงพลังงาน
0	0.794810009	0.796776378	0.79492911	-1.031966016
0.5	0.794810009	0.796776378	0.795299062	0.787815681
1	0.794810009	0.796776378	0.795603835	0.785730315
1.5	0.794810009	0.796776378	0.795808595	0.785730315
2	0.794810009	0.796776378	0.795954271	0.78583547
2.5	0.794810009	0.796776378	0.796062718	0.786439276
3	0.794810009	0.796776378	0.79614631	0.787090607
3.5	0.794810009	0.796776378	0.79621266	0.787712539
4	0.794810009	0.796776378	0.796266508	0.788294923
4.5	0.794810009	0.796776378	0.796311024	0.788819973
5	0.794810009	0.796776378	0.796348484	0.789294646
5.5	0.794810009	0.796776378	0.796380319	0.789724098
6	0.794810009	0.796776378	0.796407848	0.790113025
6.5	0.794810009	0.796776378	0.796431813	0.790463422
7	0.794810009	0.796776378	0.79645286	0.790781199
7.5	0.794810009	0.796776378	0.796471478	0.791070907
8	0.794810009	0.796776378	0.796488125	0.79133454
8.5	0.794810009	0.796776378	0.796503011	0.7915758
9	0.794810009	0.796776378	0.79651644	0.791797302
9.5	0.794810009	0.796776378	0.796528641	0.792000738
10	0.794810009	0.796776378	0.796539724	0.792199448

หมายเหตุ : (1) ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับศูนย์เท่าของอากาศ ($\alpha = 0$) ในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ ใช้ $\alpha = 0.1 \times 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ และในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน ใช้ $\alpha = 0.1 \times 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$

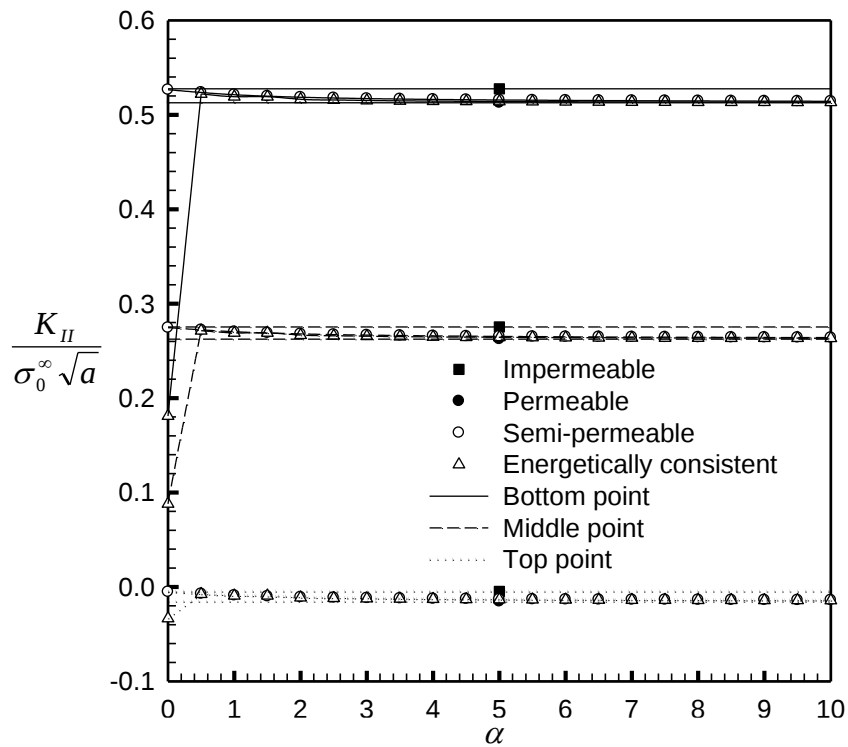


รูปที่ ก.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโหมดที่ 1 (K_I) กับค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท่าของอากาศ และมี $\theta = 30^\circ$ สำหรับสูงสุดของรอยร้าวผิวทรงกระบอกในตัวกลางไฟอ์โซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต

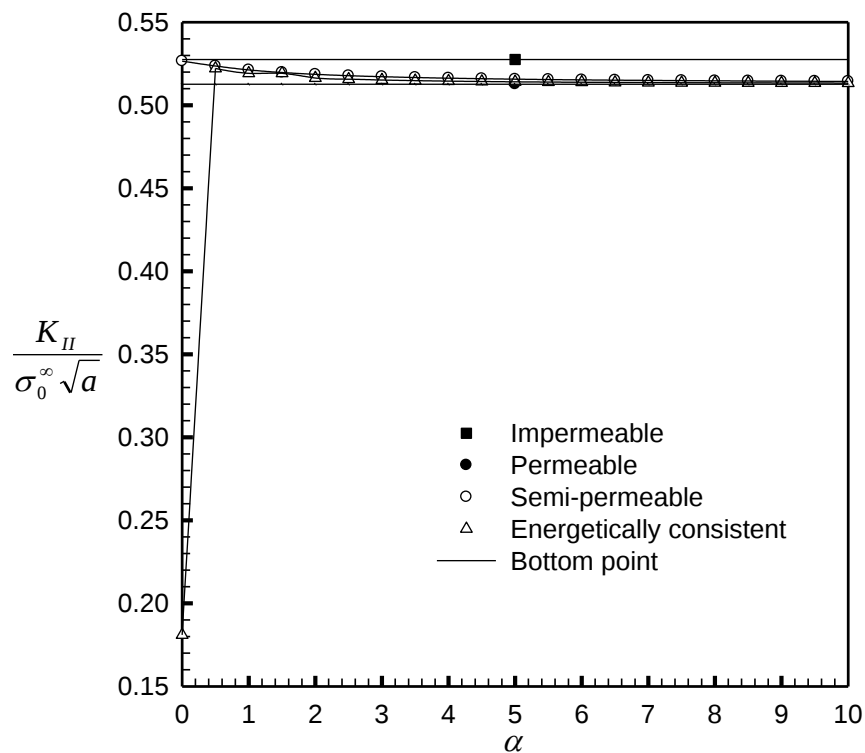
ตารางที่ ก.28 ตารางแสดงนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้ม $K_I/\sigma_0^\infty \sqrt{a}$ สำหรับจุดสูงสุดของรอยร้าว
ผิวทรงกระบอกในตัวยกกลางไฟโอซีโอเล็กทริกไร้ขอบเขต ใช้ประกอบรูปที่ ก.10 และ ก.13

จำนวนเท่าของ คุณสมบัติ การนำไฟฟ้าของ อากาศ (α)	$K_I/\sigma_0^\infty \sqrt{a}$			
	เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้า			
	แบบซึมผ่านไม่ได้	แบบซึมผ่านได้	แบบกึ่งซึมผ่านได้	แบบสอดคล้องเชิงพลังงาน
0	0.903381538	0.902882816	0.90335102	-1.115932814
0.5	0.903381538	0.902882816	0.903255675	0.895861967
1	0.903381538	0.902882816	0.903177493	0.89318456
1.5	0.903381538	0.902882816	0.903125073	0.89318456
2	0.903381538	0.902882816	0.903087897	0.892500143
2.5	0.903381538	0.902882816	0.903060301	0.892863056
3	0.903381538	0.902882816	0.903039076	0.893336703
3.5	0.903381538	0.902882816	0.903022283	0.893841816
4	0.903381538	0.902882816	0.9030087	0.89433061
4.5	0.903381538	0.902882816	0.90299749	0.894793354
5	0.903381538	0.902882816	0.902988026	0.895223774
5.5	0.903381538	0.902882816	0.90298008	0.89562029
6	0.903381538	0.902882816	0.902973174	0.895983269
6.5	0.903381538	0.902882816	0.902967174	0.89631567
7	0.903381538	0.902882816	0.902961911	0.896620634
7.5	0.903381538	0.902882816	0.902957284	0.896900463
8	0.903381538	0.902882816	0.902953134	0.897157663
8.5	0.903381538	0.902882816	0.902949422	0.897395763
9	0.903381538	0.902882816	0.902946076	0.89761576
9.5	0.903381538	0.902882816	0.902943019	0.897819612
10	0.903381538	0.902882816	0.902940267	0.898018971

หมายเหตุ : (1) ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับศูนย์เท่าของอากาศ ($\alpha = 0$) ในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ ใช้ $\alpha = 0.1 \times 8.85 \times 10^{-12}$ F/m และในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน ใช้ $\alpha = 0.1 \times 8.85 \times 10^{-12}$ F/m



รูปที่ ก.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโหมดที่ 2 (K_{II}) กับค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท่าของอากาศ และมี $\theta = 30^\circ$ สำหรับรอยร้าวผิวทรงกระบอกในตัวกลางไฟอ์โซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต

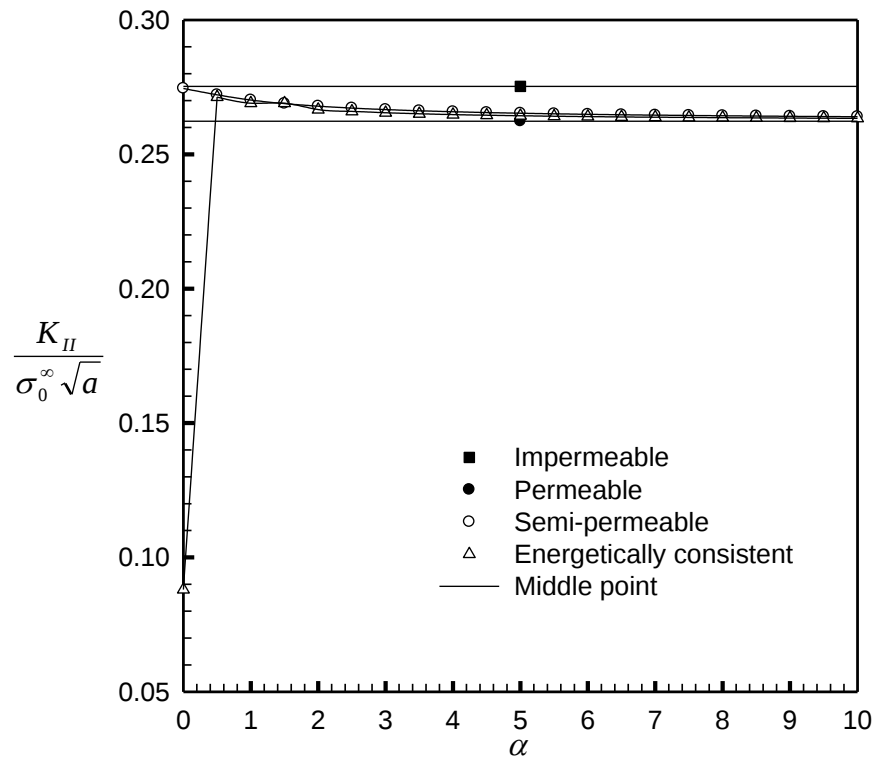


รูปที่ ก.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโหมดที่ 2 (K_{II}) กับค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท่าของอากาศ และมี $\theta = 30^\circ$ สำหรับปลายสุดของรอยร้าวผิวทรงกระบอกในตัวกลางไฟอ์โซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต

ตารางที่ ก.29 ตารางแสดงนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้ม $K_{II}/\sigma_0^\infty \sqrt{a}$ สำหรับจุดล่างสุดของรอยร้าวผิวทรงกระบอกในตัวกลางโพธิโซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต ใช้ประกอบรูปที่ ก.14 และ ก.15

จำนวนเท่าของ คุณสมบัติ การนำไฟฟ้าของ อากาศ (α)	$K_{II}/\sigma_0^\infty \sqrt{a}$			
	เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้า			
	แบบซึมผ่านไม่ได้	แบบซึมผ่านได้	แบบกึ่งซึมผ่านได้	แบบสอดคล้องเชิงพลังงาน
0	0.527493109	0.512681336	0.526545244	0.181001567
0.5	0.527493109	0.512681336	0.523625638	0.522122656
1	0.527493109	0.512681336	0.521257426	0.519202143
1.5	0.527493109	0.512681336	0.51969284	0.519202143
2	0.527493109	0.512681336	0.518593313	0.51640722
2.5	0.527493109	0.512681336	0.517784061	0.515681079
3	0.527493109	0.512681336	0.517163694	0.515169348
3.5	0.527493109	0.512681336	0.516676649	0.514791568
4	0.527493109	0.512681336	0.516284122	0.514505896
4.5	0.527493109	0.512681336	0.51596036	0.514282023
5	0.527493109	0.512681336	0.515688749	0.514103075
5.5	0.527493109	0.512681336	0.515459258	0.513957587
6	0.527493109	0.512681336	0.515261638	0.513837565
6.5	0.527493109	0.512681336	0.515090096	0.513736574
7	0.527493109	0.512681336	0.51493981	0.513650809
7.5	0.527493109	0.512681336	0.514807268	0.513577345
8	0.527493109	0.512681336	0.514689158	0.513513412
8.5	0.527493109	0.512681336	0.51458342	0.513457636
9	0.527493109	0.512681336	0.514488211	0.513408503
9.5	0.527493109	0.512681336	0.514401823	0.513364719
10	0.527493109	0.512681336	0.514323516	0.513323818

หมายเหตุ : (1) ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับศูนย์เท่าของอากาศ ($\alpha = 0$) ในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ ใช้ $\alpha = 0.1 \times 8.85 \times 10^{-12}$ F/m และในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน ใช้ $\alpha = 0.1 \times 8.85 \times 10^{-12}$ F/m

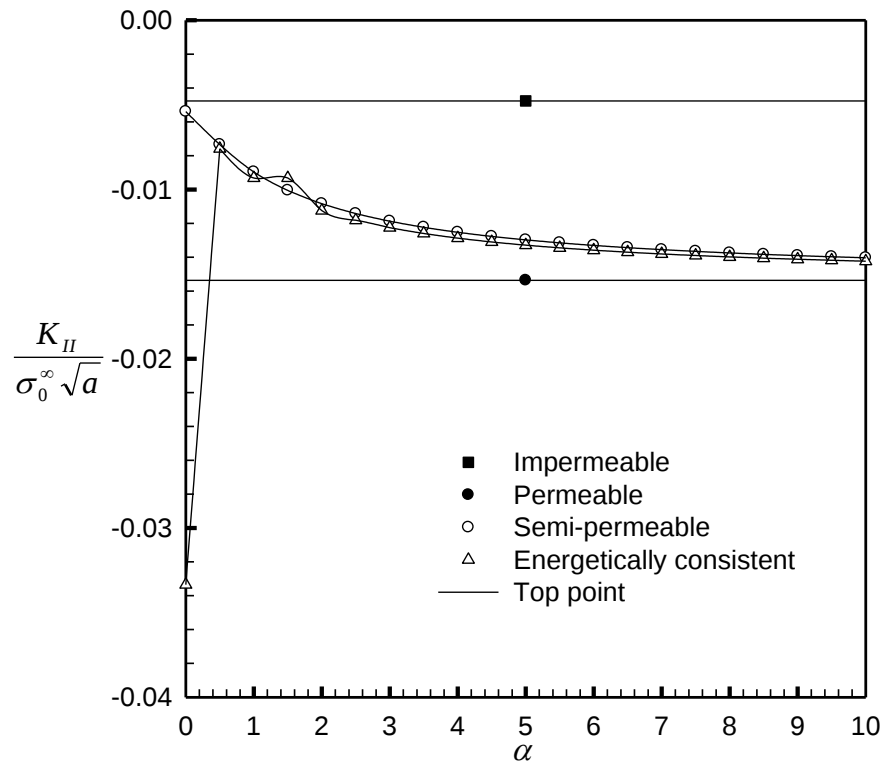


รูปที่ ก.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโหมดที่ 2 (K_{II}) กับค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท่าของอากาศ และมี $\theta = 30^\circ$ สำหรับกึ่งกลางของรอยร้าวผิวทรงกระบอกในตัวกลางไฟอ์โซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต

ตารางที่ ก.30 ตารางแสดงนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้ม $K_{II}/\sigma_0^\infty \sqrt{a}$ สำหรับจุดกึ่งกลางของรอยร้าวผิวทรงกระบอกในตัวกลางโพธิโซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต ใช้ประกอบรูปที่ ก.14 และ ก.16

จำนวนเท่าของ คุณสมบัติ การนำไฟฟ้าของ อากาศ (α)	$K_{II}/\sigma_0^\infty \sqrt{a}$			
	เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้า			
	แบบซึมผ่านไม่ได้	แบบซึมผ่านได้	แบบกึ่งซึมผ่านได้	แบบสอดคล้องเชิงพลังงาน
0	0.275260924	0.262349364	0.274509425	0.08802894
0.5	0.275260924	0.262349364	0.272159462	0.271309305
1	0.275260924	0.262349364	0.270200154	0.269020669
1.5	0.275260924	0.262349364	0.268871581	0.269020669
2	0.275260924	0.262349364	0.267919033	0.266643748
2.5	0.275260924	0.262349364	0.267204113	0.265970869
3	0.275260924	0.262349364	0.266652579	0.265471924
3.5	0.275260924	0.262349364	0.266209757	0.265092401
4	0.275260924	0.262349364	0.265847691	0.264790816
4.5	0.275260924	0.262349364	0.265548797	0.264547996
5	0.275260924	0.262349364	0.26529747	0.264348871
5.5	0.275260924	0.262349364	0.265081944	0.264182714
6	0.275260924	0.262349364	0.264895201	0.264041353
6.5	0.275260924	0.262349364	0.264732261	0.263919565
7	0.275260924	0.262349364	0.264588863	0.26381394
7.5	0.275260924	0.262349364	0.264461564	0.26372127
8	0.275260924	0.262349364	0.264347433	0.263639019
8.5	0.275260924	0.262349364	0.264245662	0.263566771
9	0.275260924	0.262349364	0.264153712	0.2635021
9.5	0.275260924	0.262349364	0.264070154	0.263443861
10	0.275260924	0.262349364	0.263994012	0.263388328

หมายเหตุ : (1) ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับศูนย์เท่าของอากาศ ($\alpha = 0$) ในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ ใช้ $\alpha = 0.1 \times 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ และในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน ใช้ $\alpha = 0.1 \times 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$

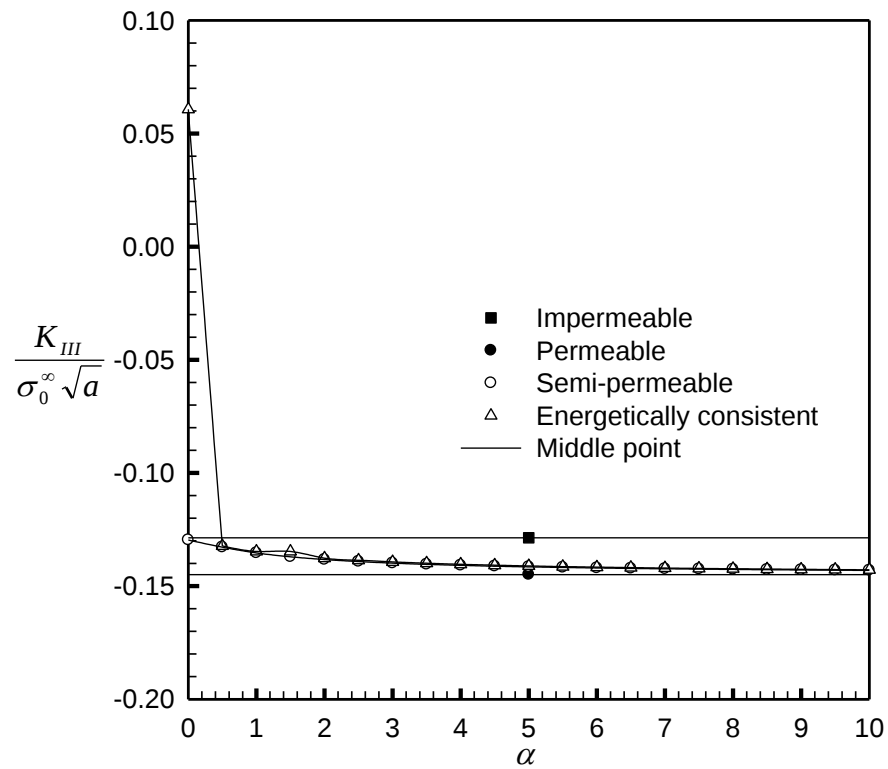


รูปที่ ก.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโหมดที่ 2 (K_{II}) กับค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท่าของอากาศ และมี $\theta = 30^\circ$ สำหรับสูงสุดของรอยร้าวผิวทรงกระบอกในตัวกลางโพธิ์ไอโซเล็กทริกไร้ขอบเขต

ตารางที่ ก.31 ตารางแสดงนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้ม $K_{II}/\sigma_0^\infty \sqrt{a}$ สำหรับจุดสูงสุดของรอยร้าวผิวทรงกระบอกในตัวกลางโพธิโซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต ใช้ประกอบรูปที่ ก.14 และ ก.17

จำนวนเท่าของ คุณสมบัติ การนำไฟฟ้าของ อากาศ (α)	$K_{II}/\sigma_0^\infty \sqrt{a}$			
	เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้า			
	แบบซึมผ่านไม่ได้	แบบซึมผ่านได้	แบบกึ่งซึมผ่านได้	แบบสอดคล้องเชิงพลังงาน
0	-0.004770519	-0.015367427	-0.005395542	-0.033348197
0.5	-0.004770519	-0.015367427	-0.007344139	-0.007588426
1	-0.004770519	-0.015367427	-0.008962112	-0.00932055
1.5	-0.004770519	-0.015367427	-0.010054597	-0.00932055
2	-0.004770519	-0.015367427	-0.010835919	-0.011241647
2.5	-0.004770519	-0.015367427	-0.011420637	-0.011817095
3	-0.004770519	-0.015367427	-0.011872131	-0.012254849
3.5	-0.004770519	-0.015367427	-0.012233001	-0.012596681
4	-0.004770519	-0.015367427	-0.012527488	-0.012872885
4.5	-0.004770519	-0.015367427	-0.012771023	-0.01309864
5	-0.004770519	-0.015367427	-0.012975416	-0.013286828
5.5	-0.004770519	-0.015367427	-0.01315124	-0.013446333
6	-0.004770519	-0.015367427	-0.013302892	-0.013583685
6.5	-0.004770519	-0.015367427	-0.013435188	-0.013702688
7	-0.004770519	-0.015367427	-0.013551597	-0.013806849
7.5	-0.004770519	-0.015367427	-0.013655139	-0.013899129
8	-0.004770519	-0.015367427	-0.013747636	-0.013981225
8.5	-0.004770519	-0.015367427	-0.013830224	-0.014054172
9	-0.004770519	-0.015367427	-0.013904827	-0.014119852
9.5	-0.004770519	-0.015367427	-0.013972341	-0.014179063
10	-0.004770519	-0.015367427	-0.014034142	-0.014236091

หมายเหตุ : (1) ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับศูนย์เท่าของอากาศ ($\alpha = 0$) ในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ ใช้ $\alpha = 0.1 \times 8.85 \times 10^{-12}$ F/m และในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน ใช้ $\alpha = 0.1 \times 8.85 \times 10^{-12}$ F/m

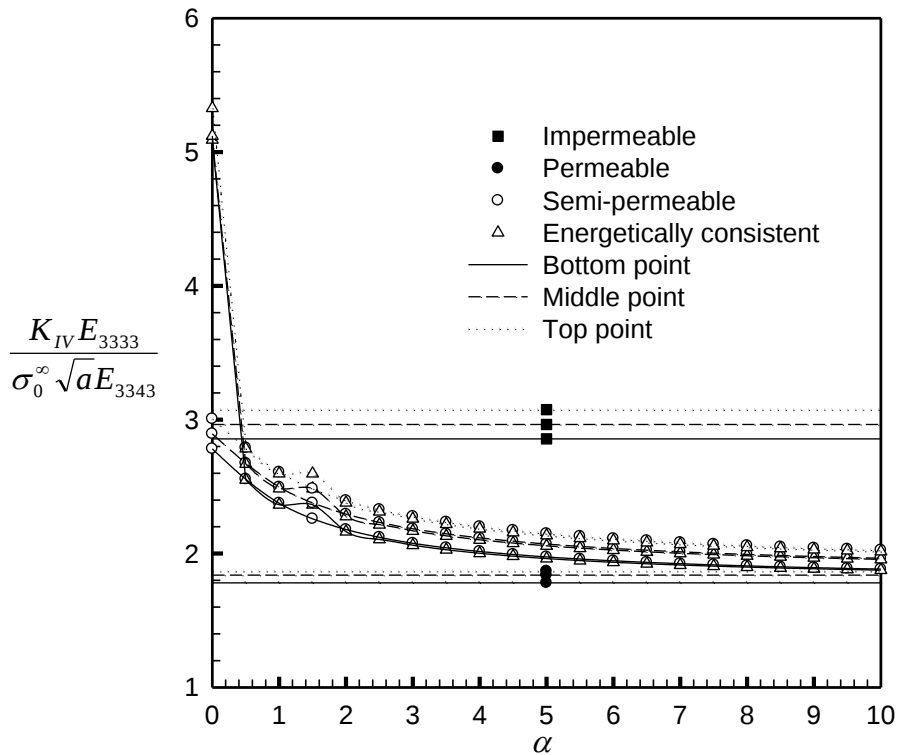


รูปที่ ก.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโหมดที่ 3 (K_{III}) กับค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท่าของอากาศ และมี $\theta = 30^\circ$ สำหรับกึ่งกลางของรอยร้าวผิวทรงกระบอกในตัวกลางไฟอ์โซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต

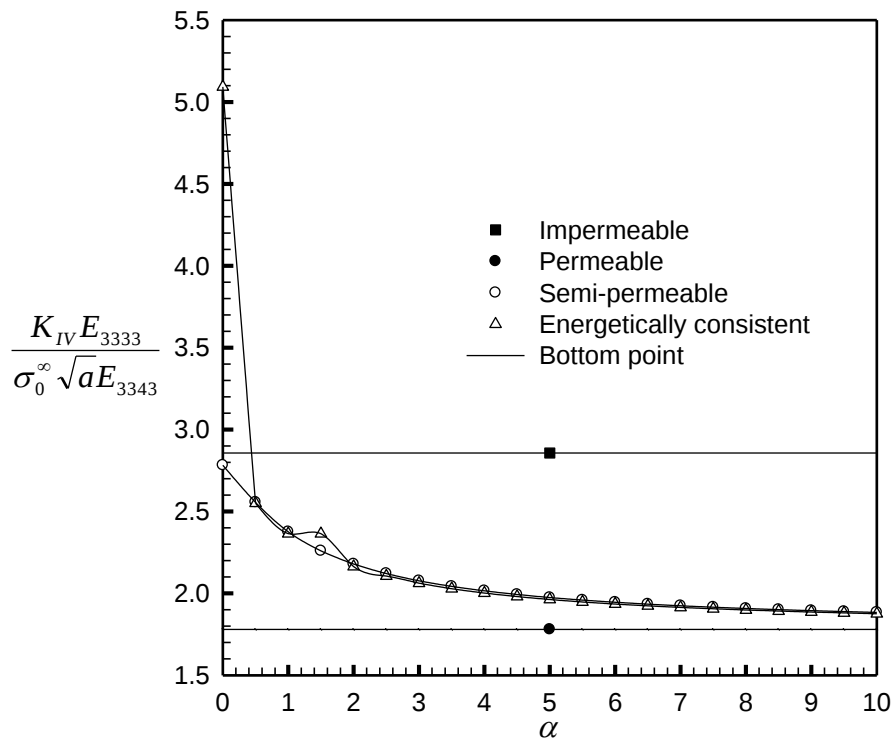
ตารางที่ ก.32 ตารางแสดงนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้ม $K_{III}/\sigma_0^\infty \sqrt{a}$ สำหรับจุดกึ่งกลางของรอยร้าวผิวทรงกระบอกในตัวกลางโพธิโซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต ใช้ประกอบรูปที่ ก.18

จำนวนเท่าของ คุณสมบัติ การนำไฟฟ้าของ อากาศ (α)	$K_{III}/\sigma_0^\infty \sqrt{a}$			
	เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้า			
	แบบซึมผ่านไม่ได้	แบบซึมผ่านได้	แบบกึ่งซึมผ่านได้	แบบสอดคล้องเชิงพลังงาน
0	-0.128627903	-0.144921902	-0.129641147	0.060683933
0.5	-0.128627903	-0.144921902	-0.132777573	-0.132242174
1	-0.128627903	-0.144921902	-0.135343166	-0.134687868
1.5	-0.128627903	-0.144921902	-0.137053305	-0.134687868
2	-0.128627903	-0.144921902	-0.138262694	-0.137640134
2.5	-0.128627903	-0.144921902	-0.139158331	-0.138576674
3	-0.128627903	-0.144921902	-0.139845941	-0.139304494
3.5	-0.128627903	-0.144921902	-0.140389684	-0.139886213
4	-0.128627903	-0.144921902	-0.140829697	-0.140359244
4.5	-0.128627903	-0.144921902	-0.141192485	-0.140753673
5	-0.128627903	-0.144921902	-0.141497579	-0.141085998
5.5	-0.128627903	-0.144921902	-0.141755388	-0.141369042
6	-0.128627903	-0.144921902	-0.141978467	-0.141612796
6.5	-0.128627903	-0.144921902	-0.14217235	-0.141826253
7	-0.128627903	-0.144921902	-0.142342399	-0.142013967
7.5	-0.128627903	-0.144921902	-0.142492334	-0.14217989
8	-0.128627903	-0.144921902	-0.142626472	-0.142328611
8.5	-0.128627903	-0.144921902	-0.142746387	-0.142461823
9	-0.128627903	-0.144921902	-0.142854457	-0.142582079
9.5	-0.128627903	-0.144921902	-0.142952857	-0.142691703
10	-0.128627903	-0.144921902	-0.14304184	-0.142796365

หมายเหตุ : (1) ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับศูนย์เท่าของอากาศ ($\alpha = 0$) ในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ ใช้ $\alpha = 0.1 \times 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ และในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน ใช้ $\alpha = 0.1 \times 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$



รูปที่ ก.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโหมดที่ 4 (K_{IV}) กับค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท่าของอากาศ และมี $\theta = 30^\circ$ สำหรับรอยร้าวผิวทรงกระบอกในตัวกลางโพไอโซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต

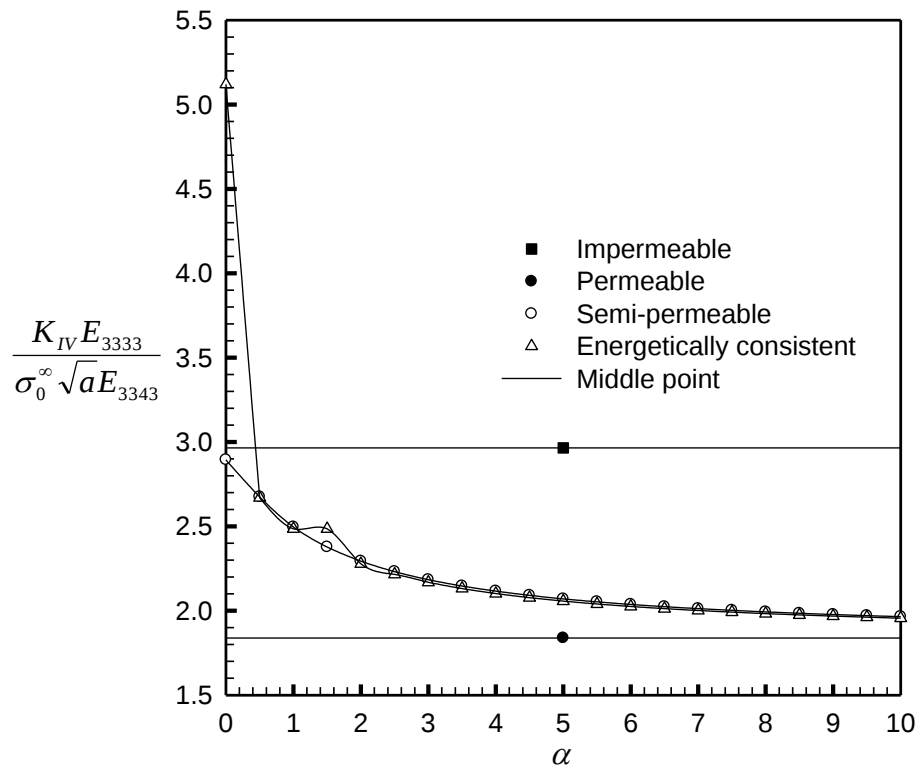


รูปที่ ก.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโหมดที่ 4 (K_{IV}) กับค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท่าของอากาศ และมี $\theta = 30^\circ$ สำหรับจุดกลางสุดของรอยร้าวผิวทรงกระบอกในตัวกลางโพไอโซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต

ตารางที่ ก.33 ตารางแสดงนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้ม $K_{IV}E_{3333}/\sigma_0^\infty \sqrt{a}E_{3343}$ สำหรับจุดล่างสุดของรอยร้าวผิวทรงกระบอกในตัวกลางโพธิโซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต ใช้ประกอบรูปที่ ก.19 และ ก.20

จำนวนเท่าของ คุณสมบัติ การนำไฟฟ้าของ อากาศ (α)	$K_{IV}E_{3333}/\sigma_0^\infty \sqrt{a}E_{3343}$			
	เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้า			
	แบบซึมผ่านไม่ได้	แบบซึมผ่านได้	แบบกึ่งซึมผ่านได้	แบบสอดคล้องเชิงพลังงาน
0	2.856885335	1.780430201	2.782487271	5.092222273
0.5	2.856885335	1.780430201	2.555950716	2.550708766
1	2.856885335	1.780430201	2.375922061	2.364857958
1.5	2.856885335	1.780430201	2.259582294	2.364857958
2	2.856885335	1.780430201	2.179189317	2.163904656
2.5	2.856885335	1.780430201	2.12106838	2.105595811
3	2.856885335	1.780430201	2.076750798	2.06233134
3.5	2.856885335	1.780430201	2.042707763	2.028536731
4	2.856885335	1.780430201	2.015649665	2.002113506
4.5	2.856885335	1.780430201	1.993349031	1.980540818
5	2.856885335	1.780430201	1.97469224	1.962634897
5.5	2.856885335	1.780430201	1.959153973	1.947591602
6	2.856885335	1.780430201	1.945868909	1.934876592
6.5	2.856885335	1.780430201	1.934399382	1.923936657
7	2.856885335	1.780430201	1.924399538	1.91442658
7.5	2.856885335	1.780430201	1.915642927	1.906127114
8	2.856885335	1.780430201	1.907895031	1.898797188
8.5	2.856885335	1.780430201	1.900925962	1.892212631
9	2.856885335	1.780430201	1.894674603	1.886317271
9.5	2.856885335	1.780430201	1.889014058	1.88098312
10	2.856885335	1.780430201	1.883910856	1.875930121

หมายเหตุ : (1) ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับศูนย์เท่าของอากาศ ($\alpha = 0$) ในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ ใช้ $\alpha = 0.1 \times 8.85 \times 10^{-12}$ F/m และในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน ใช้ $\alpha = 0.1 \times 8.85 \times 10^{-12}$ F/m

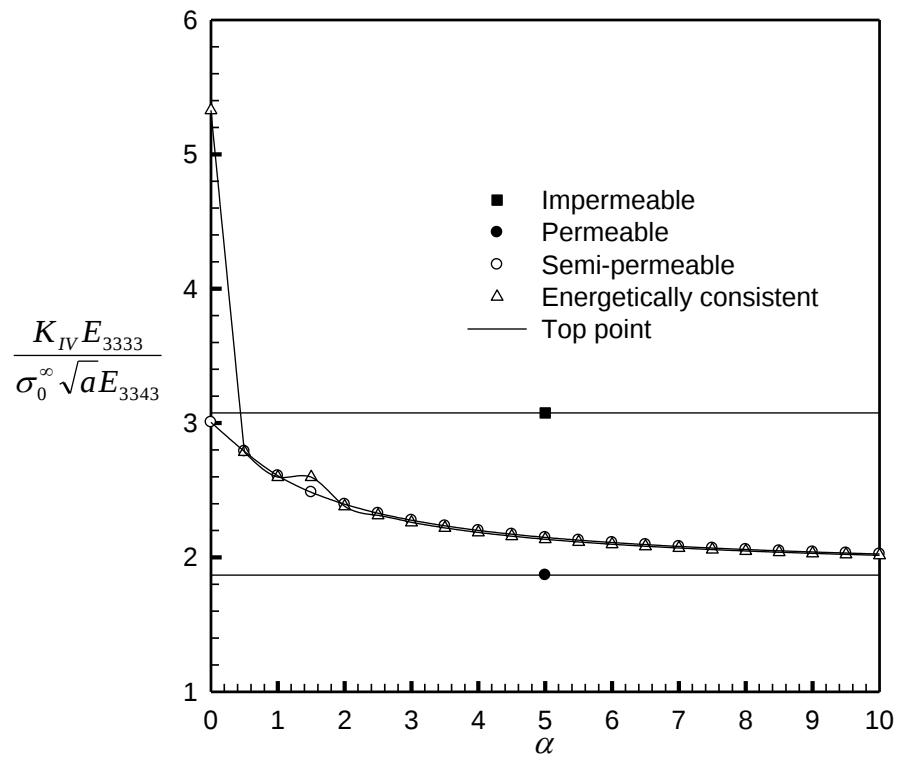


รูปที่ ก.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโหมดที่ 4 (K_{IV}) กับค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท่าของอากาศ และมี $\theta = 30^\circ$ สำหรับจุดกึ่งกลางของรอยร้าวผิวทรงกระบอกในตัวกลางไฟอ์โซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต

ตารางที่ ก.34 ตารางแสดงนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้ม $K_{IV}E_{3333}/\sigma_0^\infty \sqrt{a}E_{3343}$ สำหรับจุดกึ่งกลางของรอยร้าวผิวทรงกระบอกในตัวกลางโพธิ์โซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต ใช้ประกอบรูปที่ ก.19 และ ก.21

จำนวนเท่าของ คุณสมบัติ การนำไฟฟ้าของ อากาศ (α)	$K_{IV}E_{3333}/\sigma_0^\infty \sqrt{a}E_{3343}$			
	เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้า			
	แบบซึมผ่านไม่ได้	แบบซึมผ่านได้	แบบกึ่งซึมผ่านได้	แบบสอดคล้องเชิงพลังงาน
0	2.964783214	1.838375133	2.894026859	5.120129002
0.5	2.964783214	1.838375133	2.675046944	2.67011637
1	2.964783214	1.838375133	2.496514459	2.485672274
1.5	2.964783214	1.838375133	2.377616218	2.485672274
2	2.964783214	1.838375133	2.293675282	2.278140638
2.5	2.964783214	1.838375133	2.231672217	2.215876086
3	2.964783214	1.838375133	2.184034049	2.168760302
3.5	2.964783214	1.838375133	2.146566307	2.131619945
4	2.964783214	1.838375133	2.116360816	2.102092975
4.5	2.964783214	1.838375133	2.091426269	2.077660269
5	2.964783214	1.838375133	2.070407476	2.0572841
5.5	2.964783214	1.838375133	2.052789767	2.04012433
6	2.964783214	1.838375133	2.037523957	2.025527172
6.5	2.964783214	1.838375133	2.024273135	2.012801912
7	2.964783214	1.838375133	2.012664292	2.001685907
7.5	2.964783214	1.838375133	2.002465131	1.991951753
8	2.964783214	1.838375133	1.993338768	1.983250602
8.5	2.964783214	1.838375133	1.985166273	1.97547829
9	2.964783214	1.838375133	1.977807549	1.968492355
9.5	2.964783214	1.838375133	1.971092358	1.962120139
10	2.964783214	1.838375133	1.965048003	1.956093845

หมายเหตุ : (1) ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับศูนย์เท่าของอากาศ ($\alpha = 0$) ในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ ใช้ $\alpha = 0.1 \times 8.85 \times 10^{-12}$ F/m และในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน ใช้ $\alpha = 0.1 \times 8.85 \times 10^{-12}$ F/m

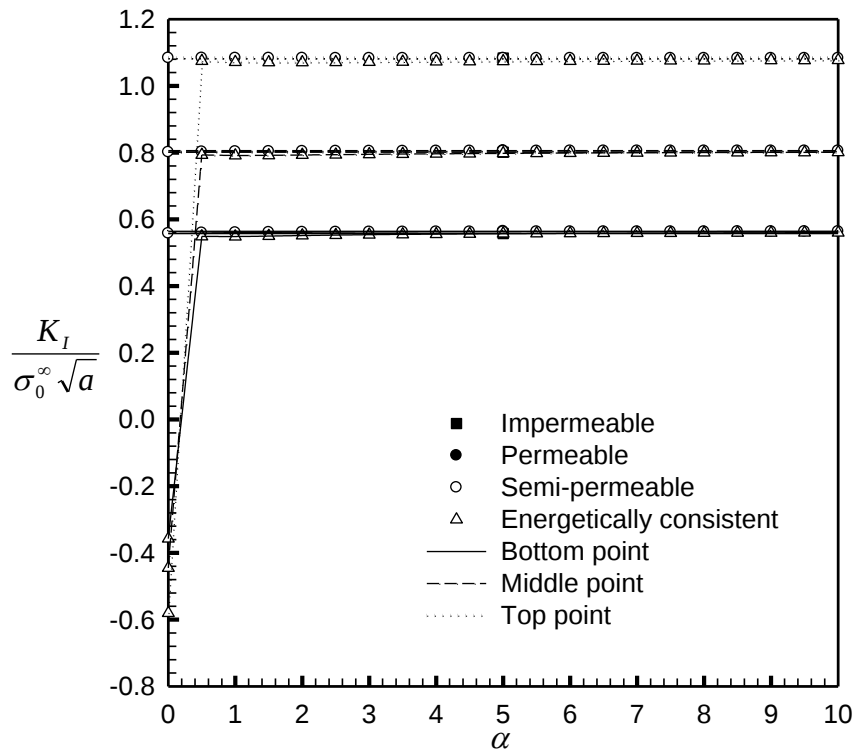


รูปที่ ก.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโหมดที่ 4 (K_{IV}) กับค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท่าของอากาศ และมี $\theta = 30^\circ$ สำหรับจุดสูงสุดของรอยร้าวผิวทรงกระบอกในตัวกลางโพสิซีอีเล็กทริกไร้ขอบเขต

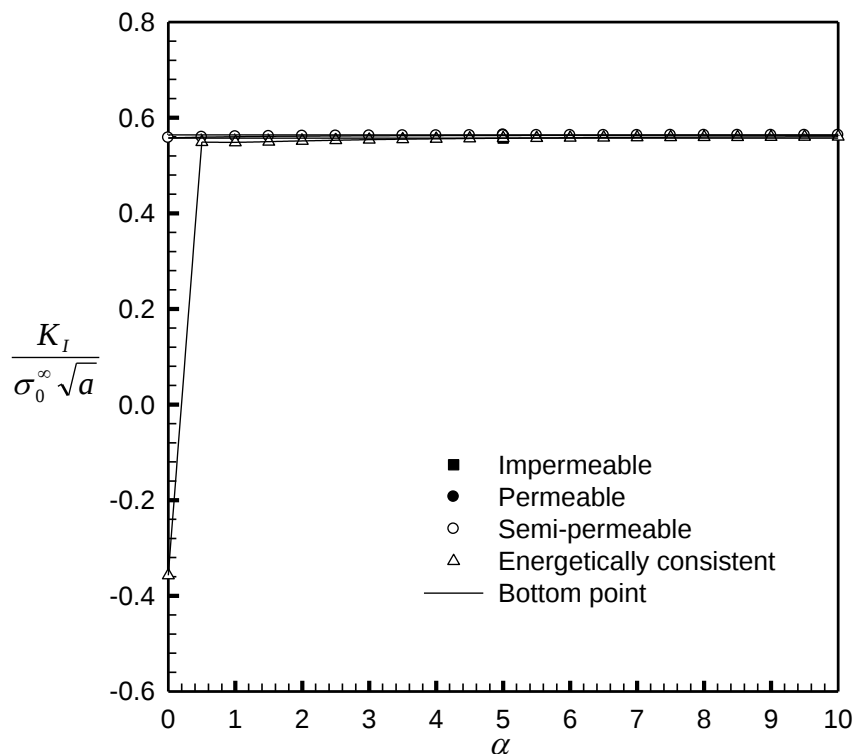
ตารางที่ ก.35 ตารางแสดงนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้ม $K_{IV}E_{3333}/\sigma_0^\infty \sqrt{a}E_{3343}$ สำหรับจุดสูงสุดของรอยร้าวผิวทรงกระบอกในตัวกลางโพธิ์โฮโมจีเนียสที่รับขอบเขต ใช้ประกอบรูปที่ ก.19 และ ก.22

จำนวนเท่าของ คุณสมบัติ การนำไฟฟ้าของ อากาศ (α)	$K_{IV}E_{3333}/\sigma_0^\infty \sqrt{a}E_{3343}$			
	เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้า			
	แบบซึมผ่านไม่ได้	แบบซึมผ่านได้	แบบกึ่งซึมผ่านได้	แบบสอดคล้องเชิงพลังงาน
0	3.074996673	1.868063268	3.005945699	5.327572293
0.5	3.074996673	1.868063268	2.789446506	2.784754691
1	3.074996673	1.868063268	2.608173205	2.597837903
1.5	3.074996673	1.868063268	2.484559219	2.597837903
2	3.074996673	1.868063268	2.395594144	2.380497645
2.5	3.074996673	1.868063268	2.328604281	2.313027596
3	3.074996673	1.868063268	2.27677028	2.260859518
3.5	3.074996673	1.868063268	2.235087453	2.219650277
4	3.074996673	1.868063268	2.200971921	2.186010259
4.5	3.074996673	1.868063268	2.17274395	2.158237502
5	3.074996673	1.868063268	2.148982426	2.134945347
5.5	3.074996673	1.868063268	2.128556998	2.115121962
6	3.074996673	1.868063268	2.110866104	2.097986392
6.5	3.074996673	1.868063268	2.095417279	2.083042007
7	3.074996673	1.868063268	2.081811093	2.069915382
7.5	3.074996673	1.868063268	2.069713964	2.058266385
8	3.074996673	1.868063268	2.058874666	2.047851083
8.5	3.074996673	1.868063268	2.04920172	2.038582419
9	3.074996673	1.868063268	2.04045779	2.030217898
9.5	3.074996673	1.868063268	2.032523776	2.02264427
10	3.074996673	1.868063268	2.025274548	2.015356049

หมายเหตุ : (1) ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับศูนย์เท่าของอากาศ ($\alpha = 0$) ในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ ใช้ $\alpha = 0.1 \times 8.85 \times 10^{-12}$ F/m และในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน ใช้ $\alpha = 0.1 \times 8.85 \times 10^{-12}$ F/m



รูปที่ ก.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโหมดที่ 1 (K_I) กับค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท่าของอากาศ และมี $\theta = 45^\circ$ สำหรับรอยร้าวผิวทรงกระบอกในตัวกลางไพอีโซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต

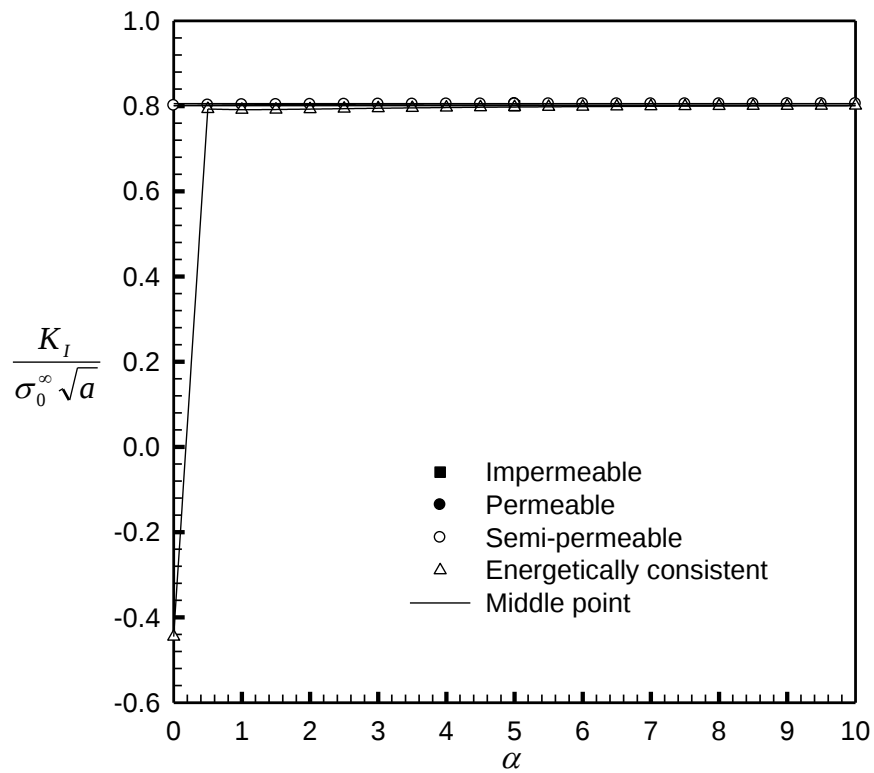


รูปที่ ก.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโหมดที่ 1 (K_I) กับค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท่าของอากาศ และมี $\theta = 45^\circ$ สำหรับจุดล่างสุดของรอยร้าวผิวทรงกระบอกในตัวกลางไพอีโซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต

ตารางที่ ก.36 ตารางแสดงนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้ม $K_I/\sigma_0^\infty \sqrt{a}$ สำหรับจุดล่างสุดของรอยร้าวผิวทรงกระบอกในตัวกลางโพธิโซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต ใช้ประกอบรูปที่ ก.23 และ ก.24

จำนวนเท่าของ คุณสมบัติ การนำไฟฟ้าของ อากาศ (α)	$K_I/\sigma_0^\infty \sqrt{a}$			
	เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้า			
	แบบซึมผ่านไม่ได้	แบบซึมผ่านได้	แบบกึ่งซึมผ่านได้	แบบสอดคล้องเชิงพลังงาน
0	0.55730026	0.564024458	0.557754211	-0.357247831
0.5	0.55730026	0.564024458	0.559123386	0.548864469
1	0.55730026	0.564024458	0.560203792	0.548453911
1.5	0.55730026	0.564024458	0.56090522	0.549828041
2	0.55730026	0.564024458	0.561393389	0.551391495
2.5	0.55730026	0.564024458	0.56175138	0.552790654
3	0.55730026	0.564024458	0.56202456	0.553971807
3.5	0.55730026	0.564024458	0.562239732	0.554959198
4	0.55730026	0.564024458	0.562413319	0.555785698
4.5	0.55730026	0.564024458	0.562556256	0.556483903
5	0.55730026	0.564024458	0.56267607	0.557078297
5.5	0.55730026	0.564024458	0.562777953	0.557589445
6	0.55730026	0.564024458	0.56286549	0.558032916
6.5	0.55730026	0.564024458	0.562941576	0.558420824
7	0.55730026	0.564024458	0.563008311	0.558762738
7.5	0.55730026	0.564024458	0.563067234	0.559065858
8	0.55730026	0.564024458	0.563119793	0.559336767
8.5	0.55730026	0.564024458	0.563166888	0.559580036
9	0.55730026	0.564024458	0.563209328	0.559799626
9.5	0.55730026	0.564024458	0.563247769	0.559998788
10	0.55730026	0.564024458	0.563282752	0.560180214

หมายเหตุ : (1) ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับศูนย์เท่าของอากาศ ($\alpha = 0$) ในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ ใช้ $\alpha = 0.1 \times 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ และในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน ใช้ $\alpha = 0.0001 \times 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$

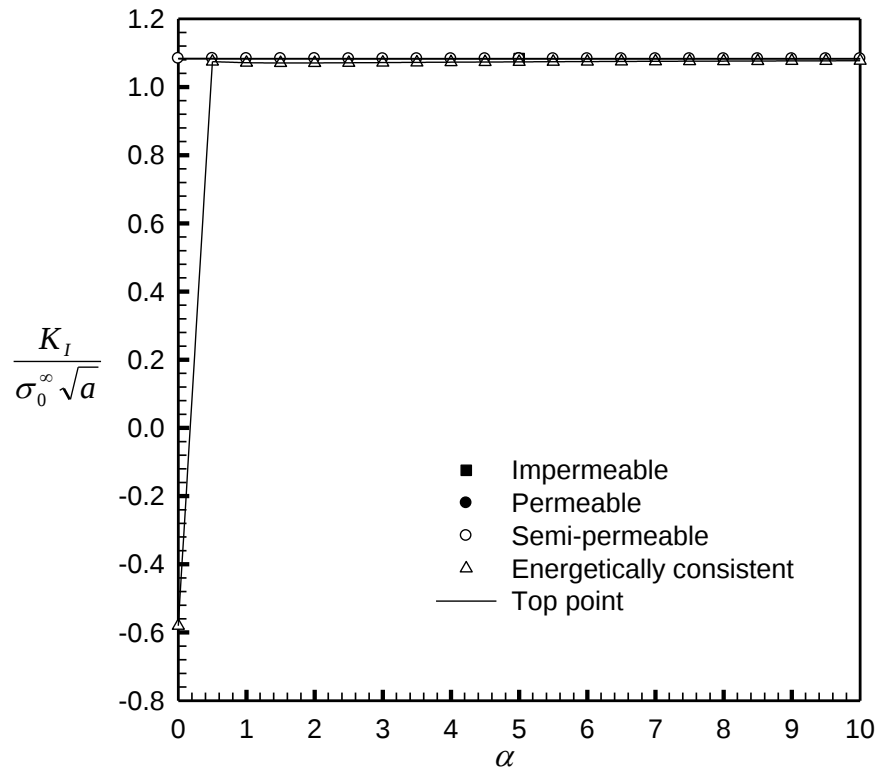


รูปที่ ก.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโหมดที่ 1 (K_I) กับค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท่าของอากาศ และมี $\theta = 45^\circ$ สำหรับจุดกึ่งกลางของรอยร้าวผิวทรงกระบอกในตัวกลางไฟอ์โซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต

ตารางที่ ก.37 ตารางแสดงนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้ม $K_I/\sigma_0^\infty \sqrt{a}$ สำหรับจุดกึ่งกลางของรอยร้าวผิวทรงกระบอกในตัวกลางโพธิโซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต ใช้ประกอบรูปที่ ก.23 และ ก.25

จำนวนเท่าของ คุณสมบัติ การนำไฟฟ้าของ อากาศ (α)	$K_I/\sigma_0^\infty \sqrt{a}$			
	เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้า			
	แบบซึมผ่านไม่ได้	แบบซึมผ่านได้	แบบกึ่งซึมผ่านได้	แบบสอดคล้องเชิงพลังงาน
0	0.800973675	0.805819351	0.80130011	-0.445153746
0.5	0.800973675	0.805819351	0.802289305	0.793039303
1	0.800973675	0.805819351	0.803072351	0.79149741
1.5	0.800973675	0.805819351	0.803581417	0.791908202
2	0.800973675	0.805819351	0.803935574	0.792853258
2.5	0.800973675	0.805819351	0.804195028	0.793878823
3	0.800973675	0.805819351	0.804392762	0.794840967
3.5	0.800973675	0.805819351	0.80454807	0.795703952
4	0.800973675	0.805819351	0.804673322	0.796465238
4.5	0.800973675	0.805819351	0.804776341	0.797133422
5	0.800973675	0.805819351	0.804862462	0.79772184
5.5	0.800973675	0.805819351	0.804935509	0.7982416
6	0.800973675	0.805819351	0.804998301	0.798701767
6.5	0.800973675	0.805819351	0.805052805	0.799111879
7	0.800973675	0.805819351	0.805100548	0.799479137
7.5	0.800973675	0.805819351	0.805142736	0.799809347
8	0.800973675	0.805819351	0.805180243	0.800108156
8.5	0.800973675	0.805819351	0.805213821	0.800379384
9	0.800973675	0.805819351	0.805244055	0.800626571
9.5	0.800973675	0.805819351	0.80527142	0.800852698
10	0.800973675	0.805819351	0.805296305	0.801060288

หมายเหตุ : (1) ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับศูนย์เท่าของอากาศ ($\alpha = 0$) ในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ ใช้ $\alpha = 0.1 \times 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ และในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน ใช้ $\alpha = 0.0001 \times 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$

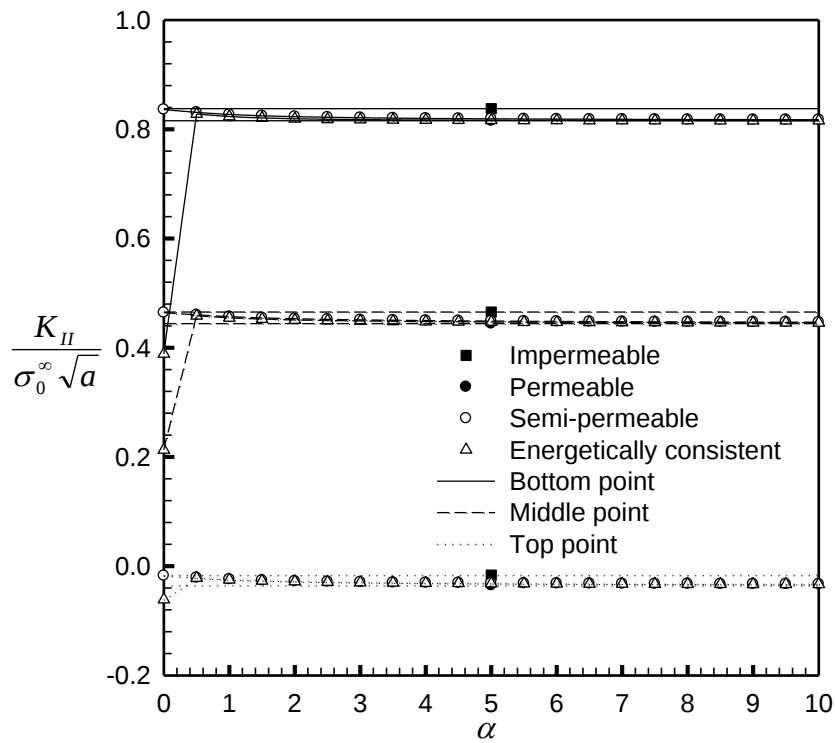


รูปที่ ก.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโหมดที่ 1 (K_I) กับ ค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท่าของอากาศ และมี $\theta = 45^\circ$ สำหรับจุดสูงสุดของรอยร้าวผิวทรงกระบอกในตัวกลางไฟอ์โซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต

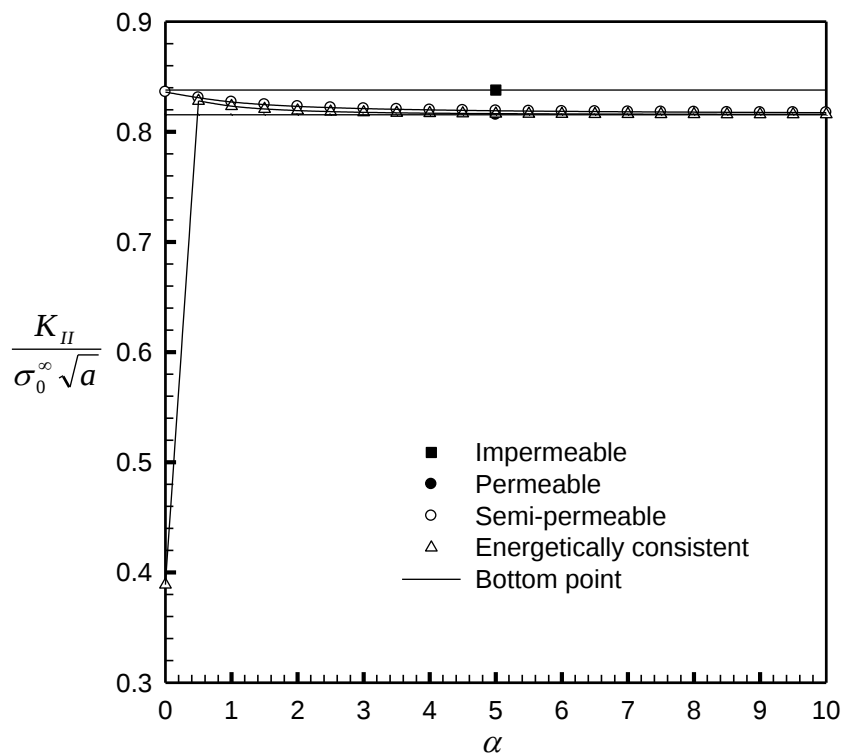
ตารางที่ ก.38 ตารางแสดงนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้ม $K_I/\sigma_0^\infty \sqrt{a}$ สำหรับจุดสูงสุดของรอยร้าว ผิวทรงกระบอกในตัวยกกลางไฟโอซีโอเล็กทริกไร้ขอบเขต ใช้ประกอบรูปที่ ก.23 และ ก.26

จำนวนเท่าของ คุณสมบัติ การนำไฟฟ้าของ อากาศ (α)	$K_I/\sigma_0^\infty \sqrt{a}$			
	เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้า			
	แบบซึมผ่านไม่ได้	แบบซึมผ่านได้	แบบกึ่งซึมผ่านได้	แบบสอดคล้องเชิงพลังงาน
0	1.083706453	1.082582663	1.083627377	-0.580371466
0.5	1.083706453	1.082582663	1.083390481	1.074510997
1	1.083706453	1.082582663	1.083204385	1.071387481
1.5	1.083706453	1.082582663	1.083084478	1.070574712
2	1.083706453	1.082582663	1.083001646	1.070659622
2.5	1.083706453	1.082582663	1.082941467	1.071092884
3	1.083706453	1.082582663	1.082895898	1.071650708
3.5	1.083706453	1.082582663	1.082860417	1.072232584
4	1.083706453	1.082582663	1.082831876	1.072798702
4.5	1.083706453	1.082582663	1.082808482	1.073330972
5	1.083706453	1.082582663	1.082789066	1.073823585
5.5	1.083706453	1.082582663	1.0827727	1.07427629
6	1.083706453	1.082582663	1.082758646	1.074691816
6.5	1.083706453	1.082582663	1.08274649	1.075072399
7	1.083706453	1.082582663	1.082735849	1.075421116
7.5	1.083706453	1.082582663	1.082726508	1.07574194
8	1.083706453	1.082582663	1.08271822	1.076036522
8.5	1.083706453	1.082582663	1.082710819	1.076308172
9	1.083706453	1.082582663	1.082704172	1.076559238
9.5	1.083706453	1.082582663	1.082698169	1.076791808
10	1.083706453	1.082582663	1.082692722	1.077007734

หมายเหตุ : (1) ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับศูนย์เท่าของอากาศ ($\alpha = 0$) ในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ ใช้ $\alpha = 0.1 \times 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ และในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน ใช้ $\alpha = 0.0001 \times 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$



รูปที่ ก.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโหมดที่ 2 (K_{II}) กับ ค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท่าของอากาศ และมี $\theta = 45^\circ$ สำหรับรอยร้าวผิวทรงกระบอกในตัวกลางไฟอ์โซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต

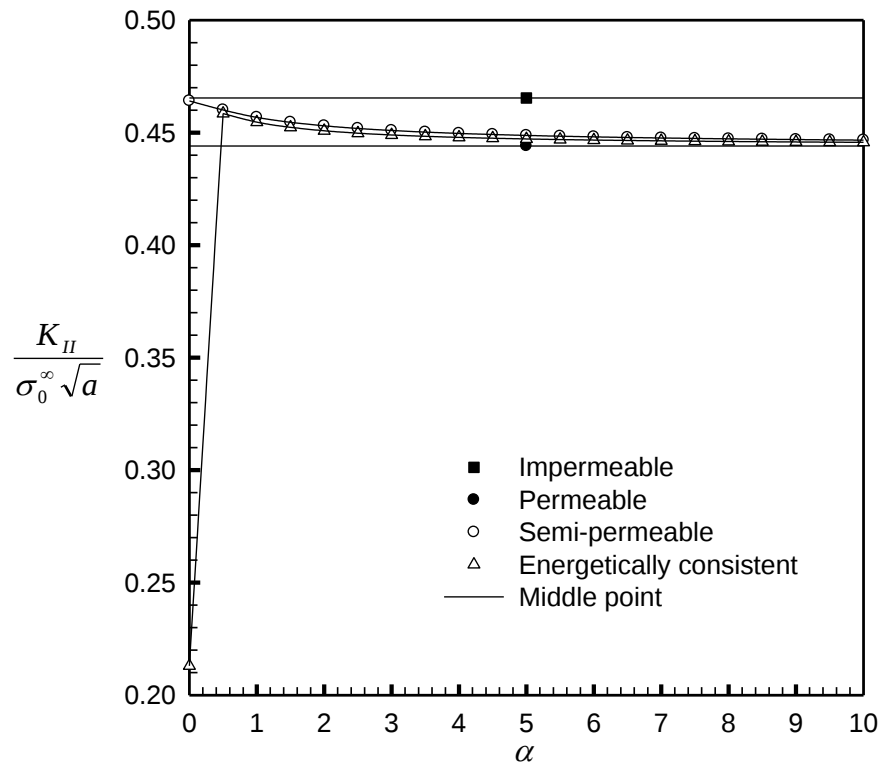


รูปที่ ก.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโหมดที่ 2 (K_{II}) กับค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท่าของอากาศ และมี $\theta = 45^\circ$ สำหรับจุดกลางสุดของรอยร้าวผิวทรงกระบอกในตัวกลางไฟอ์โซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต

ตารางที่ ก.39 ตารางแสดงนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้ม $K_{II}/\sigma_0^\infty \sqrt{a}$ สำหรับจุดล่างสุดของรอยร้าวผิวทรงกระบอกในตัวกลางโพธิโซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต ใช้ประกอบรูปที่ ก.27 และ ก.28

จำนวนเท่าของ คุณสมบัติ การนำไฟฟ้าของ อากาศ (α)	$K_{II}/\sigma_0^\infty \sqrt{a}$			
	เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้า			
	แบบซึมผ่านไม่ได้	แบบซึมผ่านได้	แบบกึ่งซึมผ่านได้	แบบสอดคล้องเชิงพลังงาน
0	0.837832132	0.815435815	0.836077155	0.388896918
0.5	0.837832132	0.815435815	0.830928462	0.828035326
1	0.837832132	0.815435815	0.827055438	0.823267444
1.5	0.837832132	0.815435815	0.824653678	0.820716081
2	0.837832132	0.815435815	0.823043136	0.819220474
2.5	0.837832132	0.815435815	0.821896886	0.818276667
3	0.837832132	0.815435815	0.821043298	0.817645096
3.5	0.837832132	0.815435815	0.820384652	0.817202976
4	0.837832132	0.815435815	0.819862091	0.816881346
4.5	0.837832132	0.815435815	0.819437958	0.816640613
5	0.837832132	0.815435815	0.819086967	0.816455534
5.5	0.837832132	0.815435815	0.818791859	0.816310178
6	0.837832132	0.815435815	0.818540454	0.816194068
6.5	0.837832132	0.815435815	0.81832378	0.816099811
7	0.837832132	0.815435815	0.81813514	0.816022236
7.5	0.837832132	0.815435815	0.817969524	0.815957713
8	0.837832132	0.815435815	0.817822905	0.815903338
8.5	0.837832132	0.815435815	0.817692228	0.815857131
9	0.837832132	0.815435815	0.817575039	0.815817531
9.5	0.837832132	0.815435815	0.817469361	0.815783332
10	0.837832132	0.815435815	0.817373585	0.815753592

หมายเหตุ : (1) ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับศูนย์เท่าของอากาศ ($\alpha = 0$) ในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ ใช้ $\alpha = 0.1 \times 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ และในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน ใช้ $\alpha = 0.0001 \times 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$

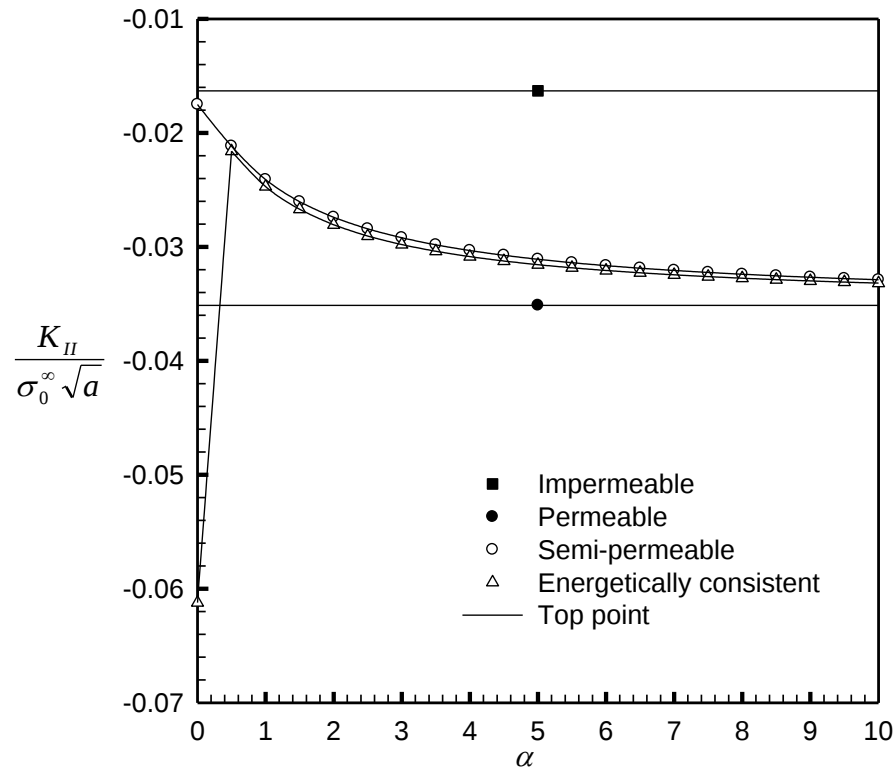


รูปที่ ก.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโหมดที่ 2 (K_{II}) กับค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 10 เทาของอากาศ และมี $\theta = 45^\circ$ สำหรับจุดกึ่งกลางของรอยร้าวผิวทรงกระบอกในตัวกลางไฟอ์โซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต

ตารางที่ ก.40 ตารางแสดงนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้ม $K_{II}/\sigma_0^\infty \sqrt{a}$ สำหรับจุดกึ่งกลางของรอยร้าวผิวทรงกระบอกในตัวกลางโพซิซีอีเล็กทริกไร้ขอบเขต ใช้ประกอบรูปที่ ก.27 และ ก.29

จำนวนเท่าของ คุณสมบัติ การนำไฟฟ้าของ อากาศ (α)	$K_{II}/\sigma_0^\infty \sqrt{a}$			
	เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้า			
	แบบซึมผ่านไม่ได้	แบบซึมผ่านได้	แบบกึ่งซึมผ่านได้	แบบสอดคล้องเชิงพลังงาน
0	0.465416253	0.444068535	0.464106791	0.212991827
0.5	0.465416253	0.444068535	0.460077303	0.458509967
1	0.465416253	0.444068535	0.456788591	0.454686475
1.5	0.465416253	0.444068535	0.454589969	0.452363316
2	0.465416253	0.444068535	0.453024915	0.450832844
2.5	0.465416253	0.444068535	0.451859078	0.449759077
3	0.465416253	0.444068535	0.450958302	0.44897048
3.5	0.465416253	0.444068535	0.450242582	0.448367272
4	0.465416253	0.444068535	0.449660072	0.447893658
4.5	0.465416253	0.444068535	0.449176826	0.447511381
5	0.465416253	0.444068535	0.448770136	0.447197262
5.5	0.465416253	0.444068535	0.448423185	0.446934765
6	0.465416253	0.444068535	0.448123691	0.446712389
6.5	0.465416253	0.444068535	0.447862524	0.446521524
7	0.465416253	0.444068535	0.447632489	0.446355674
7.5	0.465416253	0.444068535	0.447429347	0.446211333
8	0.465416253	0.444068535	0.447247579	0.446083409
8.5	0.465416253	0.444068535	0.447084421	0.445969766
9	0.465416253	0.444068535	0.446937157	0.445868154
9.5	0.465416253	0.444068535	0.446803578	0.445776769
10	0.465416253	0.444068535	0.446681862	0.445694151

หมายเหตุ : (1) ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับศูนย์เท่าของอากาศ ($\alpha = 0$) ในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ ใช้ $\alpha = 0.1 \times 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ และในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน ใช้ $\alpha = 0.0001 \times 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$

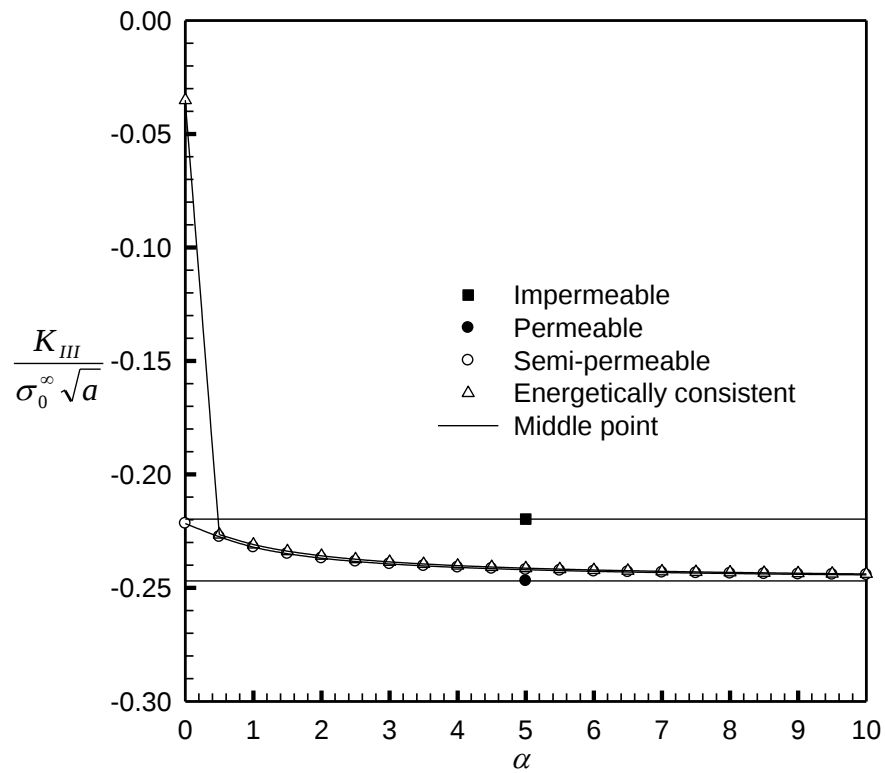


รูปที่ ก.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโหมดที่ 2 (K_{II}) กับค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท่าของอากาศ และมี $\theta = 45^\circ$ สำหรับจุดสูงสุดของรอยร้าวผิวทรงกระบอกในตัวกลางโพธิ์โซลิดที่รัศมีขอบเขต

ตารางที่ ก.41 ตารางแสดงนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้ม $K_{II}/\sigma_0^\infty \sqrt{a}$ สำหรับจุดสูงสุดของรอยร้าวผิวทรงกระบอกในตัวกลางโพธิโซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต ใช้ประกอบรูปที่ ก.27 และ ก.30

จำนวนเท่าของ คุณสมบัติ การนำไฟฟ้าของ อากาศ (α)	$K_{II}/\sigma_0^\infty \sqrt{a}$			
	เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้า			
	แบบซึมผ่านไม่ได้	แบบซึมผ่านได้	แบบกึ่งซึมผ่านได้	แบบสอดคล้องเชิงพลังงาน
0	-0.01631287	-0.035141194	-0.035141194	-0.061209586
0.5	-0.01631287	-0.035141194	-0.035141194	-0.021597138
1	-0.01631287	-0.035141194	-0.035141194	-0.024708451
1.5	-0.01631287	-0.035141194	-0.035141194	-0.026696544
2	-0.01631287	-0.035141194	-0.035141194	-0.028060677
2.5	-0.01631287	-0.035141194	-0.035141194	-0.029049483
3	-0.01631287	-0.035141194	-0.035141194	-0.029798529
3.5	-0.01631287	-0.035141194	-0.035141194	-0.030383756
4	-0.01631287	-0.035141194	-0.035141194	-0.03085442
4.5	-0.01631287	-0.035141194	-0.035141194	-0.031239823
5	-0.01631287	-0.035141194	-0.035141194	-0.031562181
5.5	-0.01631287	-0.035141194	-0.035141194	-0.03183578
6	-0.01631287	-0.035141194	-0.035141194	-0.032070105
6.5	-0.01631287	-0.035141194	-0.035141194	-0.032273429
7	-0.01631287	-0.035141194	-0.035141194	-0.032451397
7.5	-0.01631287	-0.035141194	-0.035141194	-0.032608454
8	-0.01631287	-0.035141194	-0.035141194	-0.03274842
8.5	-0.01631287	-0.035141194	-0.035141194	-0.032873723
9	-0.01631287	-0.035141194	-0.035141194	-0.032986551
9.5	-0.01631287	-0.035141194	-0.035141194	-0.03308868
10	-0.01631287	-0.035141194	-0.035141194	-0.033181561

หมายเหตุ : (1) ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับศูนย์เท่าของอากาศ ($\alpha = 0$) ในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ ใช้ $\alpha = 0.1 \times 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ และในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน ใช้ $\alpha = 0.0001 \times 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$

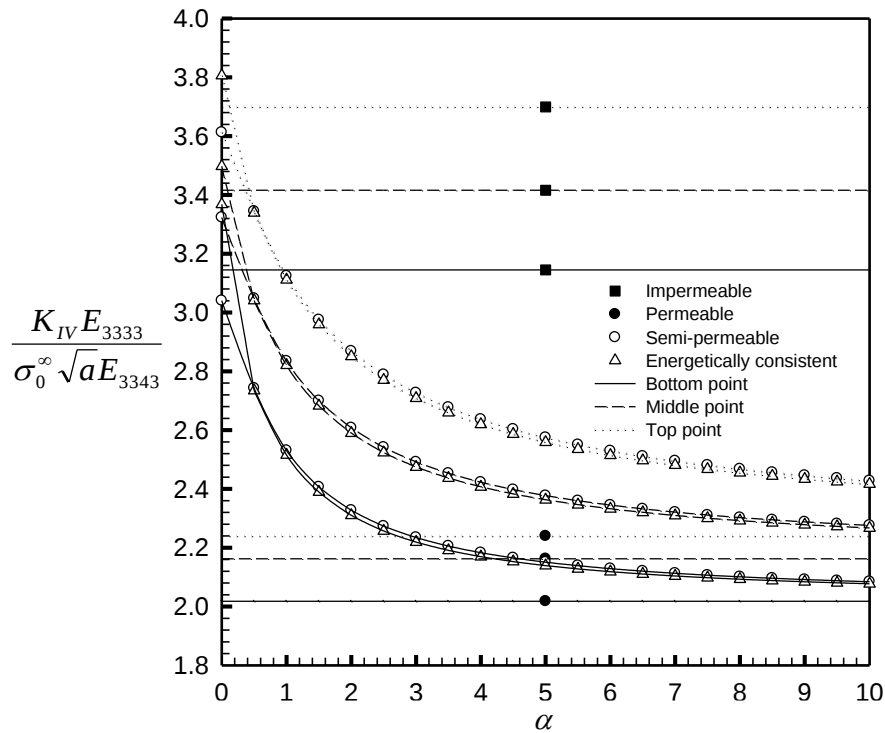


รูปที่ ก.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโหมดที่ 3 (K_{III}) กับค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท่าของอากาศ และมี $\theta = 45^\circ$ สำหรับจุดกึ่งกลางของรอยร้าวผิวทรงกระบอกในตัวกลางไฟอ์โซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต

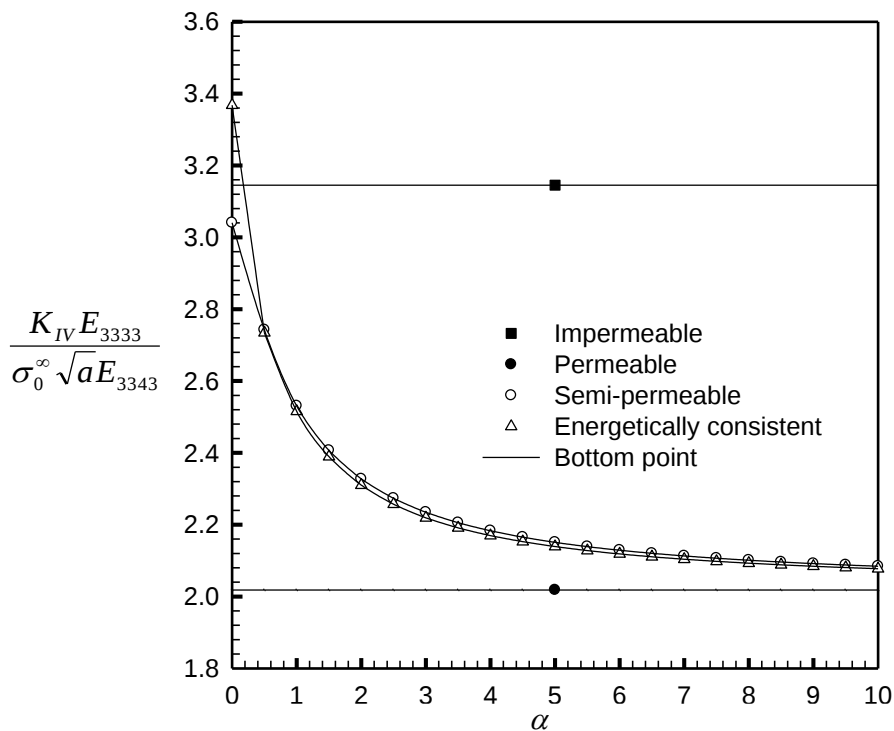
ตารางที่ ก.42 ตารางแสดงนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้ม $K_{III}/\sigma_0^\infty \sqrt{a}$ สำหรับจุดกึ่งกลางของรอยร้าวผิวทรงกระบอกในตัวกลางโพสิซีโออิเล็กทรอนิกส์ไร้ขอบเขต ใช้ประกอบรูปที่ ก.31

จำนวนเท่าของ คุณสมบัติ การนำไฟฟ้าของ อากาศ (α)	$K_{III}/\sigma_0^\infty \sqrt{a}$			
	เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้า			
	แบบซึมผ่านไม่ได้	แบบซึมผ่านได้	แบบกึ่งซึมผ่านได้	แบบสอดคล้องเชิงพลังงาน
0	-0.219663543	-0.246907945	-0.221621686	-0.035102896
0.5	-0.219663543	-0.246907945	-0.227478513	-0.226506198
1	-0.219663543	-0.246907945	-0.232027448	-0.230878815
1.5	-0.219663543	-0.246907945	-0.234930712	-0.23380243
2	-0.219663543	-0.246907945	-0.236920829	-0.235861638
2.5	-0.219663543	-0.246907945	-0.238360441	-0.237378915
3	-0.219663543	-0.246907945	-0.239446336	-0.238537747
3.5	-0.219663543	-0.246907945	-0.240291631	-0.239450546
4	-0.219663543	-0.246907945	-0.240968603	-0.240185958
4.5	-0.219663543	-0.246907945	-0.241522211	-0.240791833
5	-0.219663543	-0.246907945	-0.241982227	-0.241298116
5.5	-0.219663543	-0.246907945	-0.242370294	-0.241727297
6	-0.219663543	-0.246907945	-0.242702717	-0.242096427
6.5	-0.219663543	-0.246907945	-0.242990188	-0.242416804
7	-0.219663543	-0.246907945	-0.243241425	-0.242697695
7.5	-0.219663543	-0.246907945	-0.243462429	-0.242945476
8	-0.219663543	-0.246907945	-0.243658449	-0.243165846
8.5	-0.219663543	-0.246907945	-0.243833497	-0.243363098
9	-0.219663543	-0.246907945	-0.243990753	-0.243540677
9.5	-0.219663543	-0.246907945	-0.244132787	-0.243701378
10	-0.219663543	-0.246907945	-0.244261699	-0.24384749

หมายเหตุ : (1) ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับศูนย์เท่าของอากาศ ($\alpha = 0$) ในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ ใช้ $\alpha = 0.1 \times 8.85 \times 10^{-12}$ F/m และในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน ใช้ $\alpha = 0.0001 \times 8.85 \times 10^{-12}$ F/m



รูปที่ ก.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโหมดที่ 4 (K_{IV}) กับค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท่าของอากาศ และมี $\theta = 45^\circ$ สำหรับรอยร้าวผิวทรงกระบอกในตัวกลางไฟอ์โซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต

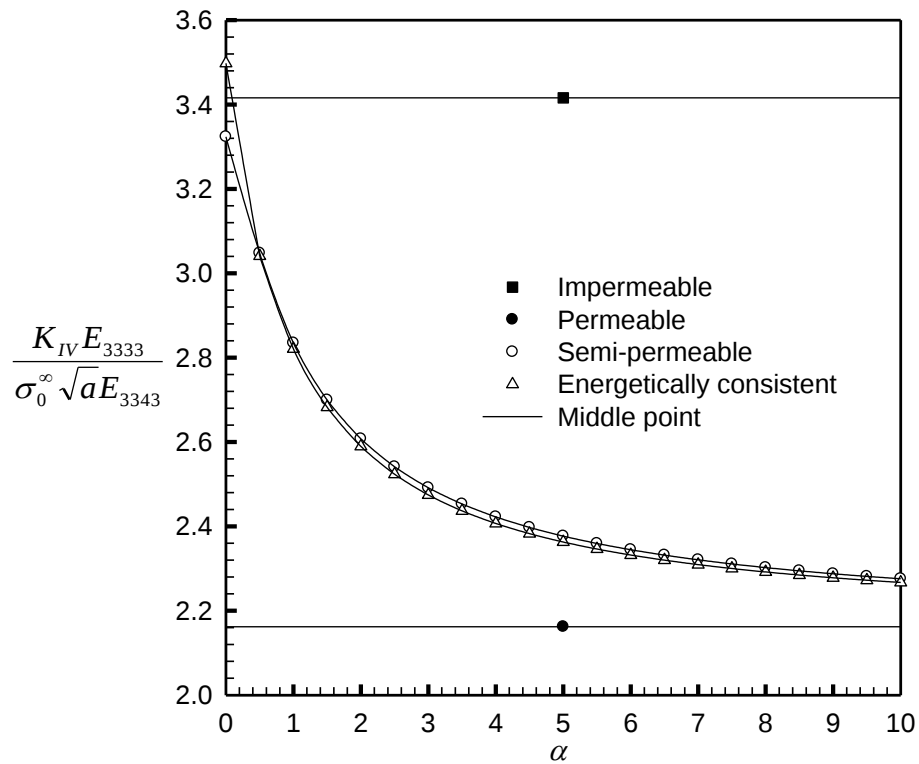


รูปที่ ก.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโหมดที่ 4 (K_{IV}) กับค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท่าของอากาศ และมี $\theta = 45^\circ$ สำหรับจุดล่างสุดของรอยร้าวผิวทรงกระบอกในตัวกลางไฟอ์โซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต

ตารางที่ ก.43 ตารางแสดงนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้ม $K_{IV}E_{3333}/\sigma_0^\infty \sqrt{a}E_{3343}$ สำหรับจุดล่างสุดของรอยร้าวผิวทรงกระบอกในตัวกลางโพธิโซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต ใช้ประกอบรูปที่ ก.32 และ ก.33

จำนวนเท่าของ คุณสมบัติ การนำไฟฟ้าของ อากาศ (α)	$K_{IV}E_{3333}/\sigma_0^\infty \sqrt{a}E_{3343}$			
	เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้า			
	แบบซึมผ่านไม่ได้	แบบซึมผ่านได้	แบบกึ่งซึมผ่านได้	แบบสอดคล้องเชิงพลังงาน
0	3.145163762	2.01810463	3.040511834	3.367856291
0.5	3.145163762	2.01810463	2.742447052	2.734523795
1	3.145163762	2.01810463	2.530506319	2.515575391
1.5	3.145163762	2.01810463	2.406530657	2.38934837
2	3.145163762	2.01810463	2.327390582	2.310125095
2.5	3.145163762	2.01810463	2.273407454	2.256932708
3	3.145163762	2.01810463	2.234641417	2.219133795
3.5	3.145163762	2.01810463	2.205542482	2.191180069
4	3.145163762	2.01810463	2.183122359	2.169712746
4.5	3.145163762	2.01810463	2.165334523	2.152842956
5	3.145163762	2.01810463	2.150872597	2.13920105
5.5	3.145163762	2.01810463	2.138916072	2.127978386
6	3.145163762	2.01810463	2.128898377	2.118619232
6.5	3.145163762	2.01810463	2.120380847	2.110692566
7	3.145163762	2.01810463	2.113062427	2.103906412
7.5	3.145163762	2.01810463	2.106683529	2.098005589
8	3.145163762	2.01810463	2.101106582	2.092863148
8.5	3.145163762	2.01810463	2.09617946	2.088330799
9	3.145163762	2.01810463	2.091796343	2.084307663
9.5	3.145163762	2.01810463	2.087872931	2.080713651
10	3.145163762	2.01810463	2.084341296	2.077484431

หมายเหตุ : (1) ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับศูนย์เท่าของอากาศ ($\alpha = 0$) ในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ ใช้ $\alpha = 0.1 \times 8.85 \times 10^{-12}$ F/m และในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน ใช้ $\alpha = 0.0001 \times 8.85 \times 10^{-12}$ F/m

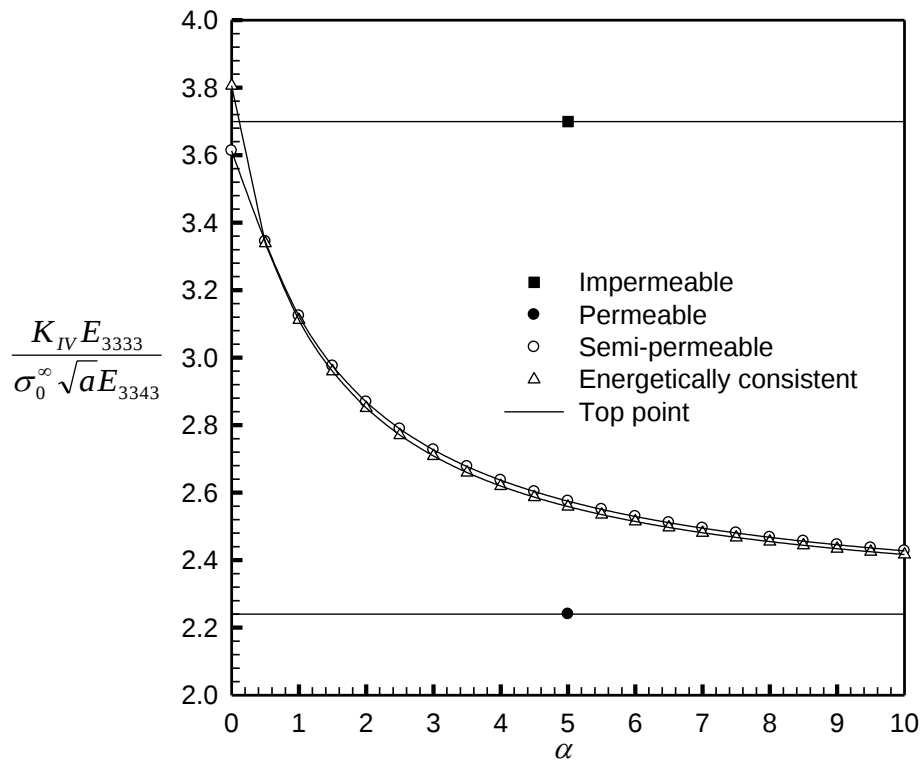


รูปที่ ก.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโหมดที่ 4 (K_{IV}) กับค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท่าของอากาศ และมี $\theta = 45^\circ$ สำหรับจุดกึ่งกลางของรอยร้าวผิวทรงกระบอกในตัวกลางไฟอ์โซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต

ตารางที่ ก.44 ตารางแสดงนอร์มัลไลส์ค่าตัวประกอบความเข้ม $K_{IV}E_{3333}/\sigma_0^\infty \sqrt{a}E_{3343}$ สำหรับจุดกึ่งกลางของรอยร้าวผิวทรงกระบอกในตัวกลางโพธิ์โซลิด์ทริกไร้ขอบเขต ใช้ประกอบรูปที่ ก.32 และ ก.34

จำนวนเท่าของ คุณสมบัติ การนำไฟฟ้าของ อากาศ (α)	$K_{IV}E_{3333}/\sigma_0^\infty \sqrt{a}E_{3343}$			
	เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้า			
	แบบซึมผ่านไม่ได้	แบบซึมผ่านได้	แบบกึ่งซึมผ่านได้	แบบสอดคล้องเชิงพลังงาน
0	3.415773132	2.16221917	3.323451759	3.497748275
0.5	3.415773132	2.16221917	3.047875521	3.040973756
1	3.415773132	2.16221917	2.834770532	2.820953496
1.5	3.415773132	2.16221917	2.699513311	2.68256629
2	3.415773132	2.16221917	2.607478062	2.589539437
2.5	3.415773132	2.16221917	2.541255855	2.523480895
3	3.415773132	2.16221917	2.491580878	2.474407323
3.5	3.415773132	2.16221917	2.453134008	2.436707876
4	3.415773132	2.16221917	2.422475555	2.406909178
4.5	3.415773132	2.16221917	2.397520625	2.382768615
5	3.415773132	2.16221917	2.376873674	2.362907742
5.5	3.415773132	2.16221917	2.359527147	2.346298955
6	3.415773132	2.16221917	2.344695291	2.332141842
6.5	3.415773132	2.16221917	2.331909534	2.319978121
7	3.415773132	2.16221917	2.320777277	2.309417534
7.5	3.415773132	2.16221917	2.310973882	2.300139257
8	3.415773132	2.16221917	2.302327908	2.291978185
8.5	3.415773132	2.16221917	2.294622141	2.284719254
9	3.415773132	2.16221917	2.287712234	2.278221824
9.5	3.415773132	2.16221917	2.281481803	2.272372904
10	3.415773132	2.16221917	2.275835986	2.267080685

หมายเหตุ : (1) ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับศูนย์เท่าของอากาศ ($\alpha = 0$) ในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ ใช้ $\alpha = 0.1 \times 8.85 \times 10^{-12}$ F/m และในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน ใช้ $\alpha = 0.0001 \times 8.85 \times 10^{-12}$ F/m



รูปที่ ก.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโหมดที่ 4 (K_{IV}) กับค่าคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของตัวกลางภายในรอยร้าวที่มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 10 เท่าของอากาศ และมี $\theta = 45^\circ$ สำหรับจุดสูงสุดของรอยร้าวผิวทรงกระบอกในตัวกลางไฟอ์โซอิเล็กทริกไร้ขอบเขต

ตารางที่ ก.45 ตารางแสดงนอร์มัลไลซ์ค่าตัวประกอบความเข้ม $K_{IV}E_{3333}/\sigma_0^\infty \sqrt{a}E_{3343}$ สำหรับจุดสูงสุดของรอยร้าวผิวทรงกระบอกในตัวกลางโพธิ์โฮโมจีเนียสที่รับขอบเขต ใช้ประกอบรูปที่ ก.32 และ ก.35

จำนวนเท่าของ คุณสมบัติ การนำไฟฟ้าของ อากาศ (α)	$K_{IV}E_{3333}/\sigma_0^\infty \sqrt{a}E_{3343}$			
	เงื่อนไขขอบเขตเชิงไฟฟ้า			
	แบบซึมผ่านไม่ได้	แบบซึมผ่านได้	แบบกึ่งซึมผ่านได้	แบบสอดคล้องเชิงพลังงาน
0	3.699533594	2.239862201	3.612695486	3.806122729
0.5	3.699533594	2.239862201	3.344395239	3.338868728
1	3.699533594	2.239862201	3.123760407	3.111620068
1.5	3.699533594	2.239862201	2.975104362	2.95924276
2	3.699533594	2.239862201	2.868551723	2.851021775
2.5	3.699533594	2.239862201	2.788698035	2.770542134
3	3.699533594	2.239862201	2.726688188	2.708580278
3.5	3.699533594	2.239862201	2.677160118	2.659394146
4	3.699533594	2.239862201	2.636732879	2.619493192
4.5	3.699533594	2.239862201	2.603102055	2.586471675
5	3.699533594	2.239862201	2.574692648	2.558685031
5.5	3.699533594	2.239862201	2.55037524	2.534983334
6	3.699533594	2.239862201	2.529361205	2.514577768
6.5	3.699533594	2.239862201	2.510999334	2.496797446
7	3.699533594	2.239862201	2.494808364	2.481157507
7.5	3.699533594	2.239862201	2.480479569	2.467353222
8	3.699533594	2.239862201	2.467635297	2.45499765
8.5	3.699533594	2.239862201	2.4560907	2.443912683
9	3.699533594	2.239862201	2.4456582	2.433912169
9.5	3.699533594	2.239862201	2.436184631	2.424844573
10	3.699533594	2.239862201	2.427543703	2.416585311

หมายเหตุ : (1) ที่คุณสมบัติการนำไฟฟ้าเท่ากับศูนย์เท่าของอากาศ ($\alpha = 0$) ในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบกึ่งซึมผ่านได้ ใช้ $\alpha = 0.1 \times 8.85 \times 10^{-12}$ F/m และในกรณีของเงื่อนไขการนำไฟฟ้าแบบสอดคล้องเชิงพลังงาน ใช้ $\alpha = 0.0001 \times 8.85 \times 10^{-12}$ F/m

ประวัติผู้ทำโครงการ

นายเมธัส แสงสว่าง ปัจจุบันศึกษา ณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จบการศึกษามัธยมศึกษา จากโรงเรียนอิสลามศรีอยุธยามูลนิธิ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

นายชัยณรงค์ เบญจพรทวี ปัจจุบันศึกษา ณ ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จบการศึกษามัธยมศึกษา จากโรงเรียนสารสาสน์วิเทศบางบอน จังหวัดกรุงเทพมหานคร