บทที่ 9

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาความสามารถในการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นแบบแอนไอโซทรอปิกที่ไม่มีการสูญเสีย รวมถึงท่อนำคลื่นที่มีขอบเขตเป็นผิวโค้ง และการศึกษาเปรียบเทียบในส่วนของความแม่นและการลู่เข้าผลเฉลยแม่นตรงของค่า β/k_0 ที่ได้รับ การใช้จำนวนตัวแปรไม่ทราบค่าในสมการเมตริกซ์ของปัญหาค่าเจาะจงมาตรฐาน ความสามารถในการกำจัดผลเฉลยปลอมเทียม และความสปาร์สของเมตริกซ์ในสมการของปัญหาค่าเจาะจง ของวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ทั้ง 6 วิธี คือ

1.วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็ก 3 องค์ประกอบ (Koshiba และคณะ, 1985ก)

2.วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้า 3 องค์ประกอบ (Koshiba และคณะ, 1985ข)

3.วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็กตามขวาง 2 องค์ประกอบ (Hayata และคณะ, 1986)

4.วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าตามขวาง 2 องค์ประกอบ (Hayata และคณะ, 1989)

5.วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าในแนวสัมผัสและในแนวแกน (Lee, 1994)

6.วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวาง (Angkaew และคณะ, 1987)

ผู้เสนอวิทยานิพนธ์มีความเห็นว่า วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่มีประสิทธิภาพสูงควรมีคุณสมบัติคือ สามารถวิเคราะห์ท่อนำคลื่นได้หลายประเภท ให้ความแม่นของค่า β/k_0 ที่ได้รับสูง และใช้เวลาในการคำนวณต่ำ

ผลจากการศึกษาดังกล่าวข้างต้น สามารถสรุปประสิทธิภาพของวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ในด้านต่างๆ สำหรับวิเคราะห์ท่อนำคลื่นได้ดังนี้

1. ความสามารถในการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นแบบแอนไอโซทรอปิก

ความสามารถในการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นแบบแอนไอโซทรอปิก แสดงได้ในตาราง 9.1

ตาราง 9.1 ความสามารถในการวิเคราะห์ท่อน้ำคลื่นแบบแอนไอโซทรอปิก

วิธี		ท่อนำคลื่นแบบแอนไอโซทรอปิก	
		ท่อนำคลื่นแบบดิสเพอร์ซีฟ แอนไอโซทรอปิกแม่เหล็ก	ท่อนำแสงแบบ แอนไอโซทรอปิกไฟฟ้า
วิธีที่ 1	วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้ สนามแม่เหล็ก 3 องค์ประกอบ	ไม่สามารถวิเคราะห์ได้	สามารถวิเคราะห์ได้
วิธีที่ 2	วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้ สนามไฟฟ้า 3 องค์ประกอบ	ก่อนปรับปรุง ไม่สามารถ วิเคราะห์ได้, หลังปรับปรุง สามารถ วิเคราะห์ได้	ไม่สามารถวิเคราะห์ได้
วิธีที่ 3	วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้ สนามแม่เหล็กตามขวาง 2 องค์ประกอบ	ไม่สามารถวิเคราะห์ได้	สามารถวิเคราะห์ได้
วิธีที่ 4	วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้ สนามไฟฟ้าตามขวาง 2 องค์ประกอบ	ไม่สามารถวิเคราะห์ได้	ไม่สามารถวิเคราะห์ได้
วิธีที่ 5	วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้ สนามไฟฟ้าในแนวสัมผัส และในแนวแกน	ก่อนปรับปรุง ไม่สามารถ วิเคราะห์ได้, หลังปรับปรุง สามารถ วิเคราะห์ได้	ก่อนปรับปรุง ไม่ สามารถวิเคราะห์ได้, หลังปรับปรุง สามารถ วิเคราะห์ได้
วิธีที่ 6	วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้ สนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กตามขวาง	สามารถวิเคราะห์ได้	สามารถวิเคราะห์ได้

จากตาราง 9.1 แสดงให้เห็นว่า วิธีที่มีความสามารถในการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นแบบดิสเพอร์ซีฟแอนไอโซทรอปิกแม่เหล็กและท่อนำแสงแบบแอนไอโซทรอปิกไฟฟ้าคือ วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าในแนวสัมผัสและในแนวแกน และวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวาง

2. ประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงเวลาที่ใช้ในการคำนวณ

เวลาที่ใช้ในการคำนวณเป็นปัจจัยหนึ่งที่กำหนดประสิทธิภาพของวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ในการวิเคราะห์ท่อนำคลื่น เนื่องจาก

1. เวลาสามารถใช้เป็ นตัวเปรียบเทียบจำนวนตัวแปรไม่ทราบค่าที่ใช้

2. เวลาสามารถใช้เป็นตัวเปรียบเทียบความยุ่งยากในการกำจัดผลเฉลยปลอมเทียม

3. เวลาสามารถใช้เป็นตัวเปรียบเทียบความซับซ้อนของวิธีการ

ผู้เสนอวิทยานิพนธ์ได้กำหนดการหาประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงเวลาที่ใช้ในการคำนวณ จากเวลาที่ใช้ในการคำนวณค่า β/k_0 ที่ $k_0a=3.0$ ในโมดมูลฐานของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยไดอิเล็กตริก ที่มีโครงสร้างดังแสดงในรูป 8.1 และมีการแบ่งอีลีเมนต์ดังแสดงในรูป 8.2 โดยให้วิธีที่ใช้เวลาในการคำนวณน้อยที่สุดในกลุ่มมีประสิทธิภาพเท่ากับ 100% สำหรับการหาประสิทธิภาพเชิงเวลาจะอยู่ภายใต้เงื่อนไขต่อไปนี้

1. ใช้เมชของอีลีเมนต์และหมายเลขโนดแบบเดียวกัน

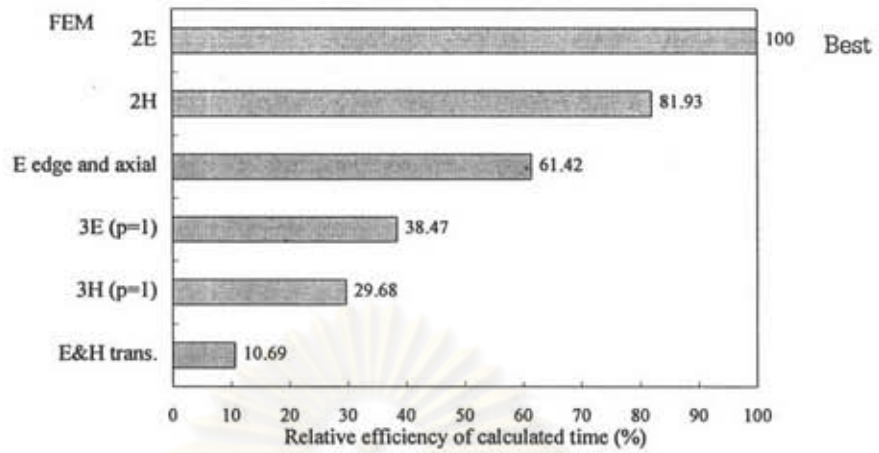
2. ประมวลผลบนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล ที่ใช้หน่วยประมวลผลกลาง (CPU) เพนเทียม (pentium) 120 เมกะเฮิรตซ์ และหน่วยความจำขนาด 49,152 กิโลไบต์ โดยใช้ภาษาการคำนวณแมทแล็บ 4.2c1

เวลาที่ใช้ในการคำนวณ และค่าประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงเวลาที่ใช้ในการคำนวณ แสดงได้ในตาราง 9.2 โดยที่ค่าประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงเวลาสามารถจัดลำดับเป็นกราฟได้ดังแสดงในรูป 9.1

ตาราง 9.2 ประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงเวลาที่ใช้ในการคำนวณ ของวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ ในท่อนำคลื่นบรรจุด้วยไดอิเล็กตริก

วิธี		เวลาที่ใช้ในการคำนวณ (วินาที)	ประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงเวลาที่ใช้ในการคำนวณ (%)
วิธีที่ 1	วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็ก 3 องค์ประกอบ (p=1) (3H)	2×115.08 *	29.68%
วิธีที่ 2	วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้า 3 องค์ประกอบ (p=1) (3E)	2×88.78 *	38.47%
วิธีที่ 3	วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็กตามขวาง 2 องค์ประกอบ (2H)	83.38	81.93%
วิธีที่ 4	วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าตามขวาง 2 องค์ประกอบ (2E)	68.31	100%
วิธีที่ 5	วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าในแนวสัมผัสและในแนวแกน (E edge and axial)	111.21	61.42%
วิธีที่ 6	วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวาง (E&H trans.)	638.80	10.69%

* : วิธีนี้ต้องการการคำนวณโดยเปลี่ยนสัมประสิทธิ์พีนอลตี p อย่างน้อย 2 ครั้งเพื่อหาโมดที่ถูกต้องในท่อนำคลื่น



รูป 9.1 กราฟประสิทธิภาพสัมพัทธ์เชิงเวลาที่ใช้ในการคำนวณ ของวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ในท่อน

จากรูป 9.1 แสดงให้เห็นว่า วิธีที่ใช้สนามไฟฟ้าตามขวาง 2 องค์ประกอบ ให้ประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงเวลาที่ใช้ในการคำนวณสูงสุด และวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าตามขวาง ให้ประสิทธิภาพในเชิงเวลาที่ใช้ในการคำนวณต่ำสุด เนื่องจากวิธีนี้ใช้จำนวนไม่ทราบค่ามากที่สุดในทั้ง 6 วิธี

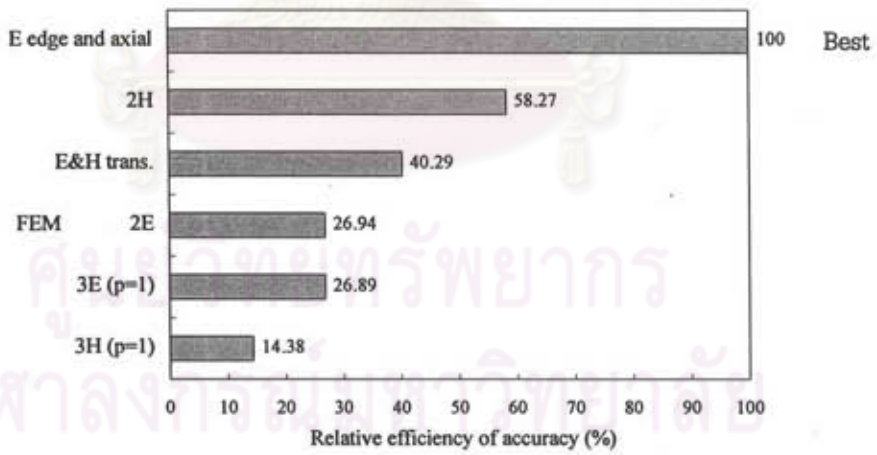
3. ประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงความแม่น

ความแม่นเป็นปัจจัยหนึ่งที่กำหนดประสิทธิภาพของวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ในการวิเคราะห์ท่อนำคลื่น ผู้เสนอวิทยานิพนธ์ได้กำหนดวิธีการหาประสิทธิภาพในเชิงความแม่น จากเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของค่า β/k_0 ที่ $k_0a=3.0$ ในโมดมูลฐาน (LSE_{10}) ของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยไดอิเล็กตริก ที่มีโครงสร้างดังแสดงในรูป 8.1 และมีการแบ่งอีลีเมนต์ดังแสดงในรูป 8.2 โดยให้เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของ β/k_0 น้อยที่สุดมีประสิทธิภาพเท่ากับ 100% สำหรับการหาประสิทธิภาพเชิงความแม่นจะอยู่ภายใต้เงื่อนไขเดียวกันหัวข้อ 2 เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของค่า β/k_0 ที่ได้รับ และประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงความแม่น แสดงได้ดังตาราง 9.3 โดยที่ประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงความแม่นสามารถจัดลำดับเป็นกราฟได้ดังแสดงในรูป 9.2

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง 9.3 ประสิทธิภาพในเชิงความแม่นของวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ ในท่อนำคลื่นบรรจุด้วยไดอิเล็กตริก

วิธี		เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของ β/k_0	ประสิทธิภาพในเชิงความแม่น (%)
วิธีที่ 1	วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็ก 3 องค์ประกอบ (p=1) (3H)	0.260452%	14.38%
วิธีที่ 2	วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้า 3 องค์ประกอบ (p=1) (3E)	0.139253%	26.89%
วิธีที่ 3	วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็กตามขวาง 2 องค์ประกอบ (2H)	0.064255%	58.27%
วิธีที่ 4	วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าตามขวาง 2 องค์ประกอบ (2E)	0.138981%	26.94%
วิธีที่ 5	วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าในแนวสัมผัสและในแนวแกน (E edge and axial)	0.037443%	100%
วิธีที่ 6	วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวาง (E&H trans.)	0.092924%	40.29%



รูป 9.2 แสดงกราฟประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงความแม่น ของวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ ในท่อนำคลื่นบรรจุด้วยไดอิเล็กตริก

จากรูป 9.2 แสดงให้เห็นว่า วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าในแนวสัมผัสและในแนวแกน ให้ประสิทธิภาพในเชิงความแม่นสูงสุด ส่วนวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็ก 3 องค์ประกอบให้ประสิทธิภาพสัมพัทธ์ต่ำสุด ในทั้ง 6 วิธี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4. ประสิทธิภาพในกลุ่มวิธีที่มีความสามารถในการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นที่มีขอบเขตเป็นผิวโค้ง

ในส่วนนี้จะแสดงประสิทธิภาพในกลุ่มวิธีที่มีความสามารถในการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นที่มีขอบเขตเป็นผิวโค้ง ซึ่งประกอบด้วย ประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงเวลาที่ใช้ในการคำนวณ และประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงความแม่น

ตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาคือท่อนำคลื่นกลวงที่มีภาคตัดขวางรูปวงกลมที่มีรัศมีเท่ากับ a ล้อมรอบด้วยตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์แบบ ดังแสดงในรูป 8.4

แบ่งภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นออกเป็นอีลีเมนต์ ดังแสดงในรูป 8.5 และพิจารณาที่ $k_0 a = 4.0$ ในโหมดมูลฐาน (TE_{11}) ภายใต้เงื่อนไขในหัวข้อ 2 ตามที่เสนอได้เสนอไว้ข้างต้น ประสิทธิภาพในกลุ่มวิธีที่มีความสามารถในการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นที่มีขอบเขตเป็นผิวโค้ง สามารถแสดงได้ดังนี้

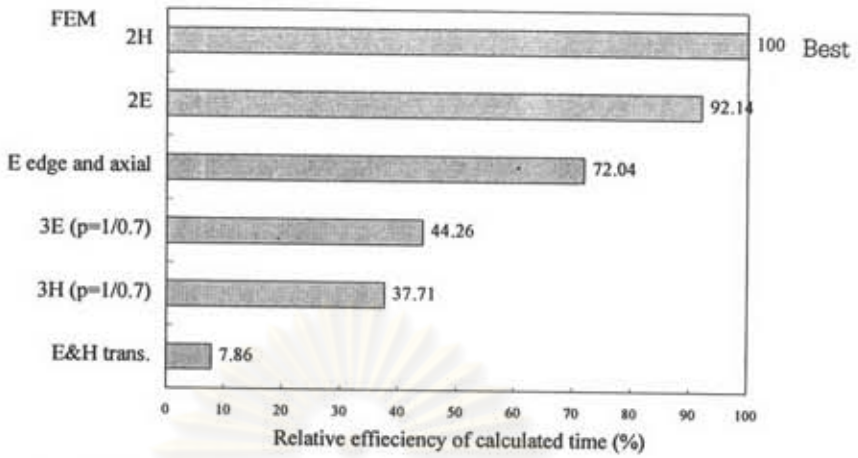
4.1 ประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงเวลาที่ใช้ในการคำนวณ

เวลาที่ใช้ในการคำนวณที่ $k_0 a = 4.0$ ในโหมดมูลฐาน (TE_{11}) และประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงเวลาที่ใช้ในการคำนวณแสดงได้ในตาราง 9.4 โดยที่ค่าประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงเวลา สามารถจัดลำดับเป็นกราฟได้ดังรูป 9.3

ตาราง 9.4 ประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงเวลาที่ใช้ในการคำนวณ ของกลุ่มวิธีที่มีความสามารถในการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นที่มีขอบเขตเป็นผิวโค้ง

วิธี		เวลาที่ใช้ในการคำนวณ (วินาที)	ประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงเวลาที่ใช้ในการคำนวณ (%)
วิธีที่ 1	วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็ก 3 องค์ประกอบ (p=1/0.7) (3H)	2×148.51 *	37.71%
วิธีที่ 2	วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้า 3 องค์ประกอบ (p=1/0.7) (3E)	2×126.53 *	44.26%
วิธีที่ 3	วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็กตามขวาง 2 องค์ประกอบ (2H)	112.00	100%
วิธีที่ 4	วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าตามขวาง 2 องค์ประกอบ (2E)	121.55	92.14%
วิธีที่ 5	วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าในแนวสัมผัสและในแนวแกน (E edge and axial)	155.47	72.04%
วิธีที่ 6	วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวาง (E&H trans.)	1424.72	7.86%

* : วิธีนี้ต้องการการคำนวณอย่างน้อย 2 ครั้งเพื่อหาโมดที่ถูกต้องในท่อนำคลื่น



รูป 9.3 กราฟประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงเวลาที่ใช้ในการคำนวณ ของกลุ่มวิธีที่มีความสามารถในการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นที่มีขอบเขตเป็นผิวโค้ง

จากรูป 9.3 แสดงให้เห็นว่า วิธีที่ใช้สนามแม่เหล็กตามขวาง 2 องค์ประกอบ ให้ประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงเวลาที่ใช้ในการคำนวณสูงสุด และวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางให้ประสิทธิภาพต่ำสุด เนื่องจากวิธีนี้ใช้จำนวนไม่ทราบค่ามากที่สุดในทั้ง 6 วิธี

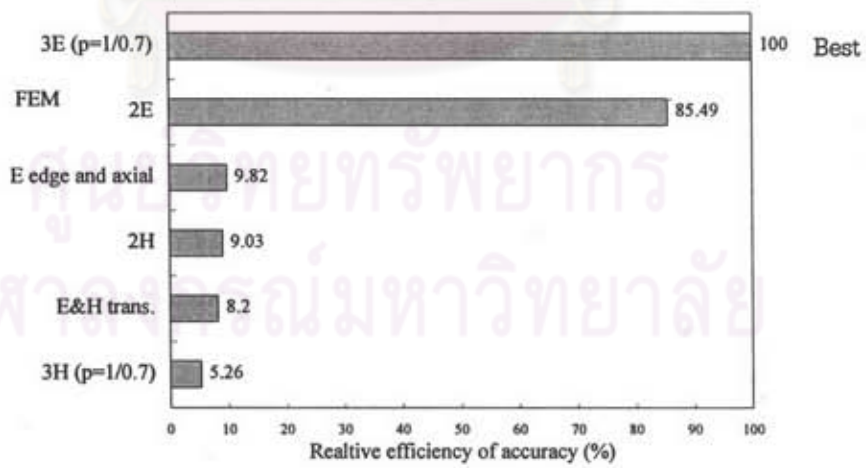
4.2 ประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงความแม่น

เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของค่า β/k_0 ที่ $k_0a = 4.0$ ในโมดมูลฐาน (TE_{11}) และประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงความแม่นแสดงได้ในตาราง 9.5 โดยที่ประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงความแม่นสามารถจัดลำดับเป็นกราฟได้ดังรูป 9.4

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง 9.5 ประสิทธิภาพในเชิงความแม่นของกลุ่มวิธีที่มีความสามารถในการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นที่มีขอบเขตเป็นผิวโค้ง

วิธี		เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของ β/k_0	ประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงความแม่น (%)
วิธีที่ 1	วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็ก 3 องค์ประกอบ (p=1/0.7) (3H)	0.247784%	5.26%
วิธีที่ 2	วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้า 3 องค์ประกอบ (p=1/0.7) (3E)	0.013122%	100%
วิธีที่ 3	วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็กตามขวาง 2 องค์ประกอบ (2H)	0.145302%	9.03%
วิธีที่ 4	วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าตามขวาง 2 องค์ประกอบ (2E)	0.015350%	85.49%
วิธีที่ 5	วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าในแนวสัมผัสและในแนวแกน (E edge and axial)	0.133629%	9.82%
วิธีที่ 6	วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวาง (E&H trans.)	0.160074%	8.20%



รูป 9.4 กราฟประสิทธิภาพในเชิงความแม่น ของกลุ่มวิธีที่มีความสามารถในการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นที่มีขอบเขตเป็นผิวโค้ง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากรูป 9.4 แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพในเชิงความแม่น สามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือกลุ่มที่มีประสิทธิภาพมากกว่า 80% ซึ่งประกอบด้วยค่าที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้า 3 องค์ประกอบ และวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าตามขวาง 2 องค์ประกอบ และกลุ่มที่มีประสิทธิภาพน้อยกว่า 10% ซึ่งประกอบด้วยค่าที่ได้จากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์อีก 4 วิธีที่เหลือ

5. ประสิทธิภาพในกลุ่มวิธีที่มีความสามารถในการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นแบบดิสเพอร์ซีฟแอนไอโซทรอปิกแม่เหล็ก

ในส่วนนี้จะแสดงประสิทธิภาพในกลุ่มวิธีที่มีความสามารถในการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นแบบดิสเพอร์ซีฟแอนไอโซทรอปิกแม่เหล็ก ซึ่งประกอบด้วย ประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงเวลาที่ใช้ในการคำนวณ และประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงความแม่น

ตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาคือท่อนำคลื่นบรรจุด้วยเฟอร์ไรต์ที่มีโครงสร้างดังแสดงในรูป 8.7 เทนเซอร์ความซาบซึมได้ $[\mu]$ และสภาพยอม ε มีค่าดังแสดงไว้ในบทที่ 8 แบ่งภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นออกเป็นอีลีเมนต์ ดังแสดงในรูป 8.8 และพิจารณาที่ $k_0a = 3.0$ ในโมดมูลฐาน (H_{10}) ของการแพร่กระจายในทิศ $+z$ ภายใต้เงื่อนไขในหัวข้อ 2 ตามที่เสนอได้เสนอไว้ข้างต้น ประสิทธิภาพในกลุ่มวิธีที่มีความสามารถในการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นแบบดิสเพอร์ซีฟแอนไอโซทรอปิกแม่เหล็ก สามารถแสดงได้ดังนี้

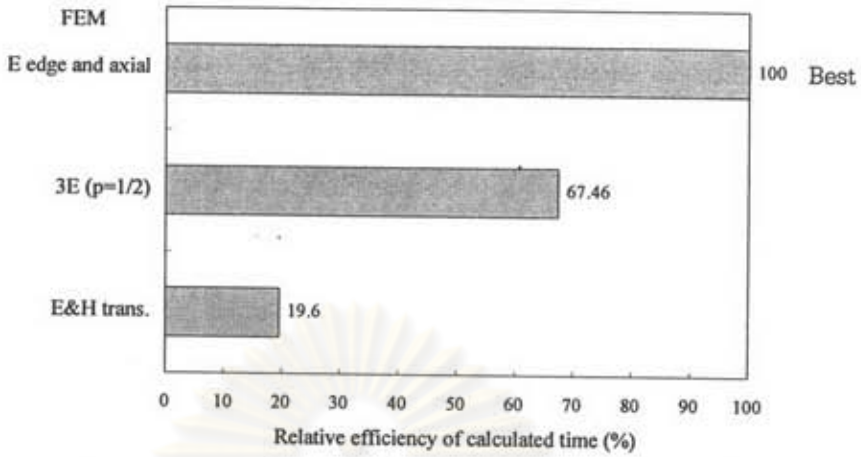
5.1 ประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงเวลาที่ใช้ในการคำนวณ

เวลาที่ใช้ในการคำนวณที่ $k_0a = 3.0$ ในโมดมูลฐาน (H_{10}) ของการแพร่กระจายในทิศ $+z$ และประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงเวลาที่ใช้ในการคำนวณแสดงได้ในตาราง 9.6 โดยที่ค่าประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงเวลา สามารถจัดลำดับเป็นกราฟได้ดังรูป 9.5

ตาราง 9.6 ประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงเวลาที่ใช้ในการคำนวณ ในกลุ่มวิธีที่มีความสามารถในการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นแบบดิสเพอร์ซีฟแอนไอโซทรอปิกแม่เหล็ก

วิธี		เวลาที่ใช้ในการคำนวณ (วินาที)	ประสิทธิภาพในเชิงเวลาที่ใช้ในการคำนวณ (%)
วิธีที่ 2	วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้า 3 องค์ประกอบ (p=1/2) (3E)	2×107.48 *	67.46%
วิธีที่ 5	วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าในแนวสัมผัสและในแนวแกน (E edge and axial)	145.01	100%
วิธีที่ 6	วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวาง (E&H trans.)	739.77	19.60%

* : วิธีนี้ต้องการการคำนวณอย่างน้อย 2 ครั้งเพื่อหาโมดที่ถูกต้องในท่อนำคลื่น



รูป 9.5 กราฟประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงเวลาที่ใช้ในการคำนวณ ของกลุ่มวิธีที่มีความสามารถในการวิเคราะห์ ท่อนำคลื่นแบบดิสเพอร์ซีฟแอนไอโซทรอปิกแม่เหล็ก

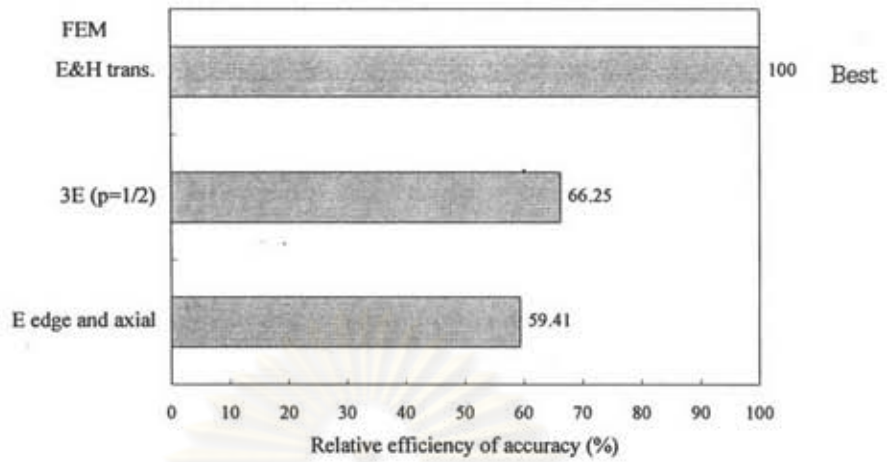
จากรูป 9.5 แสดงให้เห็นว่า วิธีที่ใช้สนามไฟฟ้าในแนวสัมผัสและในแนวแกน ให้ประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงเวลาที่ใช้ในการคำนวณสูงสุด และวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางให้ประสิทธิภาพต่ำสุด เนื่องจากวิธีนี้ใช้จำนวนไม่ทราบค่ามากที่สุดในทั้ง 6 วิธี

5.2 ประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงความแม่น

เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของค่า β/k_0 ที่ $k_0a=3.0$ ในโมดมูลฐาน (H_{10}) ของการแพร่กระจายในทิศ $+z$ และประสิทธิภาพสัมพัทธ์เชิงความแม่นแสดงได้ในตาราง 9.7 โดยที่ประสิทธิภาพสัมพัทธ์เชิงความแม่น สามารถจัดลำดับเป็นกราฟได้ดังรูป 9.6

ตาราง 9.7 ประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงความแม่น ของกลุ่มวิธีที่มีความสามารถในการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นแบบดิสเพอร์ซีฟแอนไอโซทรอปิกแม่เหล็ก

วิธี		เปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดของ β/k_0	ประสิทธิภาพในเชิงความแม่น (%)
วิธีที่ 2	วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้า 3 องค์ประกอบ (p=1/2) (3E)	0.658553%	66.25%
วิธีที่ 5	วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าในแนวสัมผัสและในแนวแกน (E edge and axial)	0.734321%	59.41%
วิธีที่ 6	วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวาง (E&H trans.)	0.436262%	100%



รูป 9.6 กราฟประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงความแม่น ของกลุ่มวิธีที่มีความสามารถในการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นแบบดิสเพอร์ซีฟแอนไอโซทรอปิกแม่เหล็ก

จากรูป 9.6 แสดงให้เห็นว่า วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวาง ให้ประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงความแม่น สูงสุด และวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าในแนวสัมผัสและในแนวแกนให้ประสิทธิภาพ ต่ำสุด

6. ประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงเวลาที่ใช้ในการคำนวณ ของกลุ่มวิธีที่มีความสามารถในการวิเคราะห์ท่อนำแสงแบบแอนไอโซทรอปิกไฟฟ้า

เนื่องจากท่อนำแสงแบบแอนไอโซทรอปิกไฟฟ้าในกรณีนี้ ไม่สามารถหาผลเฉลยแม่นตรงจากวิธีเชิงวิเคราะห์ได้ ฉะนั้นในส่วนนี้จึงหาได้เฉพาะค่าประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงเวลาที่ใช้ในการคำนวณ เท่านั้น ไม่สามารถหาประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงความแม่นได้

ตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาคือท่อนำแสงแบบฝังในซับสเตรท ที่มีโครงสร้างดังแสดงในรูป 7.11 การศึกษาในส่วนนี้จะแบ่งเป็น 2 กรณีคือ กรณีที่ท่อนำแสงเป็นแอนไอโซทรอปิกแนวทแยง และกรณีที่แกนเป็นแอนไอโซทรอปิกตามขวาง

แบ่งภาคตัดขวางของท่อนำคลื่นออกเป็นอีลีเมนต์ ดังแสดงในรูป 7.13 และพิจารณาที่ $k_0 a = 16.0$ ในโมดมูลฐาน (E_{11}^y) ภายใต้เงื่อนไขในหัวข้อ 2 ตามที่เสนอได้เสนอไว้ข้างต้น ประสิทธิภาพในเชิงเวลาที่ใช้ในการคำนวณ ของกลุ่มวิธีที่มีความสามารถในการวิเคราะห์ท่อนำแสงแบบแอนไอโซทรอปิกไฟฟ้า ในแต่ละกรณี แสดงได้ดังนี้

6.1 กรณีที่ท่อนำแสงเป็นแอนไอโซทรอปิกแนวทแยง

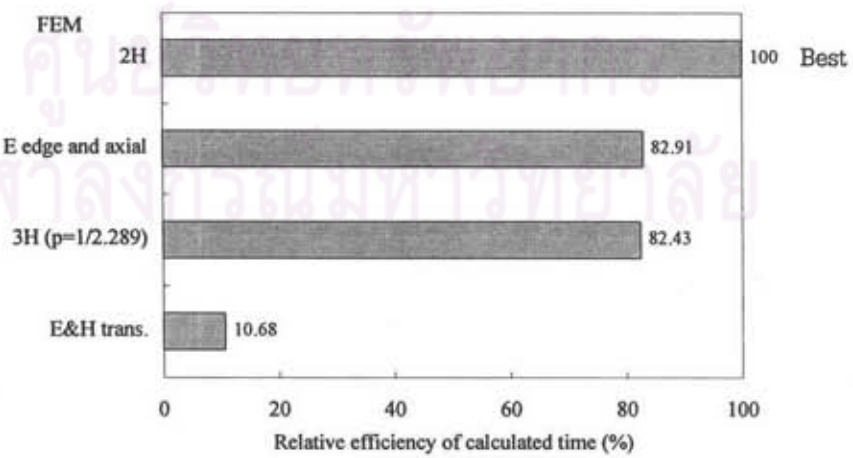
พิจารณาท่อนำแสงแบบฝังในซับสเตรทที่มีภาคตัดขวางดังแสดงในรูป 7.11 แกนและซับสเตรทของท่อนำคลื่นนี้เป็นแอนไอโซทรอปิกเนกาทิฟยูนิแอกเชียล ที่แกนทางแสงขนานกับแกน x สภาพยอมสัมพัทธ์และความซาบซึมได้สัมพัทธ์ของแกนและซับสเตรทมีค่าดังแสดงไว้ในบทที่ 7 เวลาที่ใช้ใน

การคำนวณที่ $k_0a = 16.0$ ในโมดมูลฐาน (E_{11}^{y}) และประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงเวลาที่ใช้ในการคำนวณแสดงได้ในตาราง 9.8 โดยที่ค่าประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงเวลา สามารถจัดลำดับเป็นกราฟได้ดังรูป 9.7

ตาราง 9.8 ประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงเวลาที่ใช้ในการคำนวณ ในกลุ่มวิธีที่มีความสามารถในการวิเคราะห์ท่อนำแสงที่เป็นแอนไอโซทรอปิกแนวทแยง

วิธี		เวลาที่ใช้ในการคำนวณ (วินาที)	ประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงเวลาที่ใช้ในการคำนวณ (%)
วิธีที่ 1	วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็ก 3 องค์ประกอบ (p=1/2.289) (3H)	65.75	82.43%
วิธีที่ 3	วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็กตามขวาง 2 องค์ประกอบ (2H)	54.20	100%
วิธีที่ 5	วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าในแนวสัมผัสและในแนวแกน (E edge and axial)	65.37	82.91%
วิธีที่ 6	วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวาง (E&H trans.)	507.63	10.68%

*: วิธีนี้สามารถคำนวณคุณลักษณะการแพร่กระจายของท่อนำคลื่นได้โดยไม่ต้องทำซ้ำ โดยเลือกค่าสัมประสิทธิ์พีนอลตี p ให้เหมาะสม



รูป 9.7 กราฟประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงเวลาที่ใช้ในการคำนวณ ในกลุ่มวิธีที่มีความสามารถในการวิเคราะห์ท่อนำแสงที่เป็นแอนไอโซทรอปิกแนวทแยง

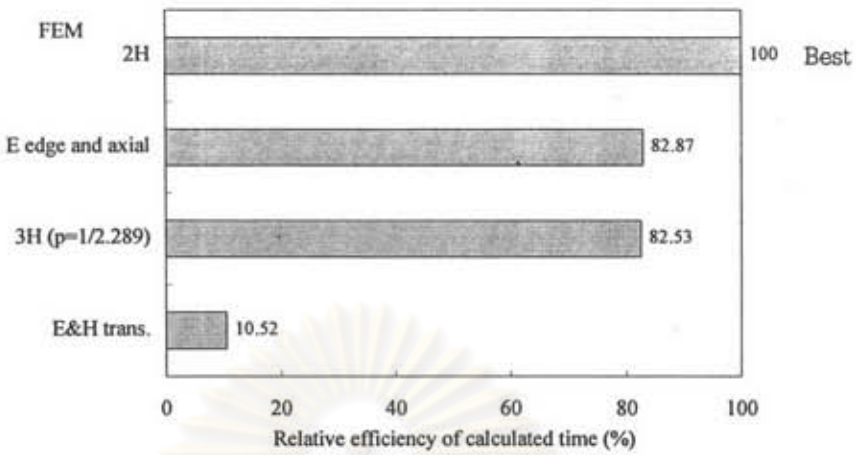
จากรูป 9.7 แสดงให้เห็นว่า วิธีที่ใช้สนามแม่เหล็กตามขวาง 2 องค์ประกอบ ให้ประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงเวลาที่ใช้ในการคำนวณสูงสุด และวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางให้ประสิทธิภาพต่ำสุด เนื่องจากวิธีนี้ใช้จำนวนไม่ทราบค่ามากที่สุดในทั้ง 6 วิธี

6.2 กรณีที่แกนเป็นแอนไอโซทรอปิกตามขวาง

พิจารณาท่อนำแสงแบบฝังในซับสเตรทที่มีภาคตัดขวางดังแสดงในรูป 7.11 แกนของท่อนำแสงนี้เป็นแอนไอโซทรอปิกตามขวาง โดยที่แกนทางแสงอยู่ในระนาบ xy และทำมุม $-\pi/8$ เรเดียนกับแกน x ซับสเตรทของท่อนำคลื่นนี้เป็นแอนไอโซทรอปิกเนกาทิฟยูนิแอกเชียล ที่แกนทางแสงขนานกับแกน x สภาพยอมสัมพัทธ์และความซาบซึมได้สัมพัทธ์ ของแกนและซับสเตรท มีค่าดังแสดงไว้ในบทที่ 7 เวลาที่ใช้ในการคำนวณที่ $k_0a = 16.0$ ในโมดมูลฐาน (E_{11}^y) และประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงเวลาที่ใช้ในการคำนวณแสดงได้ในตาราง 9.9 โดยที่ค่าประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงเวลา สามารถจัดลำดับเป็นกราฟได้ดังรูป 9.8

ตาราง 9.9 ประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงเวลาที่ใช้ในการคำนวณ ในกลุ่มวิธีที่มีความสามารถในการวิเคราะห์ท่อนำแสงที่เป็นแอนไอโซทรอปิกตามขวาง

วิธี		เวลาที่ใช้ในการคำนวณ (วินาที)	ประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงเวลาที่ใช้ในการคำนวณ (%)
วิธีที่ 1	วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็ก 3 องค์ประกอบ (p=1/2.289) (3H)	65.81	82.53%
วิธีที่ 3	วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็กตามขวาง 2 องค์ประกอบ (2H)	54.31	100%
วิธีที่ 5	วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าในแนวสัมผัสและในแนวแกน (E edge and axial)	65.54	82.87%
วิธีที่ 6	วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวาง (E&H trans.)	516.02	10.52



รูป 9.8 กราฟประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงเวลาที่ใช้ในการคำนวณ ของกลุ่มวิธีที่มีความสามารถในการวิเคราะห์ท่อนำแสงที่เป็นแอนไอโซทรอปิกตามขวาง

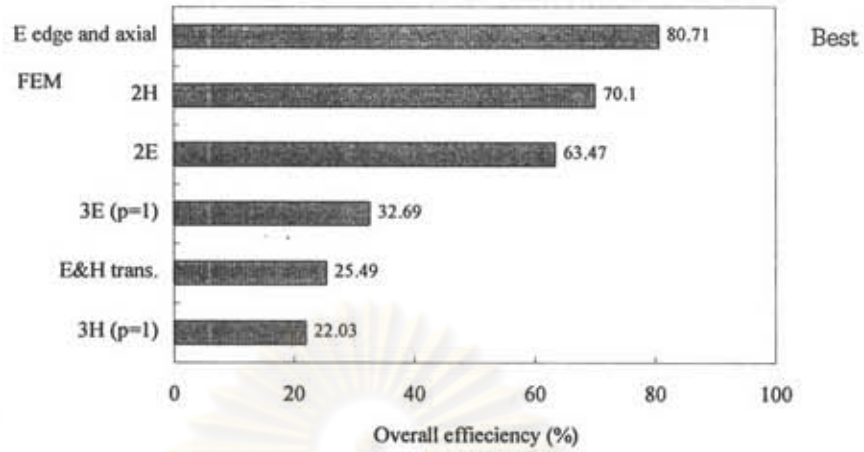
จากตาราง 9.9 และรูป 9.8 แสดงให้เห็นว่า ค่าประสิทธิภาพในเชิงเวลาของวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์อีลีเมนต์แต่ละวิธี สำหรับท่อนำแสงที่เป็นแอนไอโซทรอปิกตามขวาง จะมีค่าใกล้เคียงกับในกรณีของท่อนำแสงที่เป็นแอนไอโซทรอปิกแนวทแยง และเช่นเดียวกันกรณีแรก วิธีที่ใช้สนามแม่เหล็กตามขวาง 2 องค์ประกอบให้ประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงเวลาที่ใช้ในการคำนวณสูงสุด และวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวางให้ประสิทธิภาพต่ำสุด เนื่องจากวิธีนี้ใช้จำนวนไม่ทราบค่ามากที่สุดในทั้ง 6 วิธี

7. ประสิทธิภาพโดยรวม

ค่าประสิทธิภาพในเชิงเวลาที่ใช้ในการคำนวณ และค่าประสิทธิภาพในเชิงความแม่น สามารถสรุปเป็นประสิทธิภาพโดยรวม โดยผู้เสนอวิทยานิพนธ์กำหนดให้ประสิทธิภาพโดยรวมของวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์มีค่าเท่ากับ ค่าเฉลี่ยทางเลขคณิตของประสิทธิภาพในเชิงเวลาที่ใช้ในการคำนวณ และประสิทธิภาพในเชิงความแม่น

ประสิทธิภาพโดยรวม ของวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ในกรณีของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยไดอิเล็กตริกสามารถแสดงได้ดังรูป 9.9

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



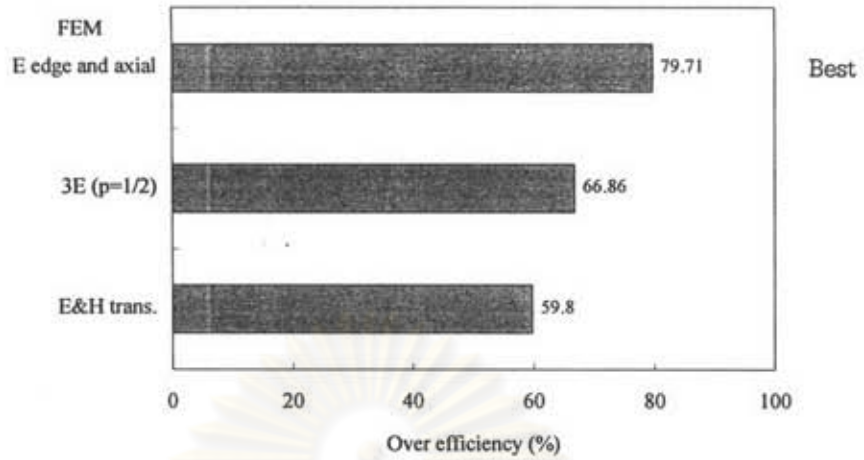
รูป 9.9 กราฟประสิทธิภาพโดยรวมของวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ ของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยไดอิเล็กตริก

จากกราฟประสิทธิภาพโดยรวม ในท่อนำคลื่นไดอิเล็กตริก ดังแสดงในรูป 9.9 แสดงให้เห็นว่า วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าในแนวสัมผัสและในแนวแกน วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็กตามขวาง 2 องค์ประกอบ และวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าตามขวาง 2 องค์ประกอบ ให้ประสิทธิภาพโดยรวม ในอันดับที่ 1 ถึง 3 ตามลำดับ

ที่กล่าวมาข้างต้น แสดงให้เห็นว่า วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าในแนวสัมผัสและในแนวแกน ที่เสนอโดย Lee (1994) ให้ประสิทธิภาพโดยรวมสูงสุด ในท่อนำคลื่นบรรจุด้วยไดอิเล็กตริก แต่มีข้อจำกัดที่ไม่มีความสามารถในการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นแบบแอนไอโซทรอปิก เพราะฉะนั้นเพื่อเป็นประโยชน์ในการใช้งานที่กว้างขวางขึ้น ผู้เสนอวิทยานิพนธ์จึงได้ปรับปรุงเพิ่มเติม เพื่อให้มีความสามารถทั้งในกรณีของท่อนำคลื่นแบบดิสเพอร์ซีฟแอนไอโซทรอปิกแม่เหล็ก และท่อนำแสงแบบแอนไอโซทรอปิกไฟฟ้า ดังรายละเอียดที่แสดงไว้ในบทที่ 6

ผลในตาราง 9.1 แสดงให้เห็นว่าวิธีที่มีความสามารถในการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นแบบดิสเพอร์ซีฟแอนไอโซทรอปิกแม่เหล็กมีอยู่ 3 วิธี คือ วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวาง วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้า 3 องค์ประกอบ และวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าในแนวสัมผัสและในแนวแกน (โดยสองวิธีหลังเป็นวิธีที่ได้รับการปรับปรุงโดยผู้เสนอวิทยานิพนธ์)

ผู้เสนอวิทยานิพนธ์ได้ศึกษาประสิทธิภาพโดยรวม ของวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ทั้ง 3 วิธี ในกรณีของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยเฟอร์ไรต์ ซึ่งเป็นตัวอย่างของท่อนำคลื่นแบบดิสเพอร์ซีฟแอนไอโซทรอปิกแม่เหล็ก ผลที่ได้สามารถแสดงเป็นกราฟดังรูป 9.10



รูป 9.10 กราฟประสิทธิภาพโดยรวมของวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ ของท่อนำคลื่นบรรจุด้วยเฟอร์ไรต์

จากรูป 9.10 แสดงให้เห็นว่า วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าในแนวสัมผัสและในแนวแกน ให้ประสิทธิภาพโดยรวม ในท่อนำคลื่นดิสเพอร์ซีฟแอนไอโซทรอปิกแม่เหล็ก สูงสุด ซึ่งเป็นไปตามที่ผู้เสนอวิทยานิพนธ์ได้คาดหมายไว้ โดยที่วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้า 3 องค์ประกอบ และวิธีที่ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวาง ให้ประสิทธิภาพโดยรวม ในอันดับที่ 2 และ 3 ตามลำดับ

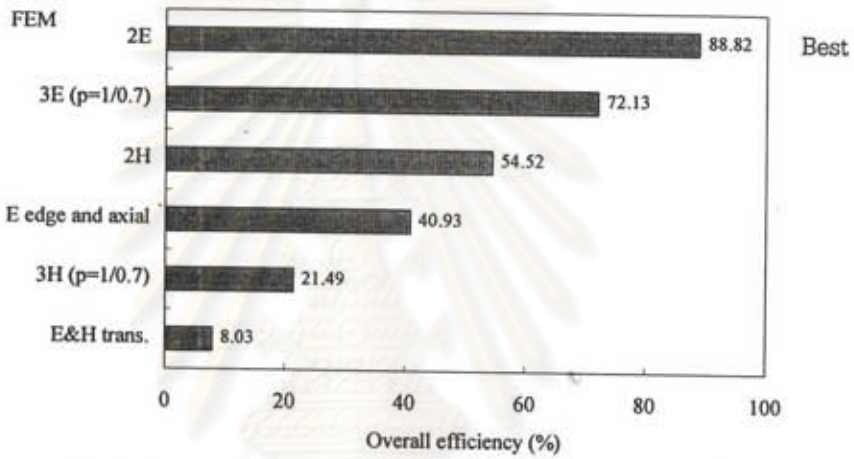
สำหรับกรณีของท่อนำแสงแบบแอนไอโซทรอปิกไฟฟ้า ผลจากตาราง 9.1 แสดงให้เห็นว่า วิธีที่มีความสามารถในการวิเคราะห์ปัญหานี้มีอยู่ 4 วิธี คือ วิธีที่ใช้สนามแม่เหล็ก 3 องค์ประกอบ วิธีที่ใช้สนามแม่เหล็กตามขวาง 2 องค์ประกอบ วิธีที่ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวาง และวิธีที่ใช้สนามไฟฟ้าในแนวสัมผัสและในแนวแกน (ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับการปรับปรุงโดยผู้เสนอวิทยานิพนธ์) จากกราฟประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงเวลาที่ใช้ในการคำนวณในกลุ่มวิธีที่มีความสามารถในการวิเคราะห์ท่อนำแสงที่เป็นแอนไอโซทรอปิกแนวทแยงและแอนไอโซทรอปิกตามขวาง ดังแสดงในรูป 9.7 และ 9.8 แสดงให้เห็นว่า วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็กตามขวาง 2 องค์ประกอบ เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงเวลาสูงสุด โดยที่วิธีที่ใช้สนามไฟฟ้าในแนวสัมผัสและในแนวแกน และวิธีที่ใช้สนามแม่เหล็ก 3 องค์ประกอบ ให้ประสิทธิภาพในเชิงเวลา ในระดับที่ใกล้เคียงกัน แต่วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็ก 3 องค์ประกอบ เสียเปรียบวิธีที่ใช้สนามไฟฟ้าในแนวสัมผัสและในแนวแกนคือ ต้องกำหนดค่า p ให้เหมาะสม เพื่อกำจัดผลเฉลยปลอมเทียมที่จะเกิดขึ้นในกราฟดิสเพอร์ชัน ส่วนวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวาง อยู่ในอันดับสุดท้าย

ผลการเปรียบเทียบสามารถสรุปได้ว่า วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าในแนวสัมผัสและในแนวแกน และวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กตามขวาง เท่านั้น ที่มีความสามารถในการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นแบบแอนไอโซทรอปิก ทั้งในกรณีของท่อนำคลื่นแบบดิสเพอร์ซีฟแอนไอโซทรอปิกแม่เหล็กและท่อนำแสงแบบแอนไอโซทรอปิกไฟฟ้า และจากการตรวจสอบประสิทธิภาพโดยรวม ในปัญหาท่อนำคลื่นไดอิเล็กตริก ท่อนำคลื่นแบบดิสเพอร์ซีฟแอนไอโซทรอปิกแม่เหล็ก และประสิทธิภาพสัมพัทธ์ในเชิงเวลาที่ใช้ในการคำนวณ ในท่อนำแสงแบบแอนไอโซทรอปิกไฟฟ้า แสดงให้เห็นว่า วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าใน

แนวสัมผัสและในแนวแกน ให้ประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ท่อนำคลื่นแบบแอนไอโซทรอปิกที่ไม่มีการสูญเสียสูงสุด

ข้อเสนอแนะ

1. ผู้เสนอวิทยานิพนธ์ได้ศึกษาประสิทธิภาพโดยรวมของวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ ในท่อนำคลื่นที่มีขอบเขตเป็นผิวโค้ง ซึ่งตัวอย่างที่ใช้คือท่อนำคลื่นกลวงที่มีภาคตัดขวางรูปวงกลม ได้ผลที่สามารถแสดงเป็นกราฟได้ดังรูป 9.11



รูป 9.11 แสดงกราฟประสิทธิภาพโดยรวมของวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ ของท่อนำคลื่นที่มีขอบเขตเป็นผิวโค้ง

จากรูป 9.11 แสดงให้เห็นว่า วิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าตามขวาง 2 องค์ประกอบ ให้ประสิทธิภาพโดยรวม สูงสุด โดยที่วิธีที่ใช้สนามไฟฟ้า 3 องค์ประกอบ และวิธีที่ใช้สนามแม่เหล็กตามขวาง 2 องค์ประกอบ อยู่ในอันดับที่ 2 และ 3 ตามลำดับ แต่ทั้ง 3 วิธีนี้มีข้อจำกัดที่ไม่สามารถใช้กับท่อนำคลื่นแบบแอนไอโซทรอปิกได้ ส่วนวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าในแนวสัมผัสและในแนวแกน อยู่ในอันดับที่ 4 ซึ่งขัดแย้งกับผลที่ได้จากกรณีของท่อนำคลื่นไดอิเล็กตริก ผู้เสนอวิทยานิพนธ์จึงมีข้อเสนอแนะว่า ควรมีการปรับปรุงวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าในแนวสัมผัสและในแนวแกน ให้มีประสิทธิภาพโดยรวมสูงขึ้น

2.ผู้เสนอวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์เฉพาะวิธีที่ใช้สนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้าในการวิเคราะห์ปัญหาท่อนำคลื่นเท่านั้น ยังมีวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้ศักย์เวกเตอร์ (vector potential) และศักย์สเกลาร์ (scalar potential) เป็นพารามิเตอร์ในการวิเคราะห์ท่อนำคลื่น เช่นวิธีที่เสนอโดย Birdi และ Biro (1991) ที่ยังต้องการการศึกษาประสิทธิภาพ

3. นอกจากวิธีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามไฟฟ้าในแนวสัมผัสและในแนวแกน ที่เสนอโดย Lee (1994) แล้ว ยังมีไฟไนต์อีลีเมนต์ที่ใช้สนามแม่เหล็กในแนวสัมผัสและในแนวแกน ที่เสนอโดย Valor และ Zapata (1995) ที่ยังต้องการการศึกษาประสิทธิภาพ เพื่อเป็นแนวทางในการพิจารณาเลือกใช้วิธีที่เหมาะสมกับแต่ละปัญหาของท่อนำคลื่นต่อไป

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย