

การวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าของสารโดยวิธีไร้ขั้วสัมผัสที่ความถี่ไมโครเวฟ



นาย จักรพันธ์                      ถาวรธิดา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

ศูนย์วิทยุโทรพัทธวิทยา  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ภาควิชาฟิสิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2539

ISBN 974-636-864-8

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I 17480989

**MEASUREMENT OF THE ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF MATERIALS BY  
A CONTACTLESS METHOD AT MICROWAVE FREQUENCIES**



**Mr Chakapun Thawornthira**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science**

**Department of Physics**

**Graduate School**

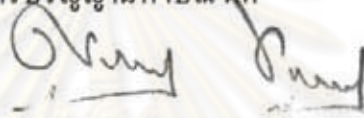
**Chulalongkorn University**

**Academic year 1996**

**ISBN 974-636-864-8**

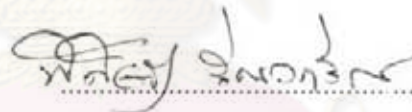
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าของสาร โดยวิธีไร้ขั้วสัมผัสที่ความถี่ ไมโครเวฟ  
โดย นาย จักรพันธ์ ถาวรธิดา  
ภาควิชา ฟิสิกส์  
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. อนันตสิน เตชะกำพุช

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็น ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต



..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ สุภวัฒน์ ชูติวงศ์)

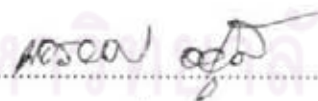
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



..... ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิเศษฐ์ รัตนวราภักย์)



..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ ดร. อนันตสิน เตชะกำพุช)



..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ขจรยศ อยู่ดี)



..... กรรมการ  
(อาจารย์สุวิทย์ พุทธรณต์)



# พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

อักษรพันธุ์ ถาวรธรา : การวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าของสารโดยวิธีไร้สัมผัสที่ความถี่ไมโครเวฟ (MEASUREMENT OF THE ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF MATERIALS BY A CONTACTLESS METHOD AT MICROWAVE FREQUENCIES) อ. ที่ปรึกษา : รศ. ดร. อนันตสิน เตชะกำพูน , 160 หน้า. ISBN 974-636-864-8

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าของแผ่นสารโดยวิธีไร้สัมผัสที่ความถี่ไมโครเวฟ โดยการสร้างตัวส่งพ้องทรงกระบอกที่ส่งพ้องแบบ  $TE_{101}$  ซึ่งไม่มีกระแสไหลข้ามระหว่างผิวโค้งและผิวแบนของตัวส่งพ้องเมื่อปิดผิวแบนด้วยแผ่นสารจึงไม่ต้องสร้างขั้วสัมผัสทางไฟฟ้าระหว่างผิวทั้งสองนี้ จากนั้นทดลองเพื่อวัดค่า Q ของตัวส่งพ้องโดยใช้แผ่นทองเหลืองและแผ่นสารตัวอย่างเป็นผิวแบน จากผลต่างของค่า Q นำไปคำนวณค่าสภาพนำไฟฟ้าของสารตัวอย่างได้

แผ่นสารตัวอย่างที่ใช้มี 3 ชนิด คือ แผ่นกราไฟต์บางบริสุทธิ์ 99.9 % แผ่นกราไฟต์บางบริสุทธิ์ 99.5% และแผ่นแก้วกราไฟต์ เมื่อเปรียบเทียบค่าสภาพนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิห้องที่วัดได้กับค่าที่วัดได้จากวิธีกระแสตรงมาตรฐานพบว่าแผ่นแก้วกราไฟต์มีผลการวัดที่ความถี่ไมโครเวฟใกล้เคียงกับวิธีมาตรฐานที่สุด ส่วนแผ่นกราไฟต์บางทั้งสองแบบนี้มีค่าแตกต่างจากวิธีมาตรฐาน เนื่องจากแผ่นแก้วกราไฟต์มีผิวราบเรียบและมีโครงสร้างสม่ำเสมอว่าแผ่นกราไฟต์บางทั้งสองแบบแรก การวัดแบบนี้อาจใช้ได้กับแผ่นสารแบบอื่นที่ไม่สามารถทำขั้วสัมผัสทางไฟฟ้ากระแสตรงที่ดีได้

ศูนย์วิทยพัทยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา ..... ฟิสิกส์ .....  
สาขาวิชา ..... ฟิสิกส์ .....  
ปีการศึกษา ..... 2539 .....

ลายมือชื่อนิสิต ..... ชัยวัฒน์ ทน.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ..... Chai Jan .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว

## C625315 : MAJOR PHYSICS

KEY WORD: ELECTRICAL CONDUCTIVITY / MICROWAVE MEASUREMENT / CYLINDRICAL RESONATOR

CHAKAPUN THAWORNTHIRA : MEASUREMENT OF THE ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF MATERIALS BY A CONTACTLESS METHOD AT MICROWAVE FREQUENCIES. THESIS ADVISOR : ASSO. PROF. ANANTASIN TECHAGUMPUGH, Ph.D. 160 pp. ISBN 974-636-864-8

This research is the measurement of the electrical conductivity of materials by a contactless method at microwave frequencies. The  $TE_{101}$  cylindrical resonator which did not have current crossing between flat walls and round wall were used in this experiment. When two flat sheet samples were used as flat walls of the resonator, good electrical contacts between the samples and the round wall were not necessary there. The Q values of the resonator with brass sheets and the resonator with sample sheets were measured. From the difference of the Q values obtained, we calculated the electrical conductivity of the samples.

In the measurements we used 3 different materials: 99.9 % pure graphite, 95 % pure graphite, and glassy-graphite samples. It was found that the electrical conductivity of glassy-graphite obtained by this contactless method at room temperature was nearly equal the value by the standard DC method. But the electrical conductivity of other graphite sheets obtained were different from that obtained by the standard method. This because the glassy-graphite is amorphous material and has very smooth flat surface. This measurement can be used for other samples that can not prepare good electrical contacts in DC measurement.

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา..... ฟิสิกส์

สาขาวิชา..... ฟิสิกส์

ปีการศึกษา..... 2539

ลายมือชื่อนิสิต..... ชัยณรงค์ ทวีชัย

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... ชัยณรงค์

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดีจากคำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยที่ได้รับจากรองศาสตราจารย์ ดร.อนันตสิน เตชะกำพูน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รวมทั้งคุณปริดา ภาวิไล ผู้ให้คำปรึกษาและกลิ้งตัวสันฟ่องทรงกระบอก คุณอภิรัตน์ บุญเปี่ยม ผู้ช่วยเหลือในการจัดการทดลองทั้งหมด ตลอดจนผู้ที่ให้ข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะต่าง ๆ ที่มีได้เอ่ยนาม ณ ที่นี้ ที่สำคัญที่สุดขอขอบพระคุณบิดามารดาที่สนับสนุนและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญตาราง .....	ญ
สารบัญภาพ .....	ต
บทที่	
1. บทนำ .....	1
- ที่มาของงานวิจัย .....	1
- ขั้นตอนในการศึกษาวิจัย .....	3
- ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	4
2. ทฤษฎีการวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าของสาร โดยวิธีไรซ์ซ์สัมผัสที่ความถี่ ไมโครเวฟ .....	5
- ตัวสั้นพ้องทรงกระบอก .....	8
- ทฤษฎีตัวสั้นพ้องทรงกระบอกที่มีการสั้นพ้องแบบTE <sub>101</sub> .....	9
- การวิเคราะห์ค่า Q ของตัวสั้นพ้องโดยอาศัยทฤษฎีของวงจรสั้นพ้อง .....	22
- การจัดการทดลองเพื่อวัดค่า Q ของตัวสั้นพ้อง .....	35
- การคำนวณค่าสภาพนำไฟฟ้าของแผ่นทองเหลืองจากค่า Q ของตัวสั้นพ้อง .....	43
- การคำนวณค่าสภาพนำไฟฟ้าของสารตัวอย่างใด ๆ จากค่า Q ของ ตัวสั้นพ้องที่ปิดด้วยแผ่นสารตัวอย่างนั้นๆ .....	46

## บทที่

3. การทดลองวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าของสาร โดยวิธีไร้ขั้วสัมผัสที่ความถี่ไมโครเวฟ .....	49
- การออกแบบสร้างตัวสั้นพ้องทรงกระบอก .....	49
- การสร้างตัวสั้นพ้องทรงกระบอก .....	54
- การทดลองวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าของแผ่นทองเหลืองจากค่า Q ของตัวสั้นพ้อง .....	57
- การทดลองวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าของแผ่นแก้วกราไฟต์บริสุทธิ์ 99.9% และแผ่นแก้วกราไฟต์บริสุทธิ์ 95 % .....	82
- การทดลองวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าของแผ่นแก้วกราไฟต์ .....	108
4. การวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าของสาร โดยวิธีวงจรไฟฟ้ากระแสตรงและวิธีแวนเดอร์พาว .....	127
- การวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าของสาร โดยวิธีวงจรไฟฟ้ากระแสตรงมาตรฐาน .....	128
- การวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าของสาร โดยวิธี แวนเดอร์พาว .....	133
- การวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าของแผ่นกราไฟต์บริสุทธิ์ 99.9% และแผ่นกราไฟต์บริสุทธิ์ 95 % .....	135
- การวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าของแผ่นแก้วกราไฟต์ .....	139
5. สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	145



รายการอ้างอิง .....	150
ภาคผนวก .....	151
ประวัติผู้เขียน .....	160



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 แสดงผลการวัดชุดข้อมูล (f,dB) ชุดที่ 1 เพื่อคำนวณค่า Q ของตัวสั้นพ้อง ที่ปิดด้วยแผ่นทองเหลือง .....	66
3.2 แสดงผลการคำนวณค่า Q จากข้อมูลชุดที่ 1 โดยโปรแกรม Tune9DX.CPP	67
3.3 แสดงผลการวัดชุดข้อมูล (f, dB) ชุดที่ 2 เพื่อคำนวณค่า Q ของตัวสั้นพ้อง ที่ปิดด้วยแผ่นทองเหลือง .....	68
3.4 แสดงผลการคำนวณค่า Q จากข้อมูลชุดที่ 2 โดยโปรแกรม Tune9DX.CPP	69
3.5 แสดงผลการวัดชุดข้อมูล (f,dB) ชุดที่ 3 เพื่อคำนวณค่า Q ของตัวสั้นพ้อง ที่ปิดด้วยแผ่นทองเหลือง .....	70
3.6 แสดงผลการคำนวณค่า Q จากข้อมูลชุดที่ 3 โดยโปรแกรม Tune9DX.CPP	71
3.7 แสดงผลการวัดชุดข้อมูล (f,dB) ชุดที่ 4 เพื่อคำนวณค่า Q ของตัวสั้นพ้อง ที่ปิดด้วยแผ่นทองเหลือง .....	72
3.8 แสดงผลการคำนวณค่า Q จากข้อมูลชุดที่ 4 โดยโปรแกรม Tune9DX.CPP	73
3.9 แสดงผลการวัดชุดข้อมูล (f,dB) ชุดที่ 5 เพื่อคำนวณค่า Q ของตัวสั้นพ้อง ที่ปิดด้วยแผ่นทองเหลือง .....	74
3.10 แสดงผลการคำนวณค่า Q จากข้อมูลชุดที่ 5 โดยโปรแกรม Tune9DX.CPP	75
3.11 แสดงผลการวัดชุดข้อมูล (f,dB) ชุดที่ 6 เพื่อคำนวณค่า Q ของตัวสั้นพ้อง ที่ปิดด้วยแผ่นทองเหลือง .....	76
3.12 แสดงผลการคำนวณค่า Q จากข้อมูลชุดที่ 6 โดยโปรแกรม Tune9DX.CPP	77

ตารางที่

3.13	แสดงผลการวัดชุดข้อมูล (f,dB) ชุดที่ 7 เพื่อคำนวณค่า Q ของตัวสั้นพ้อง ที่ปิดด้วยแผ่นทองเหลือง .....	78
3.14	แสดงผลการคำนวณค่า Q จากข้อมูลชุดที่ 7 โดยโปรแกรม Tune9DX.CPP	79
3.15	แสดงค่าความถี่สั้นพ้องค่า Q ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนของค่า Q ของ แผ่นทองเหลืองขัดมัน .....	80
3.16	แสดงการคำนวณค่าสภาพนำไฟฟ้าของแผ่นทองเหลือง .....	81
3.17	แสดงผลการวัดชุดข้อมูล (f, dB) ชุดที่ 1 เพื่อคำนวณค่า Q ของตัวสั้นพ้อง ที่ปิดด้วยแผ่นกราไฟต์ 99.9% .....	84
3.18	แสดงผลการคำนวณค่า Q จากข้อมูลชุดที่ 1 โดยโปรแกรม Tune9DX.CPP	85
3.19	แสดงผลการวัดชุดข้อมูล (f, dB) ชุดที่ 2 เพื่อคำนวณค่า Q ของตัวสั้นพ้อง ที่ปิดด้วยแผ่นกราไฟต์ 99.9% .....	86
3.20	แสดงผลการคำนวณค่า Q จากข้อมูลชุดที่ 2 โดยโปรแกรม Tune9DX.CPP	87
3.21	แสดงผลการวัดชุดข้อมูล (f, dB) ชุดที่ 3 เพื่อคำนวณค่า Q ของตัวสั้นพ้อง ที่ปิดด้วยแผ่นกราไฟต์ 99.9% .....	88
3.22	แสดงผลการคำนวณค่า Q จากข้อมูลชุดที่ 3 โดยโปรแกรม Tune9DX.CPP	89
3.23	แสดงผลการวัดชุดข้อมูล (f, dB) ชุดที่ 4 เพื่อคำนวณค่า Q ของตัวสั้นพ้อง ที่ปิดด้วยแผ่นกราไฟต์ 99.9% .....	90
3.24	แสดงผลการคำนวณค่า Q จากข้อมูลชุดที่ 4 โดยโปรแกรม Tune9DX.CPP	91
3.25	แสดงผลการวัดชุดข้อมูล (f, dB) ชุดที่ 5 เพื่อคำนวณค่า Q ของตัวสั้นพ้อง ที่ปิดด้วยแผ่นกราไฟต์ 99.9% .....	92
3.26	แสดงผลการคำนวณค่า Q จากข้อมูลชุดที่ 5 โดยโปรแกรม Tune9DX.CPP	93

ตารางที่

3.27	แสดงค่าความถี่สั้นพ้อง ค่า Q ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนของค่า Q ของแผ่นกราฟต์บริสุทธิ์ 99.9 % .....	94
3.28	แสดงการคำนวณค่าสภาพนำไฟฟ้าของแผ่นกราฟต์บริสุทธิ์ 99.9 %	95
3.29	แสดงผลการวัดชุดข้อมูล (f, dB) ชุดที่ 1 เพื่อคำนวณค่า Q ของตัวสั้นพ้อง ที่ปิดด้วยแผ่นกราฟต์ 95 % .....	96
3.30	แสดงผลการคำนวณค่า Q จากข้อมูลชุดที่ 1 โดยโปรแกรม Tune9DX.CPP	97
3.31	แสดงผลการวัดชุดข้อมูล (f, dB) ชุดที่ 2 เพื่อคำนวณค่า Q ของตัวสั้นพ้อง ที่ปิดด้วยแผ่นกราฟต์ 95 % .....	98
3.32	แสดงผลการคำนวณค่า Q จากข้อมูลชุดที่ 2 โดยโปรแกรม Tune9DX.CPP	99
3.33	แสดงผลการวัดชุดข้อมูล (f, dB) ชุดที่ 3 เพื่อคำนวณค่า Q ของตัวสั้นพ้อง ที่ปิดด้วยแผ่นกราฟต์ 95 % .....	100
3.34	แสดงผลการคำนวณค่า Q จากข้อมูลชุดที่ 3 โดยโปรแกรม Tune9DX.CPP	101
3.35	แสดงผลการวัดชุดข้อมูล (f, dB) ชุดที่ 4 เพื่อคำนวณค่า Q ของตัวสั้นพ้อง ที่ปิดด้วยแผ่นกราฟต์ 95 % .....	102
3.36	แสดงผลการคำนวณค่า Q จากข้อมูลชุดที่ 4 โดยโปรแกรม Tune9DX.CPP	103
3.37	แสดงผลการวัดชุดข้อมูล (f, dB) ชุดที่ 5 เพื่อคำนวณค่า Q ของตัวสั้นพ้อง ที่ปิดด้วยแผ่นกราฟต์ 95 % .....	104
3.38	แสดงผลการคำนวณค่า Q จากข้อมูลชุดที่ 5 โดยโปรแกรม Tune9DX.CPP	105
3.39	แสดงค่าความถี่สั้นพ้อง ค่า Q ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนของค่า Q ของแผ่นกราฟต์บริสุทธิ์ 95 % .....	106
3.40	แสดงการคำนวณค่าสภาพนำไฟฟ้าของแผ่นกราฟต์บริสุทธิ์ 95 %	107

ตารางที่

3.41	แสดงผลการวัดชุดข้อมูล ( $f$ , dB) ชุดที่ 1 เพื่อคำนวณค่า $Q$ ของตัวสั้นพ้อง ที่ปิดด้วยแผ่นแก้วกราไฟต์ .....	109
3.42	แสดงผลการคำนวณค่า $Q$ จากข้อมูลชุดที่ 1 โดยโปรแกรม Tune9DX.CPP	110
3.43	แสดงผลการวัดชุดข้อมูล ( $f$ , dB) ชุดที่ 2 เพื่อคำนวณค่า $Q$ ของตัวสั้นพ้อง ที่ปิดด้วยแผ่นแก้วกราไฟต์ .....	111
3.44	แสดงผลการคำนวณค่า $Q$ จากข้อมูลชุดที่ 2 โดยโปรแกรม Tune9DX.CPP	112
3.45	แสดงผลการวัดชุดข้อมูล ( $f$ , dB) ชุดที่ 3 เพื่อคำนวณค่า $Q$ ของตัวสั้นพ้อง ที่ปิดด้วยแผ่นแก้วกราไฟต์ .....	113
3.46	แสดงผลการคำนวณค่า $Q$ จากข้อมูลชุดที่ 3 โดยโปรแกรม Tune9DX.CPP	114
3.47	แสดงผลการวัดชุดข้อมูล ( $f$ , dB) ชุดที่ 4 เพื่อคำนวณค่า $Q$ ของตัวสั้นพ้อง ที่ปิดด้วยแผ่นแก้วกราไฟต์ .....	115
3.48	แสดงผลการคำนวณค่า $Q$ จากข้อมูลชุดที่ 4 โดยโปรแกรม Tune9DX.CPP	116
3.49	แสดงผลการวัดชุดข้อมูล ( $f$ , dB) ชุดที่ 5 เพื่อคำนวณค่า $Q$ ของตัวสั้นพ้อง ที่ปิดด้วยแผ่นแก้วกราไฟต์ .....	117
3.50	แสดงผลการคำนวณค่า $Q$ จากข้อมูลชุดที่ 5 โดยโปรแกรม Tune9DX.CPP	118
3.51	แสดงผลการวัดชุดข้อมูล ( $f$ , dB) ชุดที่ 6 เพื่อคำนวณค่า $Q$ ของตัวสั้นพ้อง ที่ปิดด้วยแผ่นแก้วกราไฟต์ .....	119
3.52	แสดงผลการคำนวณค่า $Q$ จากข้อมูลชุดที่ 6 โดยโปรแกรม Tune9DX.CPP	120
3.53	แสดงผลการวัดชุดข้อมูล ( $f$ , dB) ชุดที่ 7 เพื่อคำนวณค่า $Q$ ของตัวสั้นพ้อง ที่ปิดด้วยแผ่นแก้วกราไฟต์ .....	121
3.54	แสดงผลการคำนวณค่า $Q$ จากข้อมูลชุดที่ 7 โดยโปรแกรม Tune9DX.CPP	122

ตารางที่

3.55	แสดงผลการวัดชุดข้อมูล ( $f$ , dB) ชุดที่ 8 เพื่อคำนวณค่า $Q$ ของตัวสั้นพ้อง ที่ปิดด้วยแผ่นแก้วกราไฟต์ .....	123
3.56	แสดงผลการคำนวณค่า $Q$ จากข้อมูลชุดที่ 8 โดยโปรแกรม Tune9DX.CPP	124
3.57	แสดงค่าความถี่สั้นพ้อง ค่า $Q$ ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนของค่า $Q$ ของแผ่นแก้วกราไฟต์ .....	125
3.58	แสดงการคำนวณค่าสภาพนำไฟฟ้าของแผ่นแก้วกราไฟต์ .....	126
4.1	แสดงผลการทดลองวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าของแผ่นกราไฟต์บริสุทธิ์ 99.9 % ด้วยวิธีวงจรวัดไฟฟ้ากระแสตรง .....	137
4.2	แสดงผลการทดลองวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าของแผ่นกราไฟต์บริสุทธิ์ 95 % ด้วยวิธีวงจรวัดไฟฟ้ากระแสตรง .....	138
4.3	แสดงผลการวัดกระแสไฟฟ้าและแรงดันตกคร่อมของแผ่นแก้วกราไฟต์ ชุดที่ 1 .....	140
4.4	แสดงผลการวัดกระแสไฟฟ้าและแรงดันตกคร่อมของแผ่นแก้วกราไฟต์ ชุดที่ 2 .....	141
4.5	แสดงผลการคำนวณค่าสภาพนำไฟฟ้าของแผ่นแก้วกราไฟต์โดยวิธี แวน เดอร์ พาว .....	142
4.6	แสดงผลการทดลองวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าของแผ่นแก้วกราไฟต์โดยวิธี วงจรวัดไฟฟ้ากระแสตรงมาตรฐาน .....	143
4.7	แสดงผลการวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าของแผ่นกราไฟต์บริสุทธิ์ 99.9% แผ่นกราไฟต์บริสุทธิ์ 95 % และแผ่นแก้วกราไฟต์ .....	144
5.1	แสดงผลสรุปการวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าของสารตัวอย่าง 3 ชนิด .....	145

## สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1	แสดงการวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าของสารที่ปิดอยู่ในท่อนำคลื่น ..... 5
2.2	แสดงแบบของสนามไฟฟ้าของการสั้นพ้องแบบ $TE_{101}$ แสดงถึงการหมุนวน อย่างสมมาตรเป็นวงกลมของสนามไฟฟ้ารอบแกนของตัวสั้นพ้อง ..... 8
2.3	แสดงสนามแม่เหล็กและกระแสไฟฟ้าที่ผิวในของตัวสั้นพ้องเมื่อภายในมี การสั้นพ้องแบบ $TE_{101}$ ..... 15
2.4	แสดงสนามไฟฟ้าภายในตัวสั้นพ้อง ..... 15
2.5	แสดงวงจรสมมูลของตัวสั้นพ้อง ..... 22
2.6	แสดงกราฟระหว่างกระแสในวงจรสั้นพ้องกับความถี่ ..... 23
2.7	แสดงกราฟระหว่างกำลังไฟฟ้าในวงจรสั้นพ้องกับความถี่ ..... 24
2.8	แสดงแมจิกทีและพอร์ตทั้ง 4 ..... 35
2.9	แสดงสมมาตรของสัญญาณไมโครเวฟในพอร์ต 2, 3 และ 4 ของแมจิกที ..... 36
2.10	แสดงแผนผังการจัดการทดลองเพื่อวัดค่า $Q$ ของตัวสั้นพ้อง ..... 37
2.11	แสดงผังงานในการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อคำนวณหาค่า $Q$ ของตัวสั้นพ้อง ..... 42
2.12	แสดงตำแหน่งของสารตัวอย่างที่เป็นแผ่นทองเหลืองที่ปิดบนตัวสั้นพ้อง ..... 43
3.1	แสดงทิศทางของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าของการนำสัญญาณแบบ $TE_{10}$ ภายในท่อนำคลื่น ..... 51
3.2	แสดงไดโพลแม่เหล็กที่บริเวณช่องคู่ควบ ..... 52
3.3	แสดงแบบของตัวสั้นพ้องทรงกระบอก ..... 53
3.4	แสดงผิวเรียบที่เกิดจากการกัด้วยเครื่องกัโลหะ ..... 54

รูปที่

3.5	แสดงการกัดท่อทองเหลืองให้เป็นบ่าเพื่อรองรับฝาประกบ .....	55
3.6	แสดงการเจาะช่องคู่ควบ (Coupling Hole) รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า .....	55
3.7	แสดงแนวทางการติดฝาประกบกับตัวสันห้องทรงกระบอก .....	56
3.8	แสดงภาพถ่ายของตัวสันห้องทรงกระบอกที่สร้างเสร็จแล้ว .....	57
3.9	แสดงรูปร่างของการฉลุแผ่นทองเหลือง .....	57
3.10	แสดงภาพถ่ายการปิดผนึกแผ่นทองเหลืองกับตัวสันห้อง .....	58
3.11	แสดงภาพถ่ายของท่อไคลสตรอนและเครื่องจ่ายพลังงานของท่อไคลสตรอน	59
3.12	แสดงภาพถ่ายของไมโครเวฟไอโซเลเตอร์ .....	60
3.13	แสดงภาพถ่ายของแมจิกที .....	60
3.14	แสดงเวฟมิเตอร์ .....	61
3.15	แสดงภาพถ่ายของตัวลดไมโครเวฟ .....	62
3.16	แสดงภาพถ่ายของพลันเจอร์ .....	62
3.17	แสดงรูปถ่ายของหัววัดสัญญาณไมโครเวฟและออสซิลโลสโคป .....	63
3.18	แสดงการประกอบเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ เพื่อทำการทดลอง .....	64
3.19	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับค่า $p$ และ $p$ (least) .....	67
3.20	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับค่า $p$ และ $p$ (least) .....	69
3.21	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับค่า $p$ และ $p$ (least) .....	71
3.22	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับค่า $p$ และ $p$ (least) .....	73
3.23	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับค่า $p$ และ $p$ (least) .....	75
3.24	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับค่า $p$ และ $p$ (least) .....	77
3.25	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับค่า $p$ และ $p$ (least) .....	79



รูปที่

3.26	แสดงภาพถ่ายแผ่นกราฟไฟต์ที่ปิดบนแผ่นโลหะ .....	82
3.27	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับค่า $p$ และ $p$ (least) .....	85
3.28	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับค่า $p$ และ $p$ (least) .....	87
3.29	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับค่า $p$ และ $p$ (least) .....	89
3.30	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับค่า $p$ และ $p$ (least) .....	91
3.31	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับค่า $p$ และ $p$ (least) .....	93
3.32	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับค่า $p$ และ $p$ (least) .....	97
3.33	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับค่า $p$ และ $p$ (least) .....	99
3.34	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับค่า $p$ และ $p$ (least) .....	101
3.35	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับค่า $p$ และ $p$ (least) .....	103
3.36	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับค่า $p$ และ $p$ (least) .....	105
3.37	แสดงภาพถ่ายแผ่นแก้วกราฟไฟต์ที่ตัดขึ้นรูปพร้อมที่จะทำการทดลอง	108
3.38	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับค่า $p$ และ $p$ (least) .....	110
3.39	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับค่า $p$ และ $p$ (least) .....	112
3.40	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับค่า $p$ และ $p$ (least) .....	114
3.41	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับค่า $p$ และ $p$ (least) .....	116
3.42	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับค่า $p$ และ $p$ (least) .....	118
3.43	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับค่า $p$ และ $p$ (least) .....	120
3.44	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับค่า $p$ และ $p$ (least) .....	122
3.45	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับค่า $p$ และ $p$ (least) .....	124

## รูปที่

4.1	แสดงการจัดอุปกรณ์เพื่อทำการวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าโดยวิธีวงจรไฟฟ้า กระแสตรงมาตรฐาน .....	128
4.2	แสดงภาพถ่ายวงจรมีพิมพ์ที่ผ่านการกักขึ้นรูปแล้ว .....	131
4.3	แสดงภาพถ่ายส่วนประกอบทั้งหมดของเครื่องวัดค่าสภาพนำไฟฟ้า ..	131
4.4	แสดงภาพถ่ายการประกอบสารตัวอย่างกับเครื่องมือวัด .....	132
4.5	แสดงภาพถ่ายชุดเครื่องมือวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าของสารพร้อมวงจร ..	132
4.6	แสดงการจัดการทดสอบวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าของสาร โดยวิธี แวน เดอร์ พาว .....	133
4.7	แสดงการสลับขั้วไฟฟ้าโดยการหมุน .....	134
4.8	แสดงภาพถ่ายการบรรจุแผ่นกราไฟต์บริสุทธิ์ 99.9 % ลงในเครื่องมือวัด	136
4.9	แสดงภาพถ่ายเครื่องวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าที่ใส่แผ่นแกวกราไฟต์แล้ว	142