บทที่ 5

สรุปการวิจัย และข้อเสนอแนะ

ในการวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าของสารโดยวิธีไร้ขั้วสัมผัสที่ความถี่ไมโครเวฟครั้งนี้ มีสิ่งที่น่าสนใจมากมาย ทั้งข้อดี และปัญหาที่ควรหาแนวทางแก้ไข ซึ่งสามารถสรุปเป็นหัวข้อต่างๆ ดังนี้

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าของสาร โดยวิธีไร้ขั้วสัมผัสที่ความถี่ไมโครเวฟ ในสารตัวอย่างสามชนิด คือ แผ่นกราไฟต์บริสุทธิ์ 95 % แผ่นกราไฟต์บริสุทธิ์ 99.9 % และแผ่นแก้วกราไฟต์ กับการทดลองวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าของสารตัวอย่างทั้งสามชนิด โดยวิธีมาตรฐาน ได้ผลการทดลองสรุปได้ดังตาราง 5.1

ตารางที่ 5.1 แสดงผลสรุปการวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าของสารตัวอย่างสามชนิด

สารตัวอย่าง	วงจรไฟฟ้ากระแสตรงมาตรฐาน	แวน เดอร์ พาว	ไร้ขั้วสัมผัสที่ความถี่ไมโครเวฟ	
	$\sigma(\Omega\text{-m})^{-1}$	$\sigma(\Omega\text{-m})^{-1}$	$\sigma(\Omega\text{-m})^{-1}$	Q
แผ่นกราไฟต์ บริสุทธิ์ 99.9%	$1.14X10^5$	——	$2.96X10^4$	5055.5±280.9 %error=5.6
แผ่นกราไฟต์ บริสุทธิ์ 95%	$1.41X10^5$	——	$4.81X10^4$	5828.4±598.2 %error=10.3
แผ่นแก้ว กราไฟต์	$4.82X10^4$	$4.65X10^4$	$4.58X10^4$	5747.4±258.5 %error=4.5

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากตารางสามารถสรุปผลการทดลองทั้งหมดได้ดังนี้

1. การวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าของสารตัวอย่าง โดยวิธีไร้ขั้วสัมผัสที่ความถี่ไมโครเวฟนั้น สามารถคำนวณความแม่นยำในการวัดจาก ร้อยละของความเบี่ยงเบนในการวัดค่า ซึ่งมีความผิดพลาดสูงสุด 10.3 % ในการวัดค่า Q ของแผ่นกราไฟต์บริสุทธิ์ 95 % ผิดพลาด 5.6 % ในการวัดค่า Q ของแผ่นกราไฟต์บริสุทธิ์ 99.9% และมีความผิดพลาดต่ำสุด ร้อยละ 4.5 ในการวัดค่า Q ของแผ่นแก้วกราไฟต์ เนื่องจากแผ่นแก้วกราไฟต์มีผิวเรียบสม่ำเสมอและมีรอยขีดข่วนน้อยกว่าแผ่นกราไฟต์บริสุทธิ์ทั้งสองชนิดมาก และรอยขีดข่วนดังกล่าวสัมพันธ์กับค่า Skin Depth ของสารแต่ละชนิด ซึ่งค่า Skin Depth เป็นค่าที่ขึ้นกับค่าความถี่และค่าสภาพนำไฟฟ้าของสาร เมื่อทำการทดลองกับกราไฟต์ซึ่งมีค่าสภาพนำไฟฟ้าไม่สูงมากนัก ค่า Skin Depth จะมีค่ามากกว่าขนาดของรอยขีดข่วนที่เกิดขึ้นที่ผิวของแผ่นแก้วกราไฟต์ ทำให้การวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าในแผ่นแก้วกราไฟต์มีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากวิธีมาตรฐาน

2. ผลการคำนวณสภาพนำไฟฟ้าของแผ่นทองเหลืองขัดมันจากค่า Q ที่วัดได้มีค่าเท่ากับ $1.69X10^{6}$ $(\Omega\text{-m})^{-1}$ พบว่า มีค่าสภาพนำไฟฟ้าต่างจากค่ามาตรฐาน (Forsythe, 1964) ที่มีค่าเท่ากับ $1.4X10^{7}$ $(\Omega\text{-m})^{-1}$ เนื่องจากแผ่นทองเหลืองที่ใช้เป็นแผ่นทองเหลืองที่มีส่วนผสมต่างจากแผ่นทองเหลืองที่ใช้ในการวัดค่ามาตรฐานทำให้ค่าสภาพนำไฟฟ้าที่วัดจากวิธีไร้ขั้วสัมผัสแตกต่างจากค่ามาตรฐาน นอกจากนี้ทองเหลืองเป็นโลหะที่มีค่าสภาพนำไฟฟ้าสูงทำให้ค่า Skin Depth ของมันมีค่าน้อยและเราไม่สามารถสร้างผิวของแผ่นทองเหลืองให้มีรอยขีดข่วนที่มีขนาดเล็กกว่าค่า Skin Depth ได้จึงทำให้การวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าของทองเหลืองโดยวิธีไร้ขั้วสัมผัสมีค่าผิดพลาด เนื่องจากทองเหลืองมีค่าสภาพนำไฟฟ้ามากทำให้ค่า Q ของตัวสั่นพ้องที่ปิดด้วยแผ่นทองเหลืองมีค่าสูงและค่าความกว้างแบนด์แคบ นอกจากนี้เครื่องกำเนิดสัญญาณไมโครเวฟไม่มีเสถียรภาพของความถี่ที่ดีพอจึงทำให้ค่า Q ที่วัดได้ผิดมาก

3. ถึงแม้ว่าการวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าของแผ่นทองเหลืองโดยวิธีไร้ขั้วสัมผัสจะมีค่าคลาดเคลื่อนแต่ยังถือว่าการวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าของแผ่นกราไฟต์ทั้งสามแบบมีความน่าเชื่อถือ เพราะค่าสภาพนำไฟฟ้าของทองเหลืองมีค่าสูง เมื่อพิจารณาสมการ (2.81) พบว่า

ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าของทองเหลืองจึงไม่มีผลในการคำนวณค่าสภาพนำไฟฟ้าของสารตัวอย่างมากนัก

ปัญหาในการวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าของสารโดยวิธีไร้ขั้วสัมผัสที่ความถี่ไมโครเวฟ

ปัญหาที่พบในการศึกษาวิจัยการวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าของสารโดยวิธีไร้ขั้วสัมผัสที่ความถี่ไมโครเวฟ สามารถจำแนกได้ดังนี้

1. เครื่องกำเนิดสัญญาณไมโครเวฟที่ใช้เป็นเครื่องรุ่นเก่า ใช้งานมานาน มีระบบการทำงานแบบเก่า ทำให้ต้องเสียเวลาในการอุ่นเครื่องนาน เปลืองพลังงานไฟฟ้า และยังถูกรบกวนทางไฟฟ้าได้ง่าย นอกจากนี้เครื่องกำเนิดสัญญาณไมโครเวฟที่มีใช้ในห้องปฏิบัติการมีอยู่สองรุ่นซึ่งทำงานในช่วงความถี่ต่างกัน เครื่องที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นเครื่องกำเนิดสัญญาณไมโครเวฟในช่วงความถี่เอกซ์ (X-Band) มีช่วงความถี่ทำงาน 8 - 10 GHz เครื่องนี้ใช้ในงานการเรียนการสอนวิชาปฏิบัติการฟิสิกส์ขั้นสูง เครื่องนี้มีข้อดี คือ มีอุปกรณ์ผ่านไมโครเวฟครบถ้วนสามารถจัดการทดลองได้ทันที แต่มีข้อเสีย คือ เครื่องกำเนิดไม่มีระบบกวาดความถี่อัตโนมัติ (Sweep) ทำให้ต้องปรับความถี่โดยผู้ปฏิบัติงานได้ทางเดียว และยังไม่มีเสถียรภาพความถี่จะเลื่อนเมื่อถูกรบกวนจากระบบไฟฟ้า ซึ่งแก้ปัญหานี้ไปได้โดยการใช้เครื่องควบคุมสัญญาณไฟฟ้า หรือ UPS แต่ก็ไม่ดีพอ

ส่วนเครื่องกำเนิดสัญญาณอีกเครื่องหนึ่งทำงานในช่วงความถี่ k หรือ 18 - 26 GHz มีความสามารถในการกวาดความถี่อัตโนมัติซึ่งสามารถตั้งช่วงความถี่ในการกวาดได้ แต่เครื่องชุดนี้ขาดอุปกรณ์ผ่านไมโครเวฟหลายชนิด ที่สำคัญคือขาดไดเรกชันนอลคัปเปลอร์สำหรับการทำงานในระบบกวาดความถี่ที่ต้องใช้ไดเรกชันนอลคัปเปลอร์ทั้งหมด 2 ตัวซึ่งมีราคาแพงมากราวๆ 50,000 บาทต่อ 1 ตัวและยังเสียเวลาในการจัดซื้อนานมาก แต่ถ้าสามารถจัดหาไดเรกชันนอลคัปเปลอร์ได้ก็สามารถจัดการทดลองที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าที่ใช้อยู่ขณะนี้ได้ และการจัดการทดลองในช่วงความถี่ k ยังใช้สารตัวอย่างปริมาณน้อยกว่าเพราะตัวสั่นพ้องมีขนาดเล็กกว่า

2 การทดลองในแต่ละครั้งจะต้องปฏิบัติโดยบุคคลที่มีความชำนาญ ทำให้ต้องมีการฝึกฝนในการปฏิบัติ และถ้าผู้ปฏิบัติไม่มีความชำนาญเพียงพอก็อาจทำให้ผลการปฏิบัติผิดพลาดได้

3. ปัญหาในการสร้างตัวสั่นพ้องทรงกระบอกที่สร้างขึ้นในโรงงานของภาควิชาฟิสิกส์ คือ เครื่องมือในภาควิชาฟิสิกส์เก่า และบางชิ้นก็ชำรุด ทำให้ผลการสร้างตัวสั่นพ้องทรงกระบอกไม่ดีเท่าที่ควร

4. ปัญหาการหาสารตัวอย่างมาทดสอบ ซึ่งสารตัวอย่างที่ใช้มีจำนวนน้อยแต่ราคาแพงมาก และบางชิ้นต้องสั่งเข้าจากต่างประเทศทำให้เสียเวลารอนาน อีกทั้งในการทดลองจำเป็นต้องใช้สารตัวอย่างปริมาณที่มากพอสมควรด้วย

5. ปัญหาที่เกิดจากความขัดข้องในอุปกรณ์ผ่านไมโครเวฟที่ใช้ และอุปกรณ์ช่วยเหลืออื่นๆ อาทิเช่น ออสซิลโลสโคป ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้มีอายุการใช้งานที่นานมาก บางครั้งก่อให้เกิดปัญหาเมื่อทำการทดลองได้

แนวทางในการพัฒนาการวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าของสารโดยวิธีไร้ขั้วสัมผัสที่ความถี่ไมโครเวฟ

แนวทางในการพัฒนาในครั้งต่อๆ ไปนั้นสามารถทำได้ทั้งในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นในการทดลองครั้งนี้แล้วและการพัฒนารูปแบบวิธีการทดลองไปในทางอื่นได้อีก ซึ่งสามารถสรุปแนวทางดังกล่าวได้ดังนี้

1. สามารถพัฒนาการวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าของสารโดยวิธีไร้ขั้วสัมผัสที่ความถี่ไมโครเวฟโดยการสร้างตัวสั่นพ้องทรงกระบอกจากวัสดุที่นำไฟฟ้าดีกว่าทองเหลือง และใช้เครื่องกลึงที่มีคุณภาพดีกว่าที่มีอยู่ เช่น เครื่องกลึงไฟฟ้าที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ซึ่งกลึงได้อย่างแม่นยำและกัดผิวในของตัวสั่นพ้องได้เรียบขึ้น

2. สามารถสร้างการวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าที่ความถี่สูงกว่าที่ใช้อยู่ได้โดยใช้เครื่องกำเนิดและอุปกรณ์ผ่านไมโครเวฟในย่านความถี่ k ซึ่งมีช่วงความถี่ 18 - 26 GHz ทำให้สามารถสร้างตัวสั่นพ้องที่มีขนาดเล็กกว่าที่ใช้อยู่ได้ และสามารถวัดค่าสภาพนำไฟฟ้าของแผ่นสารตัวอย่างชิ้นเล็กกว่าได้

3. สามารถดัดแปลงเครื่องกำเนิดสัญญาณไมโครเวฟให้สามารถปรับความถี่โดยการควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ทำให้การวัดมีความสะดวกง่ายดายขึ้น

4. เนื่องจากการศึกษาทั้งหมดทำในภาวะอุณหภูมิห้อง สามารถดัดแปลงสร้างตัวสั่นพ้องที่สามารถวัดในอุณหภูมิไนโตรเจนเหลวและฮีเลียมเหลวได้ จะมีประโยชน์มากในการศึกษาการนำไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำได้

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย