

การประเมินค่ากำลังรับแรงอัดสำหรับคอนกรีตที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์  
ด้วยเถ้าแกลบโดยใช้ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อน

นวรรตน์ พิลาแดง

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

ธันวาคม 2558

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม



การประเมินค่ากำลังรับแรงอัดสำหรับคอนกรีตที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์  
ด้วยเถ้าแกลบโดยใช้ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อน

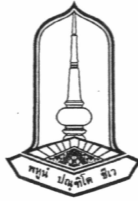
นวรรตน์ พิลาแดง

เสนอต่อมหาวิทยาลัยมหาสารคาม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์

ธันวาคม 2558

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม





คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้พิจารณาวิทยานิพนธ์ของนางสาวนวรรตน์ พิลาแดง  
แล้วเห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ.ดร.วรวัดน์ เสี่ยมวิบูล)

ประธานกรรมการ

(กรรมการบัณฑิตศึกษาประจำคณะ)

(ผศ.ดร.นิวัตร อังควิชิษฐพันธ์)

กรรมการ

(อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก)

(ผศ.ดร.สทลภก หอมวุฒิววงศ์)

กรรมการ

(อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม)

(อาจารย์ ดร.ชลธิ์ โพธิ์ทอง)

กรรมการ

(อาจารย์บัณฑิตศึกษาประจำคณะ)

(ผศ.ดร.ศุภฤกษ์ จันทรจรัสจิตต์)

กรรมการ

(ผู้ทรงคุณวุฒิ)

มหาวิทยาลัยอนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ ของมหาวิทยาลัยมหาสารคาม

(ศ.ดร.สัมพันธ์ ฤทธิเดช)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศ.ดร.ประดิษฐ์ เทอดทูล)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 30 เดือน ๕-๑๑ พ.ศ. 2558



## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณาและความช่วยเหลืออย่างสูงยิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิวัตร อังควิศิษฐพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สหลาภ หอมวุฒิมังคค์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่คอยดูแล ช่วยเหลือ และให้คำปรึกษา ตลอดจนคำแนะนำ ทั้งในภาคทฤษฎีและภาคปฏิบัติ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรวิวัฒน์ เสี่ยมวิบูล ประธานกรรมการสอบ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภฤกษ์ จันทร์จรัสจิตต์ กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ ภายนอก และอาจารย์ ดร.ชลธิ โปธิ์ทอง กรรมการสอบ ที่ได้สละเวลาอันมีค่าในการเข้าร่วมเป็น กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ตลอดจนให้คำแนะนำในการสอบ

ขอขอบพระคุณต้นสังกัด คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้ความดูแล อย่างอบอุ่น ช่วยเหลือทั้งทางด้านสถานที่ อุปกรณ์ เครื่องมือและสนับสนุนทุนวิจัย

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่เอื้อเพื่อ สถานที่และอนุญาตให้ผู้วิจัยใช้เครื่องวิเคราะห์ช่วยงานสื่อสารในการทดลอง

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ทั้งในภาคทฤษฎีและ ภาคปฏิบัติ ให้ผู้วิจัยสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณคุณธีรานันท์ ชนงาม และคุณนัฐราช แสนมีมา ที่สละเวลาอันมีค่าให้ความ ช่วยเหลือในการสร้างเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

ขอขอบคุณนิสิตปีการศึกษา 2556 ที่ให้ความช่วยเหลือและเป็นลูกมือในการทดลอง

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ และทุก ๆ ท่านที่ไม่ได้เอ่ยถึง ที่ส่งกำลังใจ ใถ่ถามสารทุกข์สุขดิบ และให้ความช่วยเหลือมาโดยตลอด

และท้ายที่สุดขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อโกเมนทร์ พิลาแดง คุณแม่่วไลพร พิลาแดง ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.บพิธ บุพโพธิ (สามี) เด็กชายธนาตุล บุพโพธิ (ลูกชายตัวน้อย) และทุกคนในครอบครัว ที่มอบความรักและกำลังใจ สนับสนุนเงินทุนสำหรับการศึกษา ให้ความ ช่วยเหลือ คำปรึกษา คำแนะนำ ตลอดจนการดูแลเรื่องสุขภาพร่างกาย ด้วยความอดทนอย่างไม่เคยย่อ ท้อและเหน็ดเหนื่อย จนทำให้ผู้วิจัยสามารถฝ่าฟันอุปสรรคและสามารถทำความฝันอันสูงสุดให้กับ ครอบครัวได้

นวรรตน์ พิลาแดง



<b>ชื่อเรื่อง</b>	การประเมินค่ากำลังรับแรงอัดสำหรับคอนกรีตที่มีการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบโดยใช้ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อน
<b>ผู้วิจัย</b>	นางสาวนวิรัตน์ พิลาแดง
<b>ปริญญา</b>	ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
<b>กรรมการควบคุม</b>	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิวัตร อังควิศิษฐพันธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สหलग หอมวุฒิมังค์
<b>มหาวิทยาลัย</b>	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ปีที่พิมพ์ 2558

### บทคัดย่อ

เถ้าแกลบถือเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากภาคเกษตรกรรมที่มีอยู่มากในประเทศไทย เถ้าแกลบที่บดละเอียดถูกนำมาใช้ใหม่เป็นวัสดุประสานในส่วนผสมของคอนกรีตเพื่อลดการใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ลดปริมาณของเหลือทิ้งจากภาคเกษตรกรรม ลดมลพิษทางสิ่งแวดล้อม ลดค่าใช้จ่าย และได้คอนกรีตที่สามารถนำไปใช้งานได้จริง โดยทั่วไปคอนกรีตจะสามารถนำไปใช้งานได้จะต้องมีคุณสมบัติทางกายภาพที่เหมาะสม เช่น มีกำลังรับแรงอัดสูง เป็นต้น กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตโดยทั่วไปนิยมทดสอบโดยใช้การวัดแบบทำลายด้วยเครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัดซึ่งทำให้เกิดความเสียหายแก่โครงสร้างและคุณสมบัติของคอนกรีตและไม่นิยมนำมาใช้ทดสอบกับโครงสร้างจริงเนื่องจากต้องมีการตัดโครงสร้างไปทดสอบและจะต้องทำการซ่อมแซมส่วนที่ถูกตัดออกไป ดังนั้นการวัดแบบไม่ทำลายจึงเข้ามามีบทบาทสำคัญในการตรวจสอบและประเมินค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต วิธีหนึ่งที่ได้รับค่านิยมคือ การตรวจสอบด้วยคลื่นไมโครเวฟ แต่ด้วยราคาของเครื่องมือที่ใช้ยังมีราคาค่อนข้างสูง สร้างยากและมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับโครงสร้างของคอนกรีต

วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งเน้นใน 2 ประเด็นสำคัญคือ ประเด็นแรกเป็น ออกแบบและสร้างโพรบแกนร่วมแบบแบนสำหรับใช้ในการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตที่มีการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบ ประเด็นที่สองเป็นการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทดสอบที่มีการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบ เพื่อประเมินกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทดสอบโดยไม่ต้องทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบทำลายจากค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตทดสอบ ขั้นตอนการวิจัยเริ่มจากการออกแบบโพรบแกนร่วมแบบแบนโดยการประยุกต์ใช้โครงสร้างสายนำสัญญาณไมโครสตริปและสายนำสัญญาณแกนร่วม โดยให้มีขนาดของโพรบครอบคลุมเส้นผ่านศูนย์กลางของคอนกรีตตัวอย่างทรงกระบอกที่ 10 เซนติเมตร ความยาวของสตริปสำหรับโครงสร้างไมโครสตริปอยู่ที่ 2.8 มิลลิเมตร สำหรับโครงสร้างสายนำสัญญาณแกนร่วมนั้นมีรัศมีของตัวนำด้านในเท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร และรัศมีภายในของตัวนำด้านนอกเท่ากับ 3.45 มิลลิเมตร โพรบแกนร่วมแบบแบนถูกสร้างขึ้นบนแผ่นวงจรพิมพ์ความถี่สูง Arlon AD260 โดยการทดลองทำการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตตัวอย่างได้ในช่วงความถี่ 0.5-3.5 GHz สำหรับคอนกรีตตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองนั้นเป็นคอนกรีตที่มีการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่ระดับร้อยละ 0 10 20 และ 30 ใช้อัตราส่วนนำต่อวัสดุประสานที่ 0.45 0.55 และ 0.65 ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดและวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตที่อายุ 7 28 และ 90 วัน การทดลองจะทำการวัดสัมประ



สิทธิ์การสะท้อน (S11) และนำไปคำนวณหาเพื่อหาค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีต โดยค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตตัวอย่างที่คำนวณได้จะถูกพิจารณาเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนจริงและส่วนจินตภาพ โดยส่วนจริงนั่นคือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของคอนกรีตตัวอย่าง และส่วนจินตภาพคือ ตัวประกอบการสูญเสียซึ่งจะถูกนำไปคำนวณหาค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตตัวอย่าง

ผลการทดลองแสดงให้เห็นผล 3 ประเด็นสำคัญดังนี้ ประเด็นแรกคือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของคอนกรีตตัวอย่างลดลงเมื่อความถี่ที่ใช้ในการทดลองเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตตัวอย่างเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่ที่ใช้ในการทดลองเพิ่มขึ้น ประเด็นที่สอง เมื่ออายุของคอนกรีตเพิ่มขึ้น ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าสภาพนำไฟฟ้ามีค่าลดลง ประเด็นสุดท้ายคือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าสภาพนำไฟฟ้าแปรผกผันกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตตัวอย่าง ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้ที่จะนำค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนไปใช้ในการประเมินกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตโดยไม่ต้องทำลายโครงสร้างและคุณสมบัติของคอนกรีต นอกจากนี้ยังมีความเป็นไปได้ที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของวัสดุอื่น ๆ

**คำสำคัญ :** โพรบแกนร่วมแบบแบน; สภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อน; แก้วแกลบ;  
ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก; สภาพนำไฟฟ้า



**TITLE** Compressive Strength Assessment for Concrete with Portland Cement Replacement by Rice Husk Ash using Complex Relative Permittivity

**AUTHOR** Miss Nawarat Piladaeng

**DEGREE** Doctor of Philosophy **MAJOR** Electrical and Computer Engineering

**ADVISORS** Asst. Prof. Niwat Angkawisittpan, Ph.D.,  
Asst. Prof. Sahalaph Homwuttivong, Ph.D.

**UNIVERSITY** Mahasarakham University **YEAR** 2015

### ABSTRACT

Rice husk ash (RHA) is one of the wastes from the agricultural sector in Thailand. RHA is ground and recycled as a binder in concrete mixtures in order to replace and reduce the use of the ordinary Portland cement (OPC), decrease the amount of agricultural wastes, the environmental pollution and the cost of concrete, and also obtained the suitable concrete that can be used in actually work. Generally, hardened concrete must have appropriate physical properties before use such as having high compressive strength etc. Normally, the compressive strength of the hardened concrete is tested by applying the destructive testing (DT) method which uses a compression machine as a basic tool of testing. Using the DT method causes damage to the structure and properties of concrete so that this method is not widely used in the field. Therefore, the non-destructive testing (NDT) method plays an important role in the compressive strength test and evaluation of concrete both in the laboratory and the filed because this method cause less destruction of the structure and properties of concrete. One method of the NDT which frequently used is the microwave non-destructive testing (MNNDT) method. Although the MNNDT method has more advantages than the DT method, the equipment used in the MNNDT is quite expensive, difficult to fabricate and smaller than the size of concrete structure.

This thesis focuses on two aims. The first aim is to design and fabricate the novel planar coaxial probe for measuring complex relative permittivity of concrete which replaced the OPC by RHA. The second aim is to study the relationship between complex relative permittivity and compressive strength of concrete which replaced the OPC by RHA in order to evaluate the compressive strength without applying the DT method. The research starts from designing the planar coaxial probe by applying the features of microstrip and coaxial transmission lines. A size of the proposed probe is designed to cover a cross section of cylindrical specimen with a diameter of 10 cm. A length of strip in the microstrip feature is 2.8 mm. For the coaxial feature, the inner conductor radius and the inner radius of outer conductor are 1.5 and 3.45 mm,



respectively. The probe is fabricated on the AD260A printed circuit board (PCB). The experiment is conducted at the frequency range of 0.5-3.5 GHz. The specimens used in the experiment are concretes with the replacement of the OPC by RHA at 10%, 20% and 30% by weight. The water-binder (W/B) ratios are 0.45, 0.55 and 0.65. The specimens are tested at the ages of 7, 28 and 90 days. In the experiment, the reflection coefficients (S11) of the specimens are measured and brought to calculate the complex relative permittivity of the samples. The complex relative permittivity is considered into two parts: the real part and imaginary part. The real part is the dielectric constant and the imaginary part is the dielectric loss factor which is brought to calculate the conductivity of the sample.

The results illustrate three important points. The first point is that the dielectric constant of the concretes decreases and the conductivity rises with increasing the frequency. The second point is that the dielectric constant and the conductivity of the specimens drop when the age of concrete expands. The last point is that the dielectric constant and the conductivity of the specimens are inversely proportional to the compressive strength of concretes. In addition, the results show the possibility of using the complex relative permittivity to assess the compressive strength of concrete without destroying the concrete structure and properties. Moreover, it is possible to apply this method with other interesting materials.

**Key Words :** Planar coaxial probe; complex relative permittivity; rice husk ash; dielectric constant; conductivity





## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพประกอบ	ญ
สารบัญคำย่อ	ท
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 หลักการและเหตุผล	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ความสำคัญของการวิจัย	3
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ปริทัศน์เอกสารข้อมูล	5
2.1 ทฤษฎีของไดโอดีทริก	5
2.2 เทคนิคการวัดค่าสภาพยอมสัมพัทธ์เชิงซ้อน	7
2.3 สายนำสัญญาณไมโครสตริป	18
2.4 สายนำสัญญาณแกนร่วมปลายเปิด	20
2.5 พารามิเตอร์แบบกระจัดกระจาย	21
2.6 เวลาผ่อนคลาย	21
2.7 สมการของโคล-โคล	22
2.8 ความสัมพันธ์ของดีบาย	25
2.9 คอนกรีตที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้ากลบ	25
2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีต	27
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	29
3.1 บทนำ	29
3.2 การออกแบบโพรบแกนร่วมแบบแบน	31
3.3 การวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของวัสดุ	42
3.4 การคำนวณค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของวัสดุ	42
3.5 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ	43
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการอภิปราย	45
4.1 บทนำ	45
4.2 การเตรียมคอนกรีตตัวอย่าง	46



	หน้า
4.3 การเตรียมโพรบแกนร่วมแบบแบน	46
4.4 ผลการทดลองการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีต ตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบ	49
บทที่ 5 สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ	78
5.1 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	78
5.2 สรุปและอภิปรายผล	78
5.3 ข้อเสนอแนะ	79
เอกสารอ้างอิง	80
ภาคผนวก	86
ภาคผนวก ก ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนและค่าสภาพ นำไฟฟ้าของคอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบกับความถี่ ที่ทำการทดลอง	86
ภาคผนวก ข ผลการเปรียบเทียบค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีต ตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบในแต่ละช่วงอายุ	99
ภาคผนวก ค ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อน ( $\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$ ) และค่าสภาพ นำไฟฟ้า ( $\sigma$ ) ของคอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบ ที่ทดลองในช่วงความถี่ 0.5-3.5 GHz	112
ภาคผนวก ง ผลการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ( $\epsilon_r'$ ) ของคอนกรีตตัวอย่างที่ความถี่ 1 GHz และค่าสภาพนำไฟฟ้า ( $\sigma$ ) ของคอนกรีตตัวอย่างที่ความถี่ 3.2 GHz	137
ภาคผนวก จ ภาพประกอบการเตรียมคอนกรีตตัวอย่าง	142
ภาคผนวก ฉ ภาพประกอบการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีต ตัวอย่าง	147
ภาคผนวก ช แผ่นวงจรพิมพ์ความถี่สูง Arlon AD260A	150
ภาคผนวก ซ SMA connector	154
ภาคผนวก ฌ วัสดุที่ใช้ในการสอบเทียบโพรบแกนร่วมแบบแบนและการคำนวณ หาค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตตัวอย่าง	156
ภาคผนวก ฎ การหาจำนวนตัวอย่างในการทดสอบที่เหมาะสม	163
ประวัติย่อผู้วิจัย	166



สารบัญตาราง

	หน้า
ตาราง 2.1 ค่าสภาพะยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของวัสดุมาตรฐานที่ใช้ในการสอบเทียบ โพรบที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส	23
ตาราง 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของถ้ำเกลือ	26
ตาราง 4.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตตัวอย่าง	46
ตาราง ค.1 ผลการวัดค่าสภาพะยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนและค่าสภาพนำไฟฟ้าของ คอนกรีตควบคุมที่ทดลองในช่วงความถี่ 0.5-3.5 GHz และอายุคอนกรีต 7 วัน	113
ตาราง ค.2 ผลการวัดค่าสภาพะยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนและค่าสภาพนำไฟฟ้าของ คอนกรีตควบคุมที่ทดลองในช่วงความถี่ 0.5-3.5 GHz และอายุคอนกรีต 28 วัน	115
ตาราง ค.3 ผลการวัดค่าสภาพะยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนและค่าสภาพนำไฟฟ้าของ คอนกรีตควบคุมที่ทดลองในช่วงความถี่ 0.5-3.5 GHz และอายุคอนกรีต 90 วัน	117
ตาราง ค.4 ผลการวัดค่าสภาพะยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนและค่าสภาพนำไฟฟ้าของ คอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยถ้ำเกลือที่ทดลอง ในช่วงความถี่ 0.5-3.5 GHz อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 และอายุคอนกรีต 7 วัน	119
ตาราง ค.5 ผลการวัดค่าสภาพะยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนและค่าสภาพนำไฟฟ้าของ คอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยถ้ำเกลือที่ทดลอง ในช่วงความถี่ 0.5-3.5 GHz อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 และอายุคอนกรีต 28 วัน	121
ตาราง ค.6 ผลการวัดค่าสภาพะยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนและค่าสภาพนำไฟฟ้าของ คอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยถ้ำเกลือที่ทดลอง ในช่วงความถี่ 0.5-3.5 GHz อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 และอายุคอนกรีต 90 วัน	123
ตาราง ค.7 ผลการวัดค่าสภาพะยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนและค่าสภาพนำไฟฟ้าของ คอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยถ้ำเกลือที่ทดลอง ในช่วงความถี่ 0.5-3.5 GHz อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 และอายุคอนกรีต 7 วัน	125
ตาราง ค.8 ผลการวัดค่าสภาพะยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนและค่าสภาพนำไฟฟ้าของ คอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยถ้ำเกลือที่ทดลอง ในช่วงความถี่ 0.5-3.5 GHz อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 และอายุคอนกรีต 28 วัน	127
ตาราง ค.9 ผลการวัดค่าสภาพะยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนและค่าสภาพนำไฟฟ้าของ คอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยถ้ำเกลือที่ทดลอง ในช่วงความถี่ 0.5-3.5 GHz อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 และอายุคอนกรีต 90 วัน	129



ตาราง ค.10	ผลการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนและค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่ทดลองในช่วงความถี่ 0.5-3.5 GHz อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 และอายุคอนกรีต 7 วัน	131
ตาราง ค.11	ผลการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนและค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่ทดลองในช่วงความถี่ 0.5-3.5 GHz อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 และอายุคอนกรีต 28 วัน	133
ตาราง ค.12	ผลการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนและค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่ทดลองในช่วงความถี่ 0.5-3.5 GHz อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 และอายุคอนกรีต 90 วัน	135
ตาราง ง.1	ผลการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) 0.45 ที่ร้อยละการแทนที่เถ้าแกลบต่างกัน	138
ตาราง ง.2	ค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีต (S/m) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) 0.45 ที่ร้อยละการแทนที่เถ้าแกลบต่างกัน	138
ตาราง ง.3	ผลการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) 0.55 ที่ร้อยละการแทนที่เถ้าแกลบต่างกัน	139
ตาราง ง.4	ค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีต (S/m) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) 0.55 ที่ร้อยละการแทนที่เถ้าแกลบต่างกัน	139
ตาราง ง.5	ผลการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) 0.65 ที่ร้อยละการแทนที่เถ้าแกลบต่างกัน	140
ตาราง ง.6	ค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีต (S/m) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) 0.65 ที่ร้อยละการแทนที่เถ้าแกลบต่างกัน	140
ตาราง ง.7	ผลการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของคอนกรีตที่อัตราควบคุมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) ต่างกัน	141
ตาราง ง.8	ค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีต (S/m) ที่อัตราควบคุมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) ต่างกัน	141
ตาราง ญ.1	สรุปจำนวนตัวอย่างชิ้นงานทดสอบที่เหมาะสม	165



สารบัญภาพประกอบ

	หน้า	
ภาพประกอบ 2.1	เวกเตอร์แทนเกณฑ์การสูญเสีย	6
ภาพประกอบ 2.2	เทคนิคสายส่งแกนร่วมแบบปลายเปิด (ก) ไม่มี grounding flange (ข) มี grounding flange	8
ภาพประกอบ 2.3	(ก) การวัดด้วยโพรบแกนร่วมแบบปลายเปิด (ข) วงจรสมมูลของการวัดด้วยโพรบแกนร่วมแบบปลายเปิด	8
ภาพประกอบ 2.4	เทคนิคสายส่งแบบท่อนำคลื่นและแกนร่วม	10
ภาพประกอบ 2.5	คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งผ่านและสะท้อนกลับจากวัสดุในสายส่ง	10
ภาพประกอบ 2.6	เทคนิคการส่งผ่านอวกาศว่าง	12
ภาพประกอบ 2.7	สายส่งไมโครสตริปที่ใช้วัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อน (ก) มุมมองด้านข้าง (ข) มุมมองด้านบน และ (ค) การกระจายคลื่นไฟฟ้าของสายส่งไมโครสตริปที่ถูกครอบด้วยชั้นวางซ้อน	13
ภาพประกอบ 2.8	แบบจำลองโพรบแบบแบน	14
ภาพประกอบ 2.9	(ก) วิธีเรโซเนเตอร์ (ข) เทคนิคการกำธรแบบโพรงทรงกระบอก และ (ค) เทคนิคการกำธรแบบการสะท้อนท่อนำคลื่น	15
ภาพประกอบ 2.10	การวางวัสดุทดสอบของเทคนิคการกำธรแบบโพรงทรงกระบอก	16
ภาพประกอบ 2.11	วิธีการรบกวนแบบกำธร	17
ภาพประกอบ 2.12	ตำแหน่งการวางของวัสดุในการวัด	17
ภาพประกอบ 2.13	โครงสร้างของสายนำสัญญาณไมโครสตริป	18
ภาพประกอบ 2.14	การแพร่กระจายสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในสายนำสัญญาณไมโครสตริป	19
ภาพประกอบ 2.15	โครงสร้างของสายนำสัญญาณแกนร่วมปลายเปิด	21
ภาพประกอบ 2.16	ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของน้ำกลั่น	23
ภาพประกอบ 2.17	แสดงค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของเอทานอล	24
ภาพประกอบ 2.18	ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของเมทานอล	24
ภาพประกอบ 3.1	แผนผังวิธีการดำเนินงานวิจัย	30
ภาพประกอบ 3.2	โครงสร้างสายนำสัญญาณไมโครสตริป (มิลลิเมตร)	32
ภาพประกอบ 3.3	ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์คุณลักษณะกับความกว้างของสตริป	33
ภาพประกอบ 3.4	โครงสร้างของสายนำสัญญาณแกนร่วมบนระนาบกราวด์ของโพรบ เมื่อ $\epsilon_r = 1$ (มิลลิเมตร)	35
ภาพประกอบ 3.5	โครงสร้างของสายนำสัญญาณแกนร่วมบนระนาบกราวด์ของโพรบ เมื่อ $\epsilon_r = 2.6$ (มิลลิเมตร)	36
ภาพประกอบ 3.6	การจำลองการทำงานของสายนำสัญญาณไมโครสตริป	37
ภาพประกอบ 3.7	การจำลองการทำงานของโพรบแกนร่วมแบบแบน เมื่อ $\epsilon_r = 2.6$ รัศมี a เท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร รัศมี b เท่ากับ 3.45 มิลลิเมตร	38



	หน้า
ภาพประกอบ 3.8 การจำลองการทำงานของโพรบแกนร่วมแบบแบน เมื่อ $\epsilon_r = 2.6$ รัศมี a เท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร รัศมี b เท่ากับ 5.745 มิลลิเมตร	38
ภาพประกอบ 3.9 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S11) ของสายนำสัญญาณ ไมโครสตริปและโพรบแกนร่วมแบบแบนทั้ง 2 แบบ	39
ภาพประกอบ 3.10 การใช้โพรบวัดวัสดุทดสอบที่สร้างขึ้นมา	40
ภาพประกอบ 3.11 ผลจากการใช้โพรบที่มีรัศมี b เท่ากับ 3.45 มิลลิเมตร วัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของวัสดุทดสอบที่สร้างขึ้นมา ( $\epsilon_s = 20$ )	40
ภาพประกอบ 3.12 ผลจากการใช้โพรบที่มีรัศมี b เท่ากับ 5.745 มิลลิเมตร วัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของวัสดุทดสอบที่สร้างขึ้นมา ( $\epsilon_s = 20$ )	41
ภาพประกอบ 3.13 แสดงโครงสร้างของระบบวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตด้วยโพรบแกนร่วมแบบแบน	42
ภาพประกอบ 3.14 รูปร่างและขนาดของคอนกรีตตัวอย่าง	44
ภาพประกอบ 4.1 ระบบการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตตัวอย่าง	45
ภาพประกอบ 4.2 โพรบแกนร่วมแบบแบนที่มีรัศมี รัศมี b เท่ากับ 3.45 มิลลิเมตร	47
ภาพประกอบ 4.3 โพรบแกนร่วมแบบแบนที่มีรัศมี b เท่ากับ 5.745 มิลลิเมตร	48
ภาพประกอบ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตควบคุมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่แตกต่างกันที่อายุคอนกรีต 90 วัน กับความถี่ที่ทำการทดลอง	50
ภาพประกอบ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตควบคุมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่แตกต่างกันที่อายุคอนกรีต 90 วัน กับความถี่ที่ทำการทดลอง	50
ภาพประกอบ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตตัวอย่างที่ระดับการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่แตกต่างกันที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 ที่อายุคอนกรีต 90 วัน กับความถี่ที่ทำการทดลอง	51
ภาพประกอบ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตตัวอย่างที่ระดับการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่แตกต่างกันที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 ที่อายุคอนกรีต 90 วัน กับความถี่ที่ทำการทดลอง	51
ภาพประกอบ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตตัวอย่างที่ระดับการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่แตกต่างกันที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 ที่อายุคอนกรีต 90 วัน กับความถี่ที่ทำการทดลอง	52
ภาพประกอบ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตตัวอย่างที่ระดับการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่แตกต่างกันที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 ที่อายุคอนกรีต 90 วัน กับความถี่ที่ทำการทดลอง	52



ภาพประกอบ	4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีต ตัวอย่างที่ระดับการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้ากลบที่แตกต่างกัน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 ที่อายุคอนกรีต 90 วัน กับความถี่ ที่ทำการทดลอง	53
ภาพประกอบ	4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตตัวอย่างที่ระดับ การแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้ากลบที่แตกต่างกันที่อัตราส่วน น้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 ที่อายุคอนกรีต 90 วัน กับความถี่ที่ทำการทดลอง	53
ภาพประกอบ	4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของคอนกรีตควบคุมที่อัตราส่วน น้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 กับความถี่ในช่วง 0.5-3.5 GHz ที่อายุคอนกรีตตัวอย่าง 7 28 และ 90 วัน	55
ภาพประกอบ	4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตควบคุมที่อัตราส่วน น้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 กับความถี่ในช่วง 0.5-3.5 GHz ที่อายุคอนกรีตตัวอย่าง 7 28 และ 90 วัน	55
ภาพประกอบ	4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของคอนกรีตตัวอย่างที่มี การแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้ากลบที่ร้อยละ 10 ที่อัตราส่วน น้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 กับความถี่ในช่วง 0.5-3.5 GHz ที่อายุคอนกรีตตัวอย่าง 7 28 และ 90 วัน	56
ภาพประกอบ	4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้ากลบที่ร้อยละ 10 ที่อัตราส่วน น้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 กับความถี่ในช่วง 0.5-3.5 GHz ที่อายุคอนกรีตตัวอย่าง 7 28 และ 90 วัน	56
ภาพประกอบ	4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของคอนกรีตตัวอย่างที่มี การแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้ากลบที่ร้อยละ 10 ที่อัตราส่วน น้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 กับความถี่ในช่วง 0.5-3.5 GHz ที่อายุคอนกรีตตัวอย่าง 7 28 และ 90 วัน	57
ภาพประกอบ	4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้ากลบที่ร้อยละ 10 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ ประสาน 0.55 กับความถี่ในช่วง 0.5-3.5 GHz ที่อายุคอนกรีตตัวอย่าง 7 28 และ 90 วัน	57
ภาพประกอบ	4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของคอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้ากลบที่ร้อยละ 10 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ ประสาน 0.65 กับความถี่ในช่วง 0.5-3.5 GHz ที่อายุคอนกรีตตัวอย่าง 7 28 และ 90 วัน	58



ภาพประกอบ	4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่ร้อยละ 10 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 กับความถี่ในช่วง 0.5-3.5 GHz ที่อายุคอนกรีตตัวอย่าง 7 28 และ 90 วัน	58
ภาพประกอบ	4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของคอนกรีตควบคุมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่แตกต่างกันกับอายุคอนกรีต	60
ภาพประกอบ	4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของคอนกรีตตัวอย่างที่ระดับการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบแตกต่างกันที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 กับอายุคอนกรีต	61
ภาพประกอบ	4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของคอนกรีตตัวอย่างที่ระดับการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบแตกต่างกันที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 กับอายุคอนกรีต	62
ภาพประกอบ	4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของคอนกรีตตัวอย่างที่ระดับการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบแตกต่างกันที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 กับอายุคอนกรีต	63
ภาพประกอบ	4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตควบคุมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่แตกต่างกันกับอายุคอนกรีตตัวอย่างที่ 7 28 และ 90 วัน	64
ภาพประกอบ	4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตตัวอย่างที่ระดับการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบแตกต่างกันที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 กับอายุคอนกรีต	65
ภาพประกอบ	4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตตัวอย่างที่ระดับการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบแตกต่างกันที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 กับอายุคอนกรีต	66
ภาพประกอบ	4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตตัวอย่างที่ระดับการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบแตกต่างกันที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 กับอายุคอนกรีต	67
ภาพประกอบ	4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตควบคุม	69
ภาพประกอบ	4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45	70
ภาพประกอบ	4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55	71





ภาพประกอบ	4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดโอิเล็กทริกกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่อัตราส่วน น้ำต่อวัสดุประสาน 0.65	72
ภาพประกอบ	4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้ากับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตควบคุม	73
ภาพประกอบ	4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้ากับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตตัวอย่าง ที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ ประสาน 0.45	74
ภาพประกอบ	4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้ากับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตตัวอย่าง ที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ ประสาน 0.55	75
ภาพประกอบ	4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้ากับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตตัวอย่าง ที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุ ประสาน 0.65	76
ภาพประกอบ	ก.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีต ควบคุมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่แตกต่างกันที่อายุคอนกรีต 7 วัน กับความถี่ที่ทำการทดลอง	87
ภาพประกอบ	ก.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีต ควบคุมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่แตกต่างกันที่อายุคอนกรีต 28 วัน กับความถี่ที่ทำการทดลอง	87
ภาพประกอบ	ก.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีต ควบคุมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่แตกต่างกันที่อายุคอนกรีต 90 วัน กับความถี่ที่ทำการทดลอง	88
ภาพประกอบ	ก.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตควบคุมที่อัตราส่วน น้ำต่อวัสดุประสานที่แตกต่างกันที่อายุคอนกรีต 7 วัน กับความถี่ ที่ทำการทดลอง	88
ภาพประกอบ	ก.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตควบคุมที่อัตราส่วน น้ำต่อวัสดุประสานที่แตกต่างกันที่อายุคอนกรีต 28 วัน กับความถี่ ที่ทำการทดลอง	89
ภาพประกอบ	ก.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตควบคุมที่อัตราส่วน น้ำต่อวัสดุประสานที่แตกต่างกันที่อายุคอนกรีต 90 วัน กับความถี่ ที่ทำการทดลอง	89
ภาพประกอบ	ก.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีต ตัวอย่างที่ระดับการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่แตกต่างกัน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 ที่อายุคอนกรีต 7 วัน กับความถี่ ที่ทำการทดลอง	90











	หน้า
ภาพประกอบ ข.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่ร้อยละ 30 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 กับความถี่ในช่วง 0.5-3.5 GHz ที่อายุคอนกรีตตัวอย่าง 7 28 และ 90 วัน	111
ภาพประกอบ จ.1 ส่วนประกอบของคอนกรีตตัวอย่าง (1) หินขนาด 3/4 นิ้ว (2) ทราย (3) ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (4) น้ำประปา (5) เถ้าแกลบบดละเอียด	143
ภาพประกอบ จ.2 เครื่องผสมคอนกรีต	143
ภาพประกอบ จ.3 การผสมส่วนประกอบของคอนกรีต	144
ภาพประกอบ จ.4 การทดสอบการยุบตัวของคอนกรีต	144
ภาพประกอบ จ.5 การบรรจุคอนกรีตลงในแบบหล่อ	145
ภาพประกอบ จ.6 คอนกรีตตัวอย่างที่ถอดออกจากแม่พิมพ์	145
ภาพประกอบ จ.7 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต	146
ภาพประกอบ ฉ.1 เครื่องวิเคราะห์ข่ายงานสื่อสาร (Vector Network Analyzer; VNA)	148
ภาพประกอบ ฉ.2 วิธีการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตตัวอย่าง	148
ภาพประกอบ ฉ.3 ระบบสำหรับวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตตัวอย่าง	149
ภาพประกอบ ช.1 คุณสมบัติของแผ่นวงจรพิมพ์ความถี่สูง Arlon AD260A (1)	151
ภาพประกอบ ช.2 คุณสมบัติของแผ่นวงจรพิมพ์ความถี่สูง Arlon AD260A (2)	152
ภาพประกอบ ช.3 ข้อมูลตัวแทนจำหน่ายแผ่นวงจรพิมพ์ความถี่สูง Arlon AD260A	153
ภาพประกอบ ซ.1 SMA – 50 Ohm connector	155
ภาพประกอบ ซ.2 คุณสมบัติและขนาดของ SMA – 50 Ohm connector	155
ภาพประกอบ ฌ.1 เอทานอล 99.99% (1)	157
ภาพประกอบ ฌ.2 เมทานอล 99.99% (2)	157
ภาพประกอบ ฌ.3 น้ำกลั่น	158
ภาพประกอบ ฌ.4 คุณสมบัติเอทานอล 99.99% (1)	159
ภาพประกอบ ฌ.5 คุณสมบัติเอทานอล 99.99% (2)	160
ภาพประกอบ ฌ.6 คุณสมบัติเมทานอล 99.99% (3)	161
ภาพประกอบ ฌ.7 คุณสมบัติเมทานอล 99.99% (4)	162
ภาพประกอบ ฎ.1 Operating Characteristic Curves for the Fixed Effects Model Analysis of Variance	164



## สารบัญคำย่อ

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
$\bar{P}$	โพลาริเซชัน (Polarization)	C/m <sup>2</sup>
$\bar{E}$	ความเข้มสนามไฟฟ้า (Electric field intensity)	V/m
$\bar{D}$	ความหนาแน่นเส้นแรงไฟฟ้า (Electric flux density)	C/m <sup>2</sup>
$\epsilon_0$	ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (Permittivity) ของอวกาศว่าง	F/m
$\chi_e$	ค่าสภาพซาบซึมได้ทางไฟฟ้า (Electric susceptibility) ของวัสดุ	-
$\epsilon_r$	ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์ (Relative permittivity) ของวัสดุ	-
$\epsilon$	ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (Permittivity) ของวัสดุ	F/m
$\epsilon_r'$	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant)	-
$\epsilon_r''$	ตัวประกอบการสูญเสียของไดอิเล็กตริก (Dielectric loss factor)	-
$\tan\delta$	แทนเจนต์การสูญเสีย (Loss tangent)	-
D	ตัวประกอบการสูญเสีย (Dissipation factor)	-
Q	ตัวประกอบคุณภาพ (Quality factor: Q-factor)	-
$\sigma$	สภาพนำไฟฟ้า (Conductivity)	S/m
$\omega$	ความเร็วเชิงมุมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	rad/s
f	ความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	Hz
$\Gamma$	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน	-
$C_0$	ค่าความจุของตัวเก็บประจุที่ถูกรวมด้วยอากาศ	F
$C_f$	ค่าความจุของตัวเก็บประจุอิสระในวัสดุ	F
$Z_0$	ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ	Ohm
$\lambda_0$	ความยาวคลื่นในอวกาศว่าง	m
$\lambda_c$	ความยาวคลื่นคัทออฟ	m
$\gamma_0$	ค่าคงที่การแพร่กระจายในอวกาศว่าง	-
$\epsilon_{eff}$	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผล	-
$\eta$	อินทรินซิกอิมพีแดนซ์ (Intrinsic impedance) ของวัสดุไดอิเล็กตริก	Ohm
$\mu$	ค่าความซาบซึมได้ (Permeability) ของวัสดุ	H/m
$\mu_r$	ค่าความซาบซึมได้สัมพัทธ์ (Relative permeability)	-
$\mu_0$	ค่าความซาบซึมได้ของอวกาศว่าง	H/m
$\tau$	เวลาผ่อนคลาย (Relaxation time)	s
$\rho_V$	ความหนาแน่นของประจุเชิงปริมาตร (Volume charge density)	C/m <sup>3</sup>
$\epsilon_\infty$	ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ความถี่อนันต์	-
$\epsilon_S$	ค่าสถิต (Static value) ของค่าคงที่ไดอิเล็กตริก	-
$\alpha$	การกระจายของความถี่ผ่อนคลาย	-



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 หลักการและเหตุผล

คอนกรีตเป็นวัสดุที่มีส่วนผสมของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และนิยมนำมาใช้ในการก่อสร้างอาคารอย่างแพร่หลาย ซึ่งปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ผสมในคอนกรีตนั้นทำหน้าที่เป็นเป็นวัสดุประสานหลักในโครงสร้างของงานก่อสร้าง ในกระบวนการผลิตซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ นอกจากจะสิ้นเปลืองพลังงานแล้วยังปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่บรรยากาศซึ่งสร้างมลพิษให้กับสิ่งแวดล้อม อีกทั้งซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นั้นผลิตจากแร่ธรรมชาติซึ่งนับวันจะยิ่งลดปริมาณลงตามความต้องการในการใช้ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นการหาวัสดุที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมหรือวัสดุที่เหลือทิ้งจากภาคเกษตรกรรมและอุตสาหกรรม เช่น เถ้าแกลบ เป็นต้น มาเป็นวัสดุปอซโซลาน (Pozzolans) ในคอนกรีตเพื่อลดปริมาณการใช้ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการลดปริมาณขยะชีวมวล และยังช่วยลดมลพิษทางสิ่งแวดล้อมได้ด้วย [1], [2] และเมื่อมีการนำเอาเถ้าแกลบมาเป็นส่วนผสมแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในคอนกรีต จึงจำเป็นต้องมีการประเมินคุณสมบัติของคอนกรีตดังกล่าว เช่น กำลังรับแรงอัด (Compressive Strength) เป็นต้น เพื่อประเมินคุณภาพของคอนกรีตว่าเหมาะสมต่อการใช้งานหรือไม่ ซึ่งการประเมินกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ใช้ในงานก่อสร้างอาคาร โดยทั่วไปแบ่งเป็น 2 วิธี คือ วิธีการทดสอบแบบทำลาย (Destructive Testing Method) และวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย (Nondestructive Testing Method) โดยวิธีการทดสอบแบบทำลายนั้นเป็นการทดสอบที่ทำให้เกิดความเสียหายแก่คุณสมบัติและโครงสร้างของคอนกรีต ซึ่งวิธีการนี้ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดโดยการกดตัวอย่างทดสอบจนแตกเพื่อให้ทราบค่ากำลังรับแรงอัด และไม่นิยมนำไปใช้ในการหาค่ากำลังรับแรงอัดของโครงสร้างจริง เนื่องจากต้องทำการซ่อมแซมโครงสร้างที่ถูกทำลายไป หากเป็นส่วนหนึ่งของคอนกรีตตัวอย่าง หลังจากตรวจสอบกำลังรับแรงอัดแล้วก็จะกลายเป็นขยะซึ่งสร้างมลพิษให้กับสิ่งแวดล้อมอีกด้วย ส่วนวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลายนั้นเป็นการทดสอบที่ง่าย สะดวก รวดเร็ว และไม่ทำให้เกิดความเสียหายแก่คุณสมบัติและโครงสร้างจริงของคอนกรีตโดยใช้เครื่องมือตรวจสอบภายในโครงสร้าง วิธีการนี้สามารถใช้ตรวจสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตได้ทั้งตัวอย่างทดสอบและโครงสร้างจริง แม้ว่าวิธีการนี้จะเป็นที่นิยมใช้กันมากแต่เครื่องมือวัดกำลังอัดของคอนกรีตที่มีขายตามท้องตลาดยังมีราคาค่อนข้างสูง และหัววัดสัญญาณมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับโครงสร้างของคอนกรีตที่ต้องการตรวจสอบ จึงต้องอาศัยการสุ่มบริเวณที่ต้องการตรวจสอบ การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตแบบไม่ทำลายมีอยู่หลายวิธี เช่น วิธีหาค่าความแข็งแรงของคอนกรีตด้วยค้อนกระแทก (Rebound Hammer) และวิธีประเมินค่ากำลังอัดคอนกรีตด้วยการยิงด้วยหัวหยั่งทดสอบ (Penetration Resistance) เป็นต้น [3] นอกจากนี้วิธีที่ได้กล่าวไปแล้ว นักวิจัยหลายท่านยังได้ทำการศึกษาและออกแบบหัววัดสัญญาณหรือโพรบสำหรับการตรวจสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตแบบไม่ทำลายโดยอาศัยหลักการการส่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Waves) ในย่านความถี่ไมโครเวฟเข้าไปในวัสดุทดสอบ และรับสัญญาณสะท้อนกลับเพื่อแปรผลทดสอบในการตรวจสอบ ซึ่งค่าสัญญาณที่สะท้อนกลับนี้ขึ้นอยู่กับสมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric Property) ของคอนกรีตที่ทำการทดสอบ [4], [5] ค่าสมบัติไดอิเล็กตริกของ





วัสดุ คือ ค่าสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุที่สามารถสะสมพลังงานเมื่อวัสดุดังกล่าวอยู่ในบริเวณที่มีสนามไฟฟ้า โดยค่าพารามิเตอร์พื้นฐานที่จำเป็นสำหรับการศึกษาและการสร้างแบบจำลองเพื่อให้เข้าใจสมบัติและพฤติกรรมของวัสดุไดอิเล็กตริก คือ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อน (Complex Relative Permittivity) ซึ่งเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น อุณหภูมิ ความชื้น และความถี่ของสนามไฟฟ้า เป็นต้น แม้ว่าวัสดุจำนวนมากสามารถทราบค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวได้จากตารางที่มีอยู่ แต่การทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวยังคงมีความจำเป็นอย่างมากสำหรับวัสดุอื่นๆ ที่ยังคงไม่ทราบค่า [6], [7] เช่น คอนกรีตที่มีการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยแก้วกลีบ เป็นต้น

จากงานวิจัยที่ทำการการศึกษาคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของคอนกรีตหรือวัสดุอื่นที่มีซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุประสาน เช่น มอร์ตาร์ เป็นต้น เพื่อประเมินคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุดังกล่าวโดยใช้การตรวจสอบแบบไม่ทำลาย เช่น ในปี 2013 Jamil และคณะ [4] นำเสนอการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนและค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีต โดยใช้เทคนิคการส่งผ่านอวกาศว่างทำการวัดในช่วงความถี่ 7-13 GHz และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติไดอิเล็กตริกที่วัดได้กับสมบัติทางกายภาพของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ และเวลาในการบ่มคอนกรีตที่แตกต่างกัน แต่ขนาดของคอนกรีตที่ใช้ยังมีข้อจำกัดคือต้องมีความหนาไม่เกิน 10 มิลลิเมตร ในปี 2009 Kwon และคณะ [5] ได้ทำการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนและค่าสภาพนำไฟฟ้าของมอร์ตาร์โดยใช้โพรบแบบแกนร่วมปลายเปิดทำงานในช่วงความถี่ 0.2-20 GHz และแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติไดอิเล็กตริกที่วัดได้กับสมบัติทางกายภาพของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนของน้ำต่อซีเมนต์ และเวลาในการบ่มที่แตกต่างกัน แต่ขนาดของคอนกรีตที่ใช้ยังมีข้อจำกัดคือต้องมีความหนาไม่เกิน 40 มิลลิเมตร เนื่องจากจากโพรบที่ใช้มีขนาดเล็ก ในปี 2004 Damme และคณะ [8] นำเสนอการออกแบบโพรบแกนร่วมปลายเปิดที่มีขนาดใหญ่ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร ใช้ในการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตเสริมเหล็กที่มีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ได้กล่าวมาแล้ว ผลที่ได้จากการทดสอบอธิบายความสัมพันธ์เพียงแค่การเสริมกำลังของใยเหล็กในคอนกรีต แต่ไม่ได้อธิบายคุณสมบัติอื่นๆ ของคอนกรีต ในปี 2008 Filali และคณะ [9] นำเสนอการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดแตกต่างกัน โดยใช้โพรบแกนร่วมแบบปลายเปิดขนาดใหญ่ที่สร้างขึ้นใหม่เพื่อใช้ในการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตในช่วงความถี่ 100 – 900 MHz จากงานวิจัยที่ผ่านมาจะเห็นว่าเครื่องมือหรือโพรบที่ใช้ในการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตจะนิยมใช้โพรบแกนร่วมแบบปลายเปิดทั้งที่สร้างขึ้นเองและที่มีขายอยู่ตามท้องตลาด แต่โพรบที่ใช้ยังมีขนาดเล็กมากถ้าเทียบกับขนาดของแท่งตัวอย่างคอนกรีต อีกทั้งการสร้างโพรบแกนร่วมแบบปลายเปิดยังมีความยุ่งยาก และหากเป็นโพรบที่มีขายตามท้องตลาดจะมีขนาดเล็กและมีราคาค่อนข้างสูง นักวิจัยหลายท่านจึงได้สร้างโพรบรูปแบบใหม่ที่มีการประยุกต์ใช้โครงสร้างท่อนำคลื่นระนาบร่วมหรือสายนำสัญญาณไมโครสตริปร่วมกับโครงสร้างสายนำสัญญาณแกนร่วมแบบปลายเปิด เนื่องจากสร้างง่ายกว่าและเสียค่าใช้จ่ายในการผลิตต่ำกว่า แต่ยังไม่มียานวิจัยที่สร้างโพรบนี้ในการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีต งานวิจัยที่ออกแบบโพรบรูปแบบใหม่นี้ เช่น ในปี 2007 Kim และคณะ [10] ได้ทำการออกแบบโพรบด้วยเทคนิคสายส่งสัญญาณไมโครสตริปที่ความถี่ต่ำ เพื่อทำการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของเนื้อเยื่อมะเร็งในหนูทดลอง และในปี 2004 Kim และคณะ [11] ได้นำเสนอการออกแบบโพรบแกนร่วมแบบแบน เพื่อประยุกต์ใช้ในการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของวัสดุชีวภาพ



วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งเน้นที่จะทำการออกแบบและสร้างโพรบแกนร่วมแบบแบน (Planar Coaxial Probe) สำหรับตรวจวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตที่มีการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ระดับการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบและอายุของคอนกรีตที่แตกต่างกัน และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตดังกล่าว เพื่อใช้ในการประเมินกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตโดยไม่ต้องทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบทำลาย

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อออกแบบและสร้างโพรบแกนร่วมแบบแบน (Planar Coaxial Probe) สำหรับตรวจวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตทดสอบที่มีการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ระดับการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบและอายุของคอนกรีตที่แตกต่างกัน

1.2.2 เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทดสอบที่มีการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ระดับการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบและอายุของคอนกรีตที่แตกต่างกัน

1.2.3 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการประเมินกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทดสอบโดยไม่ต้องทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบทำลาย จากค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตทดสอบ

## 1.3 ความสำคัญของการวิจัย

1.3.1 สามารถใช้ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตไปประเมินกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตโดยไม่ต้องทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบทำลายได้

1.3.2 เพื่อใช้เป็นข้อมูลเกี่ยวกับหลักการ ความรู้ และความเข้าใจในการออกแบบและสร้างโพรบแกนร่วมแบบแบน ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตทดสอบที่ส่วนผสมต่าง ๆ หรือโครงสร้างงานก่อสร้างจริงหรือแม้กระทั่งวัสดุอื่น ๆ ได้

1.3.3 สามารถเผยแพร่ความรู้เกี่ยวกับการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของวัสดุไปสู่ผู้ที่สนใจได้

## 1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 ศึกษาสมการที่ใช้ในการออกแบบโพรบแกนร่วมแบบแบน เพื่อใช้ในการออกแบบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของโพรบ

1.4.2 ออกแบบและจำลองการทำงานโพรบแกนร่วมแบบแบนด้วยโปรแกรมจำลองการทำงานย่านความถี่ไมโครเวฟ โดยนำเอาโครงสร้างของสายนำสัญญาณไมโครสตริป มาประยุกต์ใช้กับโครงสร้างของสายนำสัญญาณแกนร่วมปลายเปิด เพื่อให้โพรบสามารถทำงานได้ในย่านความถี่ไมโครเวฟ



ที่ 0-8 GHz และโพรบจะมีโครงสร้างเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่แต่ละด้านมีขนาด 10 เซนติเมตร เพื่อให้ครอบคลุมพื้นที่หน้าตัดวงกลมของแท่งคอนกรีตทดสอบทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร

1.4.3 สร้างโพรบแกนร่วมแบบแบนที่ออกแบบได้จากโปรแกรมจำลองการทำงานย่านความถี่ไมโครเวฟ โดยใช้แผ่นวงจรพิมพ์ความถี่สูง Arlon AD260A ที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ( $\epsilon_r$ ) เท่ากับ 2.6 ความสูงของวัสดุฐานรอง (h) เท่ากับ 1 มิลลิเมตร และความหนาของแผ่นตัวนำสตริปและระนาบกราวด์ (t) เท่ากับ 0.0175 มิลลิเมตร

1.4.4 สอบเทียบโพรบที่สร้างขึ้นด้วยการใช้วัสดุที่ทราบค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อน 4 ชนิด ได้แก่ น้ำกลั่น เอทานอลบริสุทธิ์ เมทานอลบริสุทธิ์ และอากาศ

1.4.5 วัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตทดสอบที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร และมีความสูง 20 เซนติเมตร โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (Water to binder ratio, W/B ratio) ที่ 0.45 0.55 และ 0.65 คอนกรีตทดสอบมีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่ระดับการแทนที่ร้อยละ 10 20 และ 30 และอายุของคอนกรีตที่ 7 28 และ 90 วัน

1.4.6 นำค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนที่วัดได้ไปวิเคราะห์ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรมคำนวณทางคณิตศาสตร์ เพื่อหาความสัมพันธ์กับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ระดับการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบและอายุของคอนกรีตที่แตกต่างกัน

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้โพรบสำหรับตรวจวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ระดับการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบและอายุของคอนกรีตที่แตกต่างกัน

1.5.2 ได้ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ระดับการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบและอายุของคอนกรีตที่แตกต่างกัน

1.5.3 ได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ระดับการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบและอายุของคอนกรีตที่แตกต่างกัน



## บทที่ 2

### ปริทัศน์เอกสารข้อมูล

#### 2.1 ทฤษฎีของไดอิเล็กตริก

วัสดุไดอิเล็กตริก (Dielectric Material) หรือ ไดอิเล็กตริก (Dielectric) คือ วัสดุที่มีสภาพนำไฟฟ้าต่ำ หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ฉนวน (Insulator) โดยทั่วไปแล้วอะตอมของไดอิเล็กตริกประกอบไปด้วยกลุ่มของอิเล็กตรอนหรือประจุลบ (-Q) และกลุ่มของประจุบวก (+Q) ถ้าไม่มีสนามไฟฟ้าหรือความเข้มสนามไฟฟ้า (Electric Field Intensity,  $\vec{E}$ : V/m) จากภายนอกกระทำกับอะตอมดังกล่าว กลุ่มของประจุบวกและประจุลบจะไม่มี การเคลื่อนที่จากตำแหน่งสมดุล แต่เมื่อใดที่มีสนามจากภายนอกเข้าไปกระทำกับอะตอม จะทำให้ประจุบวกเกิดการเคลื่อนย้ายจากตำแหน่งสมดุลไปตามทิศทางของสนามไฟฟ้าที่มากกระทำ และประจุลบเกิดการเคลื่อนที่จากตำแหน่งสมดุลในทิศทางตรงข้ามกับทิศทางของสนามไฟฟ้าที่มากกระทำ ทำให้ประจุทั้งสองเกิดการแยกตัวเป็นระยะทางเล็ก ๆ นั่นคือ เกิดเป็นไดโพล (Dipole) ขึ้น เรียกปรากฏการณ์ดังกล่าวว่า โพลาริเซชัน (Polarization,  $\vec{P}$ : C/m<sup>2</sup>) โดยค่าโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นสามารถเขียนความสัมพันธ์กับสนามภายนอกที่ไปกระทำกับไดอิเล็กตริกได้ดังนี้ [12]

$$\vec{P} = \epsilon_0 \chi_e \vec{E} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $\epsilon_0$  คือ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้า (Permittivity) ของอวกาศว่าง ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$\frac{1}{36\pi} \times 10^{-9} \text{ หรือ } 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

$\chi_e$  คือ ค่าสภาพซาบซึมได้ทางไฟฟ้า (Electric susceptibility) ของวัสดุ

ค่าโพลาริเซชันที่เกิดขึ้นสามารถเขียนความสัมพันธ์กับความหนาแน่นเส้นแรงไฟฟ้า ( $\vec{D}$ ) ได้ดังนี้

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} = \epsilon_0 \vec{E} + \epsilon_0 \chi_e \vec{E} = \epsilon_0 (1 + \chi_e) \vec{E} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} = \epsilon \vec{E} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $\epsilon_r$  คือ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์ (Relative permittivity) ของวัสดุ

$\epsilon$  คือ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของวัสดุ มีหน่วยเป็น F/m

ซึ่งทั้งสองค่าที่กล่าวไปนั้นเขียนอยู่ในรูปแบบของจำนวนเชิงซ้อน

สภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของวัสดุ (Complex relative permittivity,  $\epsilon_r$ ) คือ ค่าที่อธิบายสมบัติของไดอิเล็กตริกที่มีอิทธิพลต่อการสะท้อนกลับของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่พื้นผิวสัมผัส และการลดทอนของพลังงานของคลื่นในวัสดุในโดเมนความถี่ ซึ่งแสดงตามสมการต่อไปนี้ [13]



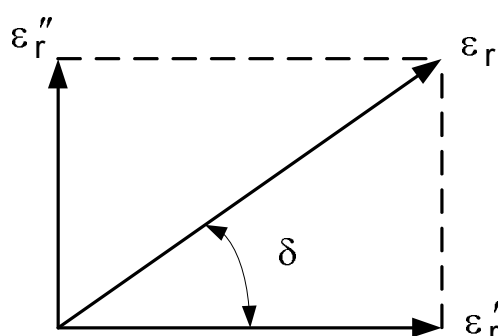
$$\varepsilon_r = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r'' \quad (2.3)$$

เมื่อ  $\varepsilon_r'$  คือ ส่วนจริงของค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อน หรือเรียกว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (Dielectric constant) เป็นค่าที่แสดงพลังงานที่ถูกเก็บไว้ในวัสดุ อันเนื่องมาจากสนามไฟฟ้าจากภายนอก [13], [14]

$\varepsilon_r''$  คือ ส่วนจินตภาพของค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อน หรือเรียกว่าตัวประกอบการสูญเสียของไดอิเล็กตริก (Dielectric loss factor) เป็นค่าที่แสดงการสูญเสียของวัสดุ อันเนื่องมาจากสนามไฟฟ้าจากภายนอก [13], [14]

โดยทั่วไปแล้วส่วนจินตภาพของค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนจะมีค่ามากกว่าศูนย์ และมีค่าน้อยกว่าส่วนจริงของค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อน ( $\varepsilon_r' > \varepsilon_r'' > 0$ ) [14]

เมื่อเขียนค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนในรูปแบบของเวกเตอร์ โดยส่วนจริงกับส่วนจินตภาพทำมุม 90 องศาและจะได้มุม  $\delta$  ที่วัดจากแกนของส่วนจริงกับเวกเตอร์ลัพธ์ ดังภาพประกอบ 2.1 [14]



ภาพประกอบ 2.1 เวกเตอร์แทนเจนต์การสูญเสีย  
[14]

ค่าการสูญเสียของวัสดุ หรือแทนเจนต์การสูญเสีย (Loss tangent:  $\tan\delta$ ) คือ อัตราส่วนพลังงานที่สูญเสียต่อพลังงานที่ถูกเก็บไว้ในวัสดุ ดังแสดงในสมการต่อไปนี้ [14]

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'} = D = \frac{1}{Q} \quad (2.4)$$

เมื่อ  $D$  คือ ตัวประกอบการสูญเสีย (Dissipation factor)  
 $Q$  คือ ตัวประกอบคุณภาพ (Quality factor: Q-factor)



สภาพนำไฟฟ้า (Conductivity:  $\sigma$ ) เป็นค่าที่บ่งบอกคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของวัสดุแต่ละชนิด สภาพนำไฟฟ้ามีหน่วยเป็นซีเมนต่อเมตร (S/m หรือ mhos/m) โดยทั่วไปค่าสภาพนำไฟฟ้าของวัสดุจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า วัสดุที่มีสภาพนำไฟฟ้าสูง เรียกว่า ตัวนำไฟฟ้า วัสดุที่มีสภาพนำไฟฟ้าต่ำ เรียกว่า ฉนวน หรือ ไดอิเล็กตริก และวัสดุที่มีสภาพนำไฟฟ้าอยู่ระหว่างตัวนำไฟฟ้ากับฉนวน เรียกว่า สารกึ่งตัวนำ [12] ค่าสภาพนำไฟฟ้าของวัสดุสามารถเขียนให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์กับส่วนจินตภาพของค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพันธ์เชิงซ้อน [5] ได้ดังนี้

$$\sigma = \epsilon_0 \epsilon_r'' \omega = (\epsilon_0 \epsilon_r' \tan \delta) 2\pi f \quad (2.5)$$

เมื่อ  $\omega$  คือ ความเร็วเชิงมุมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (rad/s)

$f$  คือ ความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Hz)

## 2.2 เทคนิคการวัดค่าสภาพยอมสัมพันธ์เชิงซ้อน

เทคนิคที่ใช้ในการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพันธ์เชิงซ้อนนั้นมีด้วยกันหลายเทคนิค แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น งานที่จะนำไปประยุกต์ใช้ ธรรมชาติของวัสดุที่ต้องการตรวจวัด ช่วงความถี่ที่ทำงาน ต้องการทดสอบแบบทำลายหรือไม่ทำลายวัสดุ หรือแม้กระทั่งความถูกต้องแม่นยำของค่าที่วัดได้ เป็นต้น โดยเทคนิคที่ใช้ในการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพันธ์เชิงซ้อนที่นิยมใช้อาศัยหลักการของการสะท้อนกลับและการส่งผ่าน (Reflection and transmission) หรือหลักการไม่ก้ำจร (Non-resonant) และหลักการก้ำจร (Resonant) เทคนิคหลัก ๆ สำหรับหลักการไม่ก้ำจร คือ เทคนิคสายส่งแบบปลายเปิด (Open ended transmission line techniques) เทคนิคสายส่งแบบท่อนำคลื่นและแกนร่วม (Waveguide and coaxial transmission line techniques) เทคนิคการส่งผ่านอวกาศว่าง (Free space transmission techniques) เทคนิคสายส่งสัญญาณแบบแบน (Planar transmission line techniques) และเทคนิคที่ใช้หลักการก้ำจร คือ วิธีเรโซเนเตอร์ (Resonator method) และวิธีการรบกวนแบบโพรง (Cavity-perturbation method) เทคนิคที่อาศัยหลักการก้ำจรแม้จะให้ความถูกต้องสูงแต่เป็นการวัดแบบทำลาย ทำให้เกิดความเสียหายต่อคุณสมบัติและโครงสร้างของวัสดุทดสอบ และมีช่วงความถี่ในการใช้งานที่แคบ ส่วนเทคนิคที่อาศัยหลักการไม่ก้ำจร แม้จะให้ความถูกต้องแม่นยำในการวัดที่ต่ำกว่า แต่การวัดไม่ได้ทำให้เกิดความเสียหายแก่วัสดุทดสอบ อีกทั้งยังสามารถใช้งานได้ในช่วงแถบความถี่กว้างกว่า ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ใช้เทคนิคสายส่งสัญญาณแบบแบน โดยนำเอาโครงสร้างของสายนำสัญญาณไมโครสตริปมาประยุกต์ใช้กับโครงสร้างของสายนำสัญญาณแกนร่วมปลายเปิด

### 2.2.1 เทคนิคสายส่งแบบปลายเปิด

เทคนิคสายส่งแบบปลายเปิด ถูกแสดงในภาพประกอบ 2.2 เริ่มใช้ในปี ค.ศ.1980 โดย Athey [15] ได้ทำการวัดสมบัติไดอิเล็กตริกของวัสดุชีวภาพ (Biological material) ในช่วงความถี่ 50 MHz ถึง 1 GHz โดยใช้โพรงแกนร่วมแบบปลายเปิด (Coaxial dielectric probe) ขนาดเล็ก หลักการทั่วไปในการตรวจวัดของเทคนิคนี้คือ การนำโพรงแกนร่วมแบบปลายเปิดวางแนบกับวัสดุที่ต้องการ

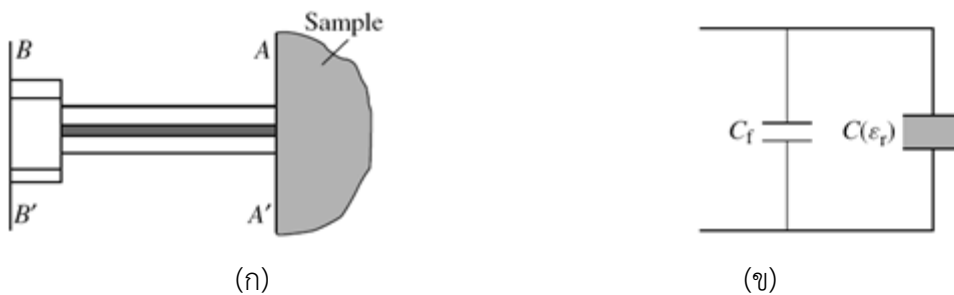


ทดสอบ จากนั้นจะทำการวัดขนาดและมุมเฟสของสัญญาณที่ถูกสะท้อนกลับ ด้วยเครื่องวิเคราะห์ ข่ายงานสื่อสารและนำค่าที่ได้ไปเข้ากระบวนการคำนวณหาค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อน [16]



ภาพประกอบ 2.2 เทคนิคสายส่งแกนร่วมแบบปลายเปิด (ก) ไม่มี grounding flange  
(ข) มี grounding flange

[17]



ภาพประกอบ 2.3 (ก) การวัดด้วยโพรบแกนร่วมแบบปลายเปิด (ข) วงจรสมมูลของการวัดด้วย โพรบแกนร่วมแบบปลายเปิด

[17]

นักวิจัยหลายท่านได้ทำการพัฒนาและปรับปรุงเทคนิคนี้เรื่อยมา จนทำให้เกิดแบบจำลองในการสอบเทียบโพรบวัดที่ถูกสร้างขึ้นมา และการคำนวณหาค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของวัสดุขึ้นหลายรูปแบบ เช่น แบบจำลองความจุของตัวเก็บประจุ (Capacitance model) [17] แสดงในภาพประกอบ 2.3

เมื่อทำการวัดวัสดุที่มีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อน ( $\epsilon_r$ ) ด้วยโพรบวัด จะทำให้วงจรสมมูลมีการเปลี่ยนแปลง และสามารถคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ( $\Gamma^*$ ) ได้ดังนี้

$$\Gamma^* = \Gamma e^{j\phi} = \frac{1 - j\omega Z_0 \cdot (C(\epsilon_r) + C_f)}{1 + j\omega Z_0 \cdot (C(\epsilon_r) + C_f)} \quad (2.6)$$



โดยที่  $C(\epsilon_r) = \epsilon_r C_0$   
 เมื่อ  $C_0$  คือ ค่าความจุของตัวเก็บประจุที่ถูกเติมด้วยอากาศ (F)  
 $C_f$  คือ ค่าความจุของตัวเก็บประจุอิสระในวัสดุ (F)  
 $\omega$  คือ ความเร็วเชิงมุมในการวัด  
 $Z_0$  คือ ค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายส่งแกนร่วมที่ต่อกับโพรบ ( $\Omega$ )

ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อน ( $\epsilon_r$ ) คำนวณได้ดังนี้

$$\epsilon_r = \frac{1 - \Gamma^*}{j\omega Z_0 C_0 (1 + \Gamma^*)} - \frac{C_f}{C_0} \quad (2.7)$$

โดยที่ค่า  $C_0$  และ  $C_f$  หาได้จากการวัดตัวอย่างมาตรฐานที่ทราบค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อน เช่น น้ำปราศจากไอออน (Deionized water) เป็นต้น ดังสมการต่อไปนี้

$$C_0 = \frac{(1 - |\Gamma_{diel}^*|^2)}{\omega Z_0 (1 + 2|\Gamma_{diel}^*| \cos(\phi_{diel}) + |\Gamma_{diel}^*|^2) \epsilon_{diel}''} \quad (2.8)$$

$$C_f = \frac{-2|\Gamma_{diel}^*| \sin(\phi_{diel})}{\omega Z_0 (1 + 2|\Gamma_{diel}^*| \cos(\phi_{diel}) + |\Gamma_{diel}^*|^2) - \epsilon_{diel}' C_0} \quad (2.9)$$

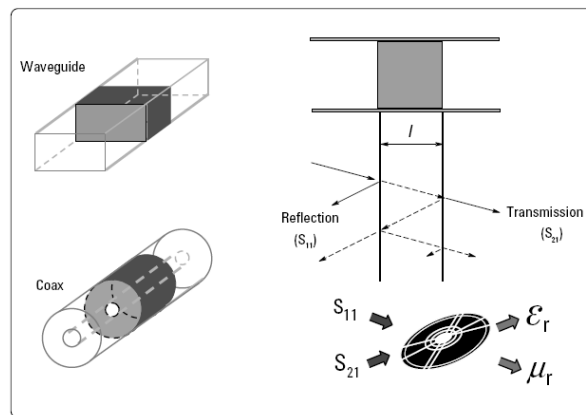
เมื่อ  $\epsilon_{diel}'$  และ  $\epsilon_{diel}''$  คือ ส่วนจริงและส่วนจินตภาพของค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของตัวอย่างมาตรฐานตามลำดับ ส่วน  $|\Gamma_{diel}^*|$  และ  $\phi_{diel}$  คือ ขนาดและเฟสของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ( $\Gamma_{diel}^*$ ) ตามลำดับ

## 2.2.2 เทคนิคสายส่งแบบท่อนำคลื่นและแกนร่วม

เทคนิคสายส่งแบบท่อนำคลื่นและแกนร่วม ดังแสดงในภาพประกอบ 2.4 ถูกกล่าวถึงครั้งแรกในปี ค.ศ.1970 โดย Nicolson [18] ที่ได้วัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของวัสดุแบบเชิงเส้นในโดเมนความถี่ และในปี ค.ศ.1993 Jarvis [19] ได้กล่าวถึงหลักการและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พื้นฐานของวิธีการวัดแบบการส่งผ่าน/การสะท้อนกลับ (Transmission/reflection methods) และวิเคราะห์วิธีการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อน เมื่อ Nicolson [18] และ Weir [20] ที่ได้ปรับปรุงเทคนิคการวัดสมบัติของไดอิเล็กทริกในโดเมนเวลาและความถี่ในปี ค.ศ.1974 ทำการรวมสมการที่ใช้ในงานของพวกเขา จนนำไปสู่การพัฒนาสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อน ที่เรียกว่า วิธีของ Nicolson-Ross-Weir (NRW algorithm) [17]



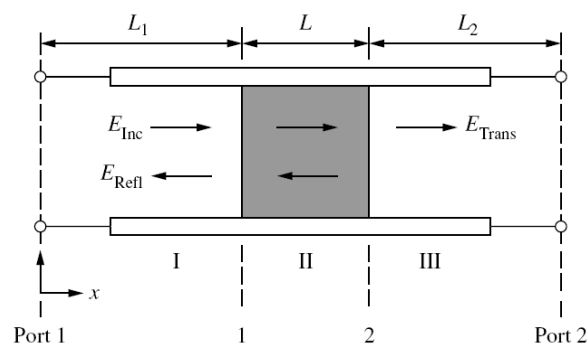




ภาพประกอบ 2.4 เทคนิคสายส่งแบบท่อนำคลื่นและแกนร่วม

[14]

หลักการทั่วไปในการตรวจวัดของเทคนิคนี้ คือ การบรรจุวัสดุที่ต้องการทดสอบเข้าไปในสายส่ง คลื่นที่ส่งผ่านเข้าไปในสายส่งเมื่อตกกระทบกับวัตถุ ส่วนหนึ่งจะสะท้อนถูกกลับทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ส่วนคลื่นที่ทะลุผ่านวัตถุออกไปทำให้วัดค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านได้ [7], [17] ดังภาพประกอบ 2.5



ภาพประกอบ 2.5 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ส่งผ่านและสะท้อนกลับจากวัสดุในสายส่ง

[17]

สำหรับขั้นตอนในการคำนวณหาค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนโดยใช้วิธีของ NRW เรียงลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้ [17], [21]

คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ( $\Gamma$ )

$$\Gamma = K \pm \sqrt{K^2 - 1} \quad (2.10)$$



$$\text{เมื่อ} \quad K = \frac{(S_{11}^2 - S_{21}^2) + 1}{2S_{11}} \quad (2.11)$$

เครื่องหมาย  $\pm$  ในสมการ (2.10) จะเป็นบวกหรือลบนั้นให้พิจารณาจากค่า  $|\Gamma| \leq 1$

คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (T)

$$T = \frac{(S_{11} + S_{21}) - \Gamma}{1 - (S_{11} + S_{21})\Gamma} \quad (2.12)$$

จากนั้นคำนวณหาค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนได้จากสมการต่อไปนี้

$$\mu_r = \frac{1 + \Gamma}{(1 - \Gamma)\Lambda \sqrt{\left(\frac{1}{\lambda_0^2}\right) - \left(\frac{1}{\lambda_c^2}\right)}} \quad (2.13)$$

$$\epsilon_r = \frac{\lambda_0^2}{\mu_r \left[ \left(\frac{1}{\lambda_c^2}\right) - \left(\frac{1}{\Lambda^2}\right) \right]} \quad (2.14)$$

$$\text{เมื่อ} \quad \frac{1}{\Lambda^2} = - \left[ \frac{1}{2\pi D} \ln \left( \frac{1}{T} \right) \right]^2 \quad (2.15)$$

โดยที่  $\lambda_0$  คือ ความยาวคลื่นในอวกาศว่าง (m)

$\lambda_c$  คือ ความยาวคลื่นคัทออฟ (m)

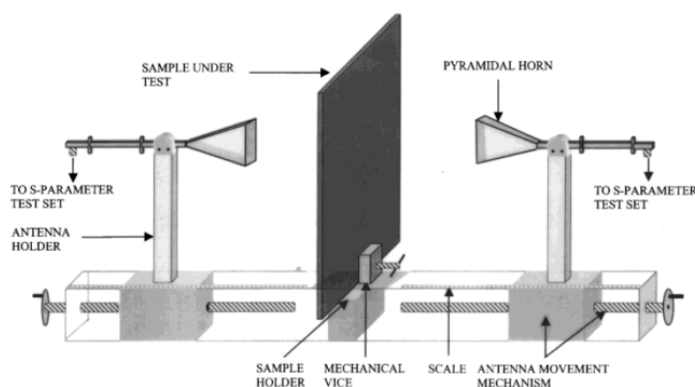
D คือ ความหนาของตัวอย่างที่ใส่เข้าไปในสายส่ง

### 2.2.3 เทคนิคการส่งผ่านอวกาศว่าง

หลักการทั่วไปในการวัดสำหรับเทคนิคนี้ คือ การวางวัสดุที่ต้องการวัดเข้ากับตัวยึดที่วางอยู่ระหว่างสายอากาศสองตัว ลักษณะการเรียงตัวจะมีรูปแบบเหมือนตู้โดยสารรถไฟ คือ อยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน ดังแสดงในภาพประกอบ 2.6 โดยเครื่องรับและเครื่องส่งจะทำตัวเหมือนสายอากาศเลนส์แบบปากแตรที่ทำการโฟกัสสัญญาณไปที่วัสดุทดสอบ เพื่อลดผลกระทบที่จะเกิดขึ้นที่บริเวณขอบของวัสดุทดสอบ และสิ่งแวดล้อมในบริเวณที่ทำการวัด ระยะห่างระหว่างสายอากาศทั้งสองสามารถปรับเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสม เมื่อเครื่องส่งส่งสัญญาณไมโครเวฟไปตกกระทบที่วัสดุ สัญญาณบางส่วนก็จะเกิดการสะท้อนกลับ ซึ่งก็คือสัญญาณสะท้อนกลับ บางส่วนถูกเก็บไว้ในวัสดุ และบางส่วนจะถูกส่งผ่านวัสดุออกไปยังเครื่องรับ ทำให้ได้สัญญาณส่งผ่าน [17], [22], [23] สมมติฐานที่ใช้ในเทคนิคนี้ คือ การที่คลื่นระนาบแบบสม่ำเสมอ (Uniform plane wave) ไปตกกระทบกับวัสดุแบบเอกพันธ์



(Homogeneous material) ที่มีพื้นผิวแบนราบ จะทำให้วัสดุนี้เป็นแผ่นอนันต์ จึงไม่พิจารณาปรากฏการณ์การเลี้ยวเบน (Diffraction effect) ที่ขอบของวัสดุ ซึ่งเป็นค่าที่ทำให้เกิดความผิดพลาดของการใช้เทคนิค [16] ดังนั้นการออกแบบสายอากาศ ที่ยึดตัวอย่าง หรือแม้แต่การปรับระยะระหว่างสายอากาศทั้งสองให้เหมาะสมจะทำให้การวัดมีความถูกต้องแม่นยำมากขึ้น แม้ว่าเทคนิคนี้มีความถูกต้องแม่นยำในการวัดต่ำกว่าเทคนิคสายส่งปลายเปิดก็ตาม [16], [23]



ภาพประกอบ 2.6 เทคนิคการส่งผ่านอวกาศว่าง

[22]

การคำนวณหาค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนโดยใช้เทคนิคการส่งผ่านอวกาศว่าง นั้น มีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์อยู่หลายวิธี ขึ้นอยู่กับผู้ใช้ที่จะเลือกวิธีไหนให้เหมาะกับงานที่ทำ ซึ่งในที่นี้จะยกวิธีที่ใช้ NRW algorithm มาประยุกต์ใช้ในการคำนวณ โดยเรียงลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้ [17], [23]

คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ( $\Gamma$ ) และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (T) จากสมการ (2.10) - (2.12) โดยเครื่องหมาย  $\pm$  ในสมการ (2.10) จะเป็นบวกหรือลบนั้นให้พิจารณาจากค่า  $|\Gamma| < 1$

จากนั้นคำนวณหาค่าคงที่การแพร่กระจายของตัวกลาง (Propagation constant:  $\gamma$ ) จากสมการต่อไปนี้

$$\gamma = \frac{\ln\left(\frac{1}{T}\right)}{d} \quad (2.16)$$

สภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนได้จากสมการต่อไปนี้

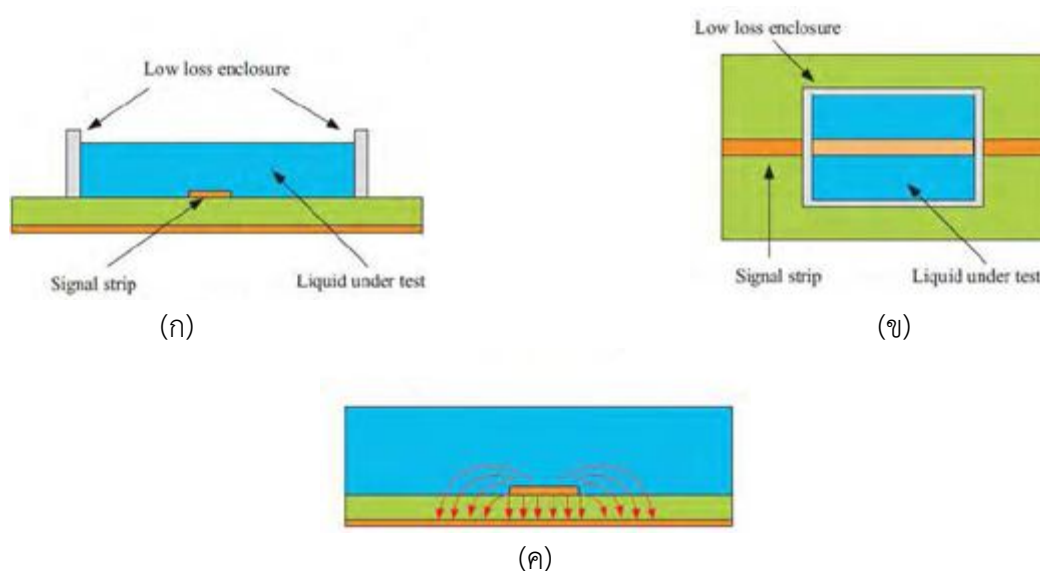
$$\epsilon_r = \frac{\gamma}{\gamma_0} \left( \frac{1 - \Gamma}{1 + \Gamma} \right) \quad (2.17)$$



เมื่อ  $\gamma_0$  คือ ค่าคงที่การแพร่กระจายในอวกาศว่าง  
 $d$  คือ ความหนาของวัสดุทดสอบ

#### 2.2.4 เทคนิคสายส่งสัญญาณแบบแบน

เทคนิคสายส่งสัญญาณแบบแบน ถูกแสดงไว้ดังภาพประกอบ 2.7 สายส่งสัญญาณแบบแบนที่นิยมใช้เป็นส่วนประกอบของวงจรมิโครเวฟ คือ ไมโครสตริป (Microstrip) และท่อนำคลื่นระนาบร่วม (Coplanar waveguides) สาเหตุที่ใช้กันมากก็เพราะสามารถออกแบบให้มีขนาดเล็กได้ ค่าใช้จ่ายในการผลิตต่ำ และสร้างง่าย จึงเหมาะที่จะนำไปใช้ในด้านอุตสาหกรรมที่ใช้การวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อน [24]



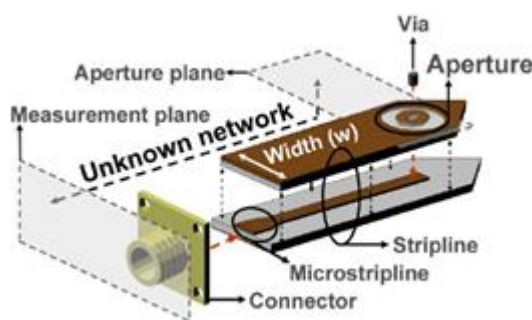
ภาพประกอบ 2.7 สายส่งไมโครสตริปที่ใช้วัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อน  
 (ก) มุมมองด้านข้าง (ข) มุมมองด้านบน และ (ค) การกระจายคลื่นไฟฟ้าของสายส่ง  
 ไมโครสตริปที่ถูกครอบด้วยชั้นวางซ้อน  
 [24]

โพรบที่ใช้ในการวัดประกอบด้วยสายส่งแบบแบนรูปร่างสี่เหลี่ยม ช่องรับส่งสัญญาณถูกออกแบบให้อยู่ที่ส่วนบนของโพรบ ซึ่งมีลักษณะเป็นวงแหวนเหมือนกับหัวโพรบของสายส่งแกนร่วมแบบปลายเปิด โครงสร้างของโพรบมีลักษณะเหมือนสายส่งแกนร่วมที่ถูกทับให้แบน นั่นคือ ระบายกราวด์ของสายส่งสัญญาณแบบแบนเทียบได้กับตัวนำด้านนอกของสายส่งแกนร่วม ส่วนไมโครสตริปที่เห็นในสายส่งสัญญาณแบบแบน เทียบได้กับตัวนำด้านในของสายส่งแกนร่วม โดยไมโครสตริปจะถูกเชื่อมต่อกับส่วนบนของโพรบโดยการเจาะรูเชื่อมต่อ (Via holes) และเติมตัวนำไฟฟ้า เช่น ตะกั่ว เป็นต้น ดังภาพประกอบ 2.8 [25], [27]

หลักการทั่วไปในการตรวจวัดของเทคนิคนี้คือ การนำโพรบไปแนบกับวัสดุเป็นของแข็งหรือกึ่งของแข็ง หรือจุ่มในวัสดุที่เป็นของเหลว จากนั้นจะทำการวัดสัญญาณที่ถูกสะท้อนกลับ และนำค่าที่ได้ไปเข้ากระบวนการคำนวณหาค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของวัสดุ [25], [26]

การคำนวณหาสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของวัสดุสามารถทำได้โดยใช้ตัวอย่างที่ทราบค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อน 3 ตัวอย่าง และวัสดุทดสอบ 1 ตัวอย่าง สมมติให้เป็นตัวอย่าง A B และ C จะทราบค่า  $\epsilon_A$   $\epsilon_B$  และ  $\epsilon_C$  ส่วนวัสดุทดสอบกำหนดให้เป็น S มีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อน คือ  $\epsilon_S$  แล้วนำโพรบไปวัดตัวอย่างทั้ง 3 และวัสดุทดสอบเพื่อให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน  $\Gamma_A$   $\Gamma_B$   $\Gamma_C$  และ  $\Gamma_S$  จากนั้นใช้สมการต่อไปนี้ในการคำนวณหาค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อน [25], [26]

$$\frac{(\epsilon_S - \epsilon_A)(\epsilon_B - \epsilon_C)}{(\epsilon_S - \epsilon_B)(\epsilon_C - \epsilon_A)} = \frac{(\Gamma_S - \Gamma_A)(\Gamma_B - \Gamma_C)}{(\Gamma_S - \Gamma_B)(\Gamma_C - \Gamma_A)} \quad (2.18)$$



ภาพประกอบ 2.8 แบบจำลองโพรบแบบแบน

[27]

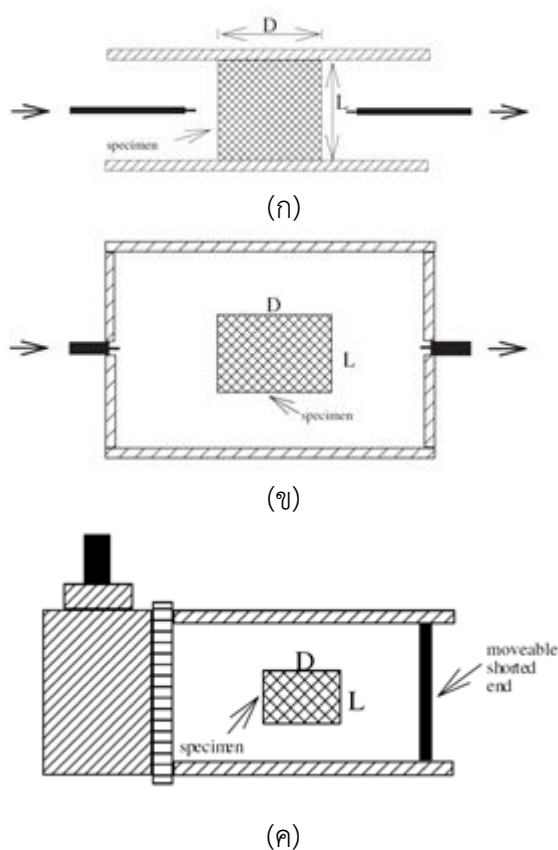
### 2.2.5 วิธีเรโซเนเตอร์

วิธีเรโซเนเตอร์ หรือ วิธีไดอิเล็กทริกเรโซเนเตอร์ (Dielectric resonator) เป็นวิธีที่ใช้ในการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของวัสดุอีกวิธีหนึ่ง ที่วัสดุทดสอบทำหน้าที่เป็นเรโซเนเตอร์ในวงจรวัด โดยค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนสามารถหาได้จากความถี่การสั่นและตัวประกอบคุณภาพที่เกิดขึ้นก่อนและหลังใส่วัสดุทดสอบ วิธีเรโซเนเตอร์รวมไปถึงเทคนิคการกำธรรูปโพรงทรงกระบอก (Cylinder cavity resonance technique) และเทคนิคการกำธรรูปการสะท้อนท่อนำคลื่น (Waveguide reflection resonance technique) [28] ดังแสดงในภาพประกอบ 2.9

การตรวจวัดด้วยวิธีเรโซเนเตอร์ทำได้โดยการนำตัวอย่างทดสอบแบบทรงกระบอกไปวางไว้ระหว่างแผ่นตัวนำ 2 แผ่น ซึ่งสามารถหาสมบัติไดอิเล็กทริกของวัสดุตัวอย่างได้จากสมบัติของเรโซเนเตอร์ที่เกิดขึ้น สมบัติของแผ่นตัวนำทั้งสองจะถูกสมมติว่าทราบค่า และใช้โหมด  $TE_{011}$  (Transverse electric  $TE_{011}$  mode) ซึ่งเป็นโหมดที่นิยมใช้ในการหาลักษณะเฉพาะของสมบัติของวัสดุเนื่องจากไม่มีกระแสแลกเปลี่ยนระหว่างแผ่นตัวนำกับวัสดุทดสอบ จึงทำให้การเกิดช่องว่างขนาดเล็กระหว่างแผ่น

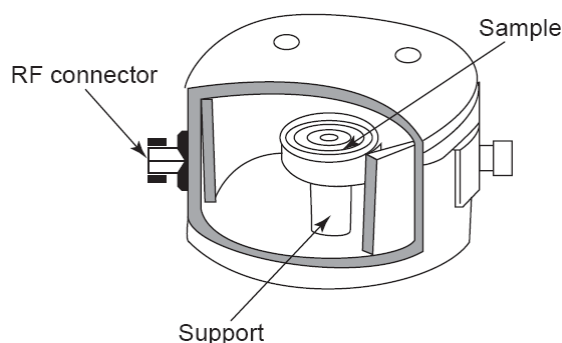


ตัวนำทั้งสองกับตัวอย่างมีผลน้อยมากต่อการวัด ซึ่งแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการคำนวณหาค่าสมบัติของวัสดุตัวอย่างนั้นมีรูปแบบที่ต่างกันอย่างสิ้นเชิงกับชนิดของวัสดุตัวอย่าง โครงสร้างและวิธีของไดอิเล็กทริกเรโซเนเตอร์ที่ใช้ [17], [28] ส่วนลักษณะการวางวัสดุทดสอบในเทคนิคการกำธแบบโพรงทรงกระบอกและเทคนิคการกำธแบบการสะท้อนท่อนำคลื่น จะใส่วัสดุเข้าไปในโพรงโดยที่วัสดุจะต้องไม่สัมผัสกับตัวป้องกันแบบโลหะ [13], [28] ดังภาพประกอบ 2.10



ภาพประกอบ 2.9 (ก) วิธีเรโซเนเตอร์ (ข) เทคนิคการกำธแบบโพรงทรงกระบอก และ (ค) เทคนิคการกำธแบบการสะท้อนท่อนำคลื่น

[28]



ภาพประกอบ 2.10 การวางวัสดุทดสอบของเทคนิคการกำธรแบบโพรงทรงกระบอก  
[13]

ตัวอย่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการคำนวณค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนด้วยวิธีเรโซเนเตอร์ [16]

$$\varepsilon_r' = \left( \frac{f_0}{f_s} \right)^2 \quad (2.19)$$

$$\varepsilon_r'' = \left( \frac{1}{Q_s} - \frac{1}{Q_0} \sqrt{\frac{f_0}{f_s}} \right) \left( \frac{f_0}{f_s} \right)^2 \quad (2.20)$$

- เมื่อ  $f_0$  คือ ความถี่กำธรก่อนใส่วัสดุทดสอบ (Hz)  
 $f_s$  คือ ความถี่กำธรหลังใส่วัสดุทดสอบ (Hz)  
 $Q_0$  คือ ตัวประกอบคุณภาพก่อนใส่วัสดุทดสอบ  
 $Q_s$  คือ ตัวประกอบคุณภาพหลังใส่วัสดุทดสอบ

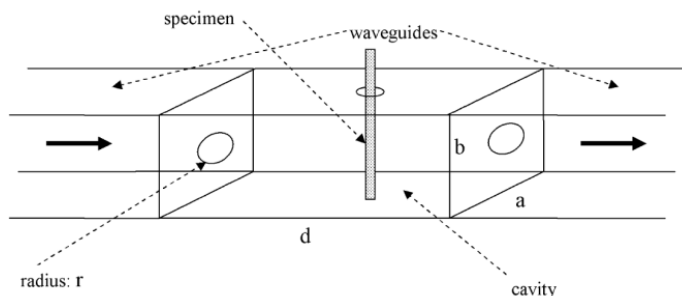
### 2.2.6 วิธีรบกวนแบบกำธร

วิธีการรบกวนแบบกำธร หรือ วิธีการรบกวนแบบโพรง (Cavity-perturbation method) ต่างจากวิธีเรโซเนเตอร์ตรงที่วัสดุตัวอย่างไม่ได้ใช้เป็นเรโซเนเตอร์ แต่ตัวอย่างที่ถูกใส่เข้าไปในตัวเรโซเนเตอร์ทำให้ความถี่กำธรและตัวประกอบคุณภาพของเรโซเนเตอร์มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งทั้งสองค่าจะถูกนำไปคำนวณหาค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของวัสดุทดสอบ [17], [28], [29], [30] ดังแสดงในภาพประกอบ 2.11

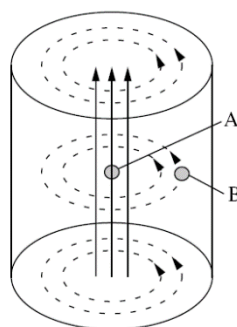
การตรวจวัดทำได้โดยใส่ตัวอย่างทดสอบลงไปในโพรงกำธร ซึ่งจะให้ความถี่กำธรถูกเลื่อนและตัวประกอบคุณภาพของโพรงลดลง จากภาพประกอบ 2.12 ถ้าใส่วัสดุขนาดเล็กที่มีลักษณะเป็นหลอด แผ่น หรือแท่งเข้าไปในโพรงบริเวณที่มีค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดและมีสนามแม่เหล็กต่ำสุด (บริเวณ A) จะสามารถหาค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนได้ แต่ถ้าวัสดุใส่เข้าไปในบริเวณ B ซึ่ง



มีค่าสนามไฟฟ้าต่ำสุดและมีสนามแม่เหล็กสูงสุด จะสามารถหาค่าความชื้นได้ของวัสดุ โดยใช้โหมด TE<sub>010</sub> (Transverse electric TE<sub>010</sub> mode) เป็นโหมดทำงาน [17], [28], [29], [30]



ภาพประกอบ 2.11 วิธีการรบกวนแบบกำธร  
[29]



ภาพประกอบ 2.12 ตำแหน่งการวางของวัสดุในการวัด  
[17]

ตัวอย่างสูตรที่ใช้ในการคำนวณค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนด้วยวิธีการรบกวนแบบกำธร [16]

$$\epsilon_r' = \frac{1}{2} \left( \frac{f_0}{f_s} - 1 \right) \frac{V_C}{V_S} - 1 \quad (2.21)$$

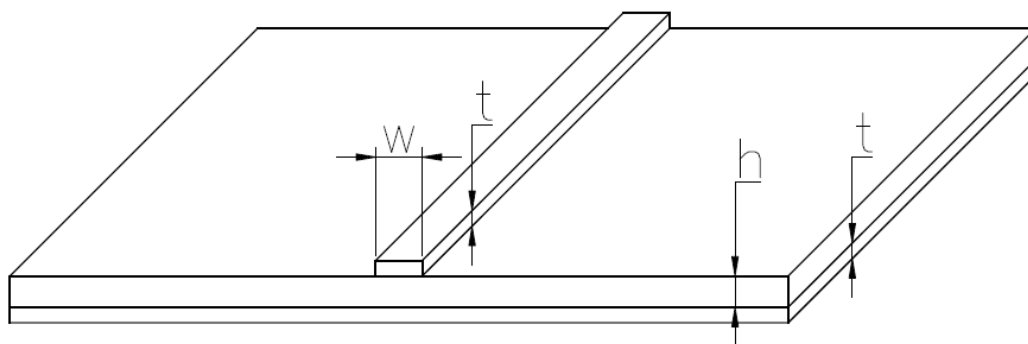
$$\epsilon_r'' = \frac{1}{4} \left( \frac{1}{Q_S} - \frac{1}{Q_0} \right) \frac{V_C}{V_S} \quad (2.22)$$



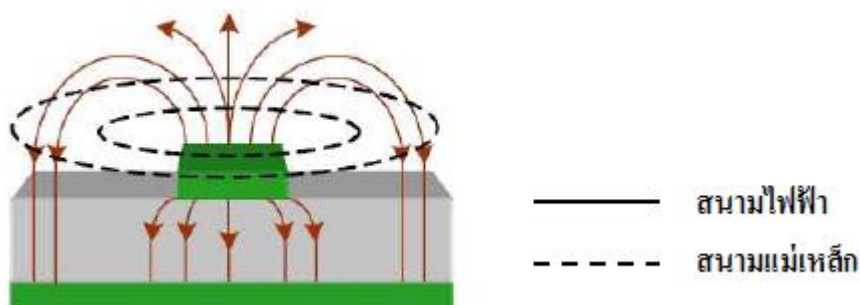
- เมื่อ  $f_0$  คือ ความถี่กำธรรก่อนใส่วัสดุทดสอบ (Hz)  
 $f_s$  คือ ความถี่กำธรรหลังใส่วัสดุทดสอบ (Hz)  
 $Q_0$  คือ ตัวประกอบคุณภาพก่อนใส่วัสดุทดสอบ  
 $Q_s$  คือ ตัวประกอบคุณภาพหลังใส่วัสดุทดสอบ  
 $V_s$  คือ ปริมาตรของวัสดุทดสอบ  
 $V_c$  คือ ปริมาตรของโพรง

### 2.3 สายนำสัญญาณไมโครสตริป

สายนำสัญญาณไมโครสตริป (Microstrip transmission line) เป็นสายนำสัญญาณที่สร้างขึ้นบนแผ่นวงจรพิมพ์ (Printed circuit board, PCB) โครงสร้างของสายนำสัญญาณไมโครสตริปประกอบด้วยแถบตัวนำด้านบนที่เรียกว่า สตริป (Strip) และตัวนำด้านล่างที่เรียกว่า ระนาบกราวด์ (Ground plane) โดยตัวนำทั้งสองส่วนทำจากโลหะ เช่น ทองแดง เป็นต้น วัสดุที่คั่นระหว่างสตริปและระนาบกราวด์ คือ วัสดุไดอิเล็กตริก เรียกว่า วัสดุฐานรอง (Substrate) จากภาพประกอบ 2.13 เมื่อ  $W$  คือ ความกว้างของสตริป  $h$  คือ ความสูงของวัสดุฐานรอง และ  $t$  คือ ความหนาของแผ่นตัวนำที่เคลือบบนแผ่นวงจรพิมพ์ โดยทั่วไปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในสายนำสัญญาณไมโครสตริปจะอยู่ในโหมด Quasi-TEM ดังแสดงในภาพประกอบ 2.14 [31]



ภาพประกอบ 2.13 โครงสร้างของสายนำสัญญาณไมโครสตริป



ภาพประกอบ 2.14 การแพร่กระจายสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในสายนำสัญญาณไมโครสตริป [31]

การออกแบบสายนำสัญญาณไมโครสตริปนั้นจะต้องออกแบบเพื่อให้สายนำสัญญาณมีค่าคงที่ไดอิเล็กทริกประสิทธิผลและอิมพีแดนซ์คุณลักษณะตามที่ต้องการ สมการที่ใช้ในการออกแบบสายนำสัญญาณไมโครสตริปมีดังนี้ [17]

$$\text{กำหนดให้} \quad u = \frac{W}{h} \quad (2.23)$$

สำหรับอัตราส่วน  $\frac{W}{h}$  ที่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 1  $\left(\frac{W}{h} \leq 1\right)$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[ \left(1 + \frac{12}{u}\right)^{-0.5} + 0.041(1-u)^2 \right] \quad (2.24)$$

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \left[ \ln\left(\frac{8}{u} + 0.25u\right) \right] \quad (2.25)$$

สำหรับอัตราส่วน  $\frac{W}{h}$  ที่มากกว่าหรือเท่ากับ 1  $\left(\frac{W}{h} \geq 1\right)$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{12}{u}\right)^{-0.5} \quad (2.26)$$

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} [u + 1.393 + 0.667 \ln(u + 1.444)]^{-1} \quad (2.27)$$



- เมื่อ  $\epsilon_r$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง  
 $h$  คือ ความหนาของวัสดุฐานรอง  
 $W$  คือ ความกว้างของสตริป  
 $\epsilon_{eff}$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผล  
 $Z_0$  คือ อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณไมโครสตริป

## 2.4 สายนำสัญญาณแกนร่วมปลายเปิด

สายนำสัญญาณแกนร่วมปลายเปิดเป็นสายนำสัญญาณที่มีโครงสร้างเป็นทรงกระบอก ประกอบด้วยตัวนำด้านในที่มีรัศมี  $a$  และตัวนำด้านนอกที่มีรัศมีด้านในของตัวนำด้านนอก  $b$  ซึ่งตัวนำทั้งสองจะถูกคั่นด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก เช่น เทฟลอน เป็นต้น ดังแสดงในภาพประกอบ 2.15 โดยทั่วไปการแพร่กระจายสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในสายนำสัญญาณแกนร่วมจะอยู่ในโหมด TEM สมการที่ใช้ในการออกแบบสายนำสัญญาณแกนร่วมมีดังนี้ [17]

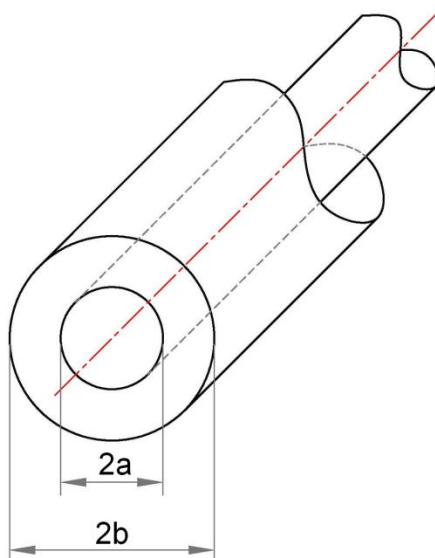
$$Z_C = \frac{\eta}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right) = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \ln\left(\frac{b}{a}\right) = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \quad (2.28)$$

- เมื่อ  $Z_C$  คือ อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณแกนร่วมปลายเปิด ( $\Omega$ )  
 $\eta$  คือ อินทรีนซิคอิมพีแดนซ์ (Intrinsic impedance) ของวัสดุไดอิเล็กตริก ( $\Omega$ )  
 $a$  คือ รัศมีของตัวนำด้านในของสายนำสัญญาณแกนร่วมปลายเปิด  
 $b$  คือ รัศมีด้านในของตัวนำด้านนอกของสายนำสัญญาณแกนร่วมปลายเปิด  
 $\epsilon$  คือ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของวัสดุ (F/m)  
 $\mu$  คือ ค่าความซาบซึ่มได้ (Relative permeability) ของวัสดุ (H/m)  
 $\epsilon_r$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริก  
 $\mu_r$  คือ ค่าความซาบซึ่มได้สัมพัทธ์ (Relative permeability)  
 $\epsilon_0$  คือ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของอวกาศว่าง ( $\frac{1}{36\pi} \times 10^{-9}$  F/m)  
 $\mu_0$  คือ ค่าซาบซึ่มได้ของอวกาศว่าง ( $4\pi \times 10^{-7}$  H/m)

เมื่อแทนค่า  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  H/m,  $\epsilon_0 = (1/36\pi) \times 10^{-9}$  F/m และ  $\mu_r = 1$  (เมื่อเติมช่องว่างระหว่างตัวนำด้านนอกกับตัวนำด้านในของสายนำสัญญาณแกนร่วมปลายเปิดด้วยวัสดุไดอิเล็กตริก) ในสมการ (2.28) จะได้

$$Z_C = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \quad (2.29)$$





ภาพประกอบ 2.15 โครงสร้างของสายนำสัญญาณแกนร่วมปลายเปิด  
[17]

## 2.5 พารามิเตอร์แบบกระจัดกระจาย

การวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพันธ์เชิงซ้อนโดยทั่วไปนิยมใช้การวิเคราะห์ข่ายงานสื่อสารแบบหนึ่งช่องทาง (One-port network) และแบบสองช่องทาง (Two-port network) ขึ้นอยู่กับเทคนิคที่นำมาใช้ โดยการวิเคราะห์ข่ายงานสื่อสารดังกล่าวเป็นการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์แบบอิมพีแดนซ์ ( $z$  parameters) ในรูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันที่ช่องทางที่ 1 และช่องทางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์แบบกระจัดกระจายที่มีความสำคัญต่อการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพันธ์เชิงซ้อน เช่น  $S_{11}$  และ  $S_{21}$  [31]

$S_{11}$  คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection coefficients) เป็นค่าที่แสดงกำลังงานที่สะท้อนกลับจากรีฟล็กเตอร์ของแต่ละความถี่ว่ามีค่าน้อยเพียงใด

$S_{21}$  คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านไปข้างหน้า (Forward transmission coefficients) เป็นกำลังงานที่สามารถส่งผ่านรีฟล็กเตอร์ของแต่ละความถี่ที่มีการส่งผ่านออกไปค่าน้อยเพียงใด

## 2.6 เวลาผ่อนคลาย

เวลาผ่อนคลาย (Relaxation time:  $\tau$ ) คือ เวลาในการกลับขั้วไดโพลของโมเลกุล [32] หรือเวลาที่ความหนาแน่นของประจุเชิงปริมาตร (Volume charge density :  $\rho_v$ ) ของวัสดุลดลง 36.8% ของความหนาแน่นของประจุเชิงปริมาตรตอนเริ่มต้น ซึ่งค่าเวลาผ่อนคลายขึ้นอยู่กับวัสดุแต่ละชนิด ดังแสดงในสมการต่อไปนี้ [12]



$$\tau = \frac{\varepsilon}{\sigma} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{\sigma} \quad (2.30)$$

โดยที่  $\varepsilon$  คือ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของไดอิเล็กตริก

$\sigma$  คือ สภาพนำไฟฟ้าของวัสดุ

$\varepsilon_0$  คือ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าของอวกาศว่าง มีค่า  $\frac{1}{36\pi} \times 10^{-9}$  F/m หรือ

$$8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

$\varepsilon_r$  คือ ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์ของวัสดุ

ความถี่ผ่อนคลาย (Relaxation frequency:  $f_c$ ) เป็นค่าตรงข้ามกับเวลาผ่อนคลาย ดังสมการต่อไปนี้ [14]

$$\tau = \frac{1}{\omega_c} = \frac{1}{2\pi f_c} \quad (2.31)$$

## 2.7 สมการของโคล-โคล

สมการของโคล-โคล (Cole-Cole equation) เป็นแบบจำลองที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของวัสดุและความถี่ เมื่อวัสดุที่ใช้แสดงค่าคงที่เวลาผ่อนคลาย 1 ค่า [33] สมการของโคล-โคล มีค่าดังนี้

$$\varepsilon_r = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + (j\omega\tau)^{1-\alpha}} \quad (2.32)$$

เมื่อ  $\varepsilon_\infty$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ความถี่อนันต์

$\varepsilon_s$  คือ ค่าสถิต (Static value) ของค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

$\varepsilon_r$  คือ สภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของวัสดุ

$\tau$  คือ เวลาผ่อนคลาย

$\omega$  คือ ความถี่เชิงมุม (rad/s)

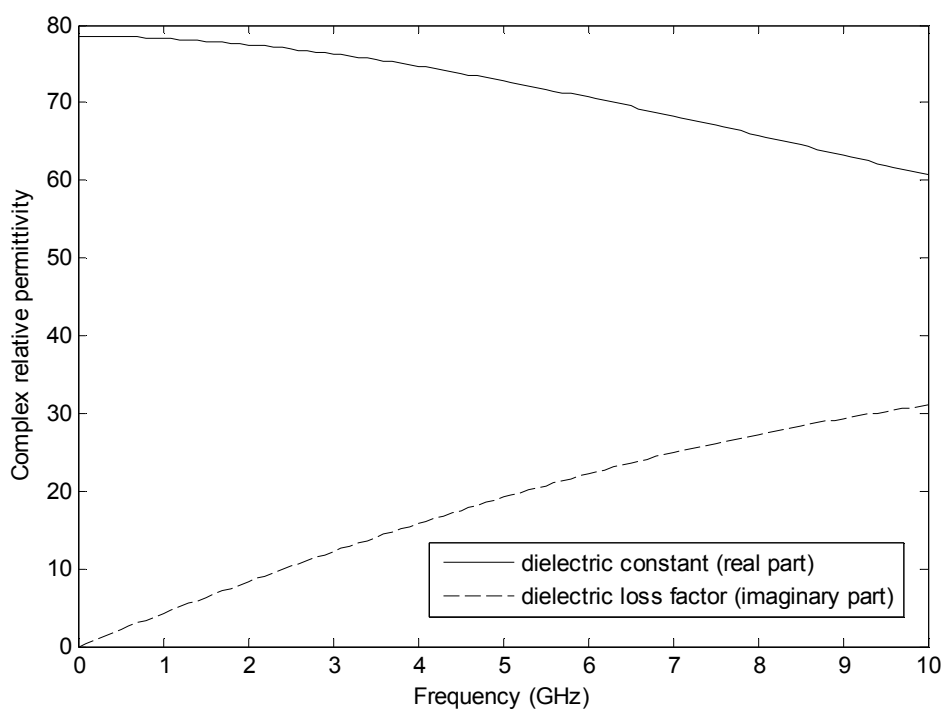
$\alpha$  คือ การกระจายของความถี่ผ่อนคลาย

ซึ่งค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของวัสดุที่ใช้ในการสอบเทียบโพรบที่ได้จากสมการโคล-โคล แสดงในตาราง 2.1



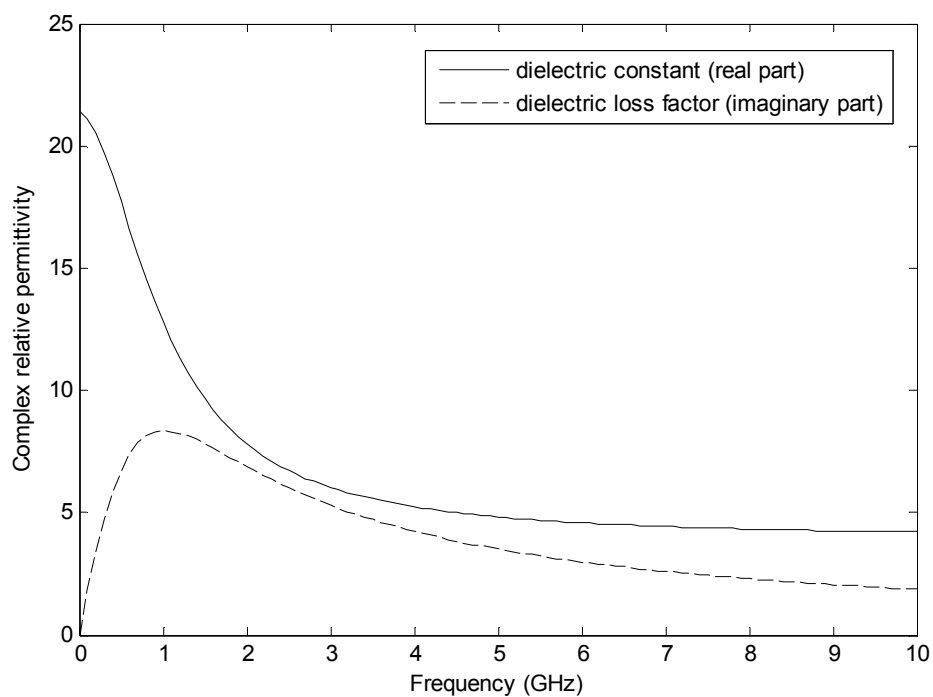
ตาราง 2.1 ค่าสภาวะยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของวัสดุมาตรฐานที่ใช้ในการสอบเทียบโพรบ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

วัสดุที่ใช้ในการ สอบเทียบโพรบ	Cole-Cole parameters			
	$\epsilon_{\infty}$	$\epsilon_s$	$\tau(ps)$	$\alpha$
น้ำกลั่น [34]	4.22	78.6	8.8	0.013
เอทานอล [26]	3.91	21.4	980.39	0.03
เมทานอล [35]	4.45	33.7	49.5	0.036
อากาศ [13]	$\epsilon = 1$			

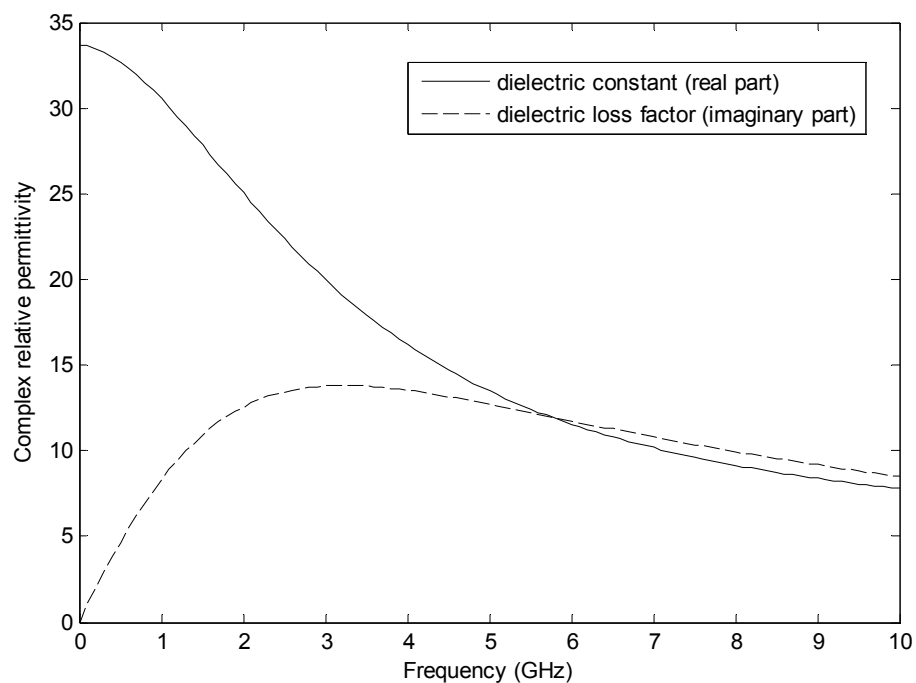


ภาพประกอบ 2.16 ค่าสภาวะยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของน้ำกลั่น [34]





ภาพประกอบ 2.17 แสดงค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของเอทานอล  
[26]



ภาพประกอบ 2.18 ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของเมทานอล  
[35]



## 2.8 ความสัมพันธ์ของดีบาย

ความสัมพันธ์ของดีบาย (Debye relation) เป็นกรณีพิเศษของสมการของโคล-โคล ( $\alpha = 0$ ) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของวัสดุและความถี่ เมื่อวัสดุที่ใช้แสดงค่าคงที่เวลาผ่อนคลาย 1 ค่า ซึ่งความสัมพันธ์ของดีบาย มีค่าดังนี้ [32]

$$\epsilon_r = \epsilon(\omega) = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + j\omega\tau} \quad (2.33)$$

- เมื่อ  $\epsilon_\infty$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ความถี่อนันต์  
 $\epsilon_s$  คือ ค่าสถิต (Static value) ของค่าคงที่ไดอิเล็กตริก  
 $\epsilon_r$  คือ สภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของวัสดุ  
 $\tau$  คือ เวลาผ่อนคลาย  
 $\omega$  คือ ความถี่เชิงมุม (rad/s)

## 2.9 คอนกรีตที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบ

### 2.9.1 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์

คอนกรีต เป็นวัสดุก่อสร้างที่เกิดขึ้นจากการผสมวัสดุประสานเข้ากับวัสดุผสม ซึ่งวัสดุประสานที่นิยมใช้ผสมเป็นคอนกรีต คือ น้ำและซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ส่วนวัสดุผสมอื่น ๆ ที่ใช้ ได้แก่ ทรายและหินหรือกรวด รูปทรงของคอนกรีตนั้นจะเปลี่ยนไปตามแม่พิมพ์ที่ใช้ในแต่ละงาน ซึ่งความแข็งแรงของคอนกรีตนั้นเปลี่ยนไปตามอัตราของส่วนผสมและอายุของคอนกรีต [36]

องค์ประกอบที่มีความสำคัญมากอย่างหนึ่งต่อการก่อตัวและการแข็งตัวของคอนกรีต คือ ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ซึ่งเกิดจากการรวมตัวของออกไซด์หลัก คือ ปูนขาว (CaO) ซิลิกา (SiO<sub>2</sub>) อะลูมินา (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) และเหล็กออกไซด์ (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) ซึ่งเป็นสารประกอบที่ได้จากแร่ธรรมชาติ เมื่อผสมซีเมนต์พอร์ตแลนด์เข้ากับน้ำจะเกิดปฏิกิริยาที่มีชื่อว่า ปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration reaction) ซึ่งจะมีความร้อนเกิดขึ้นระหว่างการทำปฏิกิริยา ปฏิกิริยาดังกล่าวจะยังไม่สิ้นสุดถ้ามีสารที่มีองค์ประกอบของซิลิกา และอะลูมินา เรียกว่า สารปอซโซลาน (Pozzolan) ที่มีลักษณะเป็นผงละเอียดผสมอยู่ในซีเมนต์พอร์ตแลนด์ สารประกอบดังกล่าวจะไปทำปฏิกิริยากับต่างที่ได้จากปฏิกิริยาไฮเดรชันที่อุณหภูมิปกติและมีความชื้นเพียงพอ จะทำให้เกิดเป็น ปฏิกิริยาปอซโซลาน (Pozzolanic reaction) ซึ่งจะช่วยลดช่องว่างระหว่างอนุภาคของซีเมนต์พอร์ตแลนด์มีผลให้กำลังอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น วัสดุปอซโซลานที่นิยมใช้แทนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ เช่น เถ้าแกลบ เถ้าลอย เถ้าขานอ้อย เป็นต้น วัสดุเหล่านี้จะต้องผ่านกระบวนการเผาที่อุณหภูมิที่เหมาะสมและบดละเอียดก่อนที่จะนำมาเป็นส่วนผสมในคอนกรีต [37]

### 2.9.2 เถ้าแกลบ

เถ้าแกลบถูกนำมาใช้เป็นวัสดุปอซโซลานชนิดหนึ่ง เนื่องจากมีซิลิกาเป็นส่วนประกอบถึง 89.9% องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบแสดงดังตาราง 2.2 การเผาเถ้าแกลบต้องให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 600-800 องศาเซลเซียส [1] หากมีอากาศเพียงพอระหว่างการเผาไหม้และใช้เวลาในการเผา





นานพอ จะได้เถ้าแกลบที่มีลักษณะเป็นสีขาว เรียกว่า เถ้าแกลบเทาขาว ในทางตรงข้ามหากใช้เวลาในการเผาไม่นานและอากาศไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ จะทำให้เถ้าแกลบที่ได้มีลักษณะเป็นสีดำ เรียกว่า เถ้าแกลบดำ โดยเถ้าแกลบดำนั้นนิยมนำมาใช้ผสมแทนซีเมนต์มากกว่าเถ้าแกลบเทาขาว เพราะเถ้าแกลบเทาขาวมักจะมีเศษดินและหินเจือปนเนื่องมาจากกระบวนการเผาในเตาขนาดเล็กหรือการเผาในที่โล่ง จึงทำให้การเก็บเถ้าแกลบทำได้ยาก นอกจากนี้เถ้าแกลบดำยังมีค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (Loss on ignition: LOI) ต่ำ ค่าความจำเพาะของเถ้าแกลบโดยทั่วไปขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการเผา ซึ่งได้แก่ 2.06 ที่อุณหภูมิการเผา 500 องศาเซลเซียส 2.2 ที่อุณหภูมิการเผา 800 องศาเซลเซียส และ 2.3 ที่อุณหภูมิการเผา 1000 องศาเซลเซียส ขนาดเฉลี่ยของอนุภาคเถ้าแกลบที่ใช้แทนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประมาณ 5-20 ไมครอน ในช่วงอายุต้น (3-7 วัน) คอนกรีตที่ผสมเถ้าแกลบที่มีความละเอียดสูงจะมีกำลังรับแรงอัดที่ต่ำ แต่ค่าดังกล่าวจะสูงขึ้นเมื่ออายุของคอนกรีตมากขึ้น (28 วัน) ความละเอียดของเถ้าแกลบที่นิยมใช้คือ มีอนุภาคข้างบนตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกิน 1% [38]

### 2.9.3 การแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบ

การแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบเพื่อเพิ่มกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต จำเป็นต้องใช้ในปริมาณที่เหมาะสม คือ ร้อยละ 20-40 โดยน้ำหนัก หากใช้ในปริมาณที่มากเกินไป จะทำให้ได้กำลังรับแรงอัดที่ต่ำกว่าการใช้ซีเมนต์ล้วน แม้ว่าอายุของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นก็ตาม [38]

ตาราง 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าแกลบ [1], [36]

สารประกอบ	สูตรเคมี	ค่าเฉลี่ย (%โดยน้ำหนัก)	
		เถ้าแกลบเทาขาว	เถ้าแกลบดำ
ซิลิคอนไดออกไซด์	SiO <sub>2</sub>	88.33	89.95
ไอรอนไดออกไซด์	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.37	1.89
โพแทสเซียมออกไซด์	K <sub>2</sub> O	2.76	1.49
อะลูมิเนียมออกไซด์	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.48	0.54
แคลเซียมออกไซด์	CaO	0.56	0.50
แมกนีเซียมออกไซด์	MgO	2.28	0.23
โซเดียมออกไซด์	Na <sub>2</sub> O	0.15	0.07
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์	SO <sub>3</sub>	0.12	0.02
การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาไหม้	LOI	3.71	4.70

### 2.9.4 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ใช้ในงานก่อสร้างอาคาร โดยทั่วไปแบ่งเป็น 2 วิธี คือ วิธีการทดสอบแบบทำลาย (Destructive testing method) และวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย (Nondestructive testing method) โดยวิธีการทดสอบแบบทำลายนั้นเป็นการทดสอบที่ทำให้เกิดความเสียหายแก่คุณสมบัติและโครงสร้างของคอนกรีต ส่วนวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลายนั้นเป็นการ



ทดสอบที่ไม่ทำให้เกิดความเสียหายแก่คุณสมบัติและโครงสร้างจริงของคอนกรีตโดยใช้เครื่องมือตรวจสอบภายในโครงสร้าง

การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตแบบทำลายนั้น นิยมใช้ทดสอบตัวอย่างคอนกรีตในห้องปฏิบัติการ โดยมาตรฐานการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบทำลายที่ใช้กันนั้นมีหลายมาตรฐานขึ้นอยู่กับรูปทรงของตัวอย่างคอนกรีต เช่น ถ้าตัวอย่างคอนกรีตเป็นทรงลูกบาศก์ จะให้มาตรฐาน BS 1881 : part 4 method of testing concrete for strength ถ้าตัวอย่างคอนกรีตเป็นทรงกระบอก มาตรฐานที่ใช้คือ ASTM C39 : standard test method for compressive strength of cylindrical specimens วิธีการทดสอบกำลังรับแรงอัดทำได้โดยการนำตัวอย่างคอนกรีตวางให้ตรงกึ่งกลางกับเครื่องกด โดยให้ส่วนหน้าแคบเป็นส่วนรับแรงอัด ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดโดยการกดตัวอย่างคอนกรีตจนแตกเพื่อให้ทราบค่ากำลังรับแรงอัด [38]

การทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตแบบไม่ทำลาย มาตรฐานที่ใช้มีหลายวิธี เช่น มาตรฐาน มยผ. 1502-51 วิธีหาค่าความแข็งแรงของคอนกรีตด้วยค้อนกระทบ (Rebound hammer) ทดสอบโดยการใช้ค้อนกระทบผิวหน้าของคอนกรีต แล้วอ่านค่าการสะท้อนจากมาตรวัด และมาตรฐาน มยผ. 1503-51 วิธีประเมินค่ากำลังอัดคอนกรีตด้วยการยิงด้วยหัวหยั่งทดสอบ (Penetration resistance) ทำได้โดยการยิงหัวหยั่งทดสอบเข้าไปในคอนกรีต ซึ่งระยะที่หัวหยั่งทะลุลงไปในคอนกรีตนั้นจะถูกนำมาประเมินหาความสัมพันธ์กับกำลังรับแรงอัด [3]

## 2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีต

### 2.10.1 การวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนด้วยเทคนิคสายส่งสัญญาณแบบแบน

ในปี 2005 Kang และคณะ [26] ได้ทำการออกแบบโพรบแบบแบน 3 แบบ ที่ประยุกต์ใช้โครงสร้างของท่อนาคคลื่นระนาบร่วม (Coplanar waveguide: CPW) กับสายนำสัญญาณแบนร่วม เพื่อนำมาใช้ในการวัดค่า สภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของวัสดุแทนโพรบแบนร่วมปลายเปิดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตรที่มีอยู่แล้ว ซึ่งโพรบที่ออกแบบนั้นสามารถทำงานได้ที่ความถี่สูงถึง 40 GHz ตัวนำของแผ่นวงจรพิมพ์ทำจากทองคำ วัสดุฐานรองที่ใช้คือ ควอตซ์และซิลิกอน และใช้ซิลเวอร์อีพ็อกซีเติมเวียร์โฮล แล้วใช้เทปทองแดงพันรอบโพรบให้มีลักษณะเหมือนตัวนำด้านนอกของสายนำสัญญาณแบนร่วม การสอบเทียบโพรบโดยการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของอากาศ น้ำกลั่น และเมทานอล ซึ่งพบว่าให้ค่าใกล้เคียงกับโพรบแบนร่วมปลายเปิด นอกจากนี้ผู้วิจัยยังได้นำโพรบดังกล่าวไปประยุกต์ใช้ในการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของเอทานอล สารละลาย น้ำเกลือ 0.9% และเนื้อหมูทั้งในส่วนไขมันและกล้ามเนื้อ

ในปี 2007 Kim และคณะ [39] นำเสนอโพรบแบบแบนที่ประยุกต์ใช้โครงสร้างของสายนำสัญญาณไมโครสตริปกับสายนำสัญญาณแบนร่วมที่สามารถวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของวัสดุที่มีคุณสมบัติสูงและใช้งานที่ความถี่สูงได้ ความกว้างของโพรบดังกล่าวเท่ากับ 2 มิลลิเมตร สำหรับโครงสร้างสายนำสัญญาณแบนร่วมนั้นมีรัศมีของตัวนำด้านในเท่ากับ 0.2 มิลลิเมตร และรัศมีด้านในของตัวนำด้านนอกเท่ากับ 0.3 มิลลิเมตร โพรบดังกล่าวถูกนำไปวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 0-100 องศาเซลเซียส โดยช่วงความถี่ที่โพรบสามารถทำงานได้คือ 0.5-40 GHz เปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้จากโพรบแบนร่วมปลายเปิด



ในปี 2007 Kim และคณะ [10] สร้างโพรบแบบแบนที่ประยุกต์ใช้โครงสร้างของสายนำสัญญาณไมโครสตริปกับสายนำสัญญาณแกนร่วมเพื่อใช้วัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของวัสดุ โพรบที่ออกแบบนั้นมีขนาดเล็กมาก โดยความกว้างของโพรบดังกล่าวเท่ากับ 800 ไมโครเมตร สำหรับโครงสร้างสายนำสัญญาณแกนร่วมนั้นมีรัศมีของตัวนำด้านในเท่ากับ 400 ไมโครเมตร และรัศมีด้านในของตัวนำด้านนอกเท่ากับ 600 ไมโครเมตร การทดสอบทำได้โดยการวัดวัสดุอ้างอิงที่ทราบค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อน คือ สารละลายน้ำเกลือ 0.9% ที่ช่วงความถี่ 0.5 MHz-20 GHz และนำโพรบไปประยุกต์ใช้ในการวัดเนื้อเยื่อเซลล์มะเร็งในหนูทดลอง

#### 2.10.2 การวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีต

ในปี 2008 Filali และคณะ [9] นำเสนอการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตที่มีกำลังรับแรงอัดที่แตกต่างกัน คือ 15 23 31 และ 80 MPa โดยใช้โพรบแกนร่วมปลายเปิดขนาดใหญ่วัดคอนกรีตที่ช่วงความถี่ 100-900 MHz ผลการทดลองพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเพิ่มขึ้นเมื่อกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น

ในปี 2009 Kwon และคณะ [5] ใช้เทคนิคการวัดแบบไม่ทำลายในการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตที่มีอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์แตกต่างกัน 5 ค่า คือ 40% 45% 50% 55% และ 60% โดยทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุคอนกรีต 1 2 และ 4 สัปดาห์ ช่วงความถี่ที่ใช้ในการวัดคือ 0.2-20 GHz ผลการทดลองพบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและสภาพนำไฟฟ้าของตัวอย่างคอนกรีตจะเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ลดลงและอายุของคอนกรีตเพิ่มขึ้น

ในปี 2013 Jamil และคณะ [4] ทำการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของตัวอย่างคอนกรีต พร้อมทั้งศึกษาผลกระทบของความถี่ เวลาในการบ่มคอนกรีต อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ กำลังรับแรงอัด และความชื้น ที่มีผลต่อสมบัติไดอิเล็กตริกของคอนกรีต งานวิจัยนี้อาศัยเทคนิคการส่งผ่านอวกาศว่าง โดยการวางตัวอย่างคอนกรีตเข้ากับตัวยึดที่วางอยู่ระหว่างสายอากาศเลนส์แบบปากแตรสองตัวให้อยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน ช่วงความถี่ที่ใช้วัดคือ 7-13 GHz ผลที่ได้พบว่า 1) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมีแนวโน้มลดลงเมื่อความถี่ที่ใช้ในการวัดสูงขึ้น 2) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกลดลงเมื่ออายุของคอนกรีตเพิ่มขึ้น 3) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของคอนกรีตที่อายุก่อน 21 วัน แปรผันตรงตามอัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ แต่หลังอายุ 21 วันค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ลดลง 4) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะเพิ่มขึ้นเมื่อกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้น และ 5) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกแปรผันตรงกันความชื้นในคอนกรีต

ในปี 2008 Zhong และคณะ [40] ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตกับความถี่ที่ใช้ในการวัด โดยใช้โพรบแกนร่วมวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ 0.4 0.5 และ 0.6 ที่อายุ 7 14 และ 28 วัน ผลการทดลองพบว่า ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกลดลงเมื่อความถี่ที่ใช้ในการวัดเพิ่มขึ้น และเมื่ออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์ลดลง



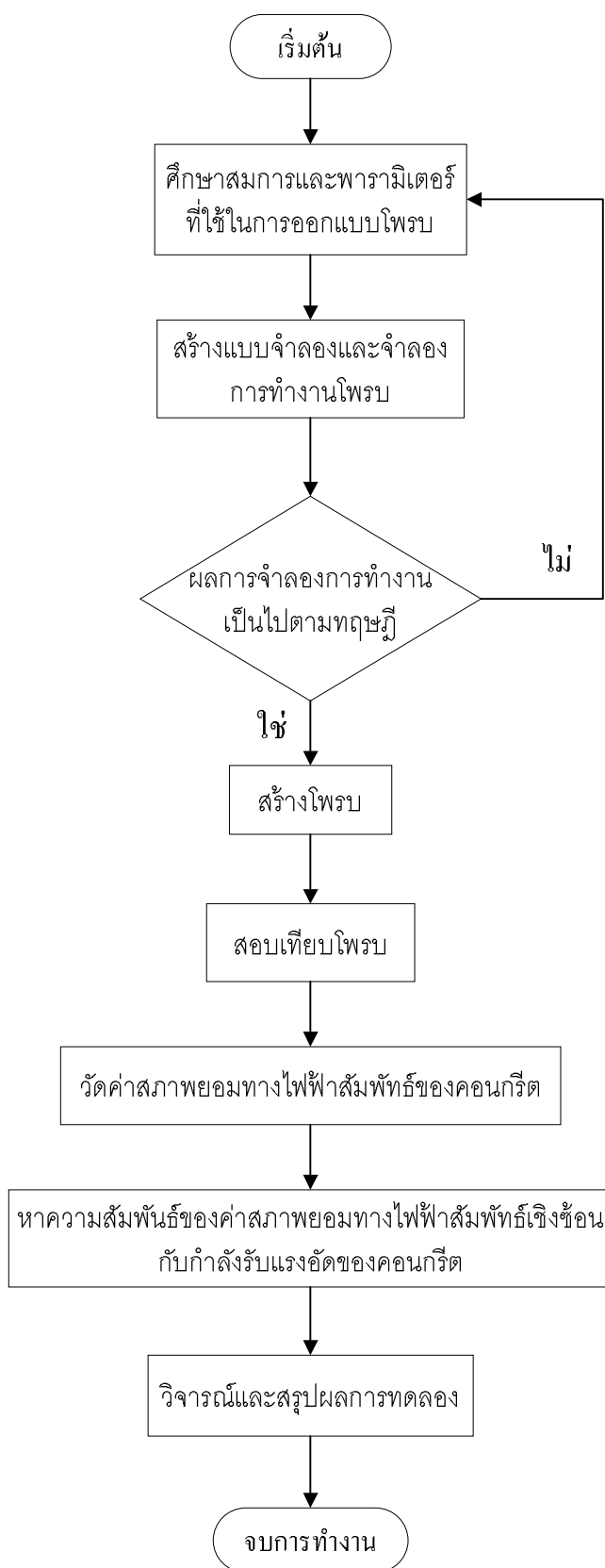
## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 บทนำ

บทนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างโพรบแกนร่วมแบบแบนโดยการประยุกต์ใช้หลักการของสายนำสัญญาณไมโครสตริปและสายนำสัญญาณแกนร่วม เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการผลิตต่ำ และสร้างง่าย เมื่อเทียบกับโพรบแกนร่วมแบบปลายเปิด โดยคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของโพรบ จากนั้นจำลองการทำงานของโพรบแกนร่วมแบบแบนด้วยโปรแกรมจำลองการทำงานย่านความถี่ไมโครเวฟ โดยการสร้างวัสดุสมมติที่ต้องการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนขึ้นมา 4 ชนิด เมื่อได้การทำงานที่ให้ผลเป็นไปตามที่ออกแบบไว้ จึงจะทำการสร้างโพรบแกนร่วมแบบแบน การสอบเทียบโพรบทำได้โดยการนำโพรบไปวัดวัสดุที่ทราบค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อน 4 ชนิด โดยสมมติให้ 3 ชนิดนั้นทราบค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อน ส่วนอีก 1 ชนิดสมมติว่าเป็นวัสดุที่ไม่ทราบค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อน หลังจากการสอบเทียบให้ผลเป็นไปตามที่ออกแบบไว้ ขั้นตอนต่อไปคือการประยุกต์ใช้ในการวัดและคำนวณหาค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตตัวอย่างที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน ระดับการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบและอายุของคอนกรีตที่แตกต่างกัน จากนั้นนำค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนที่วัดได้ไปวิเคราะห์ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรมคำนวณทางคณิตศาสตร์ เพื่อหาความสัมพันธ์กับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบต่อไป





ภาพประกอบ 3.1 แผนผังวิธีการดำเนินงานวิจัย



### 3.2 การออกแบบโพรบแชนร่วมแบบแบน

หัวข้อนี้จะกล่าวถึงการออกแบบโพรบแชนร่วมแบบแบน โดยโพรบแชนร่วมแบบแบนจะถูกออกแบบและจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมจำลองการทำงานย่านความถี่ไมโครเวฟ และจะถูกสร้างขึ้นจริงด้วยแผ่นวงจรพิมพ์ความถี่สูง Arlon AD260A ที่มีค่าคงที่ไดอิเล็กตริก  $\epsilon_r$  เท่ากับ 2.6 ความสูงของวัสดุฐานรอง (h) เท่ากับ 1 มิลลิเมตร และความหนาของแผ่นตัวนำสตริปและระนาบกราวด์ (t) เท่ากับ 0.0175 มิลลิเมตร ซึ่งโพรบแชนร่วมแบบแบนมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีความยาวแต่ละด้าน คือ 10 เซนติเมตร โดยโพรบจะมีโครงสร้างพื้นฐานเป็นสายนำสัญญาณไมโครสตริป และใช้ส่วนของระนาบกราวด์เพื่อออกแบบเป็นสายนำสัญญาณแชนร่วม โดยโพรบที่ทำการออกแบบนั้นจะต้องทำงานในช่วงความถี่ 0-8 GHz ได้

#### 3.2.1 การออกแบบสายนำสัญญาณไมโครสตริป

สายนำสัญญาณไมโครสตริปถูกออกแบบให้มีอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเท่ากับ 50 โอห์ม ซึ่งมีค่าเท่ากับสายนำสัญญาณแบบแชนร่วมที่เป็นสายเชื่อมต่อกับเครื่องวิเคราะห์ขยายงานสื่อสาร สายนำสัญญาณไมโครสตริปที่ทำการออกแบบแสดงในภาพประกอบ 3.2 ส่วนที่สำคัญของสายนำสัญญาณไมโครสตริปที่ต้องทำการออกแบบเพื่อให้ได้อิมพีแดนซ์คุณลักษณะเท่ากับ 50 โอห์ม คือ ความกว้างของสตริป (W) ซึ่งสามารถหาได้จากสมการดังต่อไปนี้

สำหรับอัตราส่วน  $W/h$  ที่มากกว่าหรือเท่ากับ 1 ( $W/h \geq 1$ ) [17]

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left( 1 + 12 \frac{h}{W} \right)^{-0.5} \quad (3.1)$$

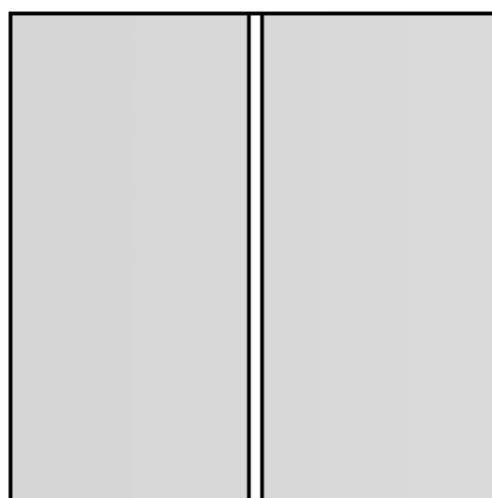
- เมื่อ  $\epsilon_r$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุฐานรอง  
 $h$  คือ ความหนาของวัสดุฐานรอง  
 $W$  คือ ความกว้างของสตริป  
 $\epsilon_{eff}$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกประสิทธิผล

$$Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \left[ \frac{W}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left( \frac{W}{h} + 1.444 \right) \right]^{-1} \quad (3.2)$$

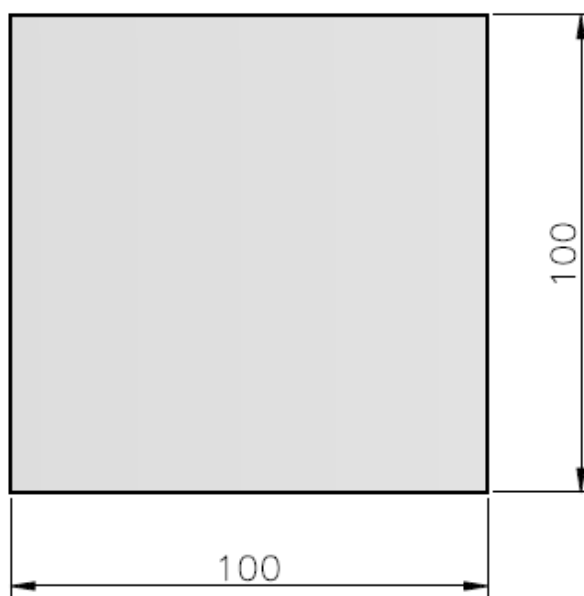
- เมื่อ  $Z_0$  คือ อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณไมโครสตริป

จากการคำนวณพบว่า ที่ความกว้างของสตริปเท่ากับ 2.8 มิลลิเมตร ได้ค่าไดอิเล็กตริกประสิทธิผลเท่ากับ 2.148 และอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเท่ากับ 49.878 โอห์ม ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับ 50 โอห์ม ดังแสดงในภาพประกอบ 3.3 ส่วนความยาวของสตริปที่ใช้ในการออกแบบคือ 100 มิลลิเมตร



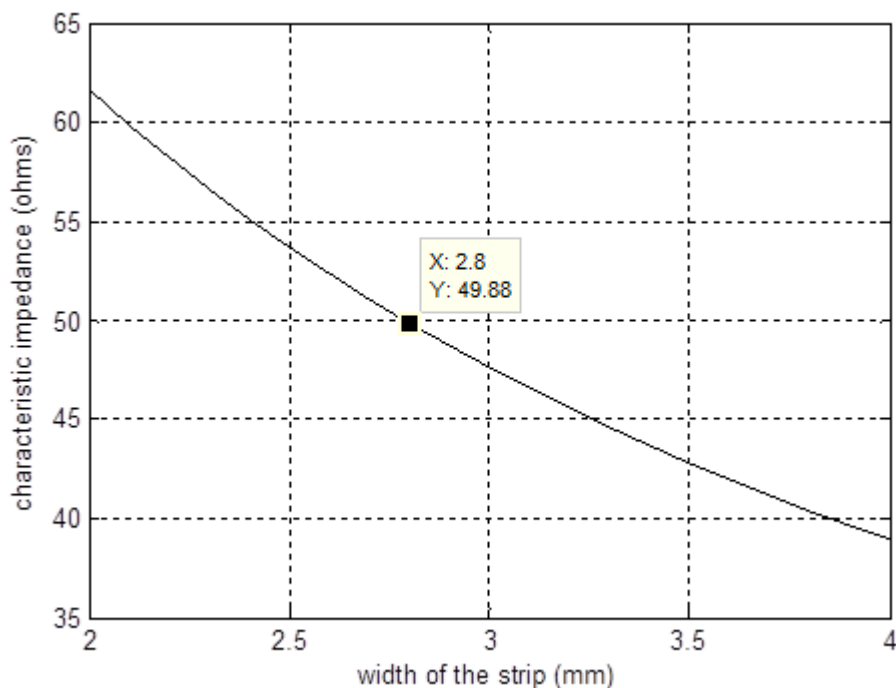


$W=2.8$   
(ก) ด้านสตริป



(ข) ด้านระนาบกราวด์

ภาพประกอบ 3.2 โครงสร้างสายนำสัญญาณไมโครสตริป (มิลลิเมตร)



ภาพประกอบ 3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอิมพีแดนซ์คุณลักษณะกับความกว้างของสตริป

### 3.2.2 การออกแบบสายนำสัญญาณแกนร่วมของโพรบแกนร่วมแบบแบน

สายนำสัญญาณแกนร่วมถูกออกแบบให้มีอิมพีแดนซ์คุณลักษณะเท่ากับ 50 โอห์ม ซึ่งระนาบกราวด์ของสายนำสัญญาณไมโครสตริปจะถูกตัดแปลงให้เป็นโครงสร้างของสายนำสัญญาณแกนร่วม การออกแบบใช้สมการต่อไปนี้ [17]

$$Z_c = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \quad (3.3)$$

- เมื่อ  $Z_c$  คือ อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของสายนำสัญญาณแกนร่วม  
 $a$  คือ รัศมีของตัวนำด้านในของสายนำสัญญาณแกนร่วม  
 $b$  คือ รัศมีด้านในของตัวนำด้านนอกของสายนำสัญญาณแกนร่วม  
 $\epsilon_r$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุที่ใช้เป็นฉนวน

จากลักษณะของสายนำสัญญาณแกนร่วมที่ทำการออกแบบนั้น ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุไดอิเล็กตริกที่อยู่ระหว่างตัวนำทั้งสองของสายนำสัญญาณหากพิจารณาจากความหนาของแผ่นตัวนำบนแผ่นวงจรพิมพ์นั้นมีความหนา (t) ดังนั้นส่วนที่คั่นระหว่างตัวนำทั้งสองของสายนำสัญญาณจะเป็นอากาศ ซึ่งมีค่า  $\epsilon_r$  เท่ากับ 1 แต่หากความหนานั้นไม่มากพอที่จะถือว่าเป็นวัสดุไดอิเล็กตริกของสายนำสัญญาณจะเป็นวัสดุฐานรองของแผ่นวงจรพิมพ์ ซึ่งมีค่า  $\epsilon_r$  เท่ากับ 2.6





จากสมการ (3.3) เพื่อให้อิมพีแดนซ์คุณลักษณะเท่ากับ 50 โอห์ม จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างรัศมีของตัวนำด้านใน (a) และรัศมีด้านในของตัวนำด้านนอก (b) เมื่อแทนค่า  $\epsilon_r$  เท่ากับ 1 และ  $\epsilon_r$  เท่ากับ 2.6 ดังต่อไปนี้

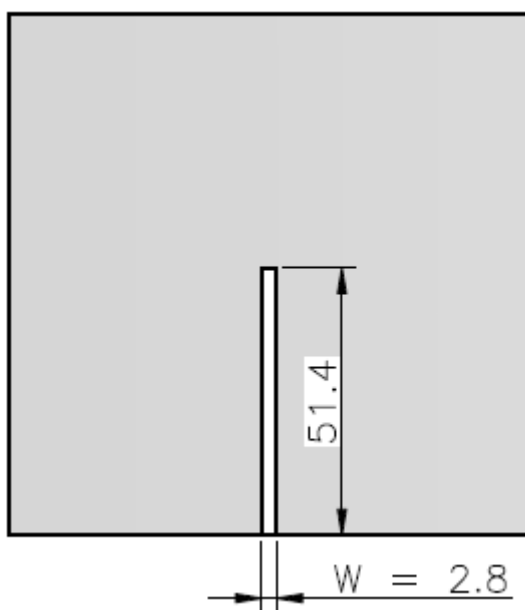
$$\text{ที่ } \epsilon_r = 1, \quad b = 2.3a \quad (3.4)$$

$$\text{ที่ } \epsilon_r = 2.6, \quad b = 3.83a \quad (3.5)$$

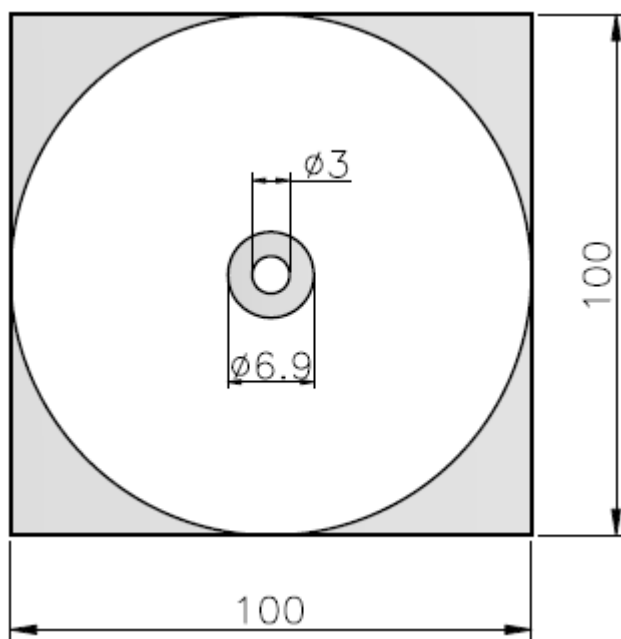
จากความกว้างของสตริปที่ออกแบบเท่ากับ 2.8 มิลลิเมตร เลือกรัศมี a เท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร ซึ่งจะทำให้รัศมี b มีค่าเท่ากับ 3.45 มิลลิเมตร ที่  $\epsilon_r = 1$  และ 5.745 มิลลิเมตร ที่  $\epsilon_r = 2.6$  ดังแสดงในภาพประกอบ 3.4-3.5

เพื่อให้ได้โพรบที่ออกแบบสมบูรณ์ ส่วนของสตริปจะถูกลดความยาวจาก 10 เซนติเมตร เหลือ 5.14 เซนติเมตร ด้านระนาบกราวด์นอกจากจะตัดแปลงให้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง a และ b แล้ว ยังมีส่วนของรัศมีด้านนอกของตัวนำด้านนอกซึ่งเท่ากับ 5 เซนติเมตร รัศมี a บนระนาบกราวด์ของแผ่นวงจรพิมพ์ที่ทำการออกแบบถูกเจาะรูเป็นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.8 มิลลิเมตร ทะลุวัสดุฐานรองจนถึงสตริป และทำการบัดกรีเชื่อมต่อระหว่างสตริปกับรัศมี a บนระนาบกราวด์ ซึ่งโพรบที่ได้ นั้นจะมีลักษณะเหมือนกับสายนำสัญญาณแกนร่วมที่ถูกพับให้แบน โดยด้านระนาบกราวด์ที่ออกแบบไว้ นั้นเทียบได้กับหน้าตัดของสายนำสัญญาณแกนร่วม และส่วนของสตริปคือตัวนำด้านในของสายนำสัญญาณแกนร่วม โพรบแกนร่วมแบบแบนที่ออกแบบจะถูกเชื่อมต่อเข้ากับ SMA connector ดังแสดงในภาพประกอบ 3.6-3.7



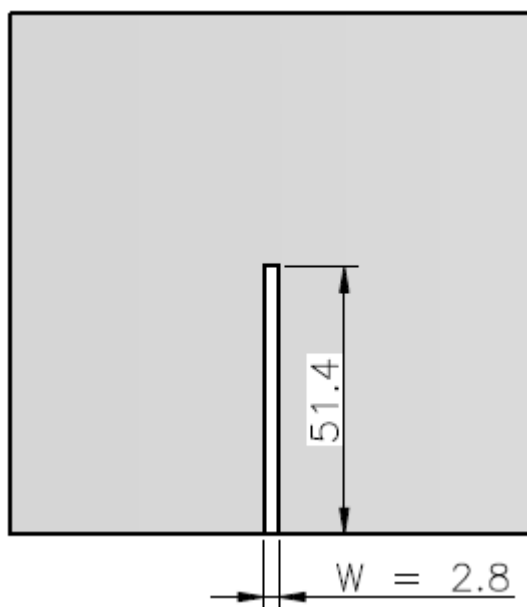


(ก) ด้านstriป

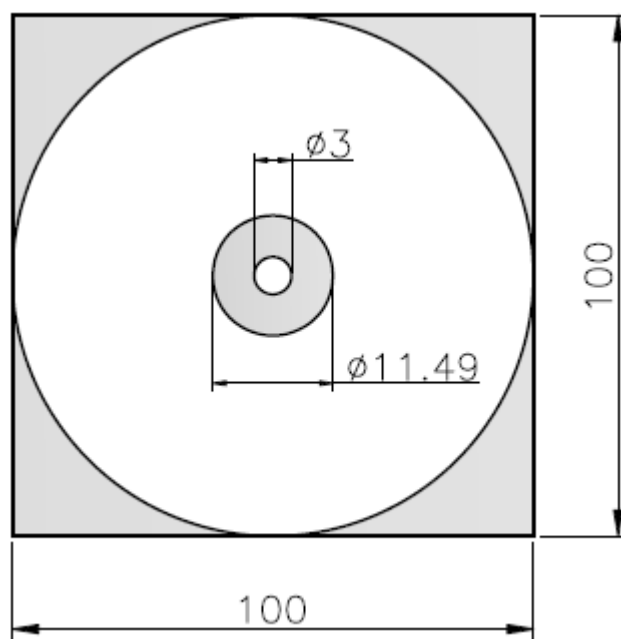


(ข) ด้านระนาบกราวด์

ภาพประกอบ 3.4 โครงสร้างของสายนำสัญญาณแกนร่วมบนระนาบกราวด์ของโพรบ  
เมื่อ  $\epsilon_r = 1$  (มิลลิเมตร)



(ก) ด้านstriป

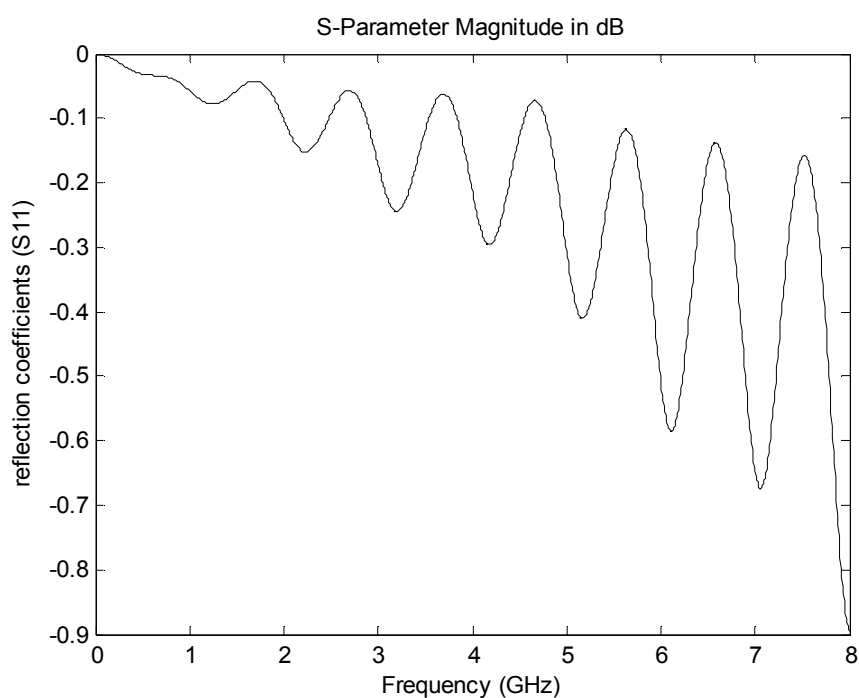


(ข) ด้านระนาบกราวด์

ภาพประกอบ 3.5 โครงสร้างของสายนำสัญญาณแกนร่วมบนระนาบกราวด์ของโพรบ  
เมื่อ  $\epsilon_r = 2.6$  (มิลลิเมตร)

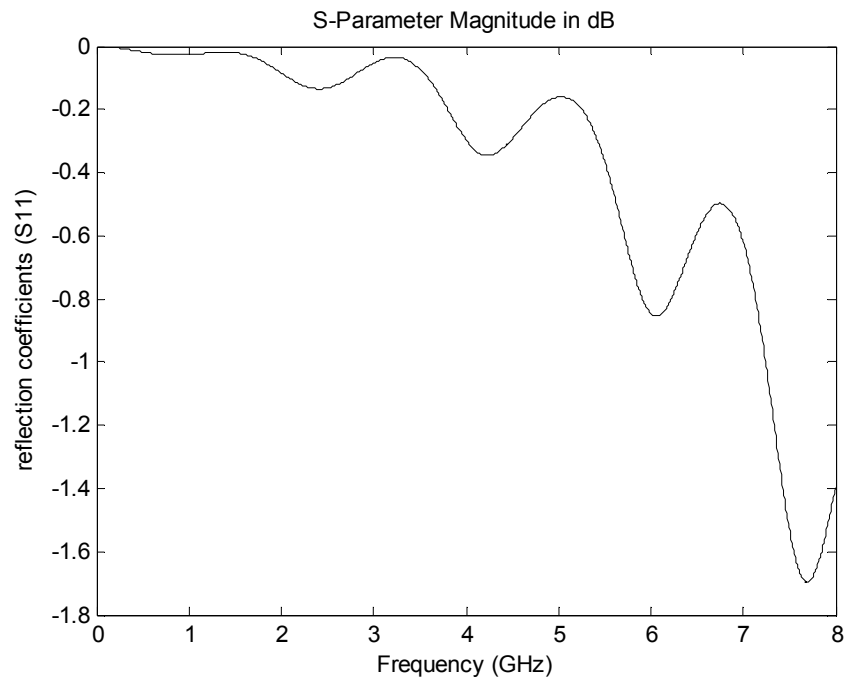
### 3.2.3 การจำลองการทำงานของโพรบแกนร่วมแบบแบน

การจำลองการทำงานของโพรบแกนร่วมแบบแบน เริ่มตั้งแต่การจำลองการทำงานของสายนำสัญญาณไมโครสตริป และจำลองการทำงานของโพรบที่มีการประยุกต์ใช้โครงสร้างของสายนำสัญญาณแกนร่วมและเจาะรูเชื่อมต่อเรียบร้อยแล้วตามค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้ออกแบบไว้ การจำลองการทำงานของโพรบนั้นทำได้โดยการใช้โปรแกรมจำลองการทำงานย่านความถี่ไมโครเวฟ ดังแสดงในภาพประกอบ 3.6-3.9 การจำลองการทำงานแสดงในแบบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S11) ช่วงความถี่ที่ใช้ในการจำลองการทำงาน คือ 0-8 GHz

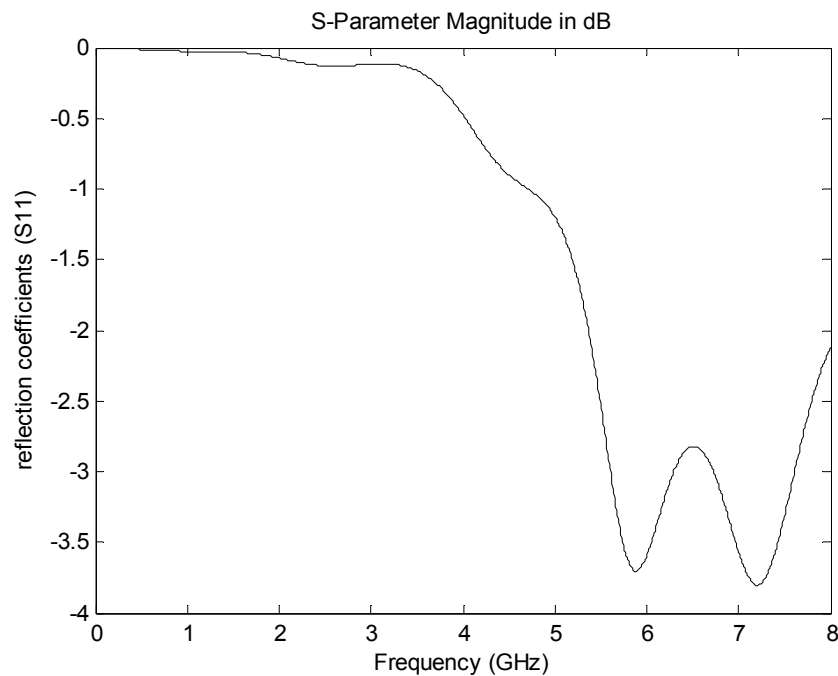


ภาพประกอบ 3.6 การจำลองการทำงานของสายนำสัญญาณไมโครสตริป



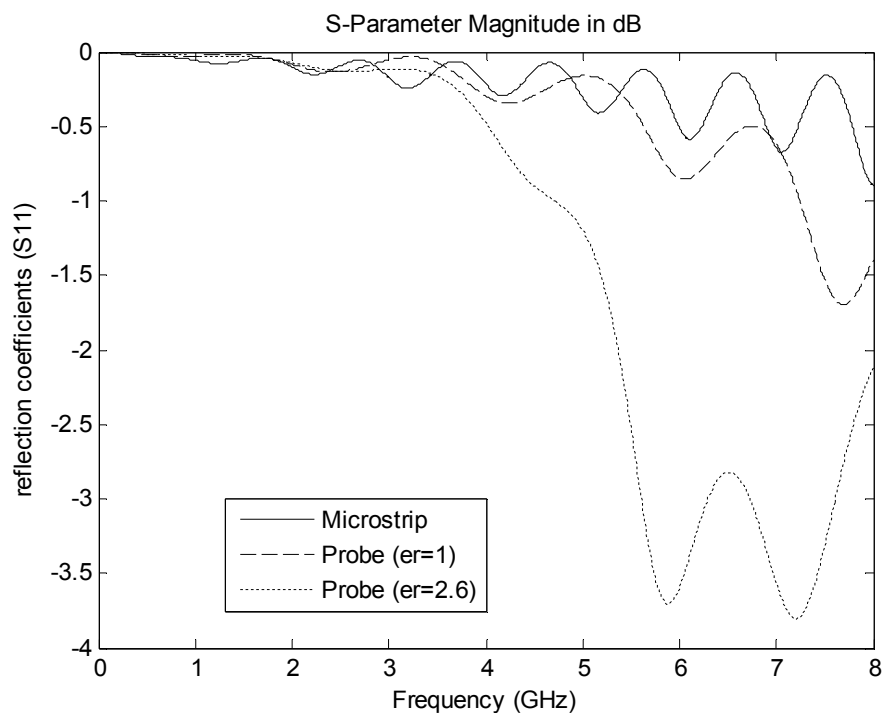


ภาพประกอบ 3.7 การจำลองการทำงานของโพรบแกนร่วมแบบแบน เมื่อ  $\epsilon_r = 2.6$  รัศมี a เท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร รัศมี b เท่ากับ 3.45 มิลลิเมตร



ภาพประกอบ 3.8 การจำลองการทำงานของโพรบแกนร่วมแบบแบน เมื่อ  $\epsilon_r = 2.6$  รัศมี a เท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร รัศมี b เท่ากับ 5.745 มิลลิเมตร



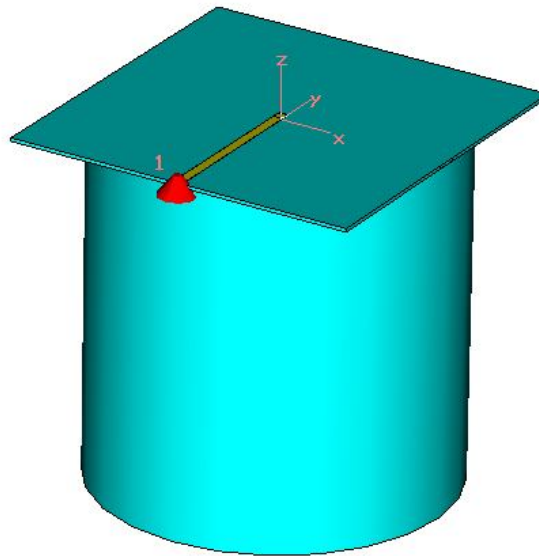


ภาพประกอบ 3.9 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S11) ของสายนำสัญญาณไมโครสตริป และโพรบแกนร่วมแบบแบนทั้ง 2 แบบ

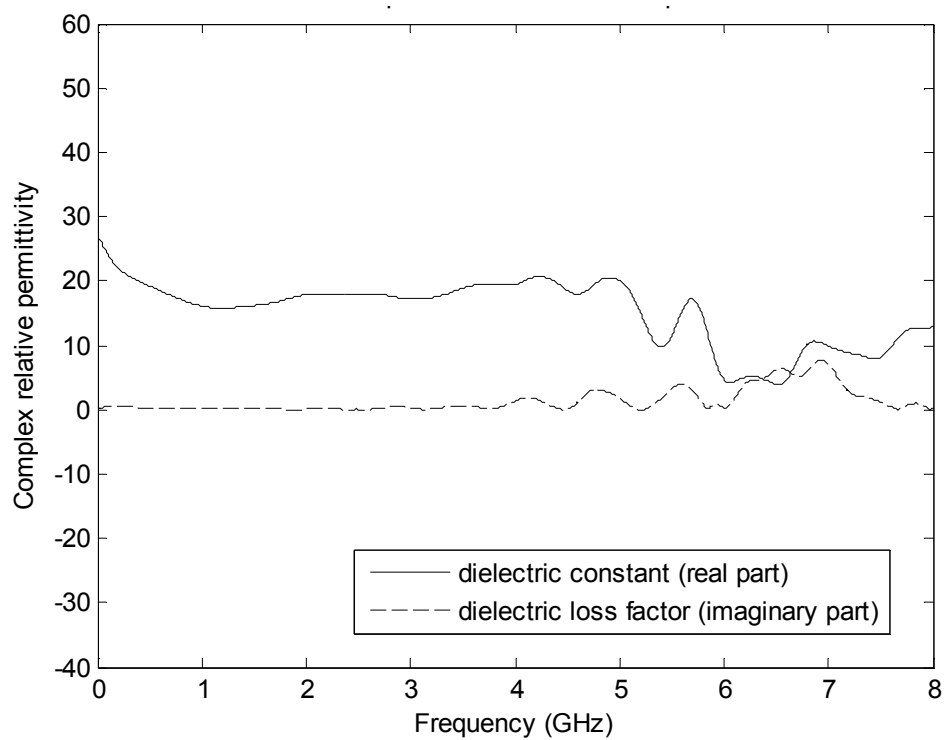
### 3.2.4 การสอบเทียบโพรบแกนร่วมแบบแบน

การสอบเทียบโพรบด้วยโปรแกรมจำลองการทำงานย่านความถี่ไมโครเวฟ โดยสร้างวัสดุทดสอบ 4 ชนิดขึ้นมา คือ วัสดุ A B C และ S ซึ่งมีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนที่แตกต่างกัน คือ 1 10 30 และ 20 ตามลำดับ โดย A B และ C สมมติให้เป็นวัสดุที่ทราบค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อน ส่วน S เป็นวัสดุทดสอบที่ต้องการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อน โครงสร้างการจำลองการทำงานในการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของวัสดุทดสอบ S แสดงในภาพประกอบ 3.10 ซึ่งผลที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนที่กำหนดไว้ นั่นคือ ส่วนจริงใกล้เคียงกับ 20 และส่วนจินตภาพใกล้เคียงกับ 0 แสดงผลในภาพประกอบ 3.11, 3.12



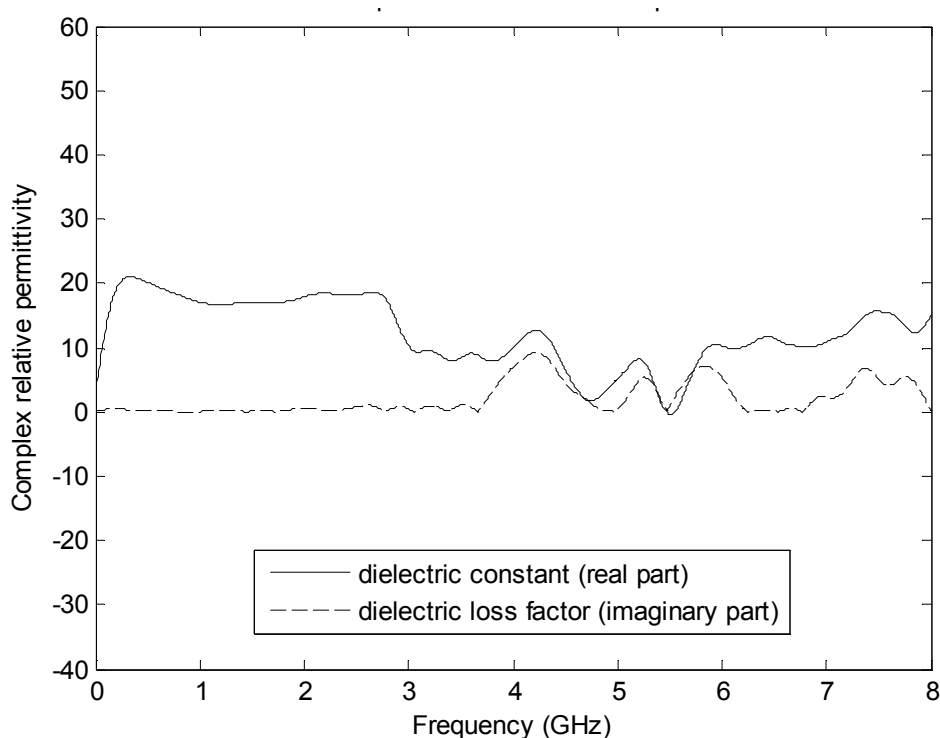


ภาพประกอบ 3.10 การใช้โพรบวัดวัสดุทดสอบที่สร้างขึ้นมา



ภาพประกอบ 3.11 ผลจากการใช้โพรบที่มีรัศมี  $b$  เท่ากับ 3.45 มิลลิเมตร วัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของวัสดุทดสอบที่สร้างขึ้นมา ( $\epsilon_s = 20$ )





ภาพประกอบ 3.12 ผลจากการใช้โพรบที่มีรัศมี  $b$  เท่ากับ 5.745 มิลลิเมตร วัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของวัสดุทดสอบที่สร้างขึ้นมา ( $\epsilon_s = 20$ )

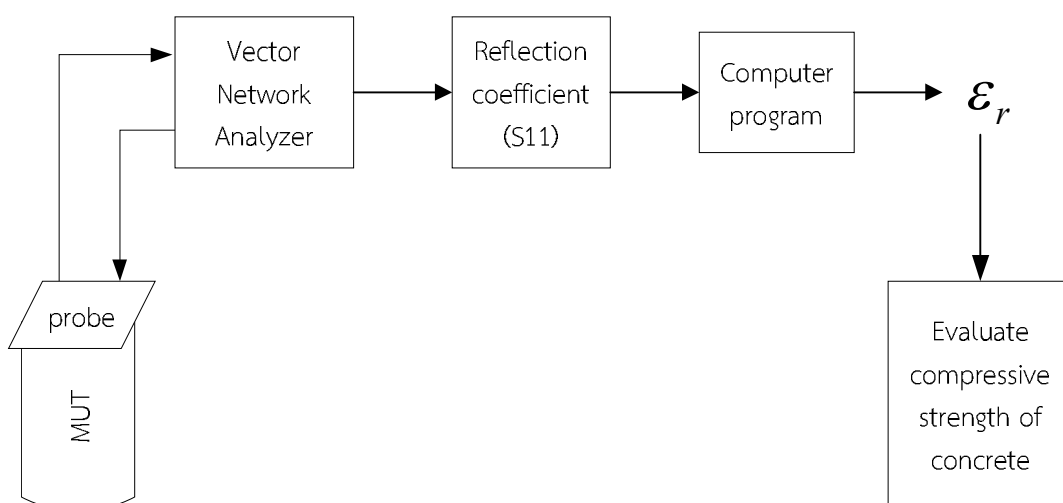
การสอบเทียบโพรบจริงนั้นทำได้โดยการวัดวัสดุมาตรฐาน 4 ชนิดที่ทราบค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อน นั่นคือ น้ำกลั่น เอทานอล เมทานอล และ อากาศ ซึ่งวัสดุ 3 ชนิดจากที่กล่าวมาจะทำหน้าที่เป็นวัสดุมาตรฐานที่ทราบค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อน ส่วน 1 ชนิดที่เหลือจะทำหน้าที่เป็นวัสดุทดสอบที่ไม่ทราบค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อน จากนั้นจะนำค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนที่หาได้ไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากสมการของโคล-โคลของวัสดุทดสอบนั้น ดังแสดงค่าในตาราง 2.1 โดยช่วงความถี่ที่ใช้ในการสอบเทียบโพรบคือ 0.5-6 GHz การสอบเทียบโพรบพบว่าโพรบทั้ง 2 แบบ ให้ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของวัสดุทดสอบที่มีแนวโน้มเป็นไปตามค่าอ้างอิงที่ได้จากสมการของโคล-โคล สำหรับโพรบที่มีรัศมี  $b$  เท่ากับ 3.45 มิลลิเมตร เมื่อความถี่สูงกว่า 3.5 GHz ค่าที่ได้ไม่เป็นไปตามค่าอ้างอิง ส่วนโพรบที่มีรัศมี  $b$  เท่ากับ 5.745 มิลลิเมตร เมื่อความถี่สูงกว่า 2 GHz ค่าที่ได้ไม่เป็นไปตามค่าอ้างอิง





### 3.3 การวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของวัสดุ

การวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของวัสดุที่จำลองขึ้นด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ วัสดุสอบเทียบโพรบและคอนกรีตทดสอบทำได้โดยนำโพรบด้านที่เป็นระนาบกรวดไปแนบกับวัสดุทดสอบที่ต้องการวัด (Material under test: MUT) จากนั้นส่งสัญญาณคลื่นไมโครเวฟผ่านโพรบไปยังวัสดุทดสอบ และรับสัญญาณเอาร์ทพุทไปใช้ในการคำนวณหาค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนต่อไป สัญญาณเอาร์ทพุทที่ได้จากการวัดจะอยู่ในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S11) ซึ่งเป็นจำนวนเชิงซ้อน ในการวัดวัสดุจริงเครื่องมือที่ให้กำเนิดสัญญาณความถี่ไมโครเวฟและประมวลผลสัญญาณที่ได้จากโพรบ คือ เครื่องวิเคราะห์ข่ายงานสื่อสาร (Vector network analyzer: VNA) จากนั้นสัญญาณเอาร์ทพุทที่อยู่ในรูปแบบของค่า สัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ได้จากเครื่อง VNA จะถูกนำไปประมวลผลและคำนวณหาค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนด้วยโปรแกรมคำนวณทางคณิตศาสตร์ จากนั้นจะนำค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนที่คำนวณได้ไปหาความสัมพันธ์และประเมินค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต ดังแสดงในภาพประกอบ 3.13



ภาพประกอบ 3.13 แสดงโครงสร้างของระบบวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตด้วยโพรบแกนร่วมแบบแบน

### 3.4 การคำนวณค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของวัสดุ

สัญญาณเอาร์ทพุทที่ได้จากการวัดที่อยู่ในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S11) จะถูกนำไปคำนวณพร้อมกันกับค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของวัสดุมาตรฐานที่ทราบค่าดังกล่าวด้วยสมการต่อไปนี้

$$\frac{(\epsilon_S - \epsilon_A)(\epsilon_B - \epsilon_C)}{(\epsilon_S - \epsilon_B)(\epsilon_C - \epsilon_A)} = \frac{(\Gamma_S - \Gamma_A)(\Gamma_B - \Gamma_C)}{(\Gamma_S - \Gamma_B)(\Gamma_C - \Gamma_A)} \quad (3.6)$$



เมื่อ $\varepsilon_A$ $\varepsilon_B$ และ $\varepsilon_C$	คือ	ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของวัสดุมาตรฐาน ที่ใช้ในการสอบเทียบ (วัสดุ A B และ C ตามลำดับ)
$\varepsilon_S$	คือ	ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของวัสดุทดสอบ (วัสดุ S)
$\Gamma_A$ $\Gamma_B$ $\Gamma_C$ และ $\Gamma_S$	คือ	ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนที่ได้จากการวัดวัสดุ A B C และ S ตามลำดับ

### 3.5 การเตรียมชิ้นงานทดสอบ

การเตรียมชิ้นงานทดสอบที่จะนำมาศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนและค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเพื่อใช้ในการประเมินกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตโดยไม่ต้องทำการทดสอบแบบทำลายนั้นอ้างอิงมาตรฐาน ACI ในการออกแบบส่วนผสม ซึ่งการออกแบบวัสดุส่วนผสมที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานมีดังนี้

3.5.1 ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตามมาตรฐาน มอก. 80-2517 ปริมาณที่ใช้คือ 350 315 280 และ 245 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามระดับการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่ร้อยละ 0 10 20 และ 30 ตามลำดับ โดยคอนกรีตที่มีระดับการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่ร้อยละ 0 จะถูกเรียกว่า คอนกรีตควบคุม (Concrete control)

3.5.2 เถ้าแกลบจากเตาเผาโรงต้มเกลือ อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม โดยทำการบดละเอียดให้ปริมาณค้างตะแกรงเบอร์ 325 ไม่เกิน 5% ปริมาณที่ใช้คือ 35 70 และ 105 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามระดับการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่ร้อยละ 10 20 และ 30 ตามลำดับ

3.5.3 ทราเยมน้ำในสภาพอิมตัวผิวแห้ง (Saturated surface dry: SSD) ปริมาณที่ใช้คือ 874 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

3.5.4 หินขนาด 3/4 นิ้ว ปริมาณที่ใช้คือ 1,080 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

3.5.5 น้ำประปา ปริมาณที่ใช้คือ 157.50 192.55 และ 2227.50 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ตามอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) ที่ 0.45 0.55 และ 0.65 ตามลำดับ

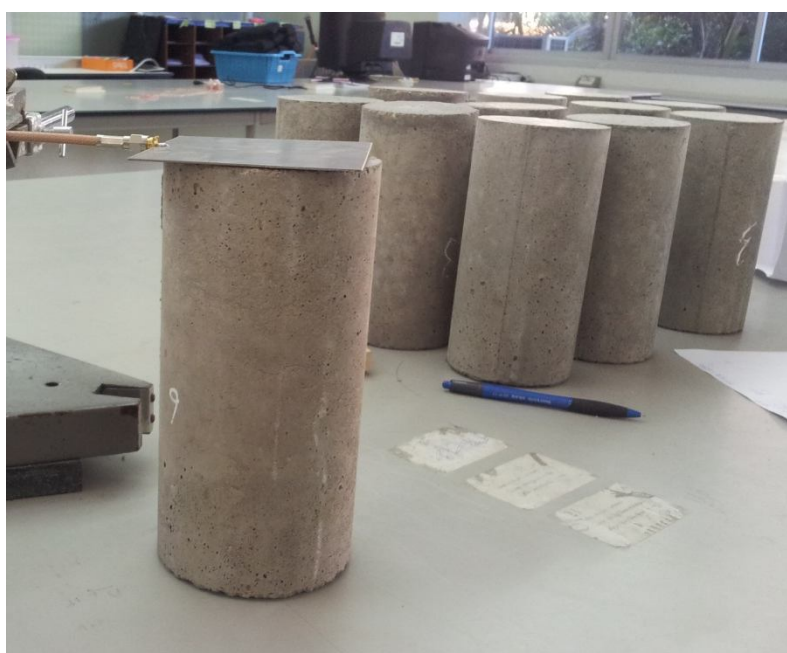
โดยอุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการเตรียมชิ้นงานได้แก่ เครื่องผสมคอนกรีต แบบหล่อทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร ชุดทดสอบการยุบตัวของคอนกรีต เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด ตะแกรงร่อนทราย เกรียง ซ้อนตัก แปรงทาน้ำมัน น้ำมันสำหรับทาแบบหล่อ อุปกรณ์สำหรับกระทุ้ง

ส่วนผสมทั้งหมดจะถูกผสมและทำการหล่อชิ้นงานในแบบหล่อ โดยกำหนดให้ค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่ 10-15 เซนติเมตรและถอดแบบที่อายุคอนกรีต 1 วัน จากนั้นนำชิ้นงานไปบ่มในน้ำทดสอบกำลังรับแรงอัดและวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนที่อายุคอนกรีต 7 28 และ 90 วัน โดยใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.45 0.55 และ 0.65 ซึ่งคอนกรีตตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองแบ่งออกเป็น 36 ชุด ชุดละ 3 ตัวอย่าง รวมทั้งหมดเป็น 108 ก้อน ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง (25 องศา



เซลเซียส) โดยคอนกรีตตัวอย่างจะถูกนำขึ้นจากน้ำ เช็ดให้แห้งและตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 1 วันก่อนจะนำไปทดสอบหาค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนและทดสอบกำลังรับแรงอัด

การทดสอบกำลังรับแรงอัดของชิ้นงานทรงกระบอกอ้างอิงมาตรฐาน ASTM C39 : standard test method for compressive strength of cylindrical specimens วิธีการทดสอบกำลังรับแรงอัดทำได้โดยการนำชิ้นงานตัวอย่างวางให้ตรงกึ่งกลางกับเครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัด โดยให้ส่วนหน้าแคบเป็นส่วนรับแรงอัด ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดโดยการกดชิ้นงานตัวอย่างจนแตกเพื่อให้ทราบค่ากำลังรับแรงอัด โดยจะทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดจำนวน 3 ตัวอย่างในแต่ละส่วนผสม ซึ่งให้ค่าความน่าเชื่อถือของข้อมูล 90% โดยการคำนวณถูกแสดงไว้ในภาคผนวก ญ. ส่วนรูปร่างและขนาดของชิ้นงานแสดงในภาพประกอบ 3.14



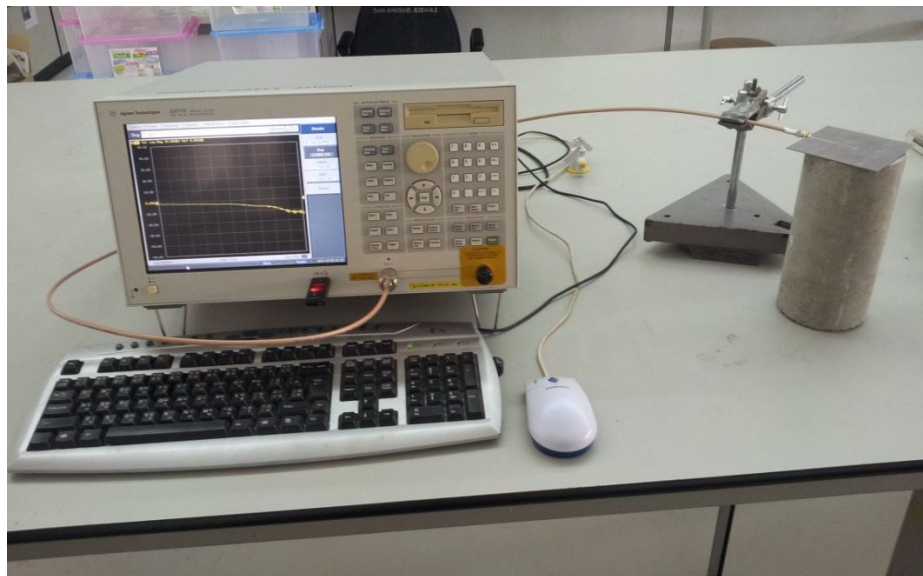
ภาพประกอบ 3.14 รูปร่างและขนาดของคอนกรีตตัวอย่าง

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและการอภิปราย

#### 4.1 บทนำ

บทนี้นำเสนอผลการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตตัวอย่าง โดยเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยโพรบแกนร่วมแบบแบน เครื่องวิเคราะห์ข่ายงานสี่สาย (Agilent E5071B ENA series network analyzer) ขาดั่ง ที่ยึดโพรบ และคอมพิวเตอร์ ดังแสดงในภาพประกอบ 4.1 ซึ่งจะทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง ผลที่ได้จากการวัดคือ ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ (S11) ซึ่งค่าดังกล่าวจะถูกนำไปหาคำนวณเพื่อหาค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตตัวอย่าง ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนที่ได้จะแบ่งแสดงออกเป็น 2 รูปแบบ คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกหรือส่วนจริงของค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อน และค่าสภาพนำไฟฟ้าซึ่งได้จากการนำส่วนจินตภาพของค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนไปคำนวณ ผลการทดลองจะถูกแสดงในรูปแบบความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนและค่าสภาพนำไฟฟ้ากับความถี่ที่ทำการทดลอง ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าสภาพนำไฟฟ้ากับอายุของคอนกรีต และความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าสภาพนำไฟฟ้ากับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตตัวอย่าง เพื่อใช้ในการประเมินค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตโดยไม่ต้องทำลายโครงสร้างของคอนกรีต



ภาพประกอบ 4.1 ระบบการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตตัวอย่าง



## 4.2 การเตรียมคอนกรีตตัวอย่าง

คอนกรีตตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองจะถูกแบ่งออกเป็น 36 ชุด โดยแต่ละชุดจะมีคอนกรีตตัวอย่าง 3 ตัวอย่างเพื่อหาค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตตัวอย่าง โดยคอนกรีตตัวอย่างจะถูกวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อน 6 ชั่วโมงที่ตำแหน่งแตกต่างกันโดยการสุ่ม ตำแหน่งของการวัดคือ ส่วนหน้าแคบ หรือส่วนที่เป็นพื้นที่หน้าตัดขวางของตัวอย่างทรงกระบอก โดยเลือกด้านที่มีผิวหน้าเรียบเป็นด้านที่จะทำการวัด สำหรับค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้จากการทดสอบนั้นให้ผลดังแสดงในตาราง 4.1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เมื่ออัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) และระดับการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตตัวอย่างมีค่าลดลง ส่วนผลของอายุของคอนกรีตที่มากขึ้นจะได้ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตตัวอย่างเพิ่มขึ้น และมีค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตตัวอย่างสูงสุดที่อายุของคอนกรีต 90 วัน ของทุกเงื่อนไขการทดลอง

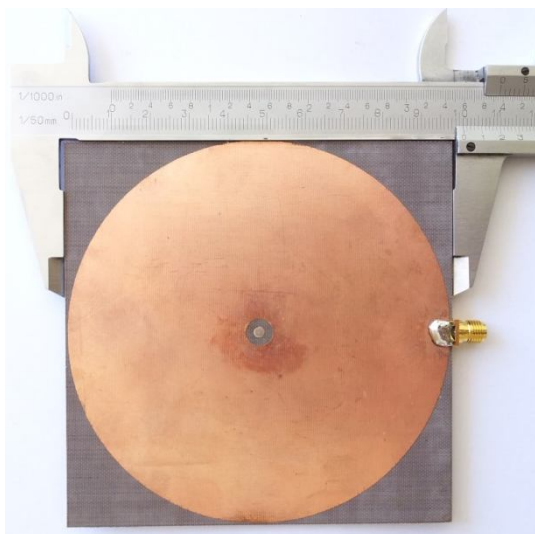
ตาราง 4.1 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตตัวอย่าง

อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B)	ระดับการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบ (เปอร์เซ็นต์)	ค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงอัด (กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร)		
		7 วัน	28 วัน	90 วัน
0.45	0	372.62 ±3.20	424.84 ±13.38	503.19 ±6.37
	10	200.64 ±3.20	317.20 ±11.47	335.04 ±11.47
	20	181.53 ±9.55	243.32 ±1.28	259.88 ±5.10
	30	130.56 ±3.20	180.89 ±12.74	233.76 ±1.91
0.55	0	296.13 ±15.88	345.23 ±11.47	429.94 ±3.20
	10	257.52 ±3.63	303.19 ±5.10	340.13 ±8.92
	20	221.28 ±4.72	264.34 ±3.20	302.16 ±9.94
	30	210.19 ±6.37	245.23 ±3.20	281.53 ±3.82
0.65	0	197.45 ±6.37	300.64 ±2.54	381.21 ±5.41
	10	194.27 ±3.20	243.06 ±16.31	278.98 ±6.37
	20	156.06 ±3.20	210.19 ±6.37	240.77 ±1.28
	30	140.13 ±6.37	184.71 ±6.37	229.20 ±0.1

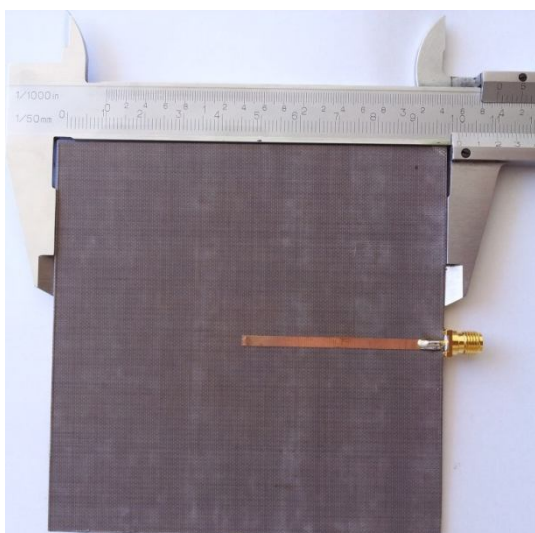
## 4.3 การเตรียมโพรบแกนร่วมแบบแบน

โพรบแกนร่วมแบบแบนถูกสร้างขึ้นบนแผ่นวงจรพิมพ์ความถี่สูง Arlon AD260A โดยโครงสร้างของโพรบแสดงดังภาพประกอบ 4.2-4.3



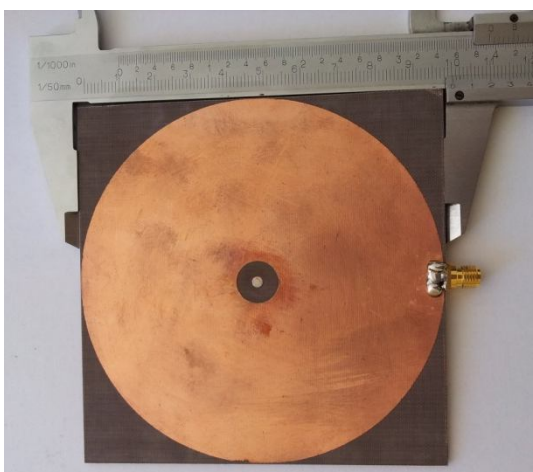


(ก) รัศมีของโพรบมีรัศมี  $a$  เท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร รัศมี  $b$  เท่ากับ 3.45 มิลลิเมตร

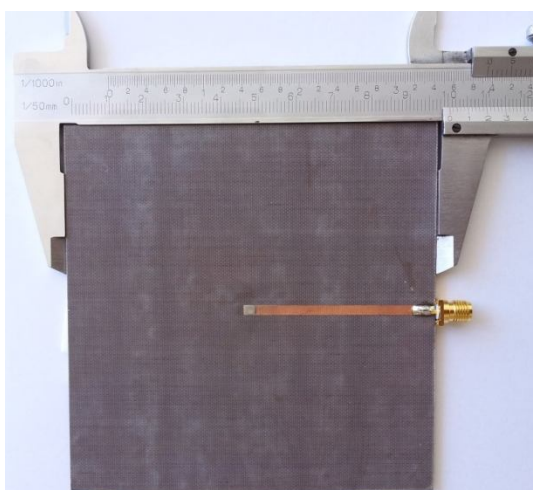


(ข) สตรีปที่มีความยาว 5.14 เซนติเมตร

ภาพประกอบ 4.2 โพรบแกนร่วมแบบแบนที่มีรัศมี รัศมี  $b$  เท่ากับ 3.45 มิลลิเมตร



(ก) ระบายกราวด์ของโพรบมีรัศมี  $a$  เท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร รัศมี  $b$  เท่ากับ 5.745 มิลลิเมตร



(ข) สตรีปที่มีความยาว 5.14 เซนติเมตร

ภาพประกอบ 4.3 โพรบแกนร่วมแบบแบนที่มีรัศมี  $b$  เท่ากับ 5.745 มิลลิเมตร

ในการทดลองเลือกใช้โพรบที่มีรัศมี  $a$  เท่ากับ 1.5 มิลลิเมตร รัศมี  $b$  เท่ากับ 3.45 มิลลิเมตร แสดงในภาพประกอบ 4.2 เนื่องจากให้ช่วงความถี่ในการทำงานที่กว้างกว่าคือ 0.5-3.5 GHz และในการทดลองเลือกใช้น้ำกลั่น เมทานอล และอากาศ เป็นวัสดุมาตรฐาน เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตตัวอย่าง

#### 4.4 ผลการทดลองการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบ

4.4.1 ผลของความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนและค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบกับความถี่ที่ทำการทดลอง

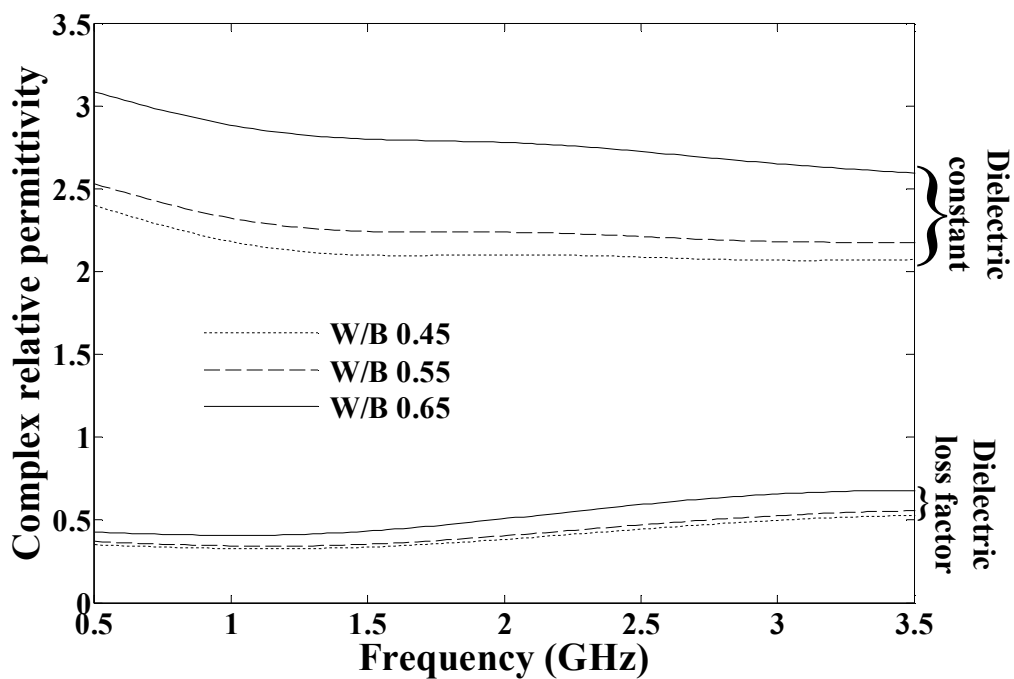
การทดลองเพื่อหาค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนและค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบด้วยการใช้โพรบแกนร่วมแบบแบนที่มีรัศมี  $b$  เท่ากับ 3.45 มิลลิเมตร นั้นทำได้โดยการส่งคลื่นความถี่ 0.5-3.5 GHz เข้าไปในคอนกรีตตัวอย่าง จากนั้นนำค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ ( $S_{11}$ ) ที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์ข่ายงานสื่อสารมาคำนวณหาค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตตัวอย่าง ( $\epsilon_r'$ ) โดยส่วนจริงของค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อน คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของคอนกรีตตัวอย่าง ( $\epsilon_r'$ ) และส่วนจินตภาพของค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อน คือ ตัวประกอบการสูญเสียของคอนกรีตตัวอย่าง ( $\epsilon_r''$ ) ซึ่งส่วนจินตภาพนั้นจะถูกนำไปคำนวณเพื่อหาค่าสภาพนำไฟฟ้า ( $\sigma$ ) ของคอนกรีตตัวอย่าง

จากผลการทดลองวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตตัวอย่างที่ระดับการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่ 10% 20% และ 30% ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 0.55 และ 0.65 อายุคอนกรีต 7 28 และ 90 วัน พบว่า ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบมีการเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ที่ใช้ในการวัด ซึ่งค่าคงที่ไดอิเล็กตริกนั้นมีแนวโน้มลดลงเมื่อความถี่ที่ใช้ในการวัดนั้นเพิ่มขึ้น แต่ที่อายุคอนกรีต 7 และ 28 วัน มีแนวโน้มการลดลงของค่ามากกว่าที่อายุคอนกรีต 90 วัน ดังนั้นจึงเลือกแสดงกราฟของผลการทดลองที่อายุคอนกรีต 90 วัน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงนั้นค่อนข้างคงที่

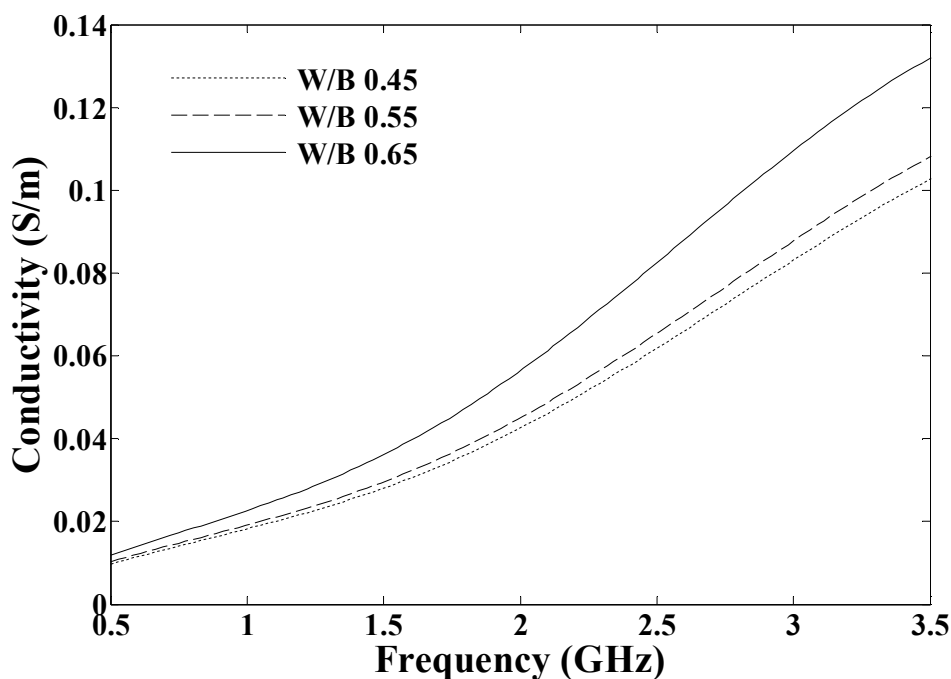
สำหรับค่าตัวประกอบการสูญเสียนั้นพบว่าจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่ที่ใช้ในการทดลองเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าสภาพนำไฟฟ้ามียุทธศาสตร์เพิ่มขึ้นเมื่อความถี่ที่ใช้ในการทดลองเพิ่มขึ้นเช่นกัน ทั้งนี้เนื่องจากค่าสภาพนำไฟฟ้านั้นมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกับค่าตัวประกอบการสูญเสียดังสมการ (2.5) ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 ซึ่งผลการทดลองแสดงดังภาพประกอบ 4.4 - 4.11





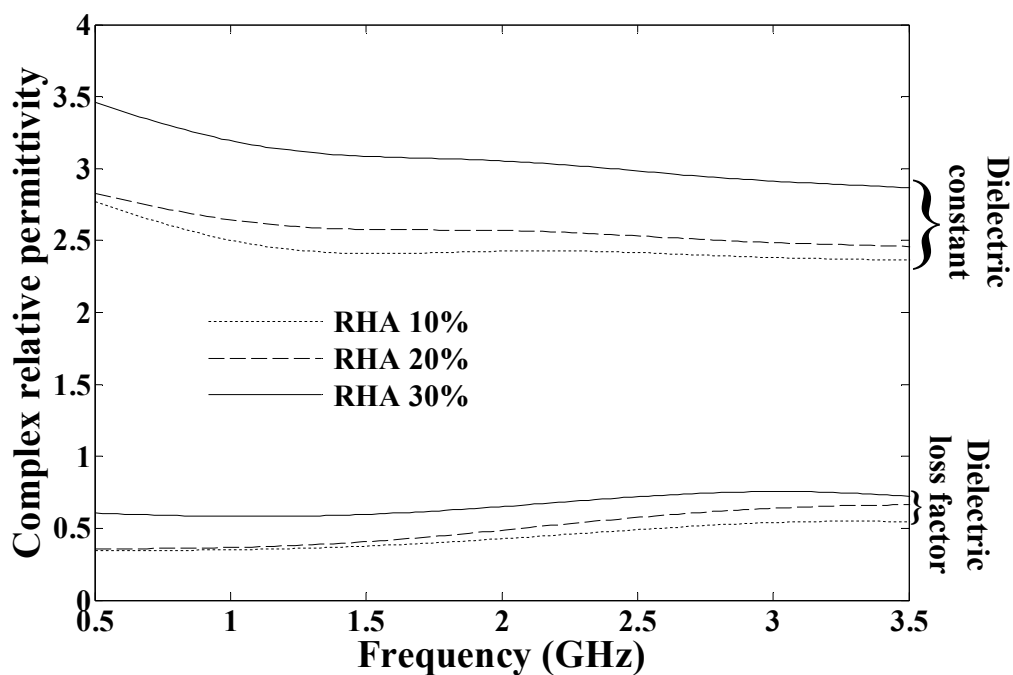


ภาพประกอบ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตควบคุมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่แตกต่างกันที่อายุคอนกรีต 90 วัน กับความถี่ที่ทำการทดลอง

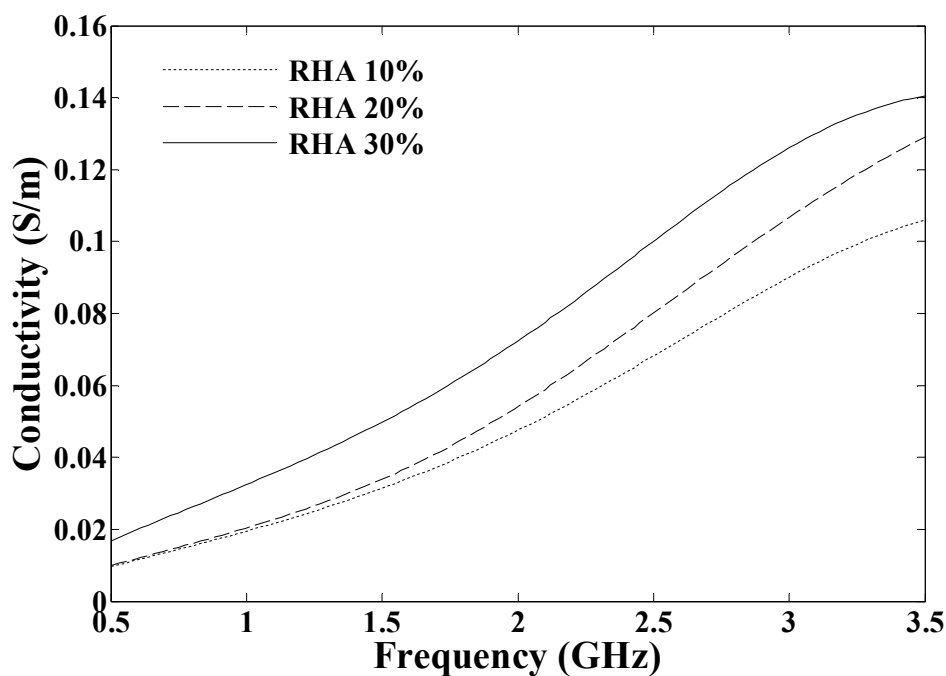


ภาพประกอบ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตควบคุมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่แตกต่างกันที่อายุคอนกรีต 90 วัน กับความถี่ที่ทำการทดลอง



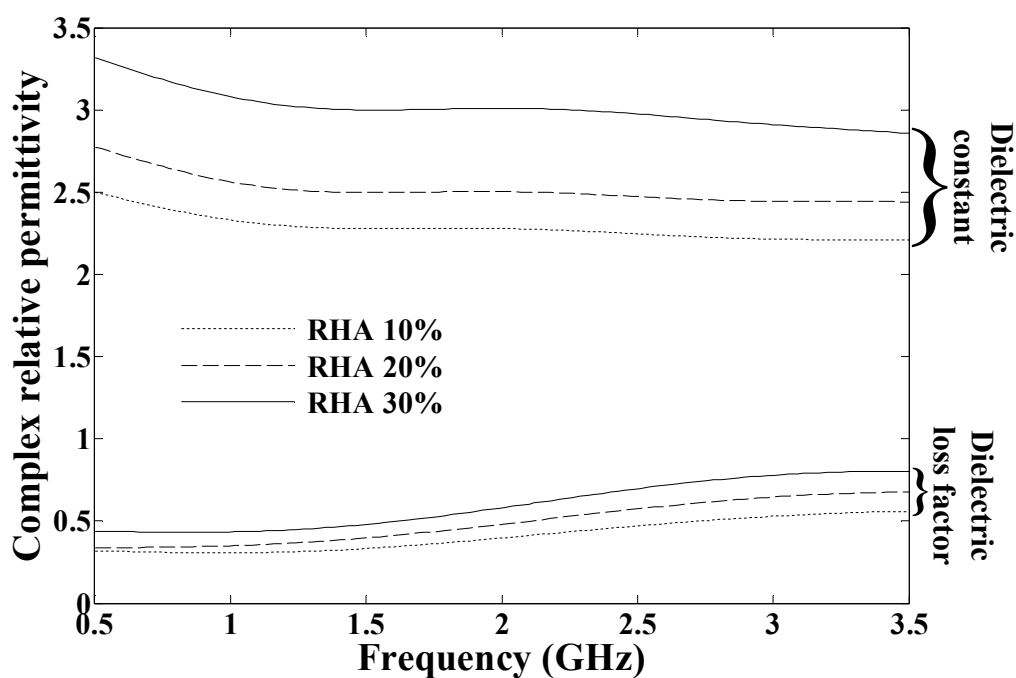


ภาพประกอบ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตตัวอย่างที่ระดับการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่แตกต่างกันที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 ที่อายุคอนกรีต 90 วัน กับความถี่ที่ทำการทดลอง

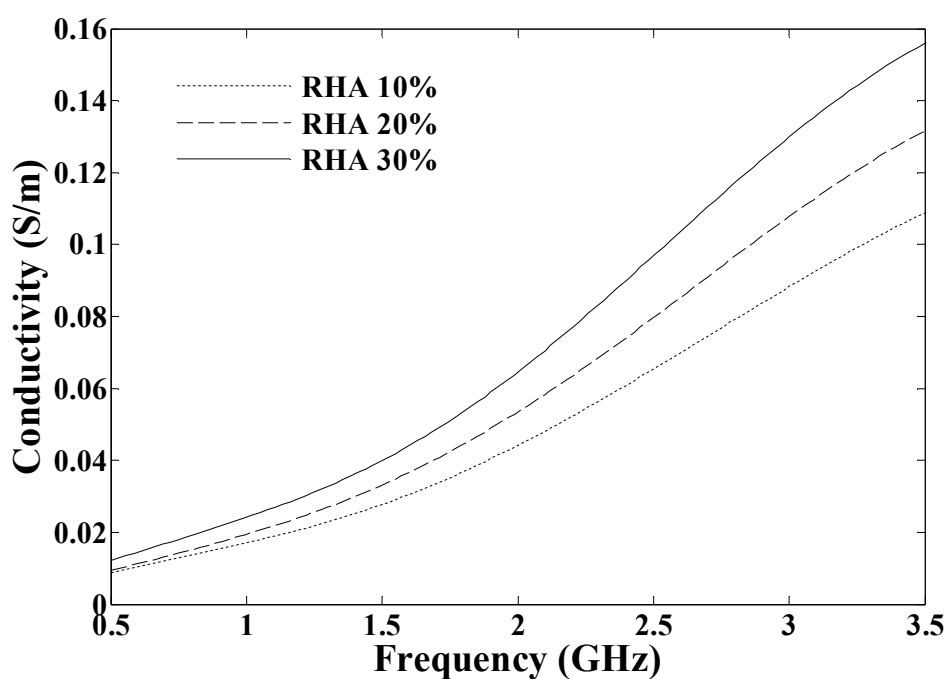


ภาพประกอบ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตตัวอย่างที่ระดับการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่แตกต่างกันที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 ที่อายุคอนกรีต 90 วัน กับความถี่ที่ทำการทดลอง



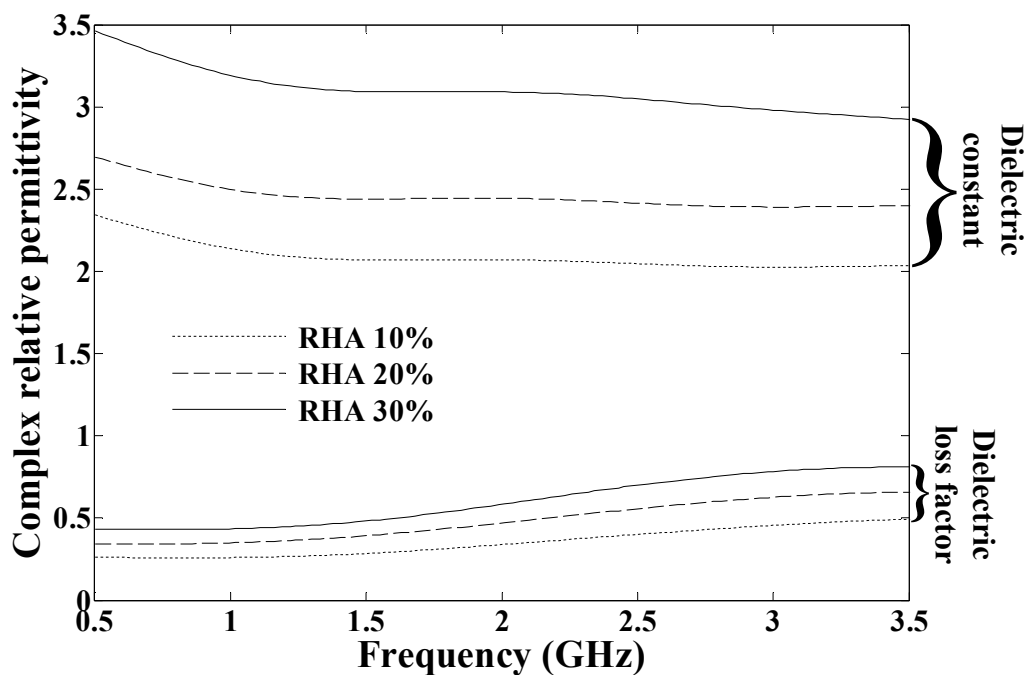


ภาพประกอบ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตตัวอย่างที่ระดับการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่แตกต่างกันที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 ที่อายุคอนกรีต 90 วัน กับความถี่ที่ทำการทดลอง

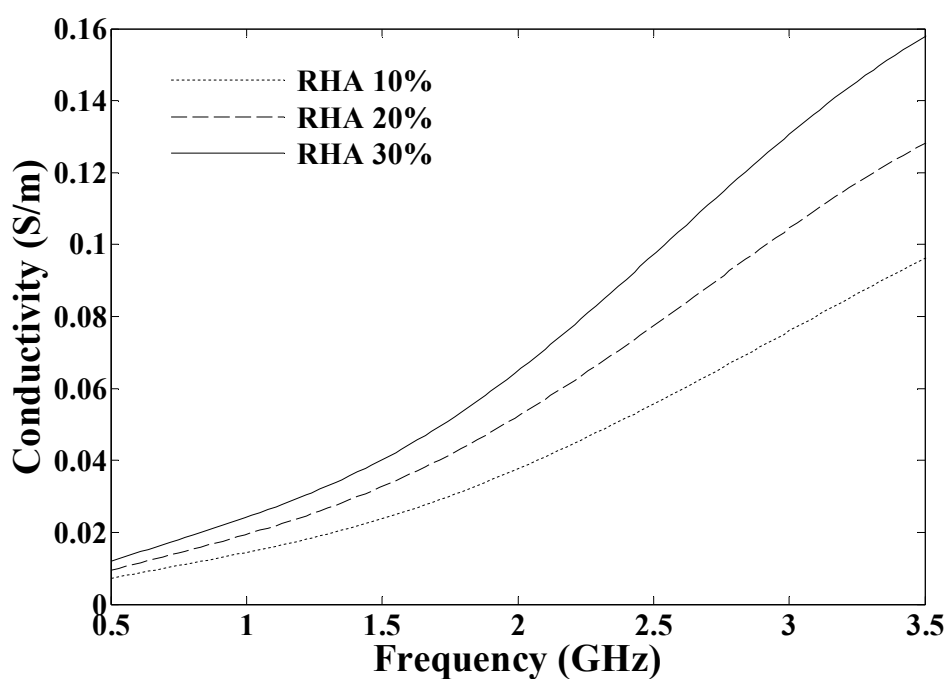


ภาพประกอบ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตตัวอย่างที่ระดับการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่แตกต่างกันที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 ที่อายุคอนกรีต 90 วัน กับความถี่ที่ทำการทดลอง





ภาพประกอบ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตตัวอย่างที่ระดับการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่แตกต่างกันที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 ที่อายุคอนกรีต 90 วัน กับความถี่ที่ทำการทดลอง



ภาพประกอบ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตตัวอย่างที่ระดับการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่แตกต่างกันที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 ที่อายุคอนกรีต 90 วัน กับความถี่ที่ทำการทดลอง



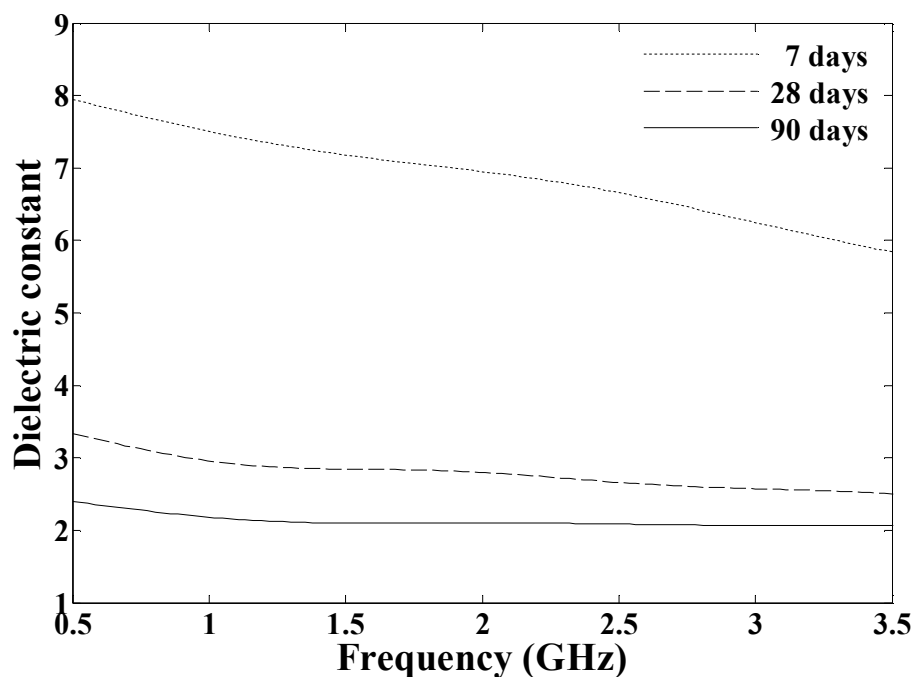
จากผลการทดสอบเพื่อหาค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตควบคุมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ 0.45 0.55 และ 0.65 ทั้ง 3 อายุทดสอบคือ 7 28 และ 90 วัน พบว่าค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนและค่าสภาพนำไฟฟ้าสูงสุดอยู่ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 และให้ค่าต่ำสุดที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45

จากการทดลองค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมีแนวโน้มลดลงและค่าตัวประกอบการสูญเสียมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่ที่ใช้ในการวัดนั้นเพิ่มขึ้น เนื่องจาก โดยทั่วไปนั้นอะตอมหรือโมเลกุลประกอบไปด้วยกลุ่มของประจุบวกกับประจุลบซึ่งประจุเหล่านั้นไม่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ แต่เมื่อมีสนามไฟฟ้าจากภายนอกเข้าไปกระทำกับโมเลกุลที่มีขั้วของคอนกรีตจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า Dipole polarization หรือการที่ประจุบวกและกลุ่มของอิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากตำแหน่งสมดุลเกิดเป็นไดโพลที่มีการเรียงตัวในทิศทางเดียวกันกับสนามภายนอกที่ไปกระทำ และปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้ทำให้เกิดการสะสมของประจุไฟฟ้าจนกลายเป็นสนามไฟฟ้าภายใน (Internal electric field) ที่ความถี่ต่ำ จะทำให้มีเวลามากในการสะสมประจุไฟฟ้าในสนามไฟฟ้าภายใน ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจึงมีค่าสูง และสนามไฟฟ้าจากภายนอกมีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ อยู่ตลอดเวลาทำให้การเรียงตัวหรือการสั่นของ ไดโพลเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ เกิดความร้อนน้อย ทำให้สมบัติของวัสดุทั้งเชิงกลและการเป็นฉนวนไม่สูญเสียไป ตัวประกอบการสูญเสียของไดอิเล็กตริกจึงมีค่าต่ำ ในทางตรงกันข้าม หากความถี่มีค่าสูง จะทำให้มีเวลาน้อยในการสะสมประจุไฟฟ้าในสนามภายใน ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจึงมีค่าลดลง อีกทั้งไดโพลไม่สามารถปรับตัวและเรียงตัวไปตามทิศทางของสนามไฟฟ้าจากภายนอกที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว จึงเกิดความร้อนสูง และทำให้สมบัติของวัสดุทั้งเชิงกลและการเป็นฉนวนสูญเสียไป ตัวประกอบการสูญเสียของไดอิเล็กตริกจึงมีค่าเพิ่มขึ้น

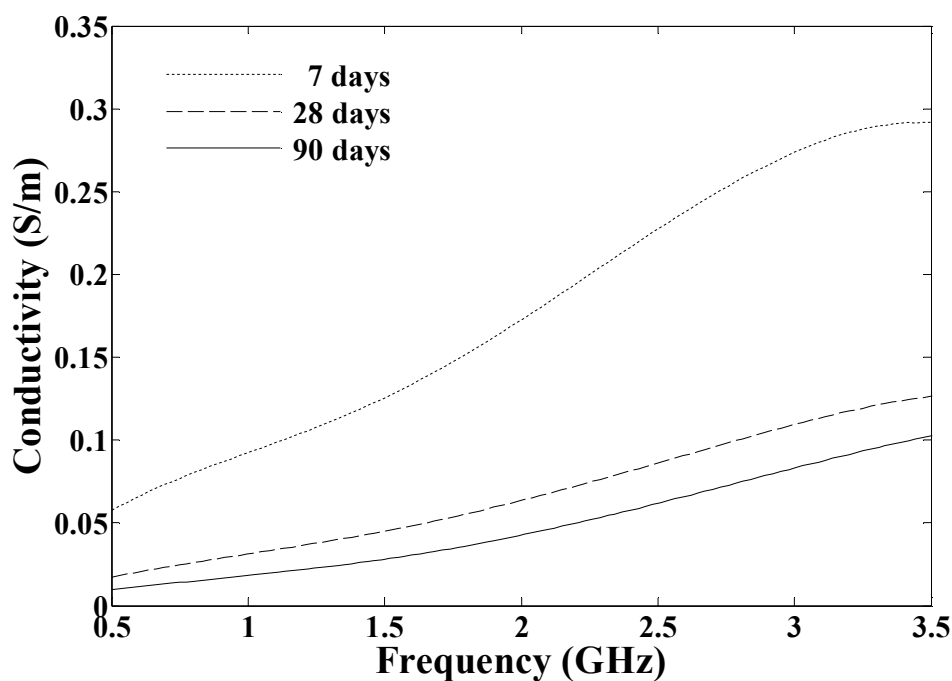
4.4.2 ผลของความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบกับอายุคอนกรีต

จากผลการทดลองเพื่อหาค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบด้วยการใช้โพรบแกนร่วมแบบแบนที่มีรัศมี  $b$  เท่ากับ 3.45 มิลลิเมตร ในช่วงความถี่ 0.5-3.5 GHz พบว่า คอนกรีตตัวอย่างที่ได้ทำการวิเคราะห์ไปนั้นให้ผลการทดลองไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งหากพิจารณาในแง่ของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าสภาพนำไฟฟ้า เมื่ออายุของคอนกรีตตัวอย่างเพิ่มขึ้นค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าสภาพนำไฟฟ้ามีแนวโน้มลดลง ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตควบคุมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 และคอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่ร้อยละ 10 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 0.55 และ 0.65 กับความถี่ในช่วง 0.5-3.5 GHz ที่อายุคอนกรีต 7 28 และ 90 วัน แสดงดังภาพประกอบ 4.12 - 4.19



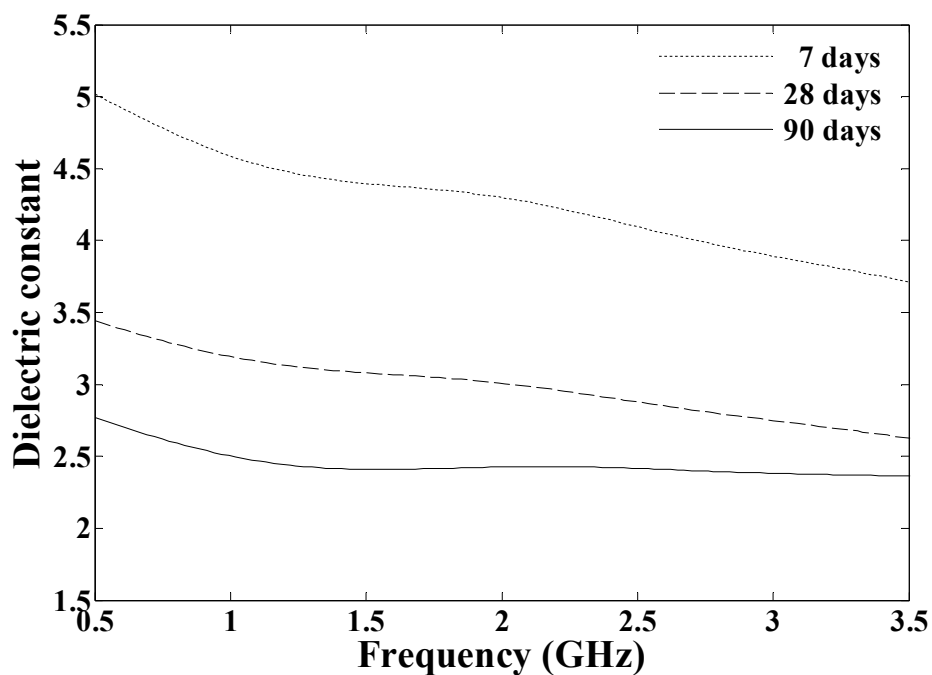


ภาพประกอบ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของคอนกรีตควบคุมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 กับความถี่ในช่วง 0.5-3.5 GHz ที่อายุคอนกรีตตัวอย่าง 7, 28 และ 90 วัน

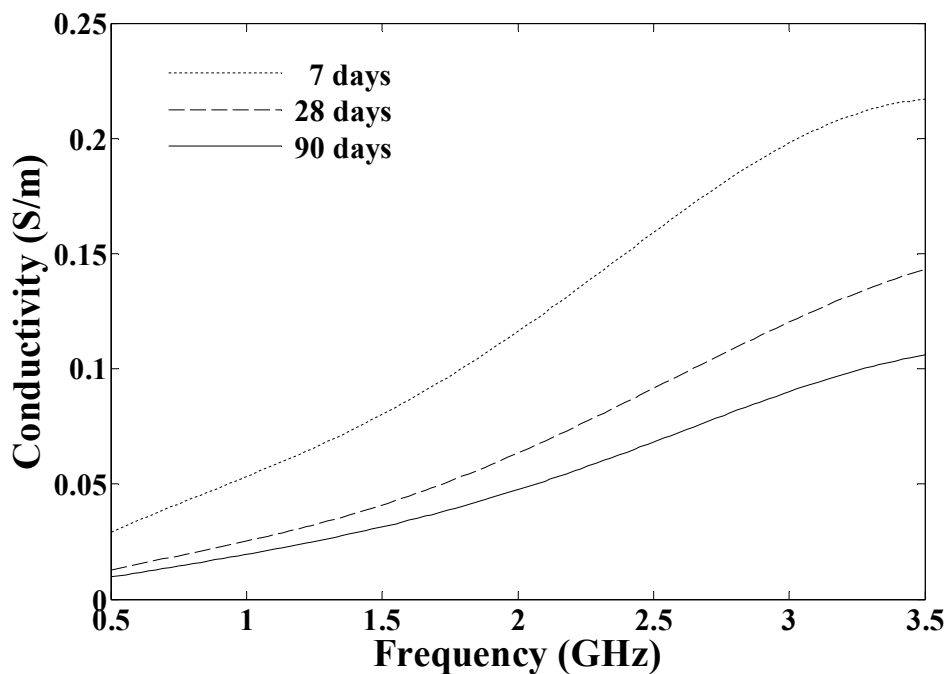


ภาพประกอบ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตควบคุมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 กับความถี่ในช่วง 0.5-3.5 GHz ที่อายุคอนกรีตตัวอย่าง 7, 28 และ 90 วัน



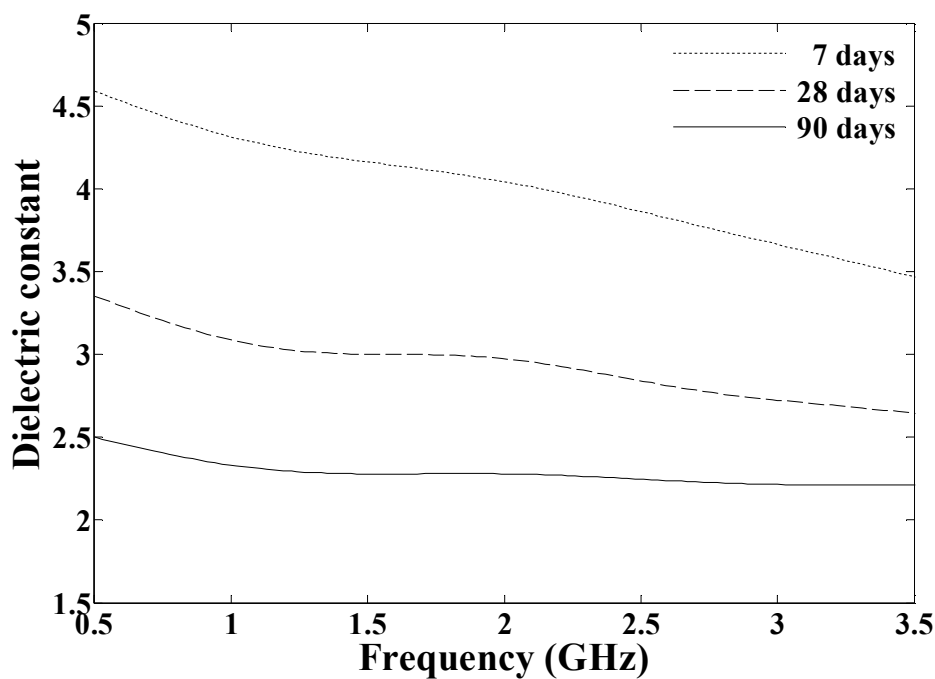


ภาพประกอบ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของคอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่ร้อยละ 10 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 กับความถี่ในช่วง 0.5-3.5 GHz ที่อายุคอนกรีตตัวอย่าง 7 28 และ 90 วัน

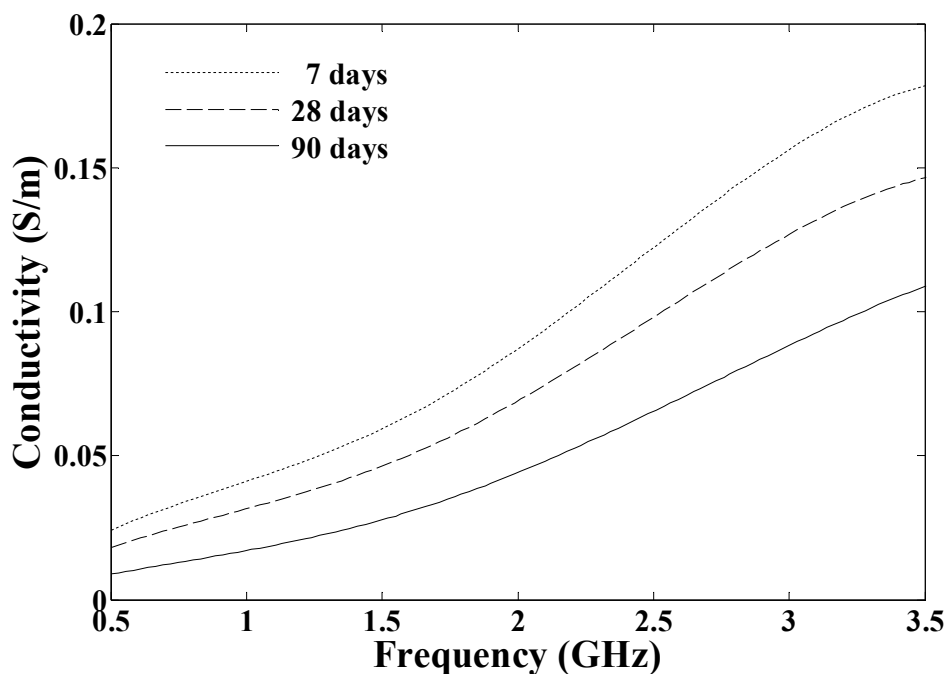


ภาพประกอบ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่ร้อยละ 10 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 กับความถี่ในช่วง 0.5-3.5 GHz ที่อายุคอนกรีตตัวอย่าง 7 28 และ 90 วัน





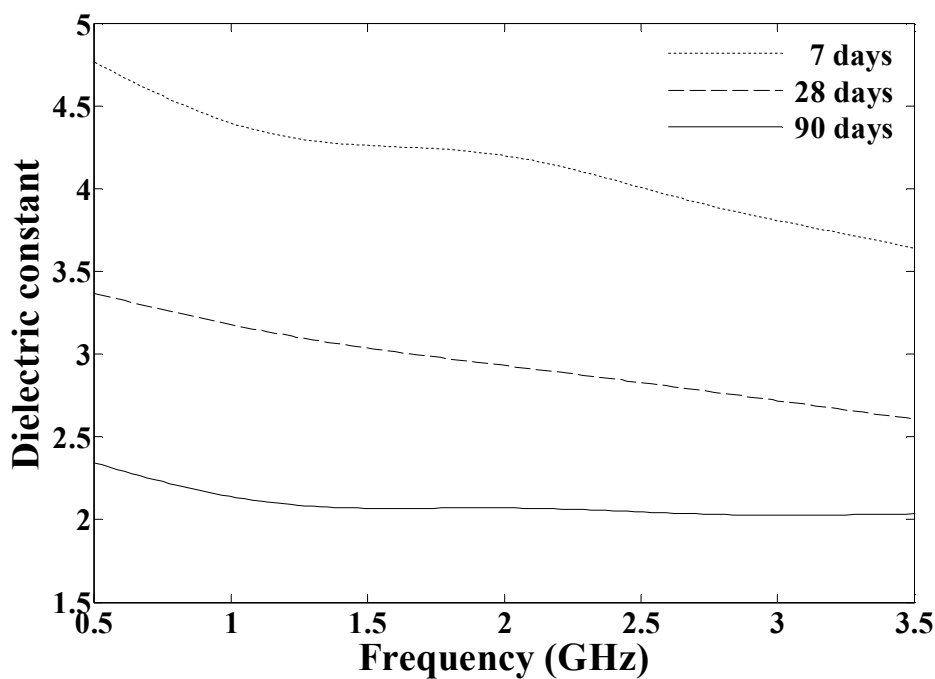
ภาพประกอบ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของคอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่ร้อยละ 10 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 กับความถี่ในช่วง 0.5-3.5 GHz ที่อายุคอนกรีตตัวอย่าง 7 28 และ 90 วัน



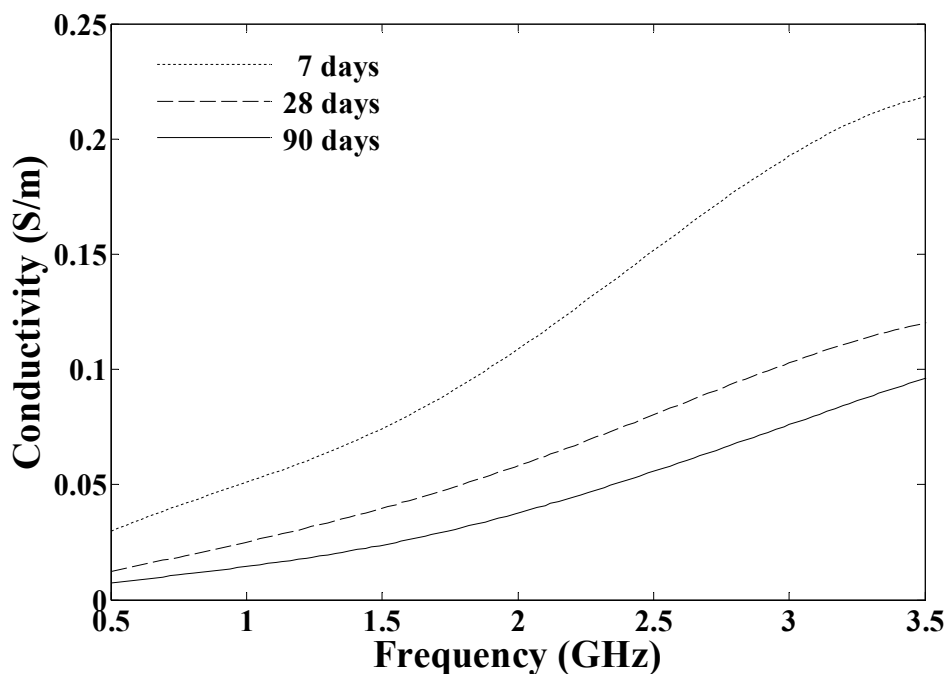
ภาพประกอบ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่ร้อยละ 10 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 กับความถี่ในช่วง 0.5-3.5 GHz ที่อายุคอนกรีตตัวอย่าง 7 28 และ 90 วัน







ภาพประกอบ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของคอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่ร้อยละ 10 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 กับความถี่ในช่วง 0.5-3.5 GHz ที่อายุคอนกรีตตัวอย่าง 7 28 และ 90 วัน



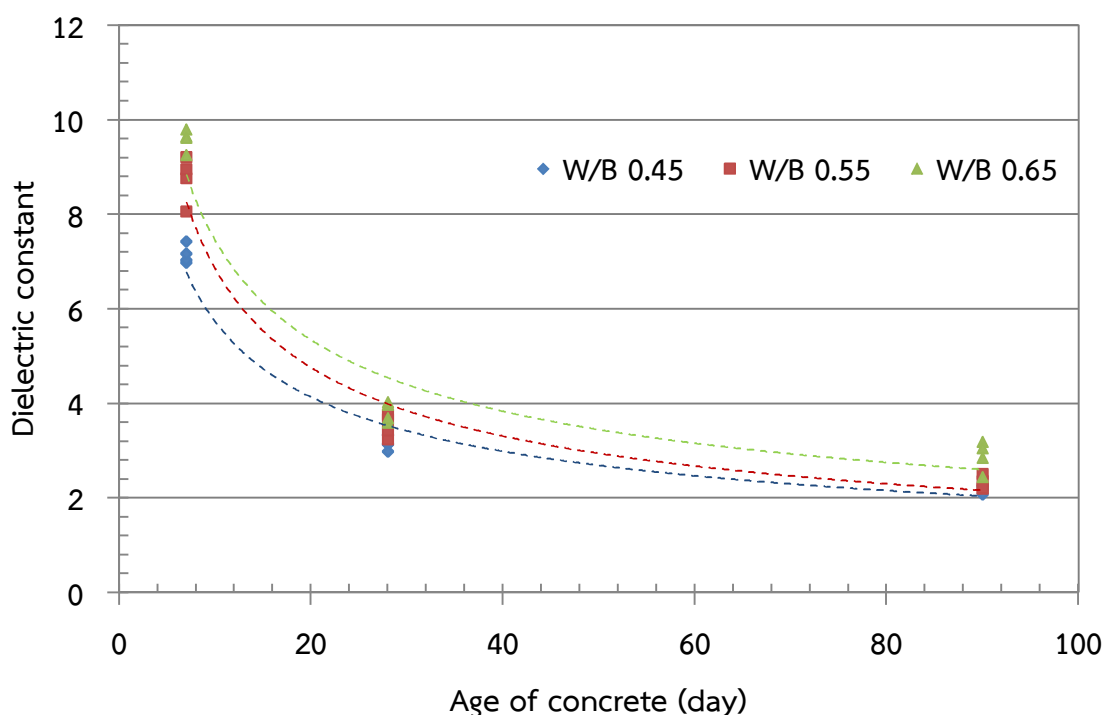
ภาพประกอบ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่ร้อยละ 10 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 กับความถี่ในช่วง 0.5-3.5 GHz ที่อายุคอนกรีตตัวอย่าง 7 28 และ 90 วัน



โดยทั่วไปน้ำมีค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนสูงกว่าส่วนประกอบอื่น ๆ ของคอนกรีต ดังนั้นน้ำถือเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีต เมื่ออายุของคอนกรีตมากขึ้น น้ำในส่วนผสมของคอนกรีตถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาไฮเดรชัน บางส่วนระเหยและบางส่วนถูกดูดซึมเข้าไปในอนุภาคของเถ้าแกลบ จึงทำให้ปริมาณน้ำอิสระ (Free water) ในคอนกรีตลดลง เมื่อปริมาณน้ำซึ่งเป็นโมเลกุลที่มีขั้วลดลง จึงทำให้เกิดโพลาลิเซชันน้อยลง อีกทั้งเมื่ออายุคอนกรีตที่เพิ่มขึ้น โครงสร้างรูพรุนในคอนกรีตมีขนาดเล็กกลง ทำให้การเคลื่อนที่ของประจุผ่านรูพรุนนั้นยากขึ้น ส่งผลให้ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีต (ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าสภาพนำไฟฟ้า) มีค่าลดลง

จากผลการทดลองเลือกพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของคอนกรีตควบคู่และคอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบกับอายุคอนกรีตตัวอย่างที่ 7 28 และ 90 วัน ที่ความถี่เดียว คือ 1 GHz เนื่องจากเป็นความถี่ที่ให้ค่าความต่างระหว่างค่าสูงสุดกับค่าต่ำสุดของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมากที่สุด และเมื่อความถี่ที่ใช้ในการทดลองเพิ่มขึ้น ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะลู่เข้าหากัน ดังนั้นความถี่เดียวที่เลือกใช้ต้องเป็นความถี่ต่ำ และพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตควบคู่และคอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบกับอายุคอนกรีตตัวอย่างที่ 7 28 และ 90 วัน ที่ความถี่เดียว คือ 3.2 GHz เนื่องจากเป็นความถี่ที่ให้ค่าความต่างระหว่างค่าสูงสุดกับค่าต่ำสุดของค่าสภาพนำไฟฟ้ามากที่สุด และในช่วงความถี่ต่ำค่าสภาพนำไฟฟ้าจะลู่เข้าหากัน ดังนั้นความถี่เดียวที่เลือกใช้ต้องเป็นความถี่สูง ผลที่ได้แสดงในภาพประกอบ 4.20-4.27





ภาพประกอบ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ได้อิเล็กทริกของคอนกรีตควบคุมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่แตกต่างกันกับอายุคอนกรีต

ผลการทดลองในภาพประกอบ 4.20 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ได้อิเล็กทริกของคอนกรีตควบคุมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่แตกต่างกันกับอายุคอนกรีตตัวอย่างที่ 7 28 และ 90 วัน มีเส้นแนวโน้มเป็นแบบเลขยกกำลัง โดยมีสมการของเส้นแนวโน้มและสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-squared:  $R^2$ ) ดังนี้

$$D_{0.45} = 16.879A^{-0.469}, \quad R^2 = 0.9681 \quad (4.1)$$

$$D_{0.55} = 22.874A^{-0.524}, \quad R^2 = 0.9652 \quad (4.2)$$

$$D_{0.65} = 22.386A^{-0.478}, \quad R^2 = 0.9257 \quad (4.3)$$

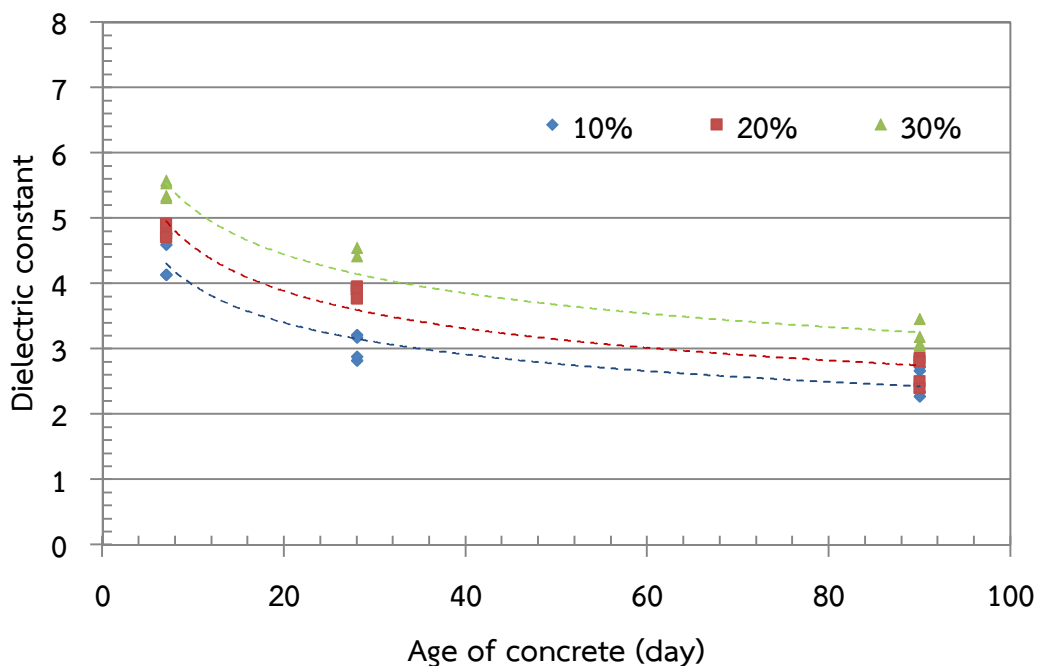
เมื่อ D คือ ค่าคงที่ได้อิเล็กทริกของคอนกรีต

A คือ อายุของคอนกรีต

$R^2$  คือ สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

ตัวห้อยของตัวแปร D คือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) ที่ 0.45 0.55 และ 0.65





ภาพประกอบ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของคอนกรีตตัวอย่างที่ระดับการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบแตกต่างกันที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 กับอายุคอนกรีต

ผลการทดลองในภาพประกอบ 4.21 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของคอนกรีตตัวอย่างที่ระดับการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบแตกต่างกันที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 กับอายุคอนกรีตตัวอย่างที่ 7 28 และ 90 วัน มีเส้นแนวโน้มเป็นแบบเลขยกกำลัง โดยมีสมการของเส้นแนวโน้มและสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) ดังนี้

$$D_{10\%} = 6.6563A^{-0.224}, \quad R^2 = 0.9073 \quad (4.4)$$

$$D_{20\%} = 7.7575A^{-0.23}, \quad R^2 = 0.9183 \quad (4.5)$$

$$D_{30\%} = 8.3018A^{-0.208}, \quad R^2 = 0.9544 \quad (4.6)$$

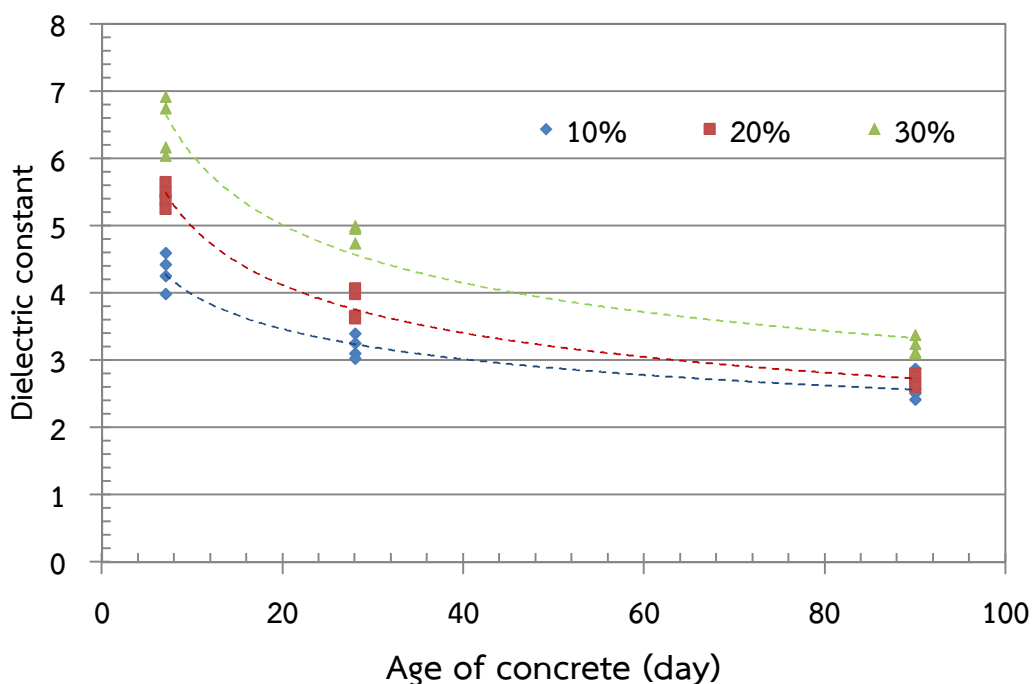
เมื่อ  $D$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของคอนกรีต

$A$  คือ อายุของคอนกรีต

$R^2$  คือ สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

ตัวห้อยของตัวแปร  $D$  คือ ระดับการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่ 10% 20% และ 30%





ภาพประกอบ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของคอนกรีตตัวอย่างที่ระดับการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบแตกต่างกันที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 กับอายุคอนกรีต

ผลการทดลองในภาพประกอบ 4.22 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของคอนกรีตตัวอย่างที่ระดับการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบแตกต่างกันที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 กับอายุคอนกรีตตัวอย่างที่ 7 28 และ 90 วัน มีเส้นแนวโน้มเป็นแบบเลขยกกำลัง โดยมีสมการของเส้นแนวโน้มและสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) ดังนี้

$$D_{10\%} = 6.3129A^{-0.2}, \quad R^2 = 0.9346 \quad (4.7)$$

$$D_{20\%} = 9.3658A^{-0.274}, \quad R^2 = 0.9809 \quad (4.8)$$

$$D_{30\%} = 11.318A^{-0.272}, \quad R^2 = 0.9509 \quad (4.9)$$

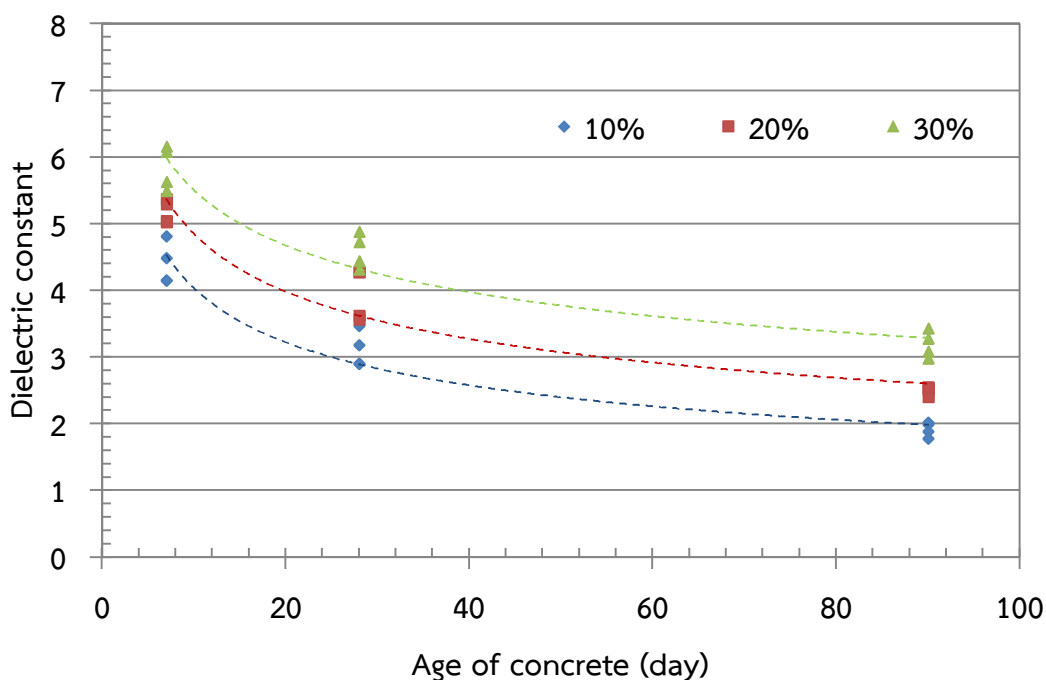
เมื่อ D คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของคอนกรีต

A คือ อายุของคอนกรีต

$R^2$  คือ สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

ตัวห้อยของตัวแปร D คือ ระดับการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่ 10% 20% และ 30%





ภาพประกอบ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของคอนกรีตตัวอย่างที่ระดับการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบแตกต่างกันที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 กับอายุคอนกรีต

ผลการทดลองในภาพประกอบ 4.23 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของคอนกรีตตัวอย่างที่ระดับการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบแตกต่างกันที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 กับอายุคอนกรีตตัวอย่างที่ 7 28 และ 90 วัน มีเส้นแนวโน้มเป็นแบบเลขยกกำลัง โดยมีสมการของเส้นแนวโน้มและสัมประสิทธิ์การตัดล้นใจ (R-squared:  $R^2$ ) ดังนี้

$$D_{10\%} = 8.4884A^{-0.323}, \quad R^2 = 0.9468 \quad (4.10)$$

$$D_{20\%} = 9.3087A^{-0.2834}, \quad R^2 = 0.9346 \quad (4.11)$$

$$D_{30\%} = 9.4565A^{-0.235}, \quad R^2 = 0.9341 \quad (4.12)$$

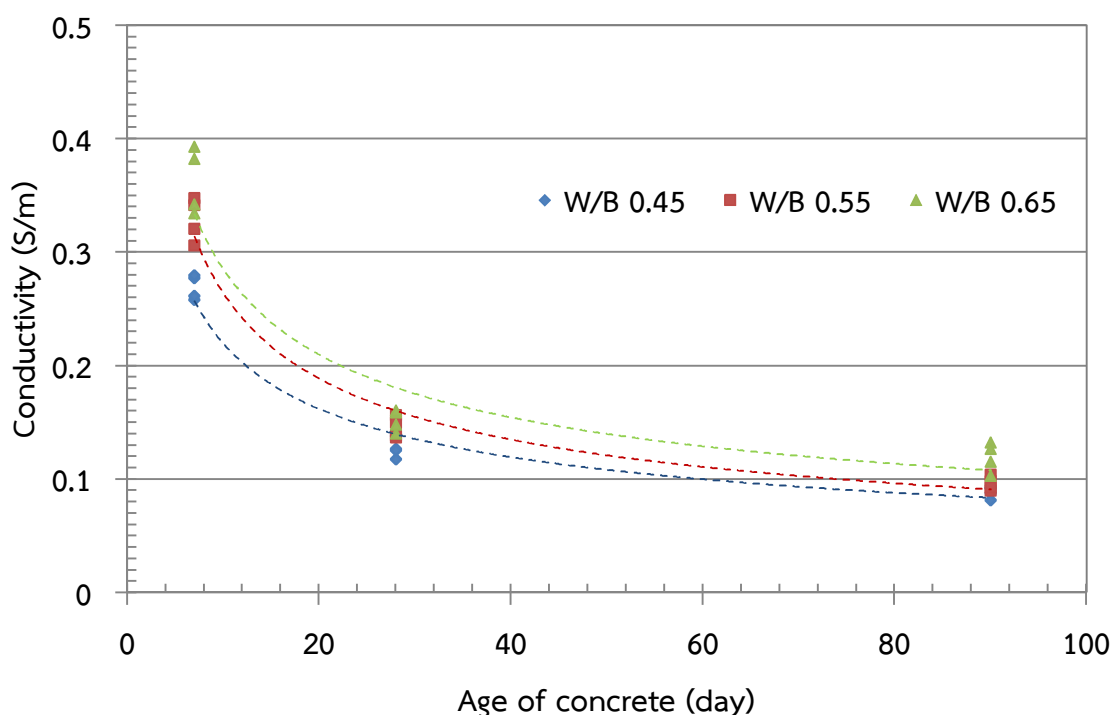
เมื่อ D คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของคอนกรีต

A คือ อายุของคอนกรีต

$R^2$  คือ สัมประสิทธิ์การตัดล้นใจ

ตัวห้อยของตัวแปร D คือ ระดับการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่ 10% 20% และ 30%





ภาพประกอบ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตควบคุมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่แตกต่างกันกับอายุคอนกรีตตัวอย่างที่ 7 28 และ 90 วัน

ผลการทดลองในภาพประกอบ 4.24 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตควบคุมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่แตกต่างกันกับอายุคอนกรีตตัวอย่างที่ 7 28 และ 90 วัน มีเส้นแนวโน้มเป็นแบบเลขยกกำลัง โดยมีสมการของเส้นแนวโน้มและสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-squared:  $R^2$ ) ดังนี้

$$C_{0.45} = 0.6048A^{-0.44}, \quad R^2 = 0.9671 \quad (4.13)$$

$$C_{0.55} = 0.8058A^{-0.484}, \quad R^2 = 0.9696 \quad (4.14)$$

$$C_{0.65} = 0.7894A^{-0.442}, \quad R^2 = 0.9092 \quad (4.15)$$

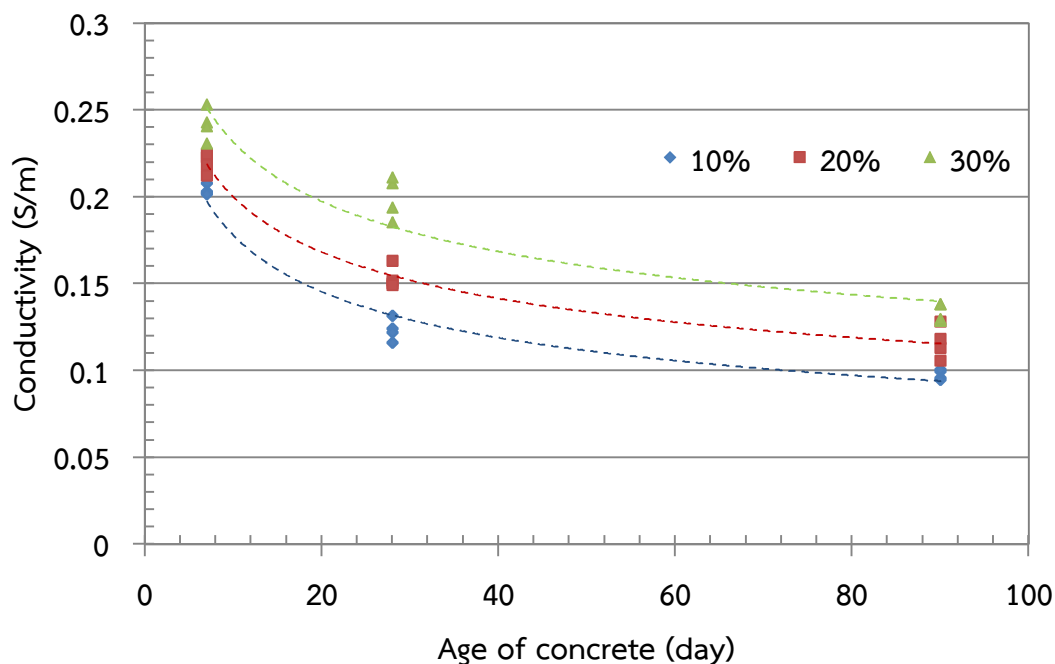
เมื่อ C คือ ค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีต

A คือ อายุของคอนกรีต

$R^2$  คือ สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

ตัวห้อยของตัวแปร C คือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) ที่ 0.45 0.55 และ 0.65





ภาพประกอบ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตตัวอย่างที่ระดับการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเส้นใยแก้วแตกต่างกันที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 กับอายุคอนกรีต

ผลการทดลองในภาพประกอบ 4.25 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตตัวอย่างที่ระดับการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเส้นใยแก้วแตกต่างกันที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 กับอายุคอนกรีตตัวอย่างที่ 7 28 และ 90 วัน มีเส้นแนวโน้มเป็นแบบเลขยกกำลัง โดยมีสมการของเส้นแนวโน้มและสัมประสิทธิ์การตัดล้นใจ (R-squared:  $R^2$ ) ดังนี้

$$C_{10\%} = 0.3474A^{-0.29}, \quad R^2 = 0.9658 \quad (4.16)$$

$$C_{20\%} = 0.3556A^{-0.25}, \quad R^2 = 0.9674 \quad (4.17)$$

$$C_{30\%} = 0.3927A^{-0.229}, \quad R^2 = 0.9149 \quad (4.18)$$

เมื่อ C คือ ค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีต

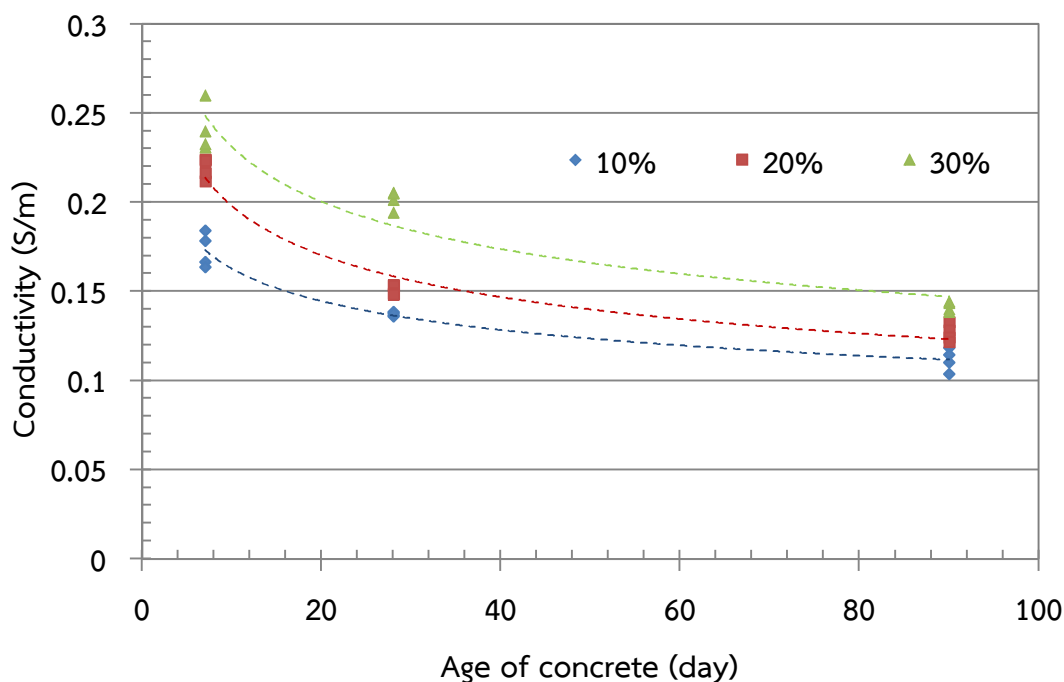
A คือ อายุของคอนกรีต

$R^2$  คือ สัมประสิทธิ์การตัดล้นใจ

ตัวห้อยของตัวแปร C คือ ระดับการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเส้นใยแก้วที่ 10% 20% และ 30%







ภาพประกอบ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตตัวอย่างที่ระดับการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบแตกต่างกันที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 กับอายุคอนกรีต

ผลการทดลองในภาพประกอบ 4.26 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตตัวอย่างที่ระดับการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบแตกต่างกันที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 กับอายุคอนกรีตตัวอย่างที่ 7 28 และ 90 วัน มีเส้นแนวโน้มเป็นแบบเลขยกกำลัง โดยมีสมการของเส้นแนวโน้มและสัมประสิทธิ์การตัดล้นใจ (R-squared:  $R^2$ ) ดังนี้

$$C_{10\%} = 0.2418A^{-0.172}, \quad R^2 = 0.9522 \quad (4.19)$$

$$C_{20\%} = 0.3255A^{-0.216}, \quad R^2 = 0.9648 \quad (4.20)$$

$$C_{30\%} = 0.3710A^{-0.206}, \quad R^2 = 0.9258 \quad (4.21)$$

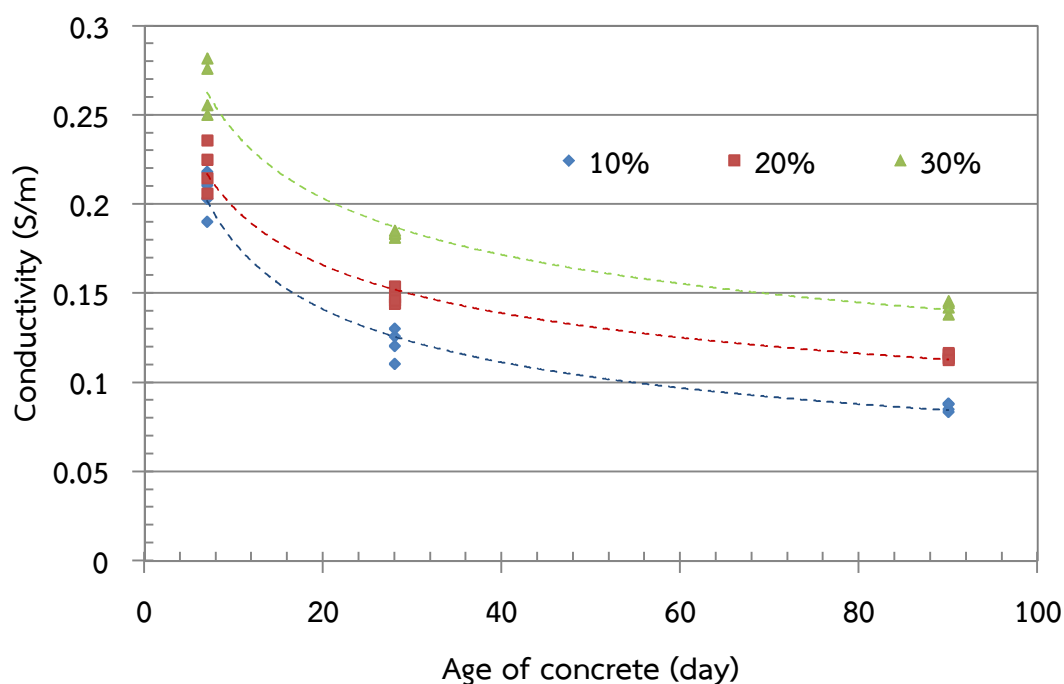
เมื่อ C คือ ค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีต

A คือ อายุของคอนกรีต

$R^2$  คือ สัมประสิทธิ์การตัดล้นใจ

ตัวห้อยของตัวแปร C คือ ระดับการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่ 10% 20% และ 30%





ภาพประกอบ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตตัวอย่างที่ระดับการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบแตกต่างกันที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 กับอายุคอนกรีต

ผลการทดลองในภาพประกอบ 4.27 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตตัวอย่างที่ระดับการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบแตกต่างกันที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 กับอายุคอนกรีตตัวอย่างที่ 7 28 และ 90 วัน มีเส้นแนวโน้มเป็นแบบเลขยกกำลัง โดยมีสมการของเส้นแนวโน้มและสัมประสิทธิ์การตัดล้นใจ (R-squared:  $R^2$ ) ดังนี้

$$C_{10\%} = 0.3925A^{-0.341}, \quad R^2 = 0.9772 \quad (4.22)$$

$$C_{20\%} = 0.3573A^{-0.256}, \quad R^2 = 0.9791 \quad (4.23)$$

$$C_{30\%} = 0.4227A^{-0.244}, \quad R^2 = 0.9815 \quad (4.24)$$

เมื่อ C คือ ค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีต

A คือ อายุของคอนกรีต

$R^2$  คือ สัมประสิทธิ์การตัดล้นใจ

ตัวห้อยของตัวแปร C คือ ระดับการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่ 10% 20% และ 30%

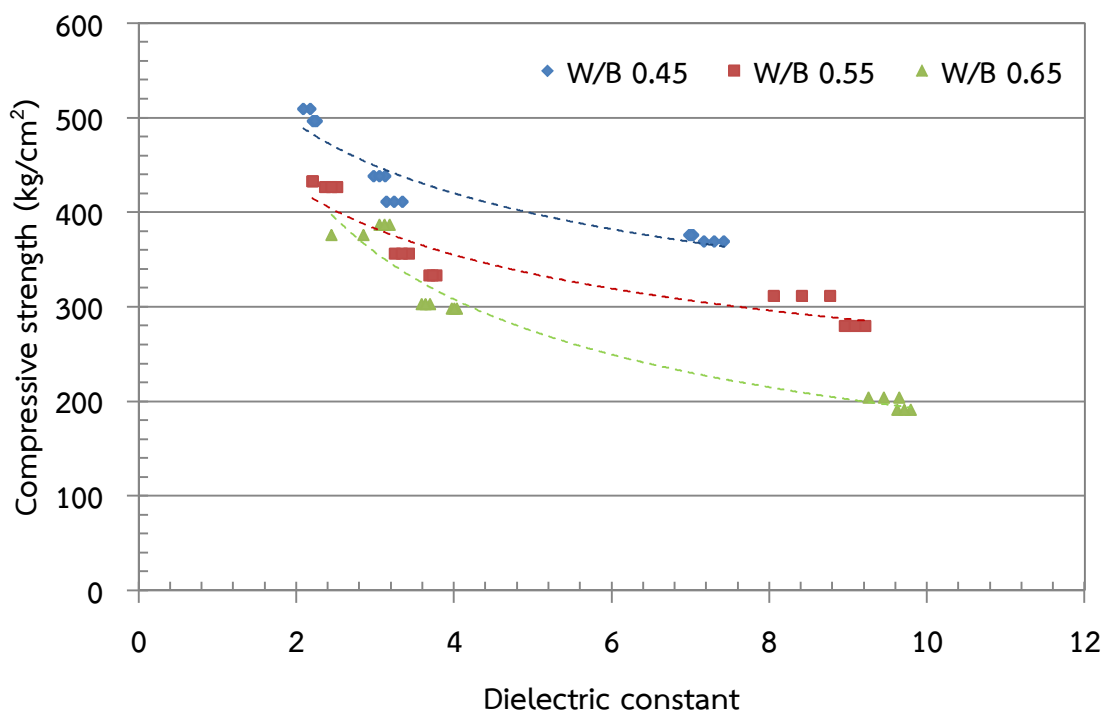


4.4.3 ผลของความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตตัวอย่าง

จากผลการทดลองเลือกพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 0.55 และ 0.65 กับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ความถี่เดียว คือ 1 GHz เนื่องจากเป็นความถี่ที่ให้ค่าความต่างระหว่างค่าสูงสุดกับค่าต่ำสุดของค่าคงที่ไดอิเล็กตริกมากที่สุดและเมื่อความถี่ที่ใช้ในการทดลองเพิ่มขึ้นค่าคงที่ไดอิเล็กตริกจะลู่เข้าหากัน ดังนั้นความถี่เดียวที่เลือกใช้ต้องเป็นความถี่ต่ำและพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 0.55 และ 0.65 กับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ความถี่เดียว คือ 3.2 GHz เนื่องจากเป็นความถี่ที่ให้ค่าความต่างระหว่างค่าสูงสุดกับค่าต่ำสุดของค่าสภาพนำไฟฟ้ามากที่สุด และในช่วงความถี่ต่ำค่าสภาพนำไฟฟ้าจะลู่เข้าหากัน ดังนั้นความถี่เดียวที่เลือกใช้ต้องเป็นความถี่สูง หากพิจารณาในแง่ของความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าสภาพนำไฟฟ้ากับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตตัวอย่างที่ได้จากการทดลอง พบว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตตัวอย่างมีค่าลดลงเมื่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น ความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงในภาพประกอบ 4.28 - 4.35

จากค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตตัวอย่างในตาราง 4.1 สำหรับคอนกรีตควบคุมนั้น กำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเมื่อลดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน และสำหรับทุกเงื่อนไขของตัวอย่างคอนกรีต กำลังรับแรงอัดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออายุของคอนกรีตมากขึ้น และจากหัวข้อ 4.4.2 ที่ได้กล่าวไว้แล้วว่า น้ำถือเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีต เมื่ออายุของคอนกรีตมากขึ้น น้ำในส่วนผสมของคอนกรีตถูกนำไปใช้ในปฏิกิริยาไฮเดรชัน บางส่วนระเหยและบางส่วนถูกดูดซึมเข้าไปในอนุภาคของเถ้าแกลบ จึงทำให้ปริมาณน้ำอิสระ (Free water) ในคอนกรีตลดลง เมื่อปริมาณน้ำซึ่งเป็นโมเลกุลที่มีขั้วลดลง จึงทำให้เกิดโพลาร์ไลเซชันน้อยลง ส่งผลให้ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีต (ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าสภาพนำไฟฟ้า) มีค่าลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าสภาพนำไฟฟ้ากับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตตัวอย่างว่าค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตตัวอย่างแปรผกผันกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต





ภาพประกอบ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ได้ไอเล็กตริกกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตควบคุม

ผลการทดลองในภาพประกอบ 4.28 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ได้ไอเล็กตริกกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตควบคุม มีเส้นแนวโน้มเป็นแบบเลขยกกำลัง โดยมีสมการของเส้นแนวโน้มและสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-squared:  $R^2$ ) ดังนี้

$$S_{0.45} = 580.3D^{-0.233}, \quad R^2 = 0.9 \quad (4.25)$$

$$S_{0.55} = 510.44D^{-0.261}, \quad R^2 = 0.8707 \quad (4.26)$$

$$S_{0.65} = 632.43D^{-0.518}, \quad R^2 = 0.9576 \quad (4.27)$$

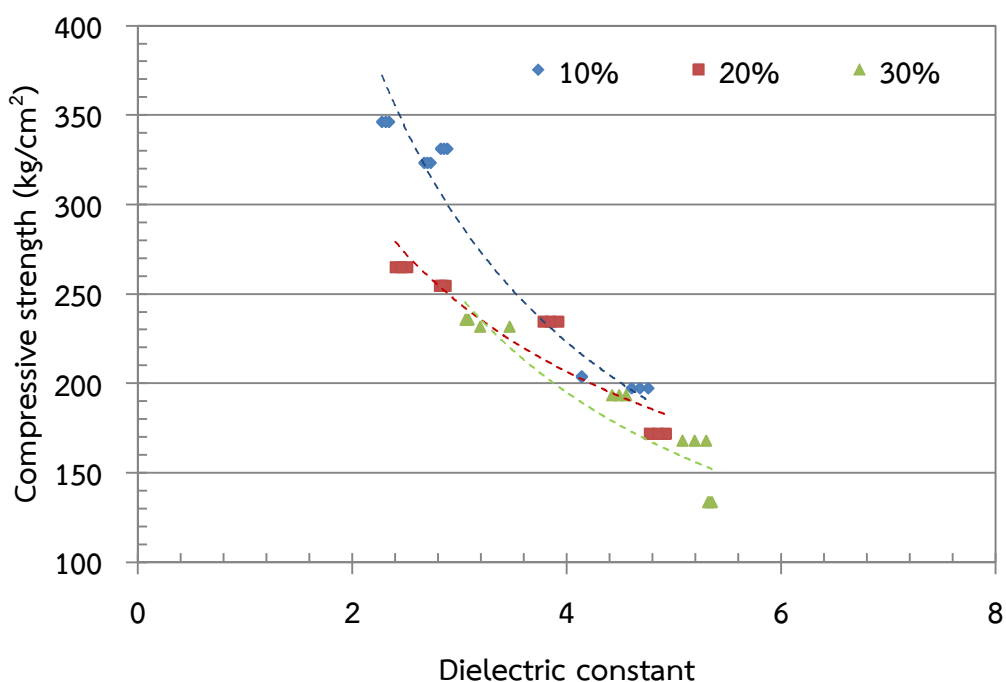
เมื่อ S คือ ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

D คือ ค่าคงที่ได้ไอเล็กตริกของคอนกรีต

$R^2$  คือ สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

ตัวห้อยของตัวแปร S คือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) ที่ 0.45 0.55 และ 0.65





ภาพประกอบ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้ากลบที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45

ผลการทดลองในภาพประกอบ 4.29 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้ากลบที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 มีเส้นแนวโน้มเป็นแบบเลขยกกำลัง โดยมีสมการของเส้นแนวโน้มและสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-squared:  $R^2$ ) ดังนี้

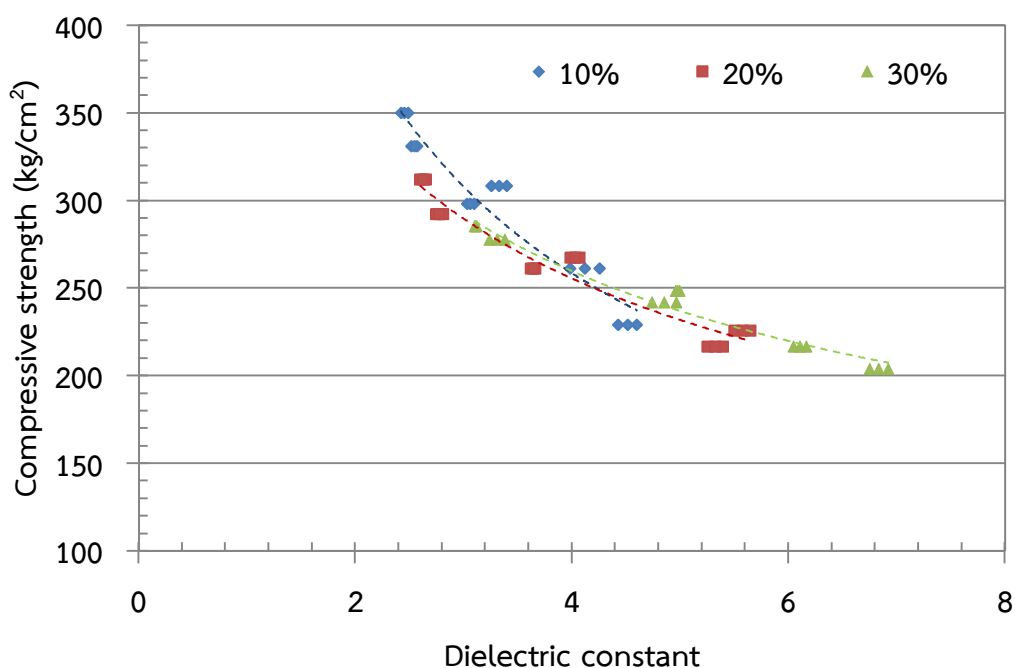
$$S_{D10\%} = 786.79D^{-0.909}, \quad R^2 = 0.9495 \quad (4.28)$$

$$S_{D20\%} = 467.75D^{-0.589}, \quad R^2 = 0.8471 \quad (4.29)$$

$$S_{D30\%} = 633.24D^{-0.85}, \quad R^2 = 0.8387 \quad (4.30)$$

เมื่อ S คือ ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต  
 D คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของคอนกรีต  
 $R^2$  คือ สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ  
 ตัวห้อยของตัวแปร S คือ ระดับการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้ากลบที่ 10% 20% และ 30%





ภาพประกอบ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55

ผลการทดลองในภาพประกอบ 4.30 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 มีเส้นแนวโน้มเป็นแบบเลขยกกำลัง โดยมีสมการของเส้นแนวโน้มและสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) ดังนี้

$$S_{D10\%} = 600.75D^{-0.608}, \quad R^2 = 0.9285 \quad (4.31)$$

$$S_{D20\%} = 467.67D^{-0.436}, \quad R^2 = 0.9413 \quad (4.32)$$

$$S_{D30\%} = 458.47D^{-0.41}, \quad R^2 = 0.9657 \quad (4.33)$$

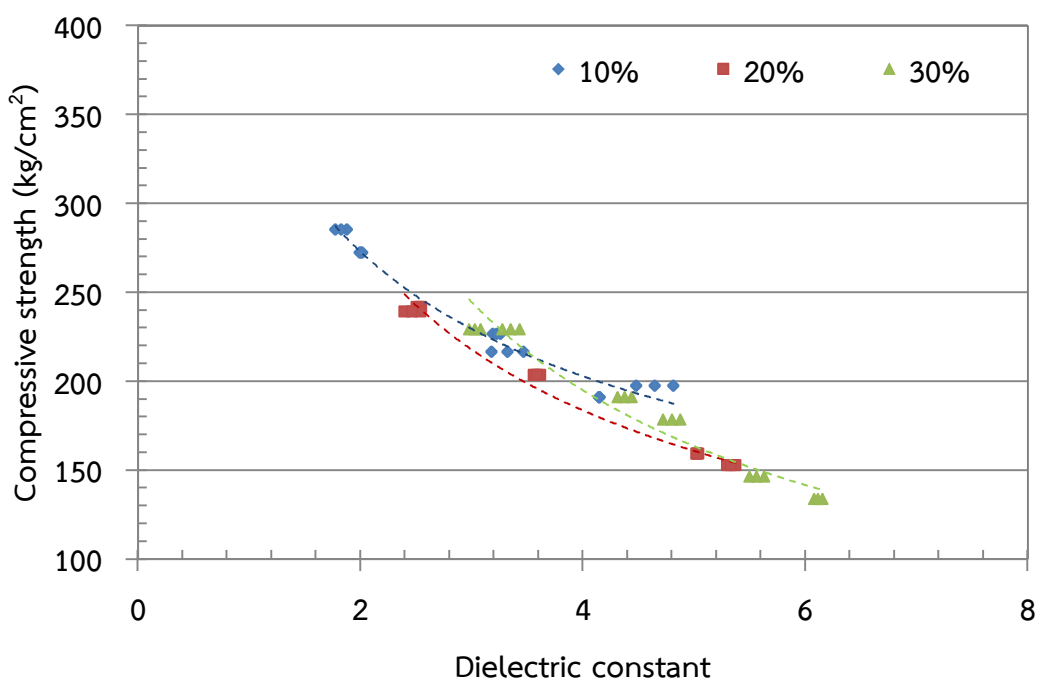
เมื่อ  $S$  คือ ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

$D$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของคอนกรีต

$R^2$  คือ สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

ตัวห้อยของตัวแปร  $S$  คือ ระดับการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่ 10% 20% และ 30%





ภาพประกอบ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65

ผลการทดลองในภาพประกอบ 4.31 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกกับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 มีเส้นแนวโน้มเป็นแบบเลขยกกำลัง โดยมีสมการของเส้นแนวโน้มและสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-squared:  $R^2$ ) ดังนี้

$$S_{D10\%} = 367.28D^{-0.428}, \quad R^2 = 0.9677 \quad (4.34)$$

$$S_{D20\%} = 418.49D^{-0.594}, \quad R^2 = 0.9869 \quad (4.35)$$

$$S_{D30\%} = 518.24D^{-0.788}, \quad R^2 = 0.9509 \quad (4.36)$$

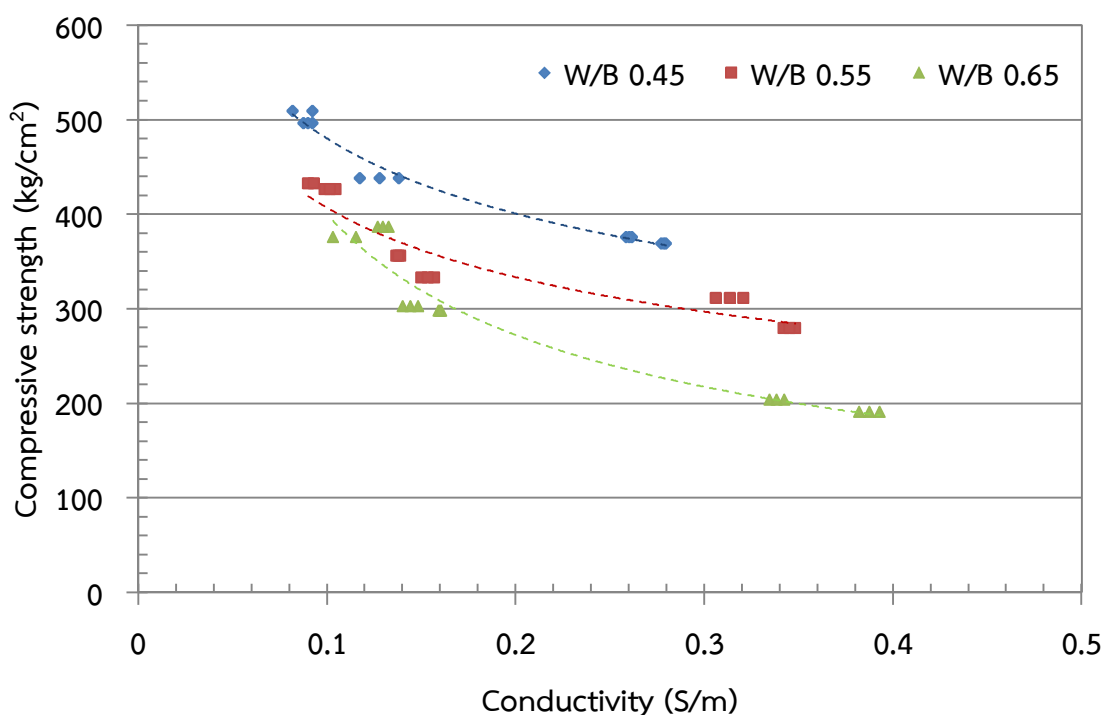
เมื่อ S คือ ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

D คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของคอนกรีต

$R^2$  คือ สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

ตัวห้อยของตัวแปร S คือ ระดับการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่ 10% 20% และ 30%





ภาพประกอบ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้ากับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตควบคุม

ผลการทดลองในภาพประกอบ 4.32 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้ากับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตควบคุม มีเส้นแนวโน้มเป็นแบบเลขยกกำลัง โดยมีสมการของเส้นแนวโน้มและสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-squared:  $R^2$ ) ดังนี้

$$S_{0.45} = 263.63C^{-0.261}, \quad R^2 = 0.9791 \quad (4.37)$$

$$S_{0.55} = 210.45C^{-0.287}, \quad R^2 = 0.8871 \quad (4.38)$$

$$S_{0.65} = 111.85C^{-0.553}, \quad R^2 = 0.9521 \quad (4.39)$$

เมื่อ S คือ ค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

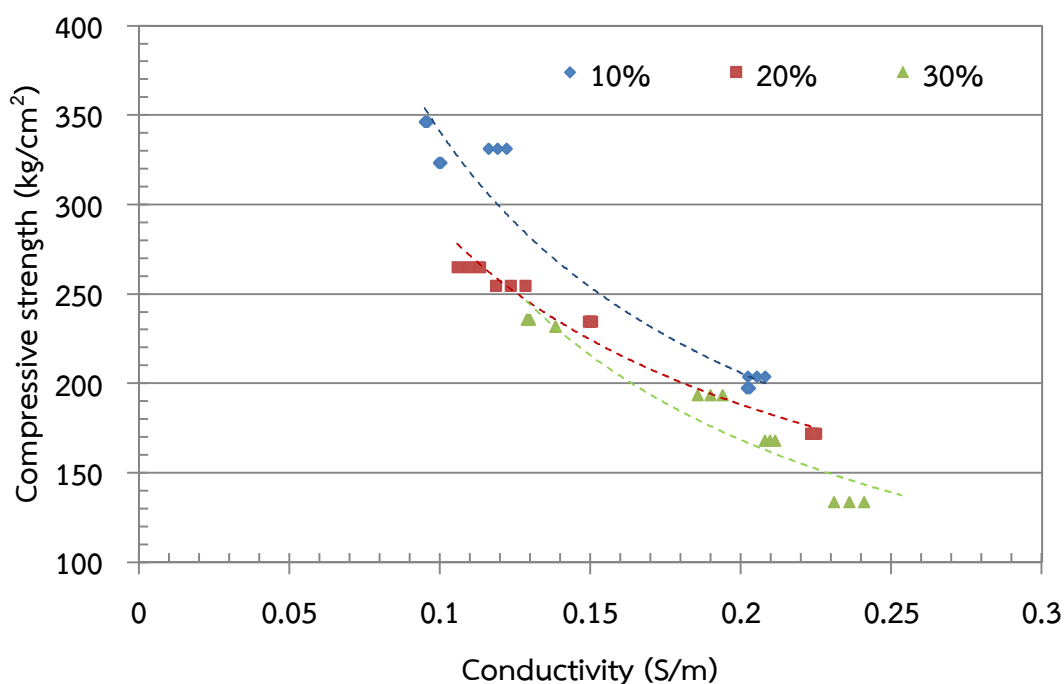
C คือ ค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีต

$R^2$  คือ สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

ตัวห้อยของตัวแปร S คือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) ที่ 0.45 0.55 และ 0.65







ภาพประกอบ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้ากับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45

ผลการทดลองในภาพประกอบ 4.33 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้ากับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 มีเส้นแนวโน้มเป็นแบบเลขยกกำลัง โดยมีสมการของเส้นแนวโน้มและสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) ดังนี้

$$S_{C10\%} = 63.947C^{-0.727}, \quad R^2 = 0.9548 \quad (4.40)$$

$$S_{C20\%} = 70.307C^{-0.612}, \quad R^2 = 0.9665 \quad (4.41)$$

$$S_{C30\%} = 42.288C^{-0.859}, \quad R^2 = 0.9032 \quad (4.42)$$

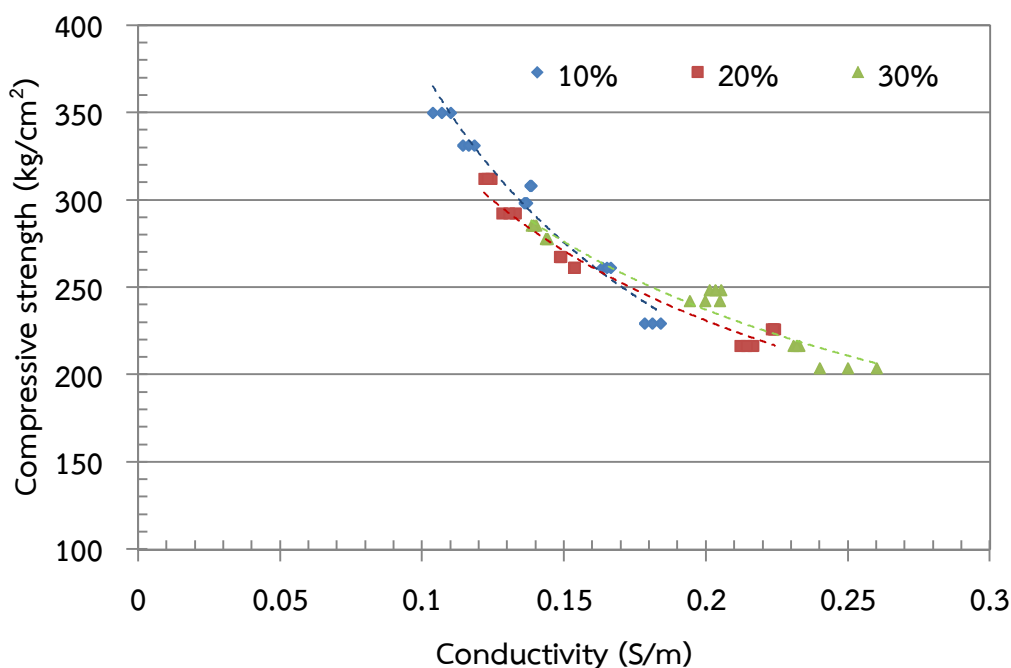
เมื่อ  $S$  คือ ค่าเฉลี่ยของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

$C$  คือ ค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีต

$R^2$  คือ สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

ตัวห้อยของตัวแปร  $S$  คือ ระดับการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่ 10% 20% และ 30%





ภาพประกอบ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้ากับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55

ผลการทดลองในภาพประกอบ 4.34 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้ากับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 มีเส้นแนวโน้มเป็นแบบเลขยกกำลัง โดยมีสมการของเส้นแนวโน้มและสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-squared:  $R^2$ ) ดังนี้

$$S_{C10\%} = 64.868C^{-0.763}, \quad R^2 = 0.9553 \quad (4.43)$$

$$S_{C20\%} = 94.816C^{-0.553}, \quad R^2 = 0.9575 \quad (4.44)$$

$$S_{C30\%} = 101.53C^{-0.527}, \quad R^2 = 0.9381 \quad (4.45)$$

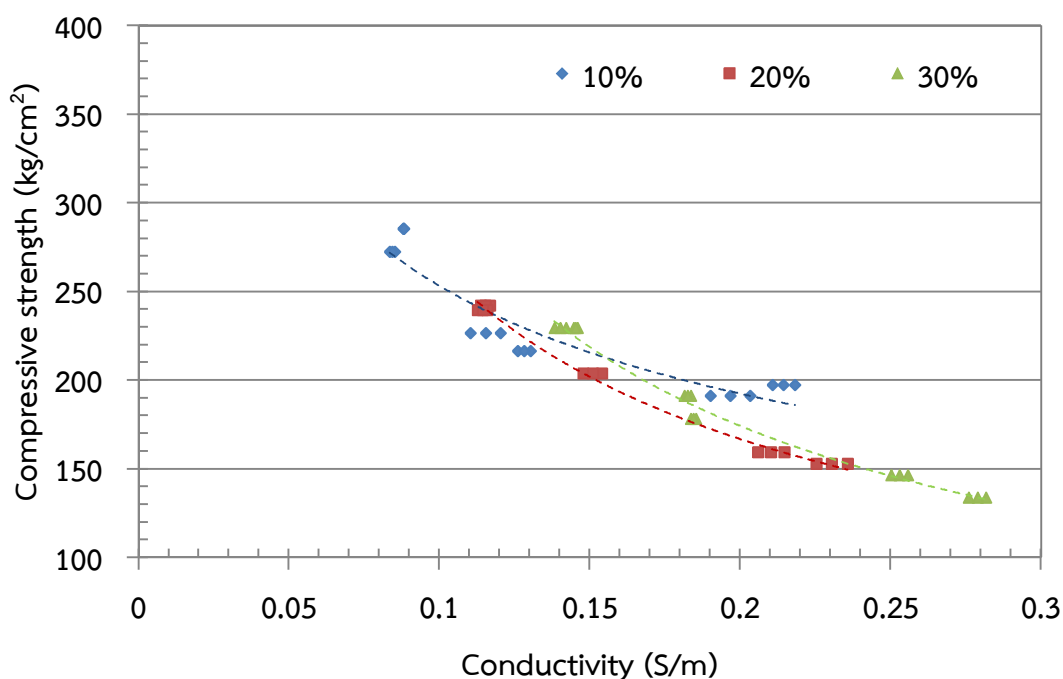
เมื่อ S คือ ค่าเฉลี่ยของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

C คือ ค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีต

$R^2$  คือ สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

ตัวห้อยของตัวแปร S คือ ระดับการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่ 10% 20% และ 30%





ภาพประกอบ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้ากับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65

ผลการทดลองในภาพประกอบ 4.35 พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้ากับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 มีเส้นแนวโน้มเป็นแบบเลขยกกำลัง โดยมีสมการของเส้นแนวโน้มและสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-squared:  $R^2$ ) ดังนี้

$$S_{C10\%} = 101.72C^{-0.396}, \quad R^2 = 0.8938 \quad (4.46)$$

$$S_{C20\%} = 57.379C^{-0.663}, \quad R^2 = 0.9946 \quad (4.47)$$

$$S_{C30\%} = 48.833C^{-0.791}, \quad R^2 = 0.9883 \quad (4.48)$$

เมื่อ S คือ ค่าเฉลี่ยของกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต

C คือ ค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีต

$R^2$  คือ สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

ตัวห้อยของตัวแปร S คือ ระดับการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่ 10% 20% และ 30%



4.4.4 ผลของความเป็นไปได้ในการประเมินกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตตัวอย่างจากค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนที่วัดจากโพรบแกนร่วมแบบแบนที่มีรัศมี  $b$  เท่ากับ 3.45 มิลลิเมตร โดยไม่ต้องทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบทำลาย

จากผลการทดลองที่ได้กล่าวมาในหัวข้อก่อนหน้าพบว่า ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนนั้นแปรผันกับค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตตัวอย่างในทิศทางตรงกันข้ามกัน กล่าวคือ ถ้ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนจะมีค่าลดลงของทุกเงื่อนไขในการทดลอง โดยค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนจะถูกนำมาใช้ในการประเมินกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตในรูปแบบของค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (ส่วนจริงของค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อน) และค่าสภาพนำไฟฟ้า (คำนวณจากส่วนจินตภาพของค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อน) ซึ่งทั้ง 2 ค่านี้ถือเป็นคุณสมบัติพื้นฐานทางไฟฟ้าของคอนกรีต ผลจากการทดลองทำให้ทราบว่าสามารถนำค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนที่วัดได้ไปประเมินหาลงรับแรงอัดของคอนกรีตตัวอย่างแบบทำลาย เนื่องจากเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าสภาพนำไฟฟ้ากับกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตตัวอย่าง เส้นแนวโน้มข้อมูลแบบเลขยกกำลังที่ได้นั้นมีสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) โดยเฉลี่ยมีค่ามากกว่าร้อยละ 90 ซึ่งหมายความว่า กำลังรับแรงอัดกับค่าคงที่ไดอิเล็กตริก และกำลังรับแรงอัดกับค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตตัวอย่างมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญมากกว่าร้อยละ 90 โดยในการประเมินกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่มีการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้ากลบนั้น จะสามารถใช้สมการเส้นแนวโน้มแบบเลขยกกำลังที่ได้จากการทดลองในการประเมินกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตได้ตามเงื่อนไขส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดลอง



## บทที่ 5

### สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการเพื่อออกแบบและสร้างโพรบแกนร่วมแบบแบนสำหรับตรวจวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและอายุของคอนกรีตที่แตกต่างกัน รวมไปถึงการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนและกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตตัวอย่างเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการประเมินกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตทดสอบโดยไม่ต้องทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดแบบทำลาย จากค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตตัวอย่าง

#### 5.2 สรุปและอภิปรายผล

โพรบแกนร่วมแบบแบนถูกสร้างขึ้นจากการประยุกต์ใช้โครงสร้างของสายนำสัญญาณไมโครสตริปร่วมกับโครงสร้างของสายนำสัญญาณแกนร่วมบนแผ่นวงจรพิมพ์ความถี่สูง Arlon AD260A โพรบที่ทำการออกแบบและใช้ในการทดลองนั้นนั้นมี 2 โพรบ คือ โพรบที่มีรัศมี  $b$  เท่ากับ 3.45 มิลลิเมตร และโพรบที่มีรัศมี  $b$  เท่ากับ 5.745 มิลลิเมตร โดยน้ำกลั่น เอทานอล เมทานอล และอากาศถูกใช้เป็นวัสดุอ้างอิงในการสอบเทียบโพรบทั้ง 2 ผลการสอบเทียบพบว่าโพรบทั้ง 2 ให้ค่าการวัดที่มีแนวโน้มเป็นไปตามค่าอ้างอิง โดยโพรบที่มีรัศมี  $b$  เท่ากับ 3.45 มิลลิเมตร สามารถวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตตัวอย่างที่ความถี่ 0.5-3.5 GHz และโพรบที่มีรัศมี  $b$  เท่ากับ 5.745 มิลลิเมตร สามารถวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตตัวอย่างที่ความถี่ 0.5-2 GHz โดยโพรบที่มีรัศมี  $b$  เท่ากับ 3.45 มิลลิเมตร ถูกเลือกใช้ในการทดลอง

จากการทดสอบวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์ของคอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและอายุของคอนกรีตที่แตกต่างกัน ด้วยโพรบที่มีรัศมี  $b$  เท่ากับ 3.45 มิลลิเมตร ในที่นี้สามารถสรุปผลการทดลองที่ได้ทำการวิเคราะห์เรียบร้อยแล้วของคอนกรีตควบคุม (ระดับการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบร้อยละ 0) และคอนกรีตตัวอย่างที่มีระดับการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบร้อยละ 10 20 และ 30 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 0.55 และ 0.65 โดยทดสอบคอนกรีตที่อายุ 7 28 และ 90 วัน ผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

5.2.1 ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนและค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตควบคุมมีค่าสูงสุดอยู่ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 0.55 และ 0.45 ตามลำดับ

5.2.2 ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตควบคุมและคอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่มีอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 0.55 และ 0.65 ที่อายุคอนกรีต 7 28 และ 90 วัน นั้นมีการเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ที่ใช้ในการทดลอง โดยค่าคงที่ไดอิเล็กตริก หรือส่วนจริงของค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนนั้นมีแนวโน้มลดลงเมื่อความถี่ที่ใช้



ในการทดลองนั้นเพิ่มขึ้น และค่าสภาพนำไฟฟ้าซึ่งคำนวณมาจากส่วนจินตภาพของค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่ที่ใช้ในการทดลองเพิ่มขึ้น

5.2.3 เมื่ออายุของคอนกรีตตัวอย่างเพิ่มขึ้น ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนมีแนวโน้มลดลง ในทิศทางตรงข้ามที่อายุของคอนกรีตเพิ่มขึ้นกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้น

5.2.4 ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนมีแนวโน้มลดลงเมื่อกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเพิ่มขึ้น

ในการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตกับค่าคงที่ไดอิเล็กตริกที่ความถี่เดียว คือ 1 GHz และพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตกับค่าสภาพนำไฟฟ้าที่ความถี่เดียว คือ 3.2 GHz มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญที่  $R^2$  มากกว่าร้อยละ 90 แสดงให้เห็นว่าสามารถใช้สมการเส้นแนวโน้มแบบเลขยกกำลังที่ได้จากการทดลองในการประเมินกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตได้ตามเงื่อนไขส่วนผสมของคอนกรีตที่ใช้ในการทดลอง จะได้ค่าการทำนายถูกต้องและแม่นยำมากกว่าร้อยละ 90

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

ปัญหาสำคัญของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ คือ ปัญหาด้านการสร้างโพรบให้ตรงกับที่ได้ออกแบบไว้ เนื่องจากมีข้อจำกัดทางด้านเครื่องมือที่ใช้ในการสร้าง ปัญหาในกระบวนการในการวัดซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับควมชื้นและอุณหภูมิ และปัญหาการสอบเทียบโพรบกับเครื่องวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อให้ระบบในการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนมีประสิทธิภาพมากขึ้น จึงจำเป็นต้องมีการแก้ไขปรับปรุงระบบการวัดตามแนวทางดังต่อไปนี้

5.3.1 ปรับปรุง พัฒนา และออกแบบโพรบแกนร่วมแบบแบนให้มีขนาดและช่วงความถี่ในการวัดให้มีความเหมาะสมกับลักษณะและขนาดของคอนกรีตที่จะนำไปวัด และสามารถสร้างได้ง่ายด้วยเครื่องมือมาตรฐานที่สามารถหาได้ทั่วไป

5.3.2 ออกแบบหรือหาชุดยึดจับโพรบกับคอนกรีตเพื่อให้โพรบสัมผัสกับผิวของคอนกรีตได้แนบสนิท หรือหากใช้คนในการกดโพรบให้สัมผัสกับพื้นผิวของคอนกรีตก็ต้องเป็นคน ๆ เดียวตลอดการวัดเพื่อให้ได้แรงกดที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งจะทำให้โพรบรับส่งสัญญาณได้ดีขึ้น

5.3.3 เพิ่มปัจจัยด้านความชื้นกับอุณหภูมิของคอนกรีตและสภาพแวดล้อม เงื่อนไขในการบ่มคอนกรีต รวมถึงน้ำหนักของคอนกรีตที่มีการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบ ในกระบวนการวัดสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อน เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้องที่สุด

5.3.4 ในการวัดต้องอาศัยการวัดแบบซ้ำและต้องทำการสอบเทียบโพรบกับเครื่องวิเคราะห์ข้อมูลซ้ำทุกครั้งก่อนทำการวัด



เอกสารอ้างอิง



## เอกสารอ้างอิง

- [1] บุรฉัตร ฉัตรวีระ, ทวีสิทธิ์ คงทรัพย์. ความทนทานของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบดำจากโรงสีข้าว. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. 2545; 25[4]: 373-389.
- [2] กมลชนก บัวดี, จิรายุ ศรีละบุตร, ประจักษ์ ทูลกลสิกร, กิตติพงษ์ สุวีโร, ประชุม คำพุด. การสมบัติทางกายภาพและทางกลของคอนกรีตบล็อกดินขาวผสมเถ้าแกลบ. เอกสารการประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยกรุงเทพ; 25 มีนาคม 2554; ปทุมธานี, ประเทศไทย. 2554. หน้า 3-11.
- [3] กรมโยธาธิการและผังเมือง. มาตรฐานการตรวจสอบโครงสร้างของคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยวิธีการทดสอบแบบไม่ทำลาย. กรุงเทพฯ: กระทรวงมหาดไทย; 2551.
- [4] Jamil M, Hassan MK, Al-Mattarneh HMA, Zain MF. Concrete dielectric properties investigation using microwave nondestructive techniques. Materials and Structures 2013; 46: 77-87.
- [5] Kwon SJ, Feng MQ, Park TW, Na UJ. An experimental study on evaluation of compressive strength in cement mortar using averaged electromagnetic properties. International Journal of Concrete Structures and Materials 2009; 3[1]: 25-32.
- [6] Vorlíček J, Oppl L, Vrba J. Measurement of complex permittivity of biological tissues. Proceeding of Progress in Electromagnetic Research Symposium Proceedings; 5 – 8 July 2010; Cambridge, USA, 2010. pp. 599 – 601.
- [7] Berezovsky VK, Drobot SV, Khandogin MS, Rusakovich VN. The waveguide technique of measurement of the complex permittivity of materials. Proceeding of 51<sup>st</sup> Internationales Wissenschaftliches Kolloquium; 11 – 15 September 2006; Technische Universität, Ilmenau, 2006. pp. 3-16.
- [8] Damme SV, Franchois A, Zutter DD, Taewe L. Nondestructive determination of steel fiber content in concrete slabs with an open-ended coaxial probe. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 2004; 42[11]: 2511-2521.
- [9] Filali B, Boone F, Rhazi J, Ballivy G. Design and calibration of a large open-ended coaxial probe for the measurement of the dielectric properties of concrete. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques 2008; 56[10]: 2322-2328.
- [10] Kim JM, Cho S, Kim N, Yoon J, Cho J, Cheon C. et al. Planar type micromachined probe with low uncertainty at low frequencies. Sensors Actuators: A Physical 2007; 139: 111-117.
- [11] Kim B, Cho J, Cheon C, Kwon Y. A planar-type probe with a coaxial aperture for nondestructive complex permittivity measurement of biological materials up to 30 GHz. IEEE MTT-S Digest 2004; 1441-1444.





- [12] อาคม แก้วระวัง. สนามแม่เหล็กไฟฟ้า. พิมพ์ครั้งที่ 2. ขอนแก่น: หน่วยงานสารบรรณงานบริหารและธุรการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยของแก่น 2550;
- [13] Komarov V, Wang S, Tang J. "Permittivity and measurement". In: Chang K (ed.) The Wiley encyclopedia of RF and microwave engineering, New York: John Wiley & Sons; 2005. pp. 3693 – 3711.
- [14] Agilent. Basics of measuring the dielectric properties of materials: application note. Agilent Technologies 2006 [cited 18 November 2013]; Available from: <http://www3.imperial.ac.uk>
- [15] Athey TW, Stuchly MA, Stuchly SS. Measurement of radio frequency permittivity of biological tissues with an open-ended coaxial Line: Part I. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques 1982; 30[1]: 82 – 86.
- [16] Venkatesh MS, Raghavan GSV. An overview of dielectric properties measuring techniques. Canadian Biosystems Engineering 2005; 47: 7.15 – 7.30.
- [17] Chen LF, Ong CK, Neo CP, Varadan VV, Varadan VK. 2004. Microwave electronics: Measurement and materials characterization. Chichester, UK: John Wiley & Sons; 2004.
- [18] Nicolson AM, Ross GF. Measurement of the intrinsic properties of materials by time-domain techniques. IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement 1970; 19(4): 377–382.
- [19] Jarvis JB, Vanzura EJ, Kissick WA. Improved technique for determining complex permittivity with the transmission/reflection method. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques 1990; 38[8]: 1096-1103.
- [20] Weir WB. Automatic measurement of complex dielectric constant and permeability at microwave frequency. Proceeding of the IEEE; January 1974; 62[1]: 33-36.
- [21] ชิตินันท์ รัตน์ประโลม. การตรวจหาความอ่อนแก่ของทุเรียนโดยใช้คลื่นไมโครเวฟวิเคราะห์ความชื้น. [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต]. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี; 2548.
- [22] Kumar SB, Raveendranath U, Mohanan P, Mathew KT, Hajian M, and Ligthart LP. A simple free space method for measuring the complex permittivity of single and compound dielectric materials. Microwave and Optical Technology Letter 2000; 26[2]: 117-119.
- [23] Ghodgaonkar DK, Varadan VV, Varadan VK. Free-space measurement of complex permittivity and complex permeability of magnetic materials at microwave frequencies. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 1990; 39[2]: 387-394.



- [24] Saeed K, Shafique MF, Byrne MB, Hunter IC. Planar microwave sensors for complex permittivity characterization of materials and their application. Applied Measurement Systems; [cited 18 November 2013]; Available from: [www.intechopen.com](http://www.intechopen.com).
- [25] Kang B, Cho J, Cheon C, Kwon Y. A planar-type probe with a coaxial aperture for nondestructive complex permittivity measurement of biological materials up to 30 GHz. IEEE MTT-S Digest 2004; 1441 –1444.
- [26] Kang B, Park JH, Cho J, Kwon K, Lim S, Yoon J. et al. Novel low-cost planar probes with broadside apertures for nondestructive dielectric measurement of biological materials at microwave frequencies. IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques 2005; 53[1]: 134–143.
- [27] Kim N, Yoon J, Cho S, Cho J, Cheon C, Kwon Y. An optimum design methodology for planar-type coaxial probes applicable to broad temperature permittivity measurements. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques 2008; 56[3]: 684-692.
- [28] Sheen J. Study of microwave dielectric properties measurements by various resonance techniques. Measurement 2005; 37: 123-130.
- [29] Sheen J. Measurements of microwave dielectric properties by an amended cavity perturbation technique”. Measurement 2009; 42: 57–61.
- [30] Kapilevich BY, Ogourtsov SG, Belenky VG, Maslenikov AB, Abbas SO. Accurate microwave resonant method for complex permittivity measurements of liquids. IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques 2000; 48[11]: 2159–2164.
- [31] นิวัตร อังควิศิษฐพันธ์. เทคโนโลยีในการออกแบบวงจรกรองความถี่แถบหยุดผ่านไมโคร-สตริป. วารสารวิชาการวิศวกรรมศาสตร์ ม.อบ. 2554; 4[2]: 35-49.
- [32] สมพร ศรีวัฒนพล. การวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกโดยใช้ไมโครสตริปเรโซเนเตอร์วงแหวนและโพรบโคแอกเซียลแบบขึ้น. [วิทยานิพนธ์ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต]. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ; 2554.
- [33] จีรภัทร์ แผงทิพย์, พงษ์ศักดิ์ ไต้ศรีโคตร. การออกแบบและสร้างโพรบแกนร่วมชนิดระนาบสำหรับวัดค่าสภาพยอมสัมพัทธ์เชิงซ้อน. [ปริญญาานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต]. มหาสารคาม: มหาวิทยาลัยมหาสารคาม; 2556.
- [34] Nyshadham A, Sibbald CL, Stuchly SS. Permittivity measurements using open-ended sensors and reference liquid calibration – an uncertainty analysis. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques 1992; 40[2]: 305-314.
- [35] Blackham DV, Pollard RD. An improved technique for permittivity measurements using a coaxial probe. IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement 1997; 46(5): 1093-1099.



- [36] ประชุม คำพุดม, กิตติพงษ์ สุวีโร. การศึกษาคอนกรีตมวลเบาผสมเถ้าแกลบเสริมแผ่นยางธรรมชาติ. [รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์]. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี; 2553.
- [37] ญัฐ สรรพพามา, มัทนา กุลนาจันทร์, ถาวร เชียงเห็น. กำลังอัดของคอนกรีตผสมเถ้าขานอ้อย-แกลบ-ไม้ ที่บ่มในสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต. [ปริญญาานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต]. ขอนแก่น: มหาวิทยาลัยขอนแก่น 2553.
- [38] ญัฐพงศ์ ทองคำ, ประวิทย์ ไผ่ยจิตร. การประเมินกำลังของคอนกรีตผสมเถ้าแกลบด้วยความถี่ไฟฟ้า”. [ปริญญาานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต]. มหาสารคาม: มหาวิทยาลัยมหาสารคาม; 2556.
- [39] Kim N, Yoon J, Kim D, Cho J, Cheon C, Kwon Y. A high-temperature capable planar-type coaxial probe for complex permittivity measurements up to 40 GHz. IEEE MTT-S International Microwave Symposium 2007; 3-8 June 2007; Honolulu, Hawaii. IEEE; 2007. pp. 519-522.
- [40] Zhong Y, Zhang B, Shi W, Wang T. Experimental research on relationships between dielectric constant of cement concrete materials and measuring frequency. 14<sup>th</sup> International Conference on Ground Penetrating Radar; 4-8 June 2012; Shanghai, China. IEEE; 2012. pp. 403-406.
- [41] Montgomery, Douglas C. Design and analysis of experiments. 5th edition. New York: John Wiley & Sons; 2001. pp. 107-110.



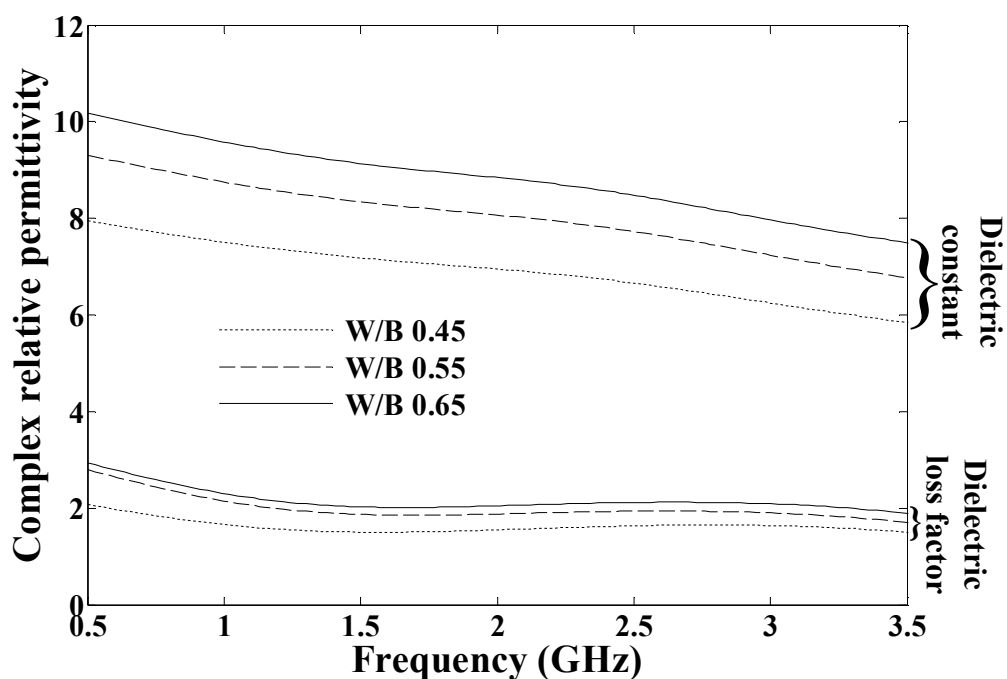
ภาคผนวก



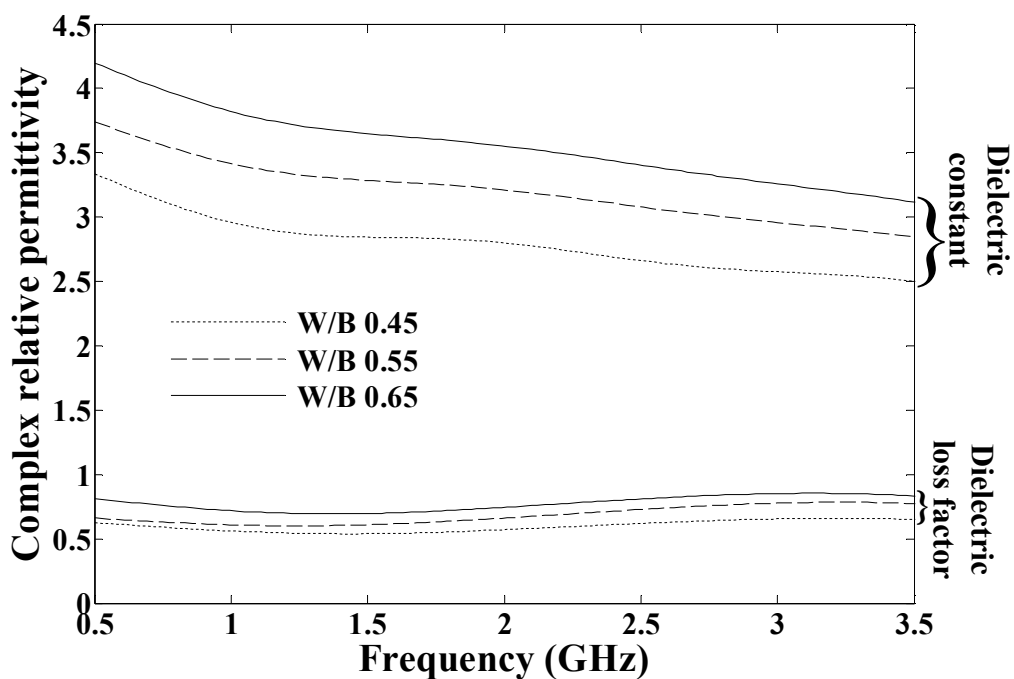
ภาคผนวก ก

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนและค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีต  
ตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบกับความถี่ที่ทำการทดลอง



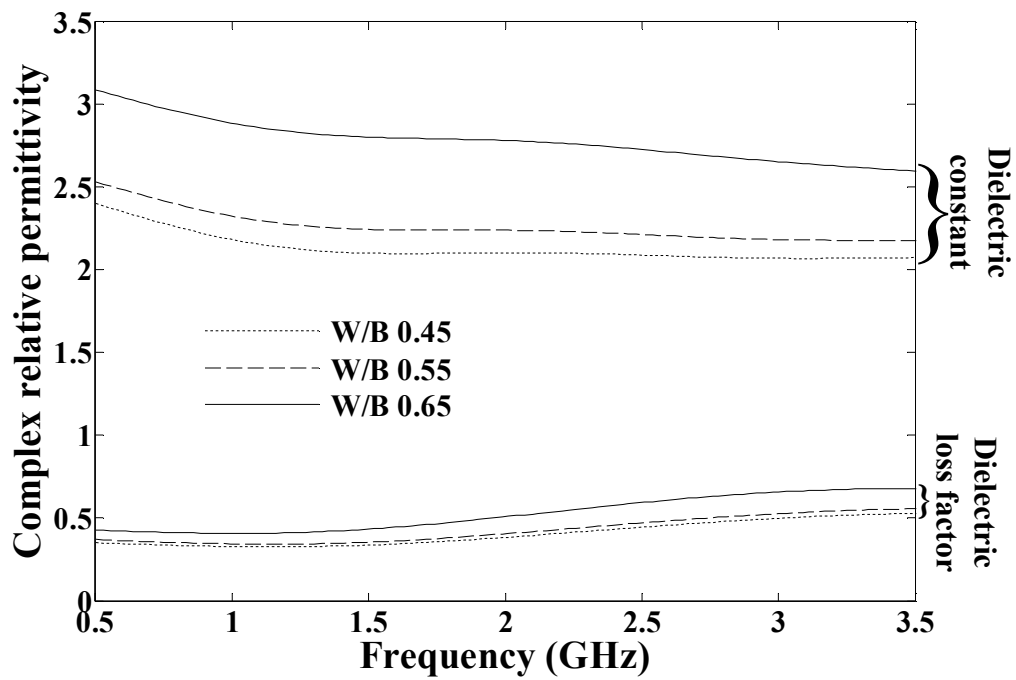


ภาพประกอบ ก.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตควบคุมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่แตกต่างกันที่อายุคอนกรีต 7 วัน กับความถี่ที่ทำการทดลอง

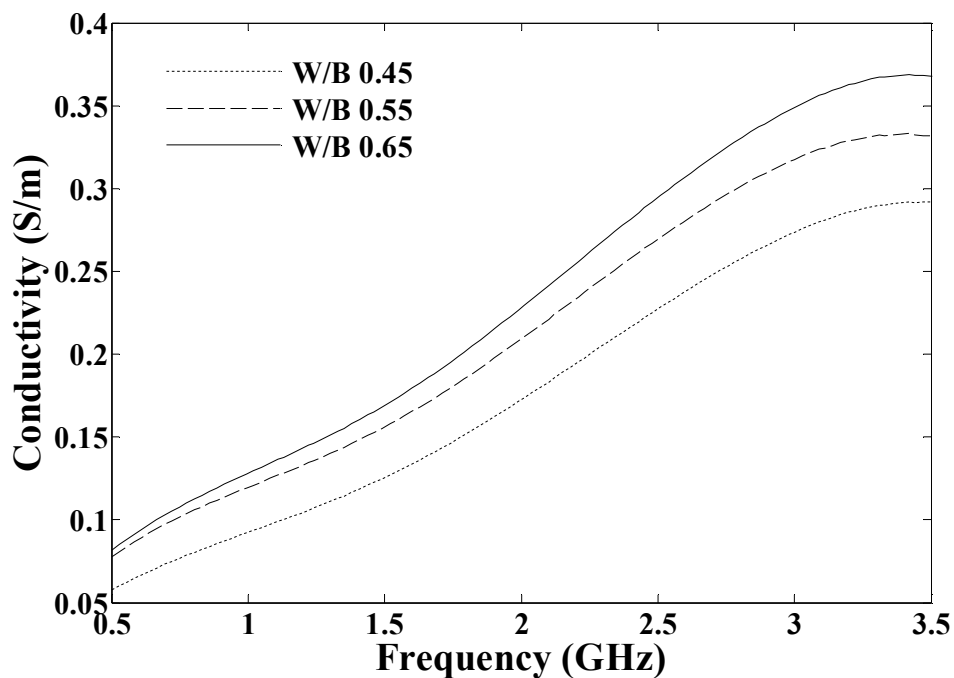


ภาพประกอบ ก.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตควบคุมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่แตกต่างกันที่อายุคอนกรีต 28 วัน กับความถี่ที่ทำการทดลอง



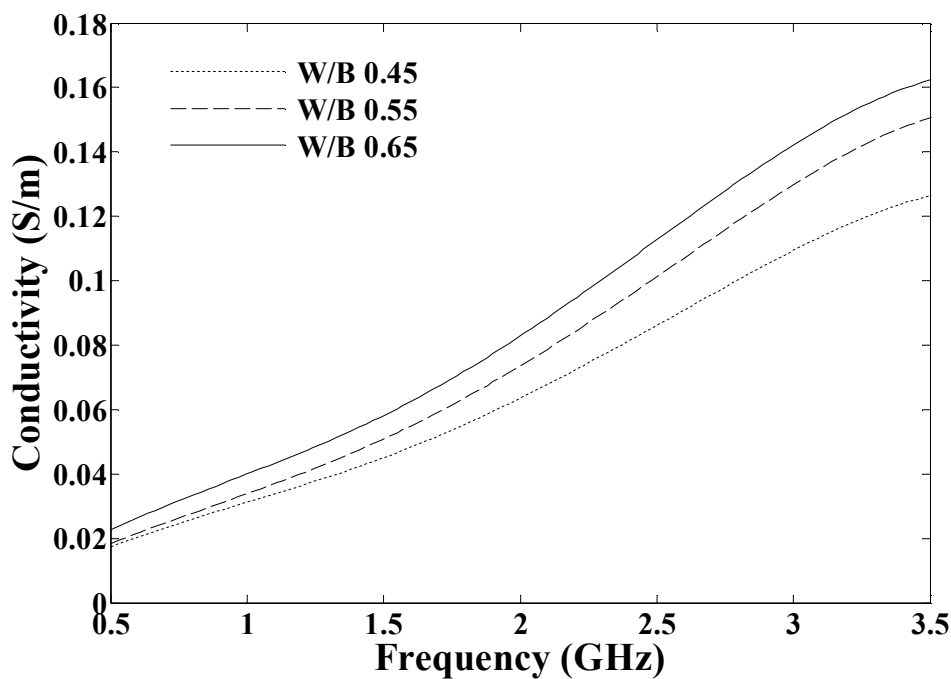


ภาพประกอบ ก.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตควบคุมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่แตกต่างกันที่อายุคอนกรีต 90 วัน กับความถี่ที่ทำการทดลอง

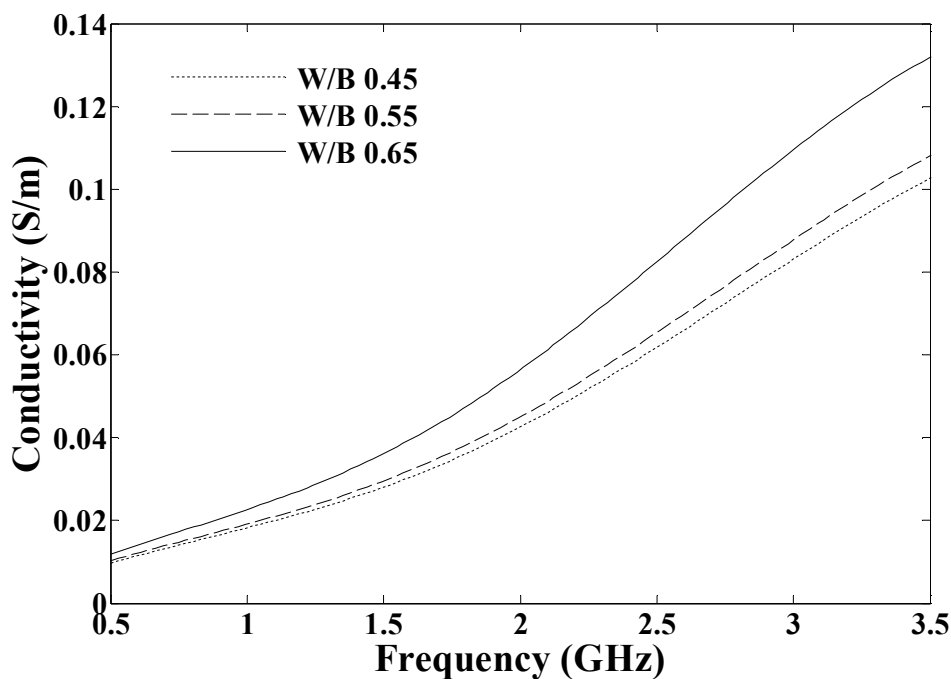


ภาพประกอบ ก.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตควบคุมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่แตกต่างกันที่อายุคอนกรีต 7 วัน กับความถี่ที่ทำการทดลอง





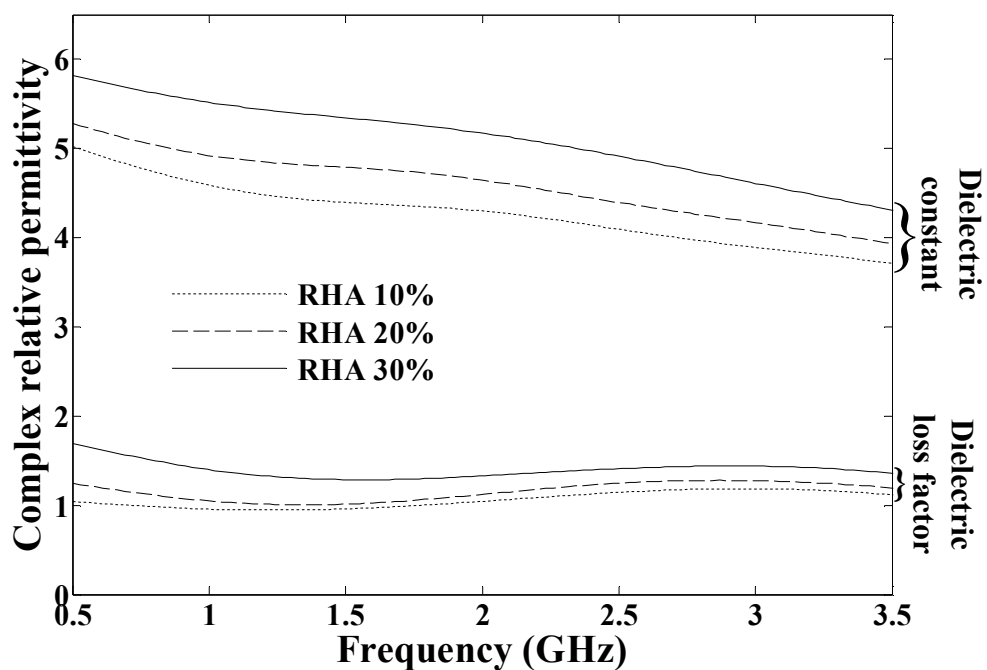
ภาพประกอบ ก.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตควบคุมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่แตกต่างกันที่อายุคอนกรีต 28 วัน กับความถี่ที่ทำการทดลอง



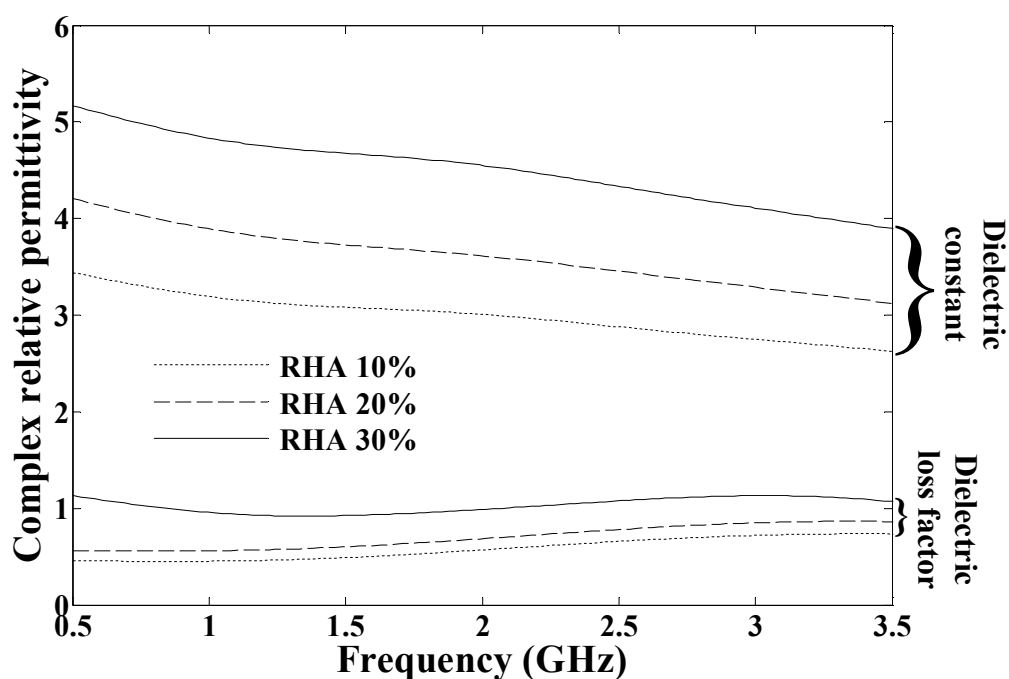
ภาพประกอบ ก.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตควบคุมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่แตกต่างกันที่อายุคอนกรีต 90 วัน กับความถี่ที่ทำการทดลอง





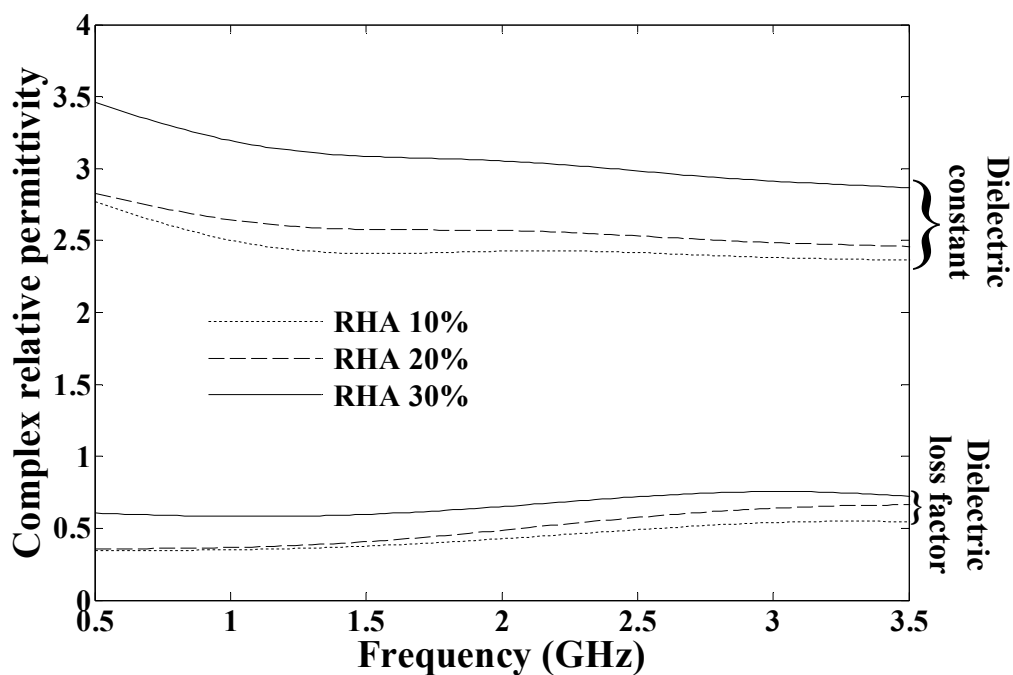


ภาพประกอบ ก.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตตัวอย่างที่ระดับการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่แตกต่างกันที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 ที่อายุคอนกรีต 7 วัน กับความถี่ที่ทำการทดลอง

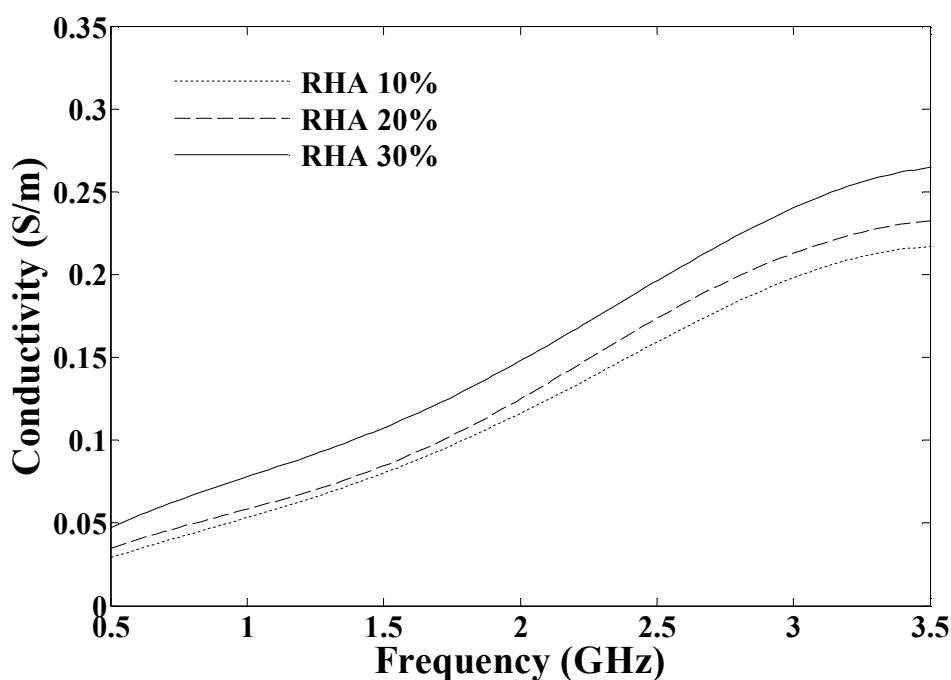


ภาพประกอบ ก.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตตัวอย่างที่ระดับการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่แตกต่างกันที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 ที่อายุคอนกรีต 28 วัน กับความถี่ที่ทำการทดลอง



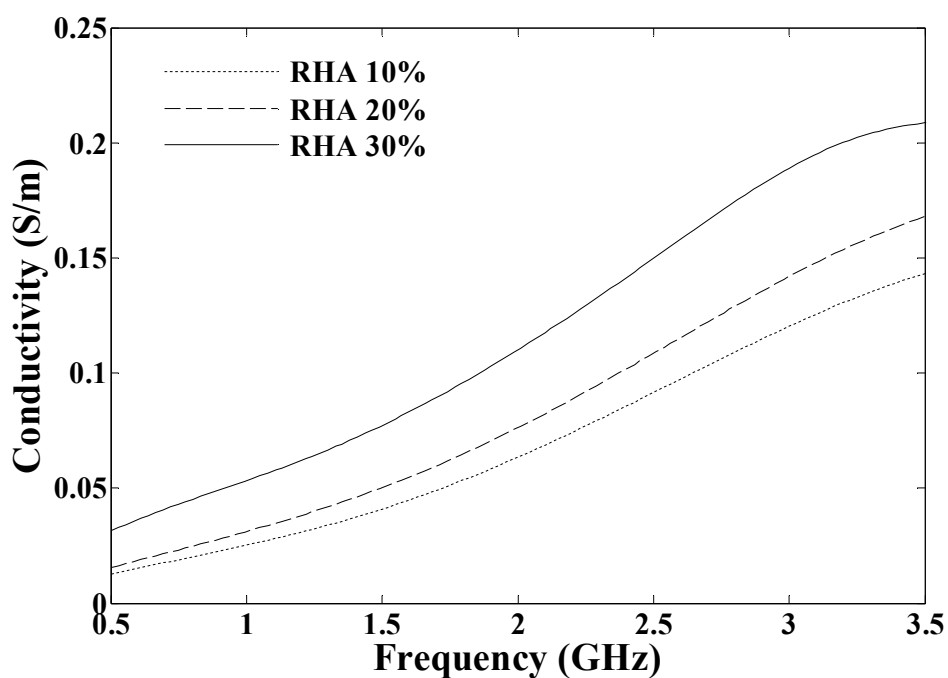


ภาพประกอบ ก.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตตัวอย่างที่ระดับการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่แตกต่างกันที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 ที่อายุคอนกรีต 90 วัน กับความถี่ที่ทำการทดลอง

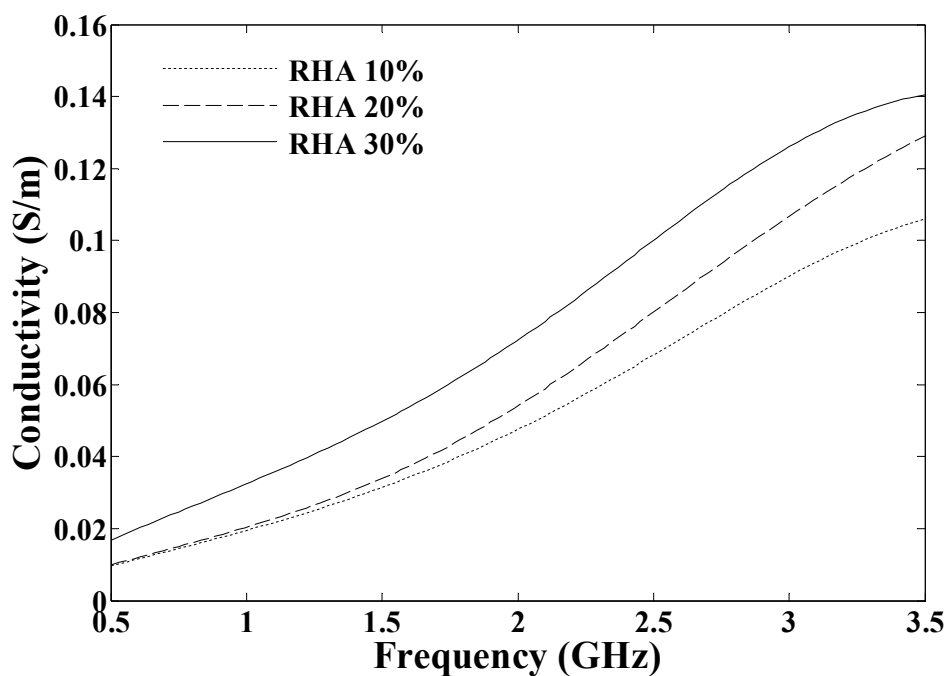


ภาพประกอบ ก.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตตัวอย่างที่ระดับการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่แตกต่างกันที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 ที่อายุคอนกรีต 7 วัน กับความถี่ที่ทำการทดลอง



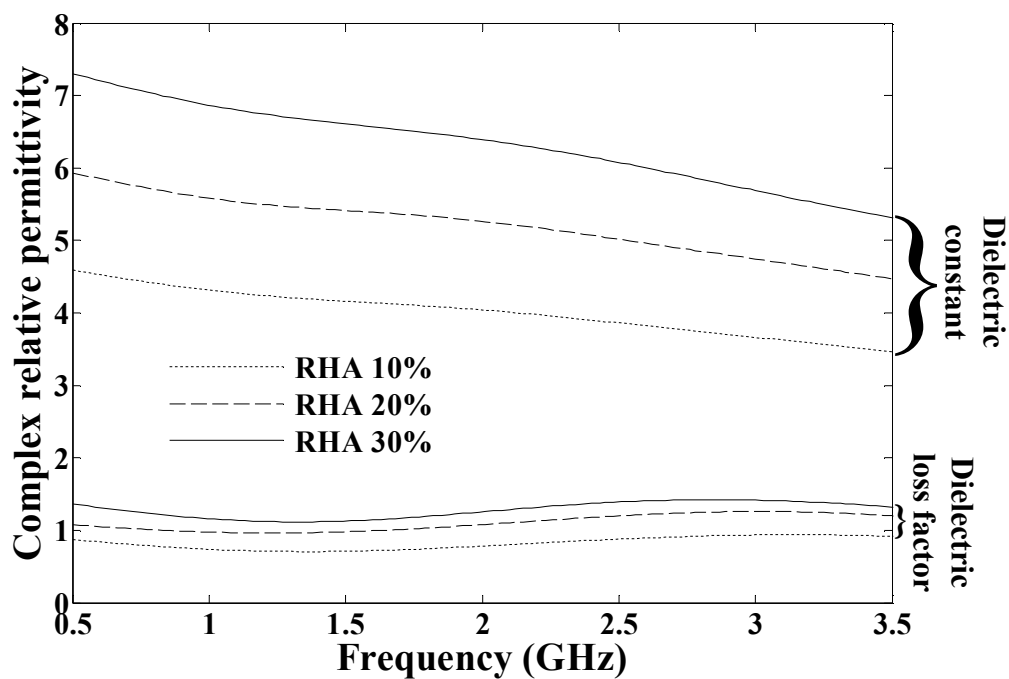


ภาพประกอบ ก.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตตัวอย่างที่ระดับการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่แตกต่างกันที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 ที่อายุคอนกรีต 28 วัน กับความถี่ที่ทำการทดลอง

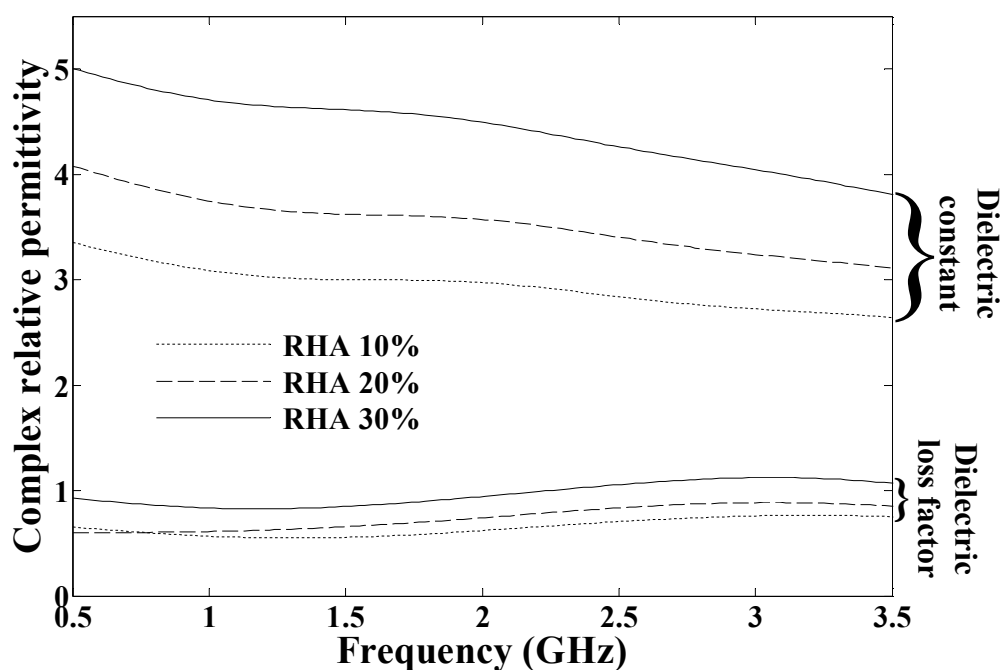


ภาพประกอบ ก.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตตัวอย่างที่ระดับการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่แตกต่างกันที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 ที่อายุคอนกรีต 90 วัน กับความถี่ที่ทำการทดลอง



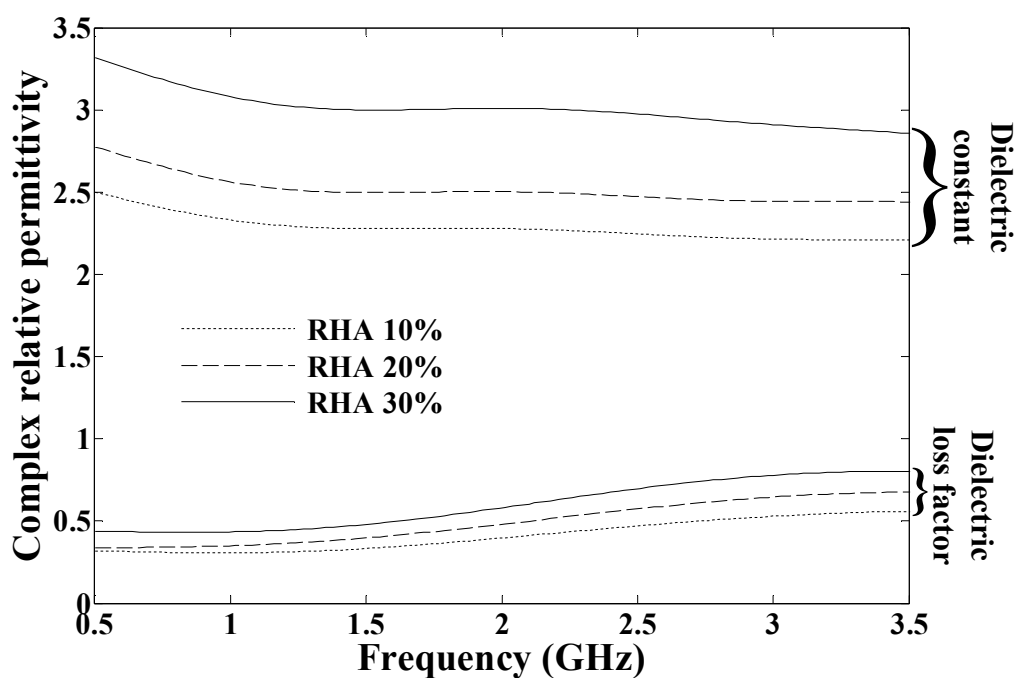


ภาพประกอบ ก.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตตัวอย่างที่ระดับการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่แตกต่างกันที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 ที่อายุคอนกรีต 7 วัน กับความถี่ที่ทำการทดลอง

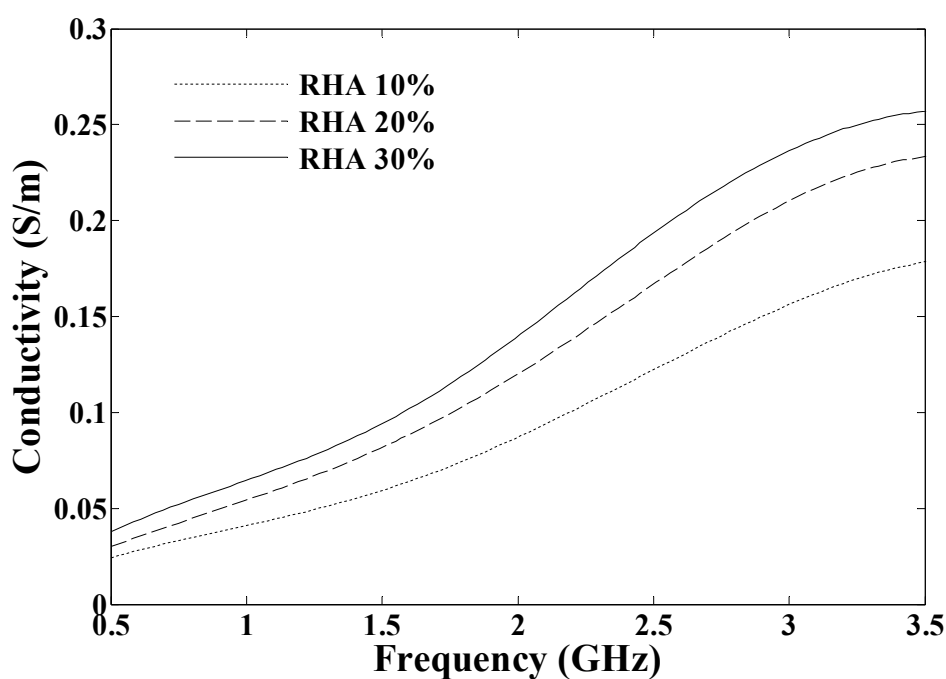


ภาพประกอบ ก.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตตัวอย่างที่ระดับการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่แตกต่างกันที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 ที่อายุคอนกรีต 28 วัน กับความถี่ที่ทำการทดลอง



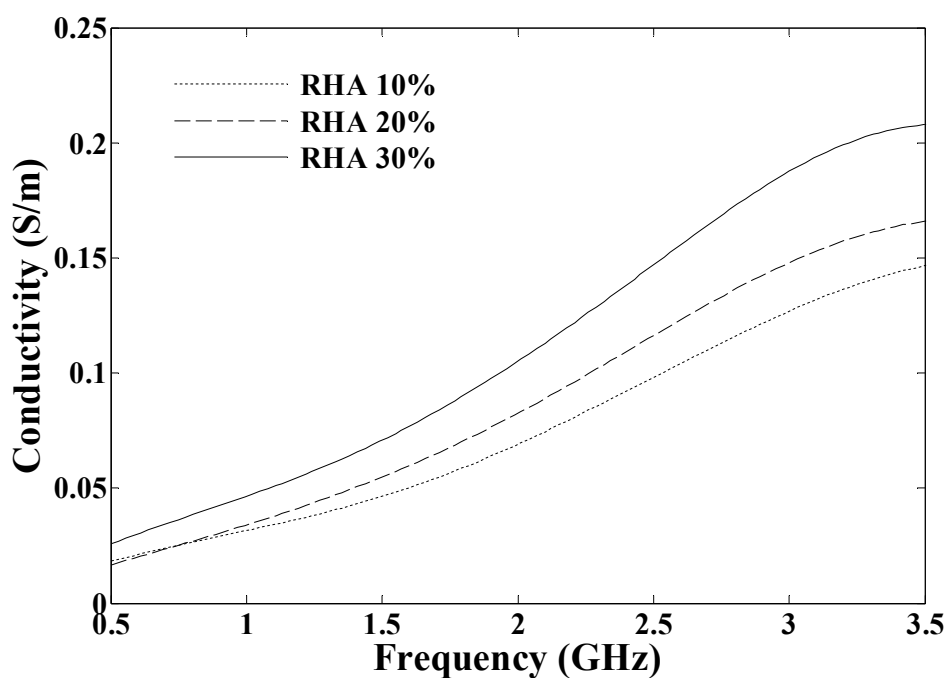


ภาพประกอบ ก.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตตัวอย่างที่ระดับการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่แตกต่างกันที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 ที่อายุคอนกรีต 90 วัน กับความถี่ที่ทำการทดลอง

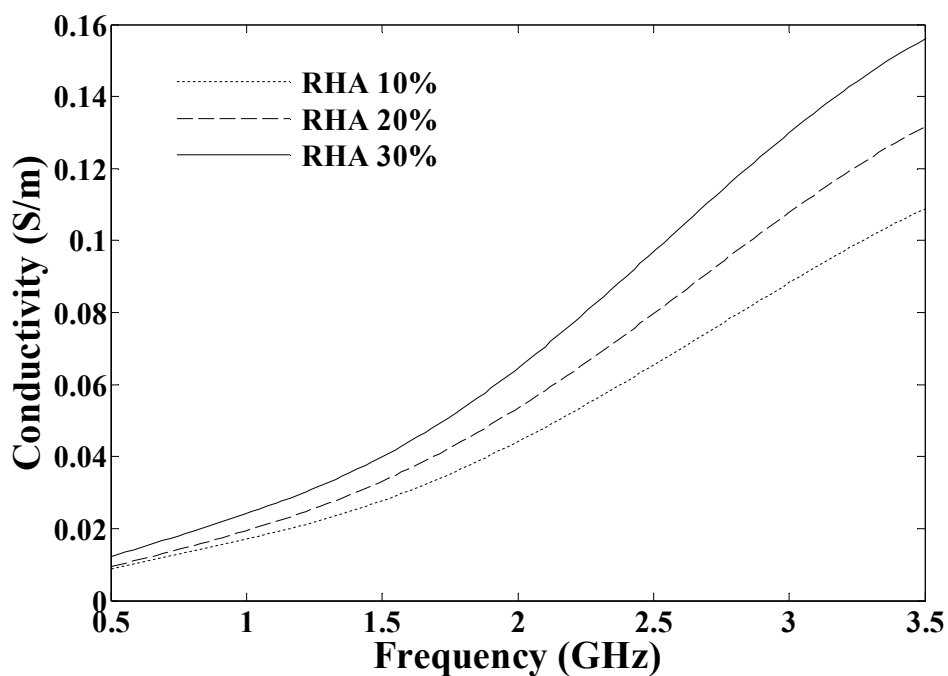


ภาพประกอบ ก.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตตัวอย่างที่ระดับการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่แตกต่างกันที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 ที่อายุคอนกรีต 7 วัน กับความถี่ที่ทำการทดลอง



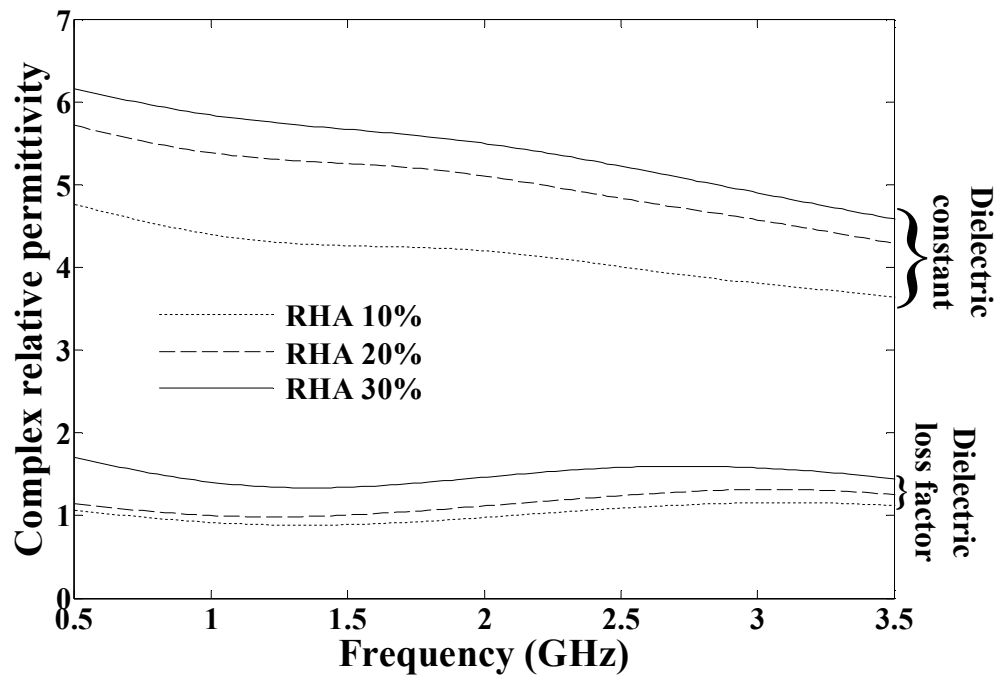


ภาพประกอบ ก.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตตัวอย่างที่ระดับการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่แตกต่างกันที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 ที่อายุคอนกรีต 28 วัน กับความถี่ที่ทำการทดลอง

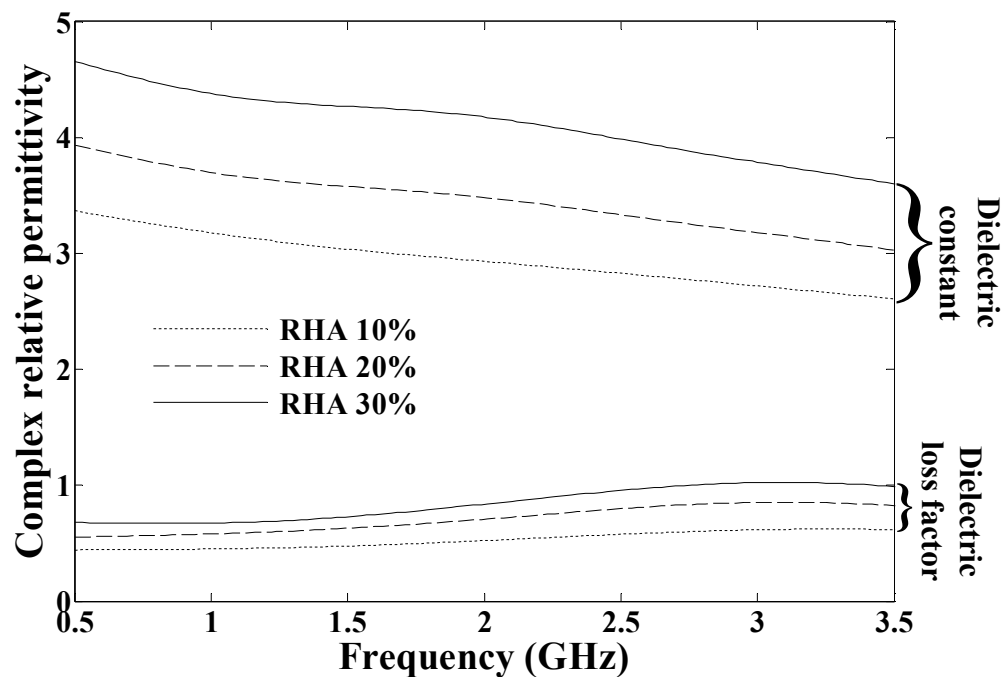


ภาพประกอบ ก.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตตัวอย่างที่ระดับการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่แตกต่างกันที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 ที่อายุคอนกรีต 90 วัน กับความถี่ที่ทำการทดลอง



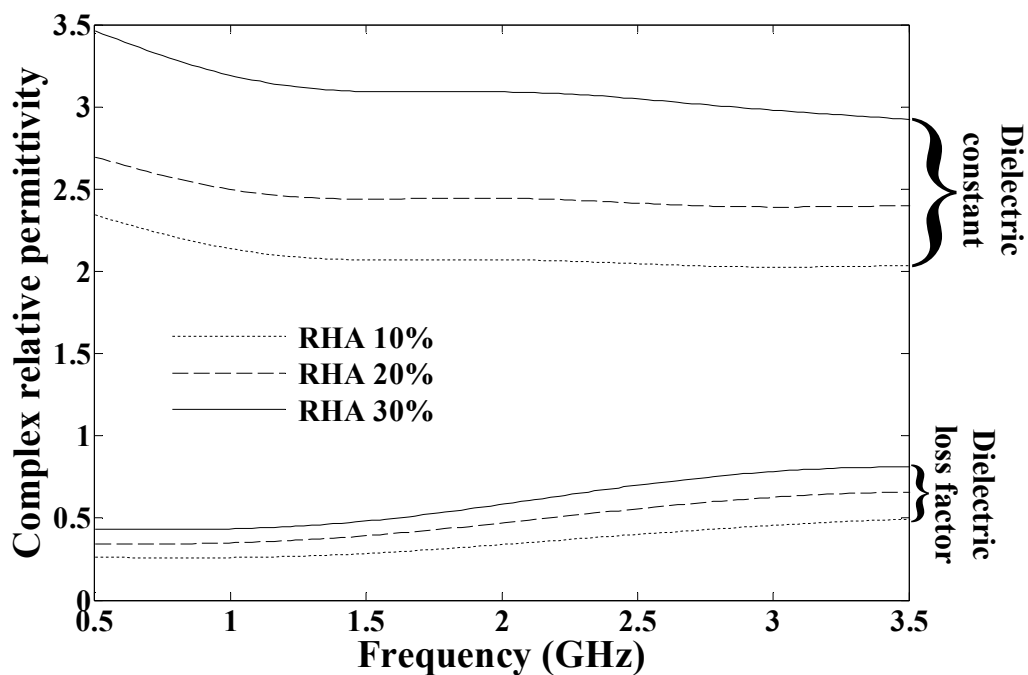


ภาพประกอบ ก.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตตัวอย่างที่ระดับการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่แตกต่างกันที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 ที่อายุคอนกรีต 7 วัน กับความถี่ที่ทำการทดลอง

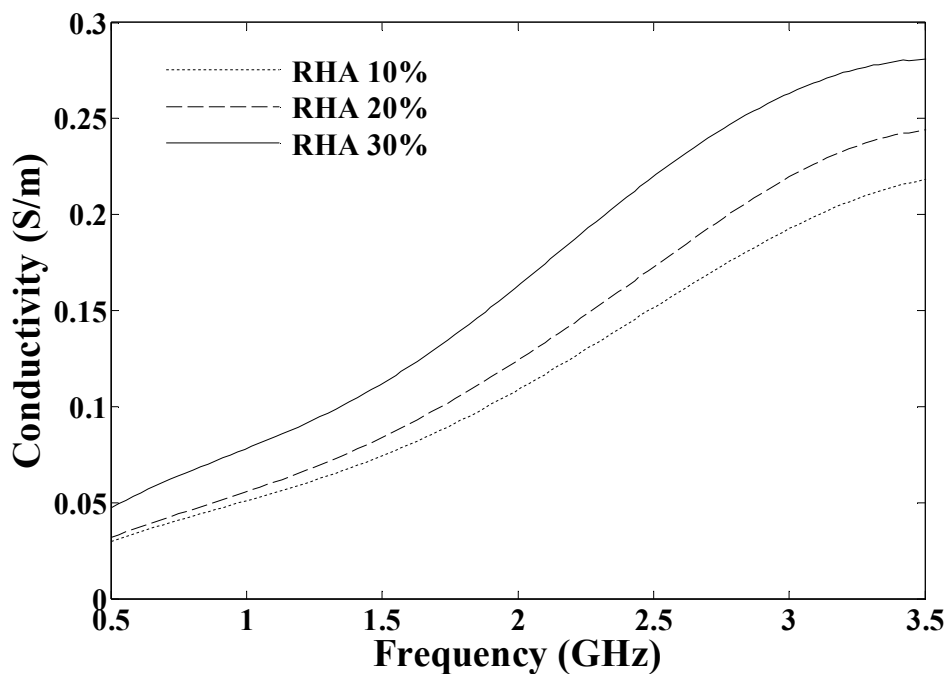


ภาพประกอบ ก.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตตัวอย่างที่ระดับการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่แตกต่างกันที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 ที่อายุคอนกรีต 28 วัน กับความถี่ที่ทำการทดลอง





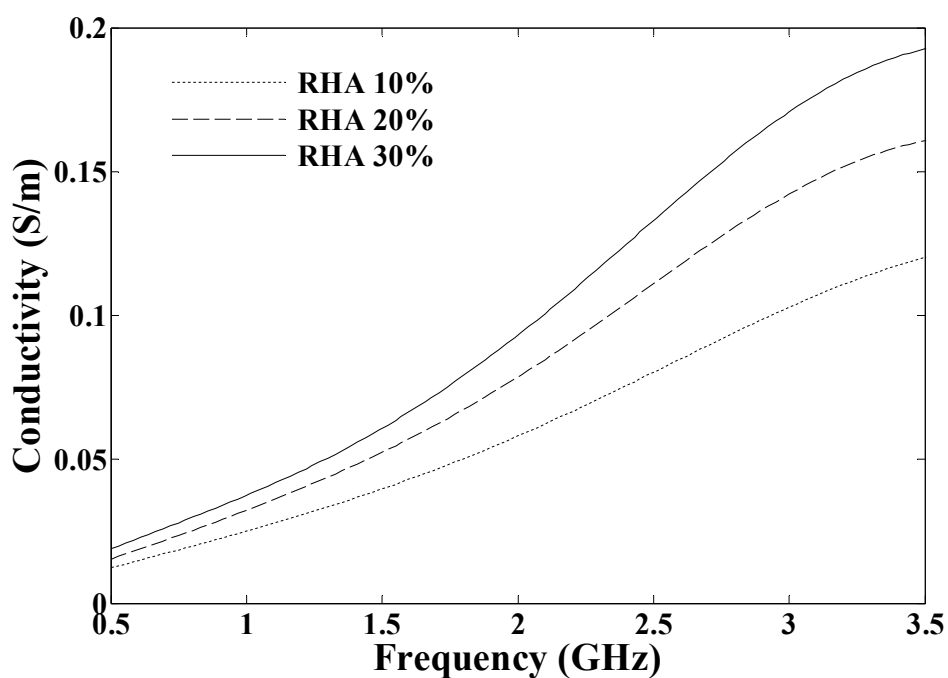
ภาพประกอบ ก.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตตัวอย่างที่ระดับการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่แตกต่างกันที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 ที่อายุคอนกรีต 90 วัน กับความถี่ที่ทำการทดลอง



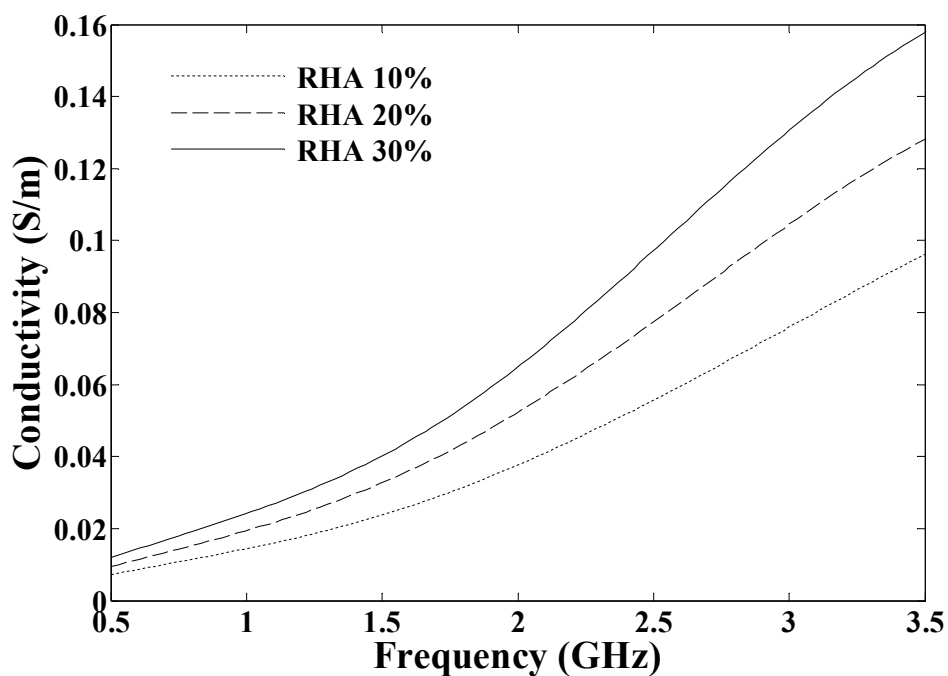
ภาพประกอบ ก.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตตัวอย่างที่ระดับการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่แตกต่างกันที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 ที่อายุคอนกรีต 7 วัน กับความถี่ที่ทำการทดลอง







ภาพประกอบ ก.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตตัวอย่างที่ระดับการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่แตกต่างกันที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 ที่อายุคอนกรีต 28 วัน กับความถี่ที่ทำการทดลอง



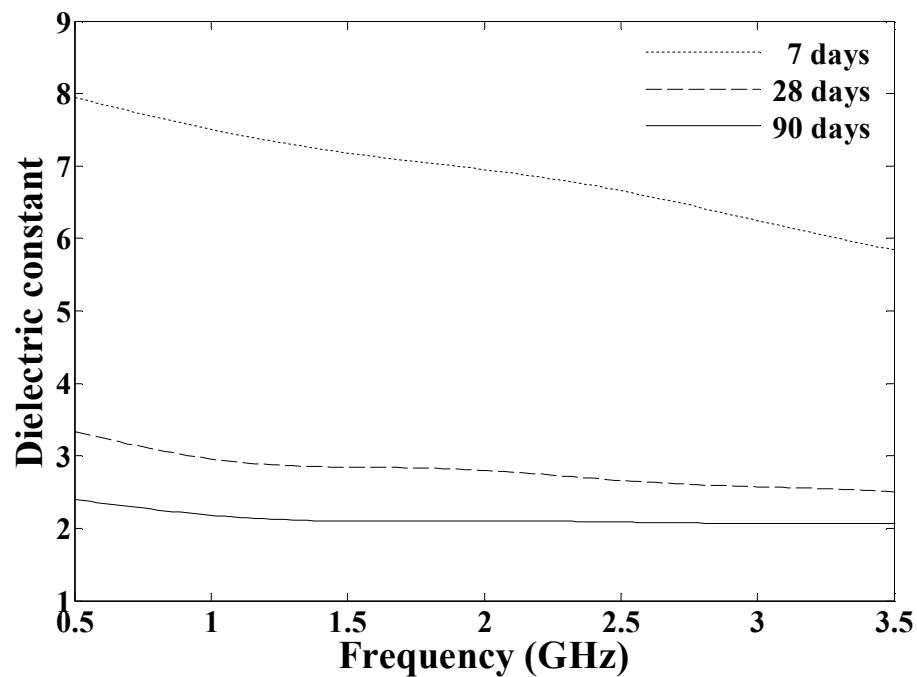
ภาพประกอบ ก.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตตัวอย่างที่ระดับการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่แตกต่างกันที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 ที่อายุคอนกรีต 90 วัน กับความถี่ที่ทำการทดลอง



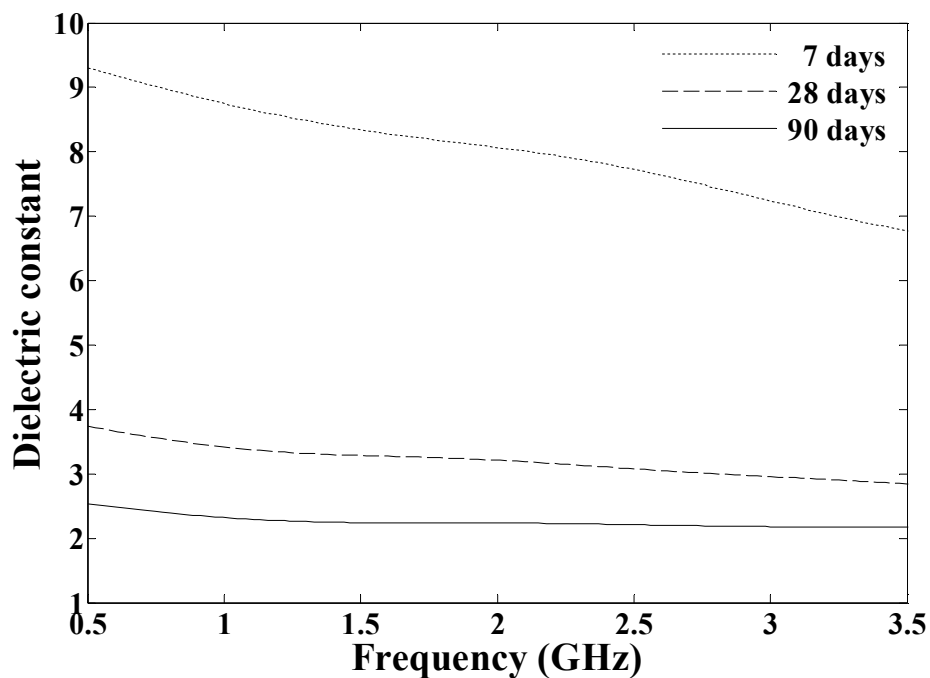
ภาคผนวก ข

ผลการเปรียบเทียบค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบในแต่ละช่วงอายุ



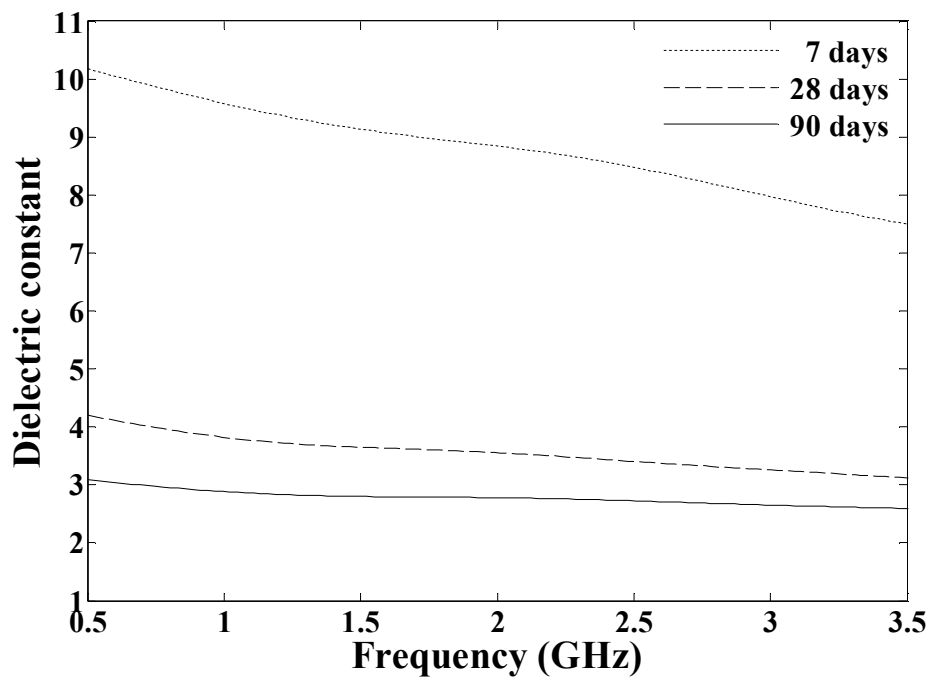


ภาพประกอบ ข.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของคอนกรีตควบคุมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 กับความถี่ในช่วง 0.5-3.5 GHz ที่อายุคอนกรีตตัวอย่าง 7 28 และ 90 วัน

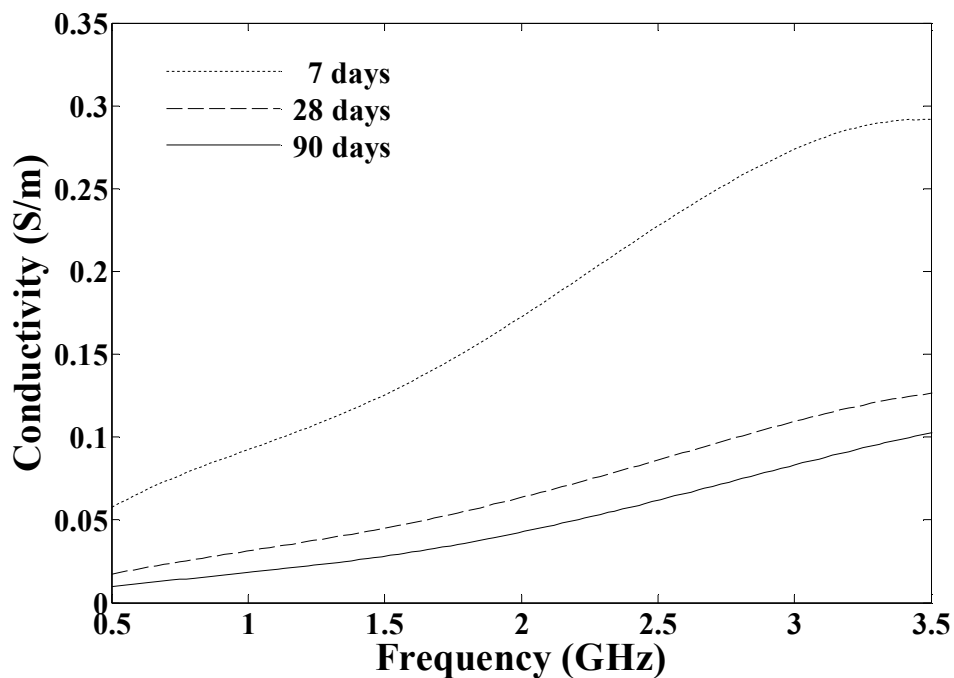


ภาพประกอบ ข.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของคอนกรีตควบคุมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 กับความถี่ในช่วง 0.5-3.5 GHz ที่อายุคอนกรีตตัวอย่าง 7 28 และ 90 วัน



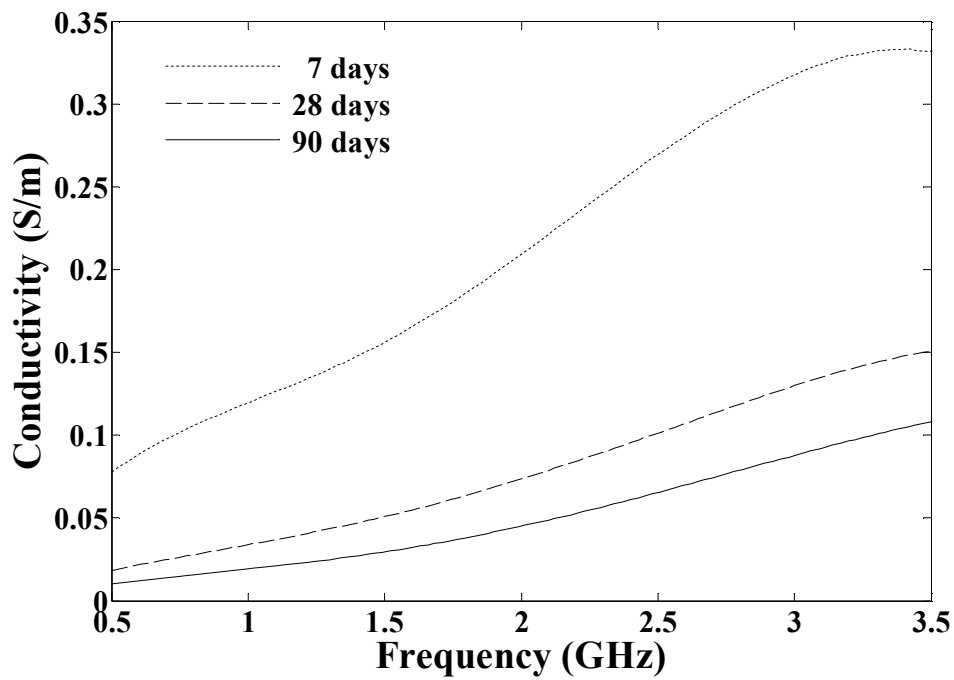


ภาพประกอบ ข.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของคอนกรีตควบคุมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 กับความถี่ในช่วง 0.5-3.5 GHz ที่อายุคอนกรีตตัวอย่าง 7 28 และ 90 วัน

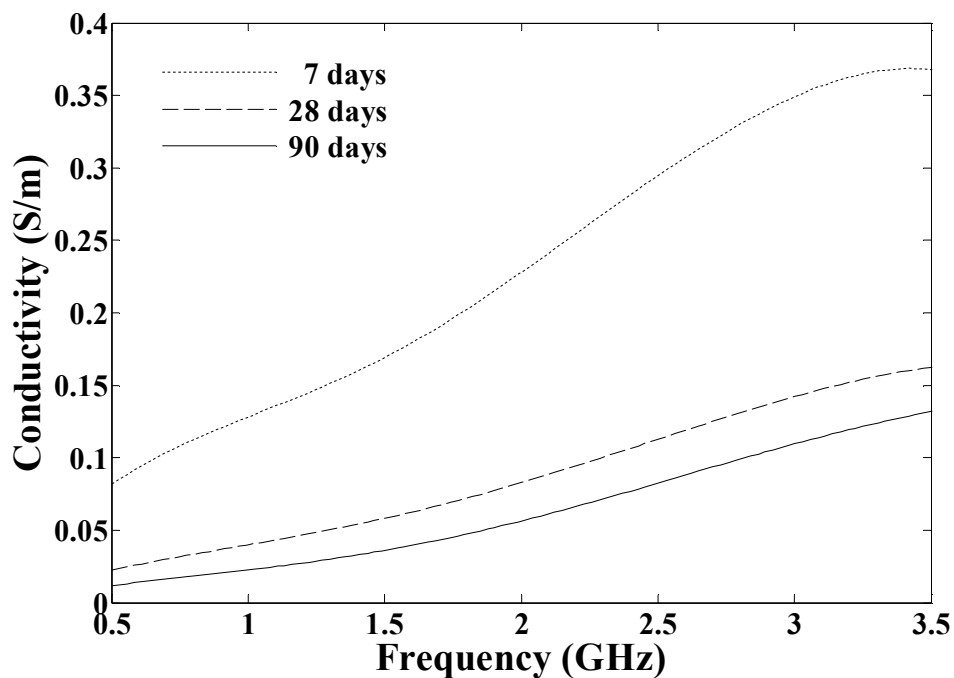


ภาพประกอบ ข.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตควบคุมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 กับความถี่ในช่วง 0.5-3.5 GHz ที่อายุคอนกรีตตัวอย่าง 7 28 และ 90 วัน



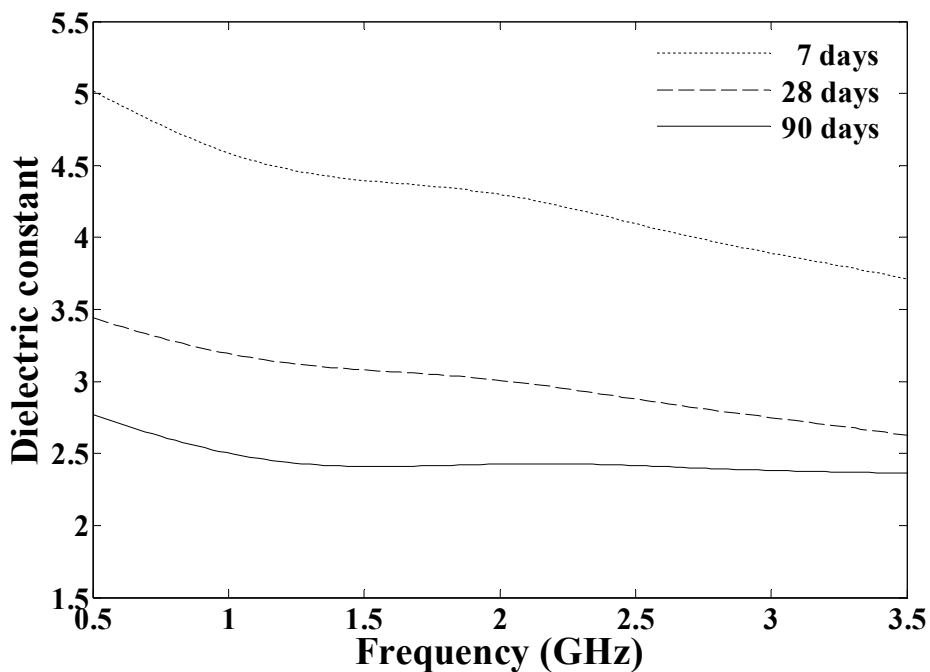


ภาพประกอบ ข.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตควบคุมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 กับความถี่ในช่วง 0.5-3.5 GHz ที่อายุคอนกรีตตัวอย่าง 7 28 และ 90 วัน

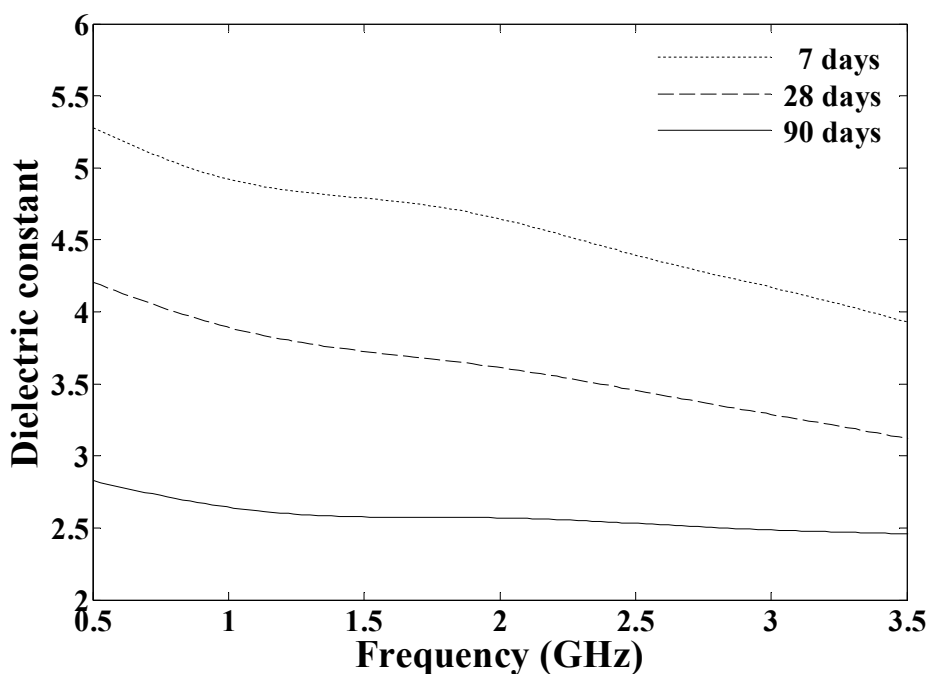


ภาพประกอบ ข.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตควบคุมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 กับความถี่ในช่วง 0.5-3.5 GHz ที่อายุคอนกรีตตัวอย่าง 7 28 และ 90 วัน



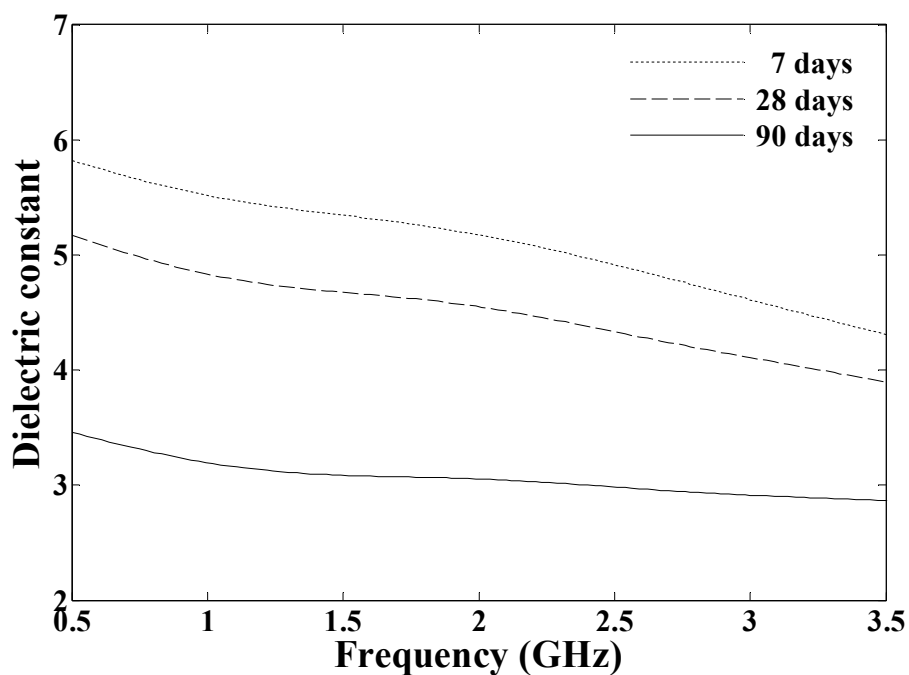


ภาพประกอบ ข.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของคอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่ร้อยละ 10 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 กับความถี่ในช่วง 0.5-3.5 GHz ที่อายุคอนกรีตตัวอย่าง 7 28 และ 90 วัน

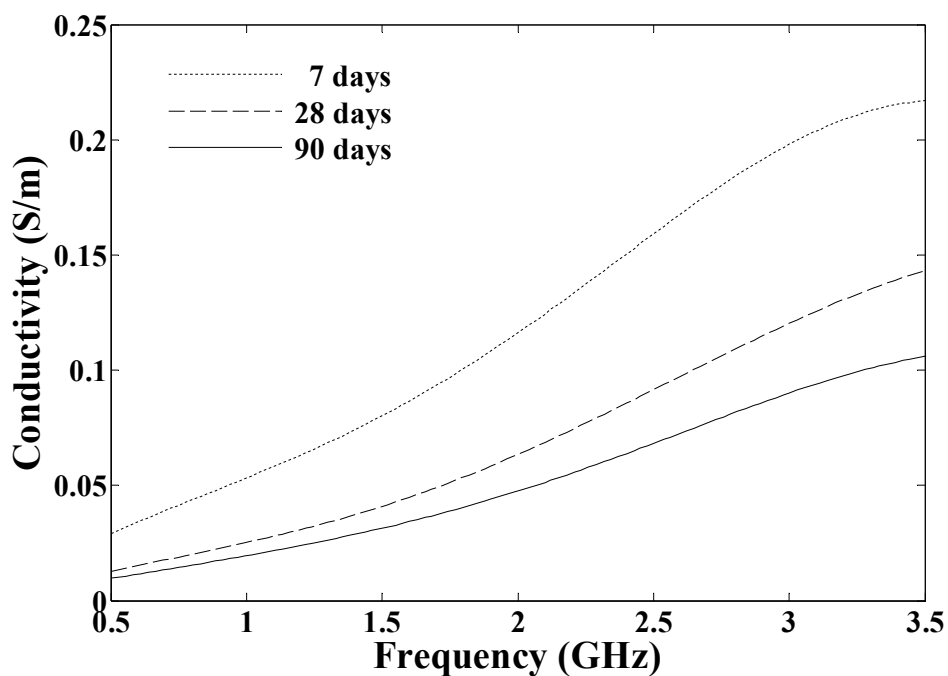


ภาพประกอบ ข.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของคอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่ร้อยละ 20 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 กับความถี่ในช่วง 0.5-3.5 GHz ที่อายุคอนกรีตตัวอย่าง 7 28 และ 90 วัน



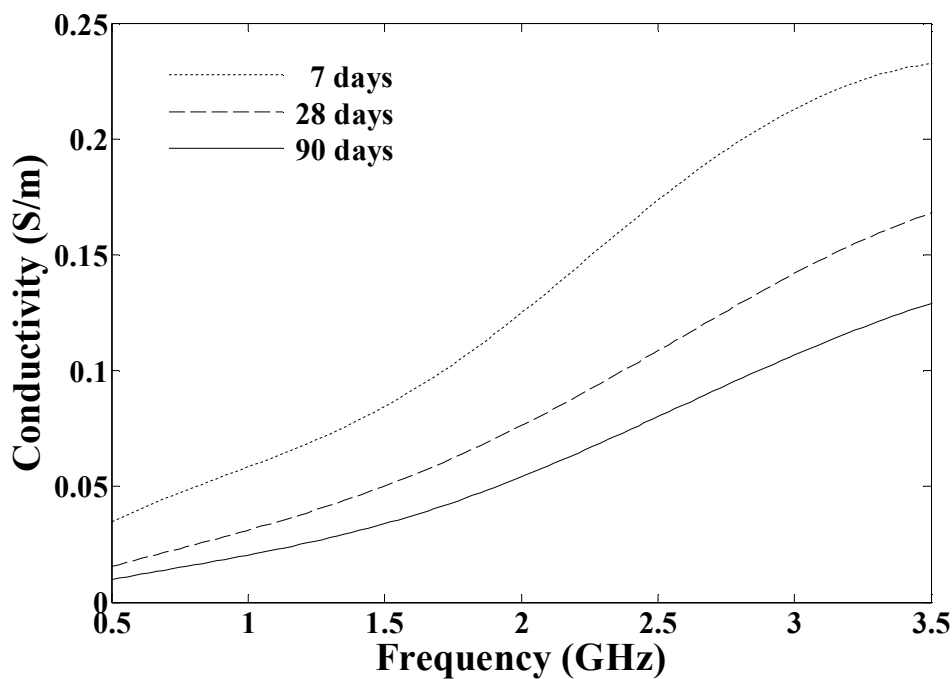


ภาพประกอบ ข.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของคอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่ร้อยละ 30 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 กับความถี่ในช่วง 0.5-3.5 GHz ที่อายุคอนกรีตตัวอย่าง 7 28 และ 90 วัน

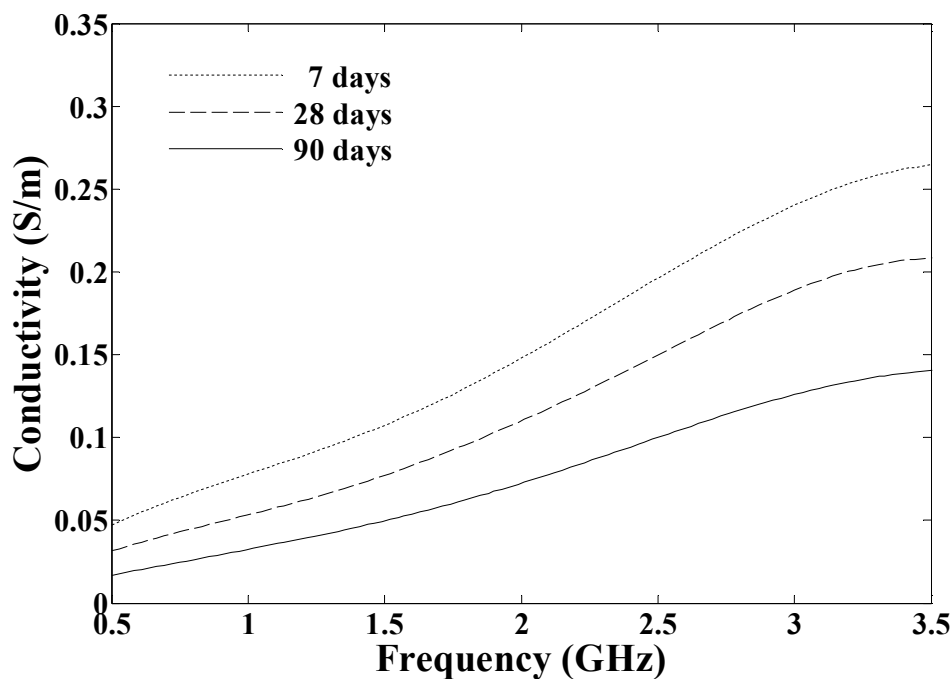


ภาพประกอบ ข.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่ร้อยละ 10 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 กับความถี่ในช่วง 0.5-3.5 GHz ที่อายุคอนกรีตตัวอย่าง 7 28 และ 90 วัน





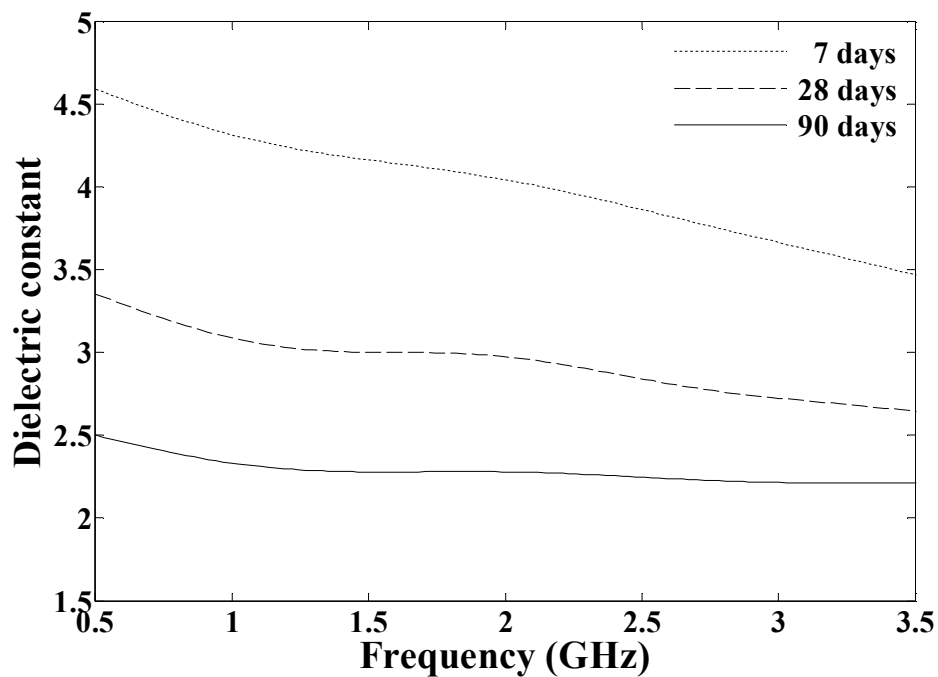
ภาพประกอบ ข.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่ร้อยละ 20 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 กับความถี่ในช่วง 0.5-3.5 GHz ที่อายุคอนกรีตตัวอย่าง 7 28 และ 90 วัน



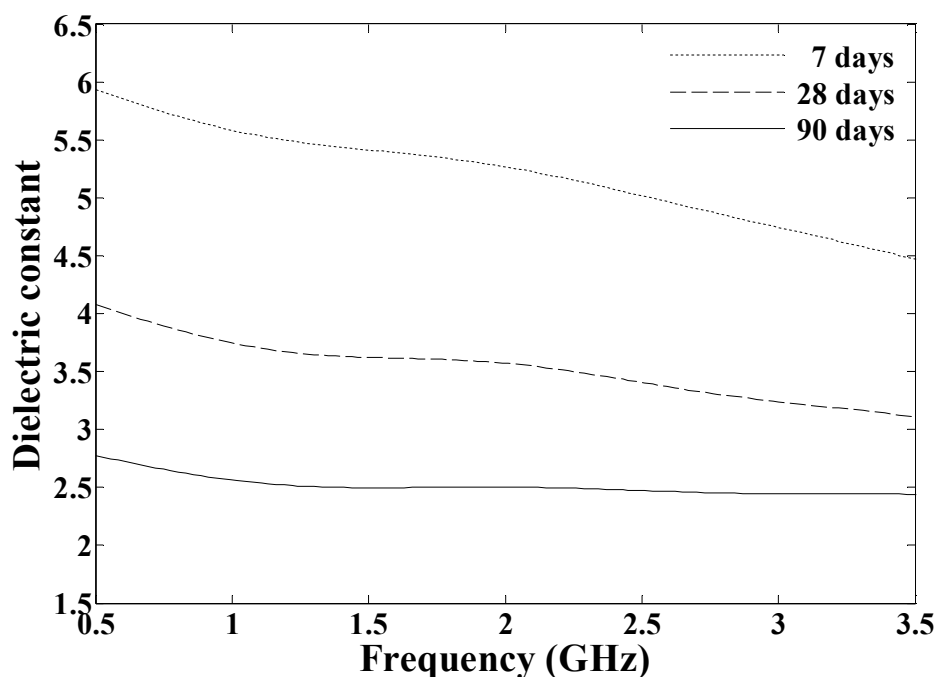
ภาพประกอบ ข.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่ร้อยละ 30 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 กับความถี่ในช่วง 0.5-3.5 GHz ที่อายุคอนกรีตตัวอย่าง 7 28 และ 90 วัน





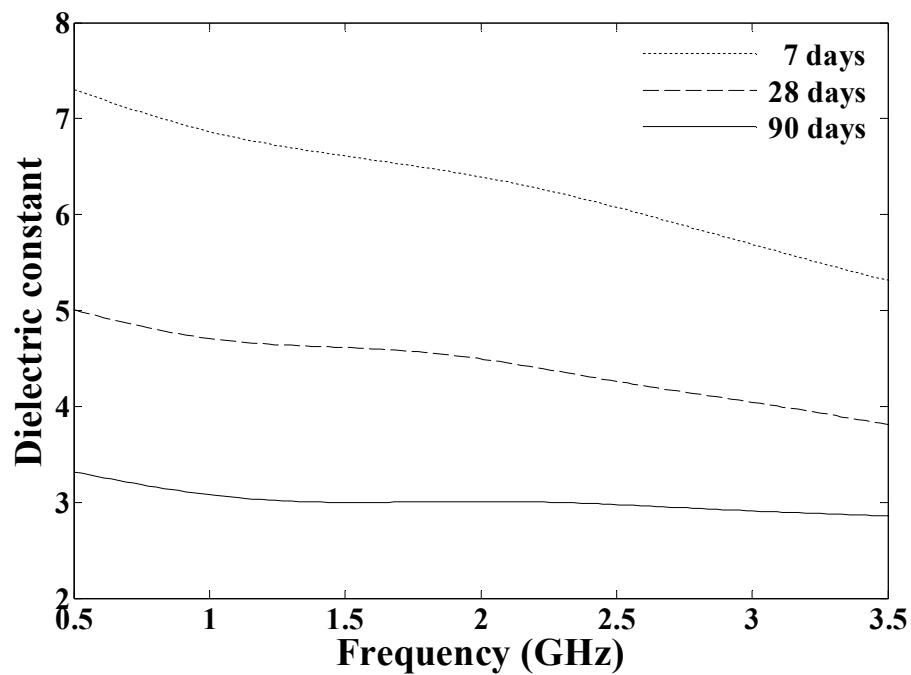


ภาพประกอบ ข.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของคอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่ร้อยละ 10 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 กับความถี่ในช่วง 0.5-3.5 GHz ที่อายุคอนกรีตตัวอย่าง 7 28 และ 90 วัน

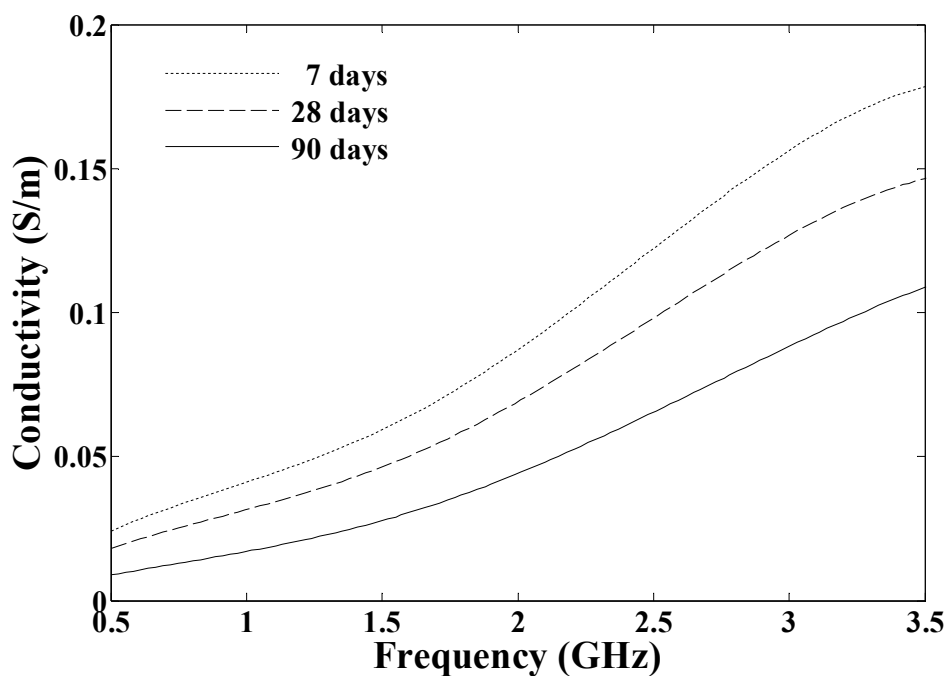


ภาพประกอบ ข.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของคอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่ร้อยละ 20 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 กับความถี่ในช่วง 0.5-3.5 GHz ที่อายุคอนกรีตตัวอย่าง 7 28 และ 90 วัน



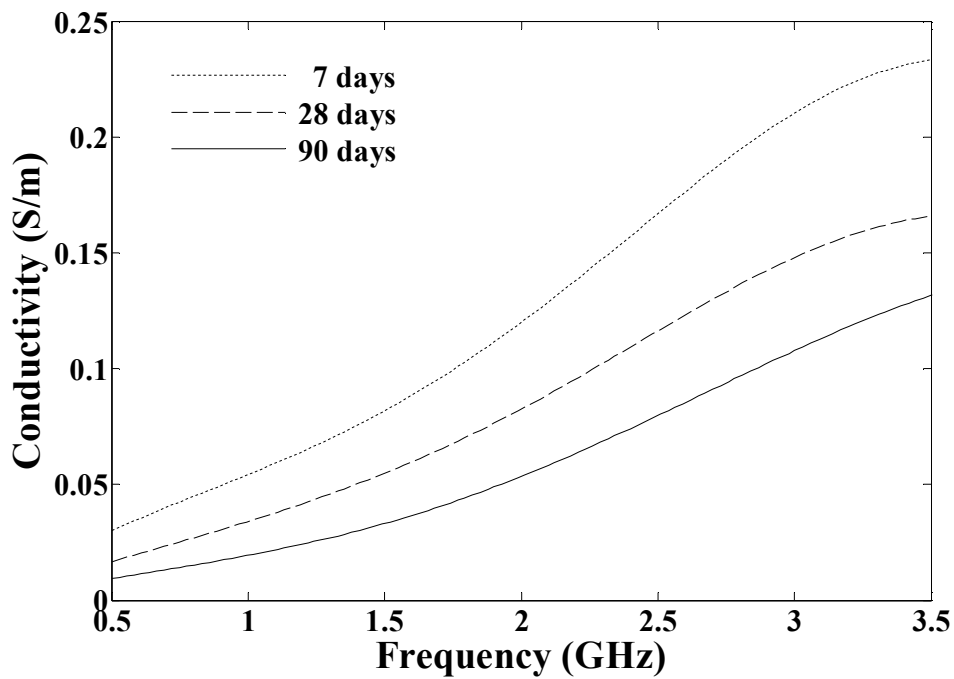


ภาพประกอบ ข.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของคอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่ร้อยละ 30 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 กับความถี่ในช่วง 0.5-3.5 GHz ที่อายุคอนกรีตตัวอย่าง 7 28 และ 90 วัน

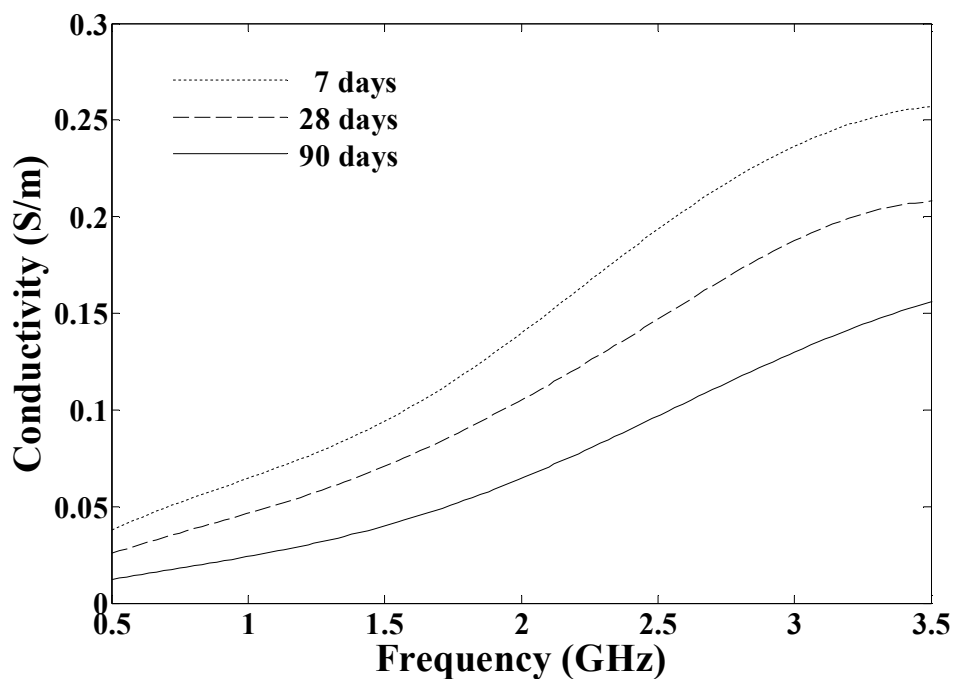


ภาพประกอบ ข.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่ร้อยละ 10 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 กับความถี่ในช่วง 0.5-3.5 GHz ที่อายุคอนกรีตตัวอย่าง 7 28 และ 90 วัน



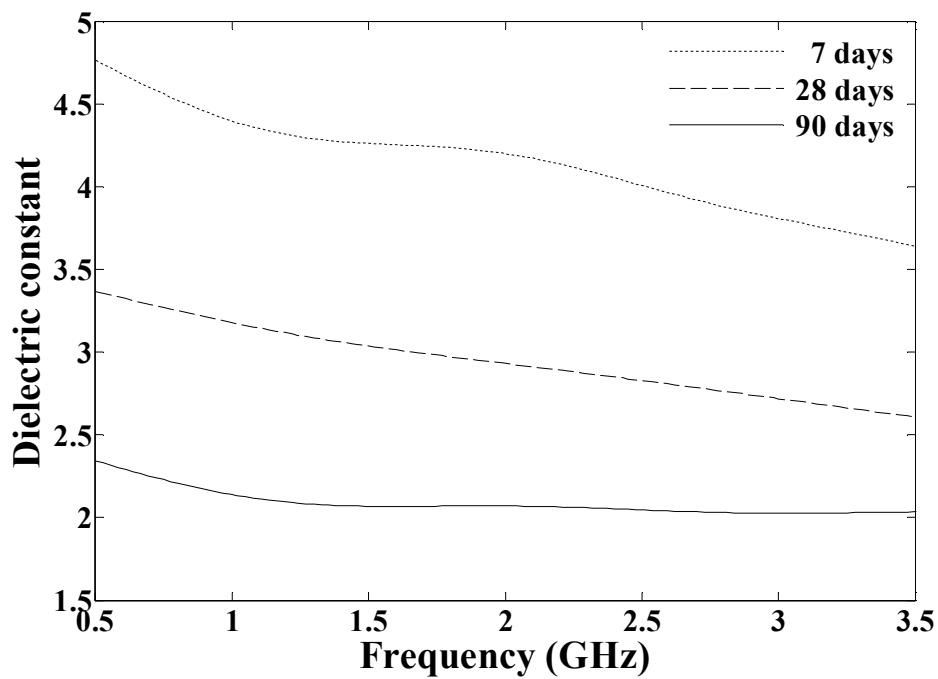


ภาพประกอบ ข.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่ร้อยละ 20 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 กับความถี่ในช่วง 0.5-3.5 GHz ที่อายุคอนกรีตตัวอย่าง 7 28 และ 90 วัน

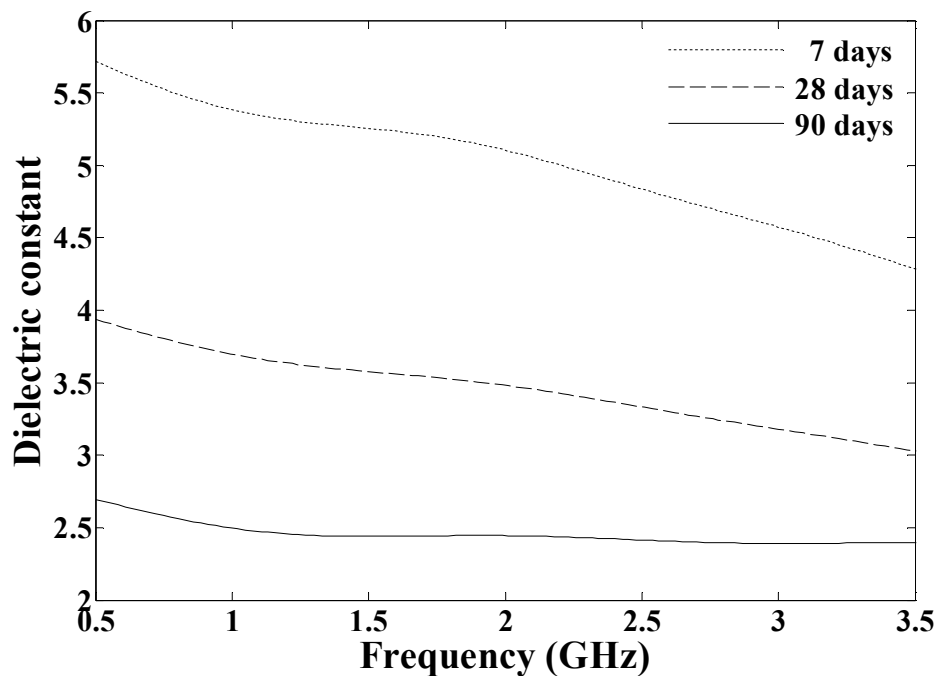


ภาพประกอบ ข.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่ร้อยละ 30 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 กับความถี่ในช่วง 0.5-3.5 GHz ที่อายุคอนกรีตตัวอย่าง 7 28 และ 90 วัน



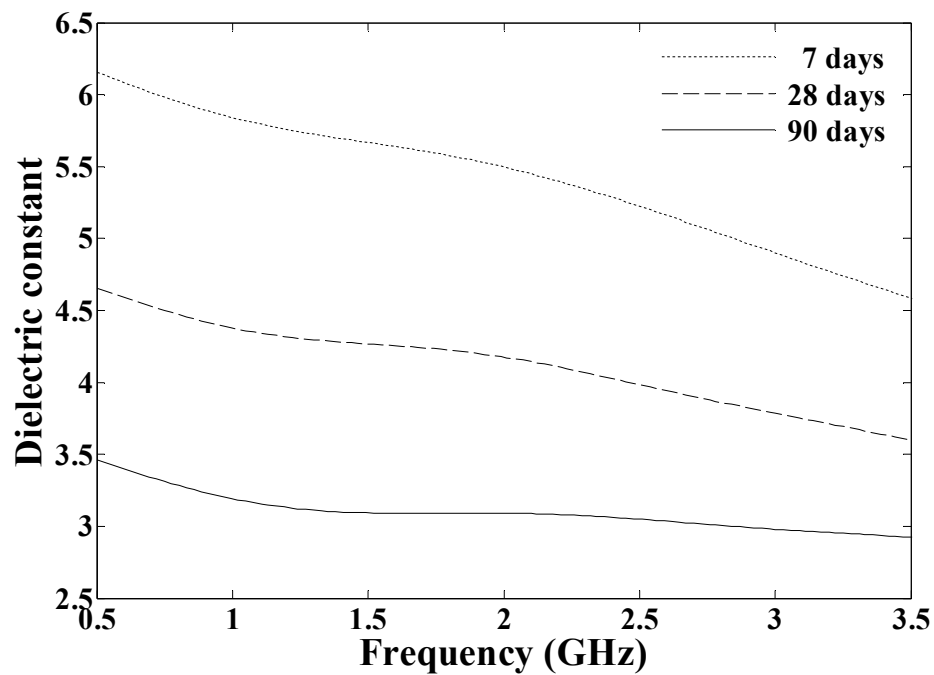


ภาพประกอบ ข.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของคอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่ร้อยละ 10 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 กับความถี่ในช่วง 0.5-3.5 GHz ที่อายุคอนกรีตตัวอย่าง 7 28 และ 90 วัน

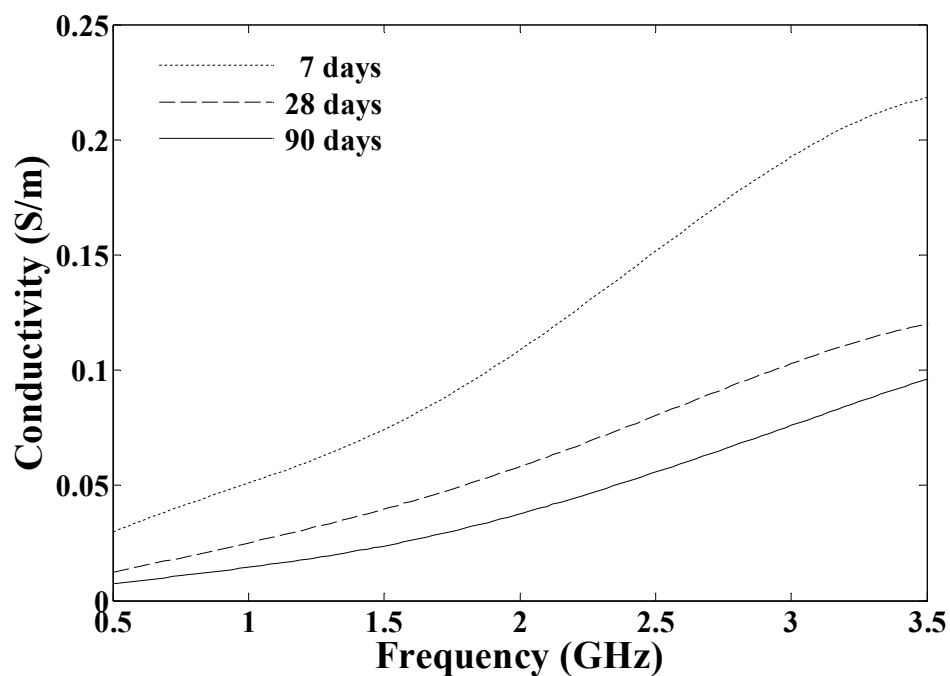


ภาพประกอบ ข.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของคอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่ร้อยละ 20 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 กับความถี่ในช่วง 0.5-3.5 GHz ที่อายุคอนกรีตตัวอย่าง 7 28 และ 90 วัน



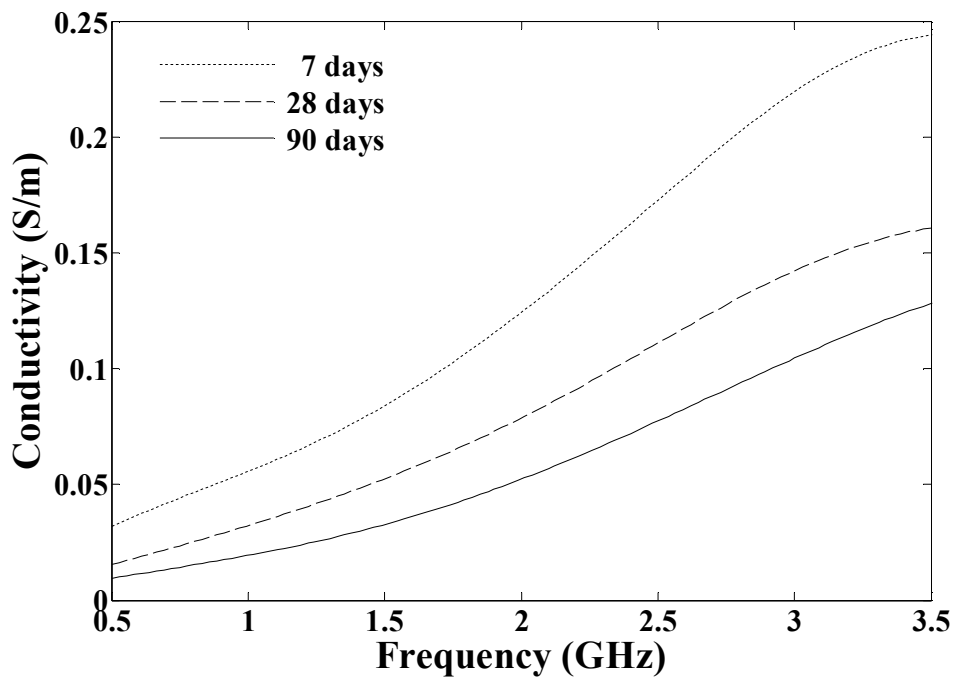


ภาพประกอบ ข.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของคอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่ร้อยละ 30 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 กับความถี่ในช่วง 0.5-3.5 GHz ที่อายุคอนกรีตตัวอย่าง 7 28 และ 90 วัน

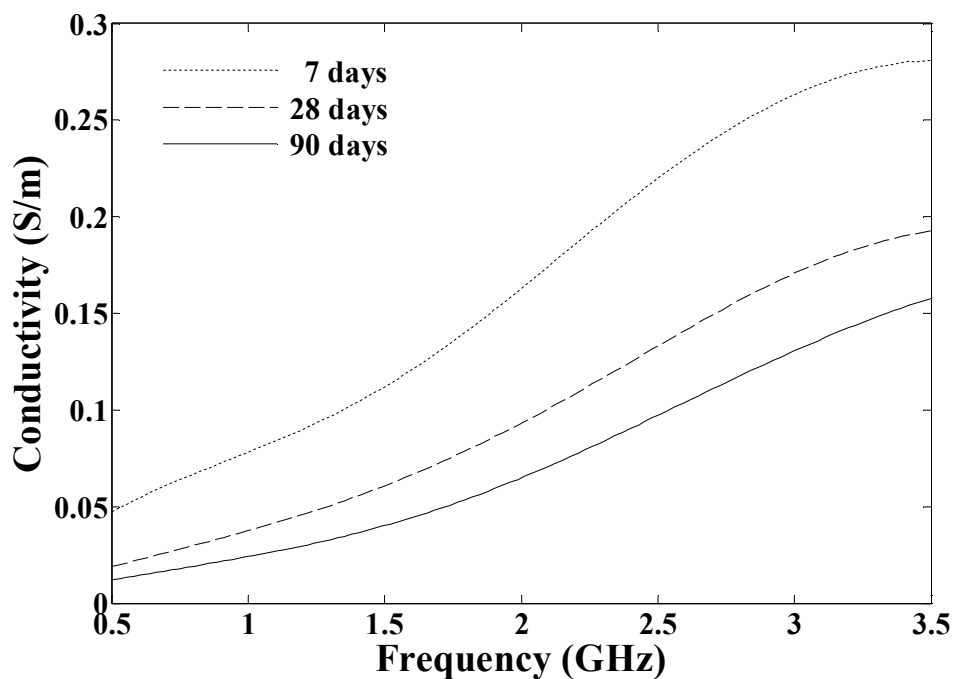


ภาพประกอบ ข.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่ร้อยละ 10 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 กับความถี่ในช่วง 0.5-3.5 GHz ที่อายุคอนกรีตตัวอย่าง 7 28 และ 90 วัน





ภาพประกอบ ข.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่ร้อยละ 20 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 กับความถี่ในช่วง 0.5-3.5 GHz ที่อายุคอนกรีตตัวอย่าง 7 28 และ 90 วัน



ภาพประกอบ ข.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีตตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่ร้อยละ 30 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 กับความถี่ในช่วง 0.5-3.5 GHz ที่อายุคอนกรีตตัวอย่าง 7 28 และ 90 วัน



ภาคผนวก ค

ค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อน ( $\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$ ) และค่าสภาพนำไฟฟ้า ( $\sigma$ ) ของคอนกรีต  
ตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้ากลบที่ทดลองในช่วงความถี่ 0.5-3.5 GHz



ตาราง ค.1 ผลการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนและค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีต  
ควบคุมที่ทดลองในช่วงความถี่ 0.5-3.5 GHz และอายุคอนกรีต 7 วัน

ความถี่ f (GHz)	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน					
	0.45		0.55		0.65	
	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)
0.5	7.9479 - j2.0721	0.0576	9.3047 - j2.7957	0.0778	10.1727 - j2.9377	0.0817
0.6	7.8538 - j1.9780	0.0660	9.1879 - j2.6493	0.0884	10.0488 - j2.7946	0.0933
0.7	7.7612 - j1.8874	0.0735	9.0728 - j2.5078	0.0977	9.9264 - j2.6561	0.1034
0.8	7.6713 - j1.8027	0.0802	8.9607 - j2.3751	0.1057	9.8066 - j2.5257	0.1124
0.9	7.5851 - j1.7265	0.0864	8.8528 - j2.2546	0.1129	9.6903 - j2.4070	0.1205
1.0	7.5033 - j1.6606	0.0924	8.7498 - j2.1488	0.1195	9.5787 - j2.3023	0.1281
1.1	7.4314 - j1.6093	0.0985	8.6590 - j2.0649	0.1264	9.4798 - j2.2190	0.1358
1.2	7.3600 - j1.5660	0.1045	8.5685 - j1.9920	0.1330	9.3808 - j2.1465	0.1433
1.3	7.2943 - j1.5347	0.1110	8.4853 - j1.9362	0.1400	9.2900 - j2.0911	0.1512
1.4	7.2346 - j1.5146	0.1180	8.4098 - j1.8965	0.1477	9.2079 - j2.0521	0.1598
1.5	7.1800 - j1.5044	0.1255	8.3413 - j1.8710	0.1561	9.1340 - j2.0277	0.1692
1.6	7.1299 - j1.5027	0.1338	8.2793 - j1.8575	0.1653	9.0676 - j2.0159	0.1794
1.7	7.0829 - j1.5081	0.1426	8.2222 - j1.8540	0.1753	9.0071 - j2.0146	0.1905
1.8	7.0380 - j1.5192	0.1521	8.1686 - j1.8581	0.1861	8.9506 - j2.0213	0.2024
1.9	6.9941 - j1.5340	0.1621	8.1172 - j1.8676	0.1974	8.8963 - j2.0336	0.2150
2.0	6.9506 - j1.5508	0.1725	8.0668 - j1.8798	0.2092	8.8428 - j2.0486	0.2279
2.1	6.9046 - j1.5687	0.1833	8.0136 - j1.8934	0.2212	8.7859 - j2.0650	0.2412
2.2	6.8525 - j1.5874	0.1943	7.9532 - j1.9075	0.2335	8.7211 - j2.0817	0.2548
2.3	6.7942 - j1.6053	0.2054	7.8853 - j1.9203	0.2457	8.6478 - j2.0970	0.2683
2.4	6.7296 - j1.6212	0.2165	7.8095 - j1.9306	0.2578	8.5663 - j2.1095	0.2816
2.5	6.6590 - j1.6344	0.2273	7.7261 - j1.9374	0.2695	8.4770 - j2.1183	0.2946
2.6	6.5826 - j1.6442	0.2378	7.6356 - j1.9403	0.2807	8.3807 - j2.1230	0.3071





ตาราง ค.1 (ต่อ)

ความถี่ f (GHz)	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน					
	0.45		0.55		0.65	
	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)
2.7	6.5015 - j1.6502	0.2479	7.5392 - j1.9388	0.2912	8.2790 - j2.1231	0.3189
2.8	6.4166 - j1.6517	0.2573	7.4383 - j1.9322	0.3010	8.1737 - j2.1180	0.3299
2.9	6.3298 - j1.6484	0.2659	7.3355 - j1.9202	0.3098	8.0672 - j2.1073	0.3400
3.0	6.2438 - j1.6397	0.2737	7.2340 - j1.9024	0.3175	7.9631 - j2.0905	0.3489
3.1	6.1617 - j1.6258	0.2804	7.1378 - j1.8789	0.3240	7.8651 - j2.0678	0.3566
3.2	6.0811 - j1.6058	0.2859	7.0442 - j1.8487	0.3291	7.7704 - j2.0380	0.3628
3.3	5.9996 - j1.5781	0.2898	6.9504 - j1.8094	0.3322	7.6759 - j1.9986	0.3670
3.4	5.9194 - j1.5425	0.2917	6.8589 - j1.7608	0.3330	7.5842 - j1.9493	0.3687
3.5	5.8414 - j1.4989	0.2919	6.7707 - j1.7031	0.3316	7.4962 - j1.8902	0.3680



ตาราง ค.2 ผลการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนและค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีต  
ควบคุมที่ทดลองในช่วงความถี่ 0.5-3.5 GHz และอายุคอนกรีต 28 วัน

ความถี่ f (GHz)	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน					
	0.45		0.55		0.65	
	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)
0.5	3.3366 - j0.6261	0.0174	3.7399 - j0.6613	0.0184	4.1965 - j0.8124	0.0226
0.6	3.2475 - j0.6117	0.0204	3.6651 - j0.6488	0.0217	4.1110 - j0.7907	0.0264
0.7	3.1623 - j0.5978	0.0233	3.5932 - j0.6368	0.0248	4.0285 - j0.7697	0.0300
0.8	3.0840 - j0.5845	0.0260	3.5265 - j0.6258	0.0279	3.9512 - j0.7503	0.0334
0.9	3.0154 - j0.5722	0.0286	3.4669 - j0.6165	0.0309	3.8813 - j0.7330	0.0367
1.0	2.9583 - j0.5614	0.0312	3.4158 - j0.6091	0.0339	3.8201 - j0.7184	0.0400
1.1	2.9164 - j0.5529	0.0338	3.3763 - j0.6043	0.0370	3.7716 - j0.7077	0.0433
1.2	2.8838 - j0.5459	0.0364	3.3429 - j0.6016	0.0402	3.7290 - j0.6996	0.0467
1.3	2.8626 - j0.5413	0.0391	3.3177 - j0.6016	0.0435	3.6953 - j0.6952	0.0503
1.4	2.8504 - j0.5392	0.0420	3.2990 - j0.6043	0.0471	3.6689 - j0.6943	0.0541
1.5	2.8442 - j0.5397	0.0450	3.2848 - j0.6094	0.0509	3.6477 - j0.6968	0.0581
1.6	2.8407 - j0.5425	0.0483	3.2727 - j0.6168	0.0549	3.6297 - j0.7024	0.0625
1.7	2.8365 - j0.5476	0.0518	3.2608 - j0.6262	0.0592	3.6125 - j0.7105	0.0672
1.8	2.8291 - j0.5544	0.0555	3.2472 - j0.6371	0.0638	3.5945 - j0.7208	0.0722
1.9	2.8167 - j0.5625	0.0595	3.2309 - j0.6491	0.0686	3.5746 - j0.7325	0.0774
2.0	2.7994 - j0.5712	0.0636	3.2121 - j0.6614	0.0736	3.5526 - j0.7448	0.0829
2.1	2.7772 - j0.5805	0.0678	3.1901 - j0.6742	0.0788	3.5279 - j0.7576	0.0885
2.2	2.7499 - j0.5903	0.0722	3.1644 - j0.6877	0.0842	3.4994 - j0.7712	0.0944
2.3	2.7199 - j0.6003	0.0768	3.1363 - j0.7014	0.0897	3.4685 - j0.7848	0.1004
2.4	2.6896 - j0.6101	0.0815	3.1073 - j0.7149	0.0955	3.4364 - j0.7980	0.1065
2.5	2.6612 - j0.6195	0.0862	3.0786 - j0.7280	0.1013	3.4041 - j0.8104	0.1127
2.6	2.6363 - j0.6285	0.0909	3.0509 - j0.7405	0.1071	3.3724 - j0.8219	0.1189



ตาราง ค.2 (ต่อ)

ความถี่ f (GHz)	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน					
	0.45		0.55		0.65	
	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)
2.7	2.6155 - j0.6369	0.0957	3.0248 - j0.7520	0.1130	3.3419 - j0.8320	0.1250
2.8	2.5988 - j0.6445	0.1004	3.0005 - j0.7624	0.1188	3.3125 - j0.8407	0.1310
2.9	2.5857 - j0.6510	0.1050	2.9778 - j0.7712	0.1244	3.2843 - j0.8475	0.1367
3.0	2.5747 - j0.6559	0.1095	2.9565 - j0.7780	0.1299	3.2572 - j0.8521	0.1422
3.1	2.5647 - j0.6590	0.1137	2.9363 - j0.7825	0.1350	3.2314 - j0.8541	0.1473
3.2	2.5537 - j0.6602	0.1175	2.9159 - j0.7847	0.1397	3.2052 - j0.8537	0.1520
3.3	2.5400 - j0.6592	0.1210	2.8939 - j0.7842	0.1440	3.1773 - j0.8503	0.1561
3.4	2.5232 - j0.6557	0.1240	2.8702 - j0.7806	0.1477	3.1478 - j0.8437	0.1596
3.5	2.5031 - j0.6496	0.1265	2.8449 - j0.7739	0.1507	3.1171 - j0.8337	0.1623



ตาราง ค.3 ผลการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนและค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีต  
ควบคุมที่ทดลองในช่วงความถี่ 0.5-3.5 GHz และอายุคอนกรีต 90 วัน

ความถี่ f (GHz)	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน					
	0.45		0.55		0.65	
	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)
0.5	2.3991 - j0.3504	0.0097	2.5285 - j0.3699	0.0103	3.0839 - j0.4272	0.0119
0.6	2.3492 - j0.3448	0.0115	2.4815 - j0.3633	0.0121	3.0383 - j0.4213	0.0141
0.7	2.3011 - j0.3394	0.0132	2.4361 - j0.3571	0.0139	2.9943 - j0.4159	0.0162
0.8	2.2562 - j0.3346	0.0149	2.3937 - j0.3516	0.0156	2.9530 - j0.4115	0.0183
0.9	2.2157 - j0.3306	0.0166	2.3555 - j0.3471	0.0174	2.9157 - j0.4084	0.0204
1.0	2.1807 - j0.3278	0.0182	2.3223 - j0.3439	0.0191	2.8831 - j0.4070	0.0226
1.1	2.1536 - j0.3264	0.0200	2.2966 - j0.3424	0.0210	2.8575 - j0.4076	0.0249
1.2	2.1309 - j0.3264	0.0218	2.2749 - j0.3425	0.0229	2.8356 - j0.4104	0.0274
1.3	2.1146 - j0.3280	0.0237	2.2592 - j0.3445	0.0249	2.8190 - j0.4156	0.0301
1.4	2.1041 - j0.3314	0.0258	2.2487 - j0.3484	0.0271	2.8073 - j0.4231	0.0330
1.5	2.0983 - j0.3364	0.0281	2.2425 - j0.3541	0.0296	2.7994 - j0.4330	0.0361
1.6	2.0963 - j0.3432	0.0305	2.2395 - j0.3617	0.0322	2.7942 - j0.4449	0.0396
1.7	2.0966 - j0.3515	0.0332	2.2386 - j0.3708	0.0351	2.7906 - j0.4588	0.0434
1.8	2.0982 - j0.3611	0.0362	2.2385 - j0.3813	0.0382	2.7875 - j0.4742	0.0475
1.9	2.0999 - j0.3717	0.0393	2.2384 - j0.3928	0.0415	2.7837 - j0.4906	0.0519
2.0	2.1010 - j0.3827	0.0426	2.2374 - j0.4047	0.0450	2.7789 - j0.5071	0.0564
2.1	2.1009 - j0.3943	0.0461	2.2351 - j0.4171	0.0487	2.7723 - j0.5241	0.0612
2.2	2.0994 - j0.4068	0.0498	2.2312 - j0.4303	0.0527	2.7634 - j0.5419	0.0663
2.3	2.0964 - j0.4195	0.0537	2.2258 - j0.4438	0.0568	2.7522 - j0.5596	0.0716
2.4	2.0921 - j0.4323	0.0577	2.2191 - j0.4573	0.0611	2.7392 - j0.5769	0.0770
2.5	2.0871 - j0.4447	0.0618	2.2116 - j0.4704	0.0654	2.7248 - j0.5934	0.0825
2.6	2.0818 - j0.4568	0.0661	2.2039 - j0.4830	0.0699	2.7095 - j0.6088	0.0881



ตาราง ค.3 (ต่อ)

ความถี่ f (GHz)	อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน					
	0.45		0.55		0.65	
	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)
2.7	2.0768 - j0.4683	0.0703	2.1966 - j0.4951	0.0744	2.6939 - j0.6230	0.0936
2.8	2.0725 - j0.4792	0.0746	2.1901 - j0.5065	0.0789	2.6785 - j0.6360	0.0991
2.9	2.0693 - j0.4893	0.0789	2.1847 - j0.5170	0.0834	2.6637 - j0.6473	0.1044
3.0	2.0674 - j0.4984	0.0832	2.1807 - j0.5264	0.0878	2.6501 - j0.6569	0.1096
3.1	2.0669 - j0.5062	0.0873	2.1782 - j0.5344	0.0922	2.6379 - j0.6645	0.1146
3.2	2.0674 - j0.5131	0.0913	2.1766 - j0.5414	0.0964	2.6267 - j0.6704	0.1194
3.3	2.0687 - j0.5191	0.0953	2.1759 - j0.5474	0.1005	2.6158 - j0.6747	0.1239
3.4	2.0705 - j0.5239	0.0991	2.1755 - j0.5520	0.1044	2.6051 - j0.6770	0.1281
3.5	2.0722 - j0.5273	0.1027	2.1751 - j0.5552	0.1081	2.5946 - j0.6773	0.1319



ตาราง ค.4 ผลการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนและค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีต ตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่ทดลองในช่วงความถี่ 0.5-3.5 GHz อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 และอายุคอนกรีต 7 วัน

ความถี่ f (GHz)	ร้อยละการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบ					
	10		20		30	
	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)
0.5	5.0175 - j1.0432	0.0290	5.2797 - j1.2446	0.0346	5.8209 - j1.6935	0.0471
0.6	4.9201 - j1.0219	0.0341	5.1942 - j1.1987	0.0400	5.7518 - j1.6265	0.0543
0.7	4.8260 - j1.0018	0.0390	5.1128 - j1.1547	0.0450	5.6852 - j1.5620	0.0608
0.8	4.7376 - j0.9837	0.0438	5.0387 - j1.1143	0.0496	5.6228 - j1.5017	0.0668
0.9	4.6573 - j0.9685	0.0485	4.9743 - j1.0788	0.0540	5.5661 - j1.4473	0.0725
1.0	4.5869 - j0.9569	0.0532	4.9211 - j1.0494	0.0584	5.5159 - j1.4001	0.0779
1.1	4.5311 - j0.9497	0.0581	4.8816 - j1.0284	0.0629	5.4749 - j1.3633	0.0834
1.2	4.4826 - j0.9462	0.0632	4.8493 - j1.0132	0.0676	5.4368 - j1.3321	0.0889
1.3	4.4452 - j0.9470	0.0685	4.8252 - j1.0058	0.0727	5.4034 - j1.3094	0.0947
1.4	4.4172 - j0.9521	0.0742	4.8063 - j1.0060	0.0784	5.3733 - j1.2948	0.1008
1.5	4.3962 - j0.9610	0.0802	4.7892 - j1.0132	0.0845	5.3445 - j1.2875	0.1074
1.6	4.3793 - j0.9733	0.0866	4.7707 - j1.0266	0.0914	5.3153 - j1.2868	0.1145
1.7	4.3634 - j0.9885	0.0935	4.7480 - j1.0456	0.0989	5.2841 - j1.2917	0.1222
1.8	4.3459 - j1.0060	0.1007	4.7195 - j1.0689	0.1070	5.2500 - j1.3012	0.1303
1.9	4.3245 - j1.0251	0.1084	4.6848 - j1.0951	0.1158	5.2128 - j1.3142	0.1389
2.0	4.2989 - j1.0446	0.1162	4.6453 - j1.1221	0.1248	5.1732 - j1.3290	0.1479
2.1	4.2679 - j1.0647	0.1244	4.6008 - j1.1496	0.1343	5.1300 - j1.3452	0.1572
2.2	4.2302 - j1.0857	0.1329	4.5509 - j1.1777	0.1441	5.0815 - j1.3626	0.1668
2.3	4.1875 - j1.1066	0.1416	4.4983 - j1.2042	0.1541	5.0288 - j1.3798	0.1766
2.4	4.1420 - j1.1264	0.1504	4.4457 - j1.2279	0.1639	4.9730 - j1.3961	0.1864
2.5	4.0957 - j1.1444	0.1592	4.3947 - j1.2476	0.1735	4.9150 - j1.4105	0.1962



ตาราง ค.4 (ต่อ)

ความถี่ f (GHz)	ร้อยละการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้ากลบ					
	10		20		30	
	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)
2.6	4.0501 - j1.1600	0.1678	4.3460 - j1.2628	0.1827	4.8552 - j1.4227	0.2058
2.7	4.0065 - j1.1726	0.1761	4.2997 - j1.2733	0.1913	4.7940 - j1.4321	0.2151
2.8	3.9653 - j1.1816	0.1841	4.2552 - j1.2788	0.1992	4.7319 - j1.4384	0.2241
2.9	3.9267 - j1.1863	0.1914	4.2116 - j1.2794	0.2064	4.6695 - j1.4408	0.2325
3.0	3.8906 - j1.1863	0.1980	4.1684 - j1.2754	0.2129	4.6080 - j1.4391	0.2402
3.1	3.8569 - j1.1818	0.2038	4.1257 - j1.2674	0.2186	4.5491 - j1.4332	0.2472
3.2	3.8234 - j1.1728	0.2088	4.0813 - j1.2556	0.2235	4.4905 - j1.4228	0.2533
3.3	3.7882 - j1.1586	0.2127	4.0332 - j1.2394	0.2276	4.4301 - j1.4069	0.2583
3.4	3.7514 - j1.1393	0.2155	3.9829 - j1.2190	0.2306	4.3693 - j1.3857	0.2621
3.5	3.7133 - j1.1154	0.2172	3.9318 - j1.1945	0.2326	4.3090 - j1.3593	0.2647



ตาราง ค.5 ผลการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนและค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีต ตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่ทดลองในช่วงความถี่ 0.5-3.5 GHz อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 และอายุคอนกรีต 28 วัน

ความถี่ f (GHz)	ร้อยละการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบ					
	10		20		30	
	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)
0.5	3.4406 - j0.4581	0.0127	4.2051 - j0.5589	0.0155	5.1686 - j1.1311	0.0315
0.6	3.3843 - j0.4554	0.0152	4.1353 - j0.5576	0.0186	5.0920 - j1.0897	0.0364
0.7	3.3299 - j0.4532	0.0176	4.0677 - j0.5568	0.0217	5.0182 - j1.0503	0.0409
0.8	3.2790 - j0.4518	0.0201	4.0038 - j0.5567	0.0248	4.9492 - j1.0144	0.0451
0.9	3.2330 - j0.4518	0.0226	3.9453 - j0.5579	0.0279	4.8871 - j0.9833	0.0492
1.0	3.1928 - j0.4533	0.0252	3.8929 - j0.5606	0.0312	4.8328 - j0.9581	0.0533
1.1	3.1610 - j0.4564	0.0279	3.8501 - j0.5647	0.0346	4.7898 - j0.9403	0.0575
1.2	3.1332 - j0.4618	0.0308	3.8109 - j0.5710	0.0381	4.7519 - j0.9278	0.0619
1.3	3.1112 - j0.4693	0.0339	3.7780 - j0.5794	0.0419	4.7213 - j0.9216	0.0667
1.4	3.0941 - j0.4789	0.0373	3.7503 - j0.5897	0.0459	4.6964 - j0.9211	0.0717
1.5	3.0801 - j0.4905	0.0409	3.7263 - j0.6020	0.0502	4.6750 - j0.9254	0.0772
1.6	3.0679 - j0.5040	0.0449	3.7044 - j0.6162	0.0548	4.6546 - j0.9337	0.0831
1.7	3.0555 - j0.5191	0.0491	3.6830 - j0.6321	0.0598	4.6331 - j0.9450	0.0894
1.8	3.0418 - j0.5356	0.0536	3.6610 - j0.6493	0.0650	4.6087 - j0.9586	0.0960
1.9	3.0258 - j0.5528	0.0584	3.6377 - j0.6674	0.0705	4.5805 - j0.9737	0.1029
2.0	3.0077 - j0.5701	0.0634	3.6131 - j0.6856	0.0763	4.5490 - j0.9893	0.1101
2.1	2.9868 - j0.5875	0.0686	3.5863 - j0.7042	0.0823	4.5132 - j1.0057	0.1175
2.2	2.9623 - j0.6057	0.0741	3.5562 - j0.7238	0.0886	4.4720 - j1.0232	0.1252
2.3	2.9354 - j0.6238	0.0798	3.5238 - j0.7434	0.0951	4.4270 - j1.0413	0.1332
2.4	2.9072 - j0.6414	0.0856	3.4900 - j0.7626	0.1018	4.3799 - j1.0594	0.1414
2.5	2.8787 - j0.6580	0.0915	3.4556 - j0.7809	0.1086	4.3322 - j1.0769	0.1498





ตาราง ค.5 (ต่อ)

ความถี่ f (GHz)	ร้อยละการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยแก้วกลบ					
	10		20		30	
	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)
2.6	2.8505 - j0.6736	0.0974	3.4211 - j0.7981	0.1154	4.2847 - j1.0935	0.1582
2.7	2.8233 - j0.6879	0.1033	3.3868 - j0.8140	0.1223	4.2381 - j1.1082	0.1665
2.8	2.7971 - j0.7007	0.1092	3.3529 - j0.8283	0.1290	4.1927 - j1.1203	0.1745
2.9	2.7720 - j0.7119	0.1149	3.3195 - j0.8406	0.1356	4.1485 - j1.1287	0.1821
3.0	2.7481 - j0.7212	0.1204	3.2870 - j0.8507	0.1420	4.1059 - j1.1324	0.1890
3.1	2.7254 - j0.7282	0.1256	3.2559 - j0.8581	0.1480	4.0655 - j1.1312	0.1951
3.2	2.7025 - j0.7333	0.1305	3.2245 - j0.8632	0.1537	4.0251 - j1.1248	0.2002
3.3	2.6781 - j0.7365	0.1352	3.1913 - j0.8659	0.1590	3.9827 - j1.1126	0.2043
3.4	2.6525 - j0.7373	0.1394	3.1569 - j0.8658	0.1638	3.9391 - j1.0947	0.2071
3.5	2.6257 - j0.7355	0.1432	3.1216 - j0.8628	0.1680	3.8946 - j1.0716	0.2087



ตาราง ค.6 ผลการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนและค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีต ตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่ทดลองในช่วงความถี่ 0.5-3.5 GHz อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.45 และอายุคอนกรีต 90 วัน

ความถี่ f (GHz)	ร้อยละการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบ					
	10		20		30	
	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)
0.5	2.7675 - j0.3467	0.0096	2.8275 - j0.3575	0.0099	3.4591 - j0.6059	0.0169
0.6	2.7067 - j0.3464	0.0116	2.7852 - j0.3583	0.0120	3.3984 - j0.5997	0.0200
0.7	2.6481 - j0.3465	0.0135	2.7445 - j0.3593	0.0140	3.3400 - j0.5939	0.0231
0.8	2.5935 - j0.3470	0.0154	2.7066 - j0.3610	0.0161	3.2854 - j0.5890	0.0262
0.9	2.5445 - j0.3483	0.0174	2.6727 - j0.3634	0.0182	3.2362 - j0.5852	0.0293
1.0	2.5024 - j0.3505	0.0195	2.6437 - j0.3669	0.0204	3.1936 - j0.5828	0.0324
1.1	2.4701 - j0.3534	0.0216	2.6214 - j0.3714	0.0227	3.1604 - j0.5822	0.0356
1.2	2.4436 - j0.3576	0.0239	2.6030 - j0.3777	0.0252	3.1321 - j0.5831	0.0389
1.3	2.4253 - j0.3630	0.0262	2.5899 - j0.3857	0.0279	3.1109 - j0.5859	0.0424
1.4	2.4143 - j0.3693	0.0288	2.5815 - j0.3954	0.0308	3.0959 - j0.5906	0.0460
1.5	2.4096 - j0.3768	0.0314	2.5768 - j0.4070	0.0340	3.0856 - j0.5969	0.0498
1.6	2.4096 - j0.3852	0.0343	2.5746 - j0.4202	0.0374	3.0785 - j0.6050	0.0538
1.7	2.4128 - j0.3947	0.0373	2.5737 - j0.4352	0.0412	3.0730 - j0.6146	0.0581
1.8	2.4176 - j0.4051	0.0406	2.5731 - j0.4515	0.0452	3.0677 - j0.6257	0.0627
1.9	2.4226 - j0.4161	0.0440	2.5719 - j0.4688	0.0496	3.0614 - j0.6378	0.0674
2.0	2.4264 - j0.4274	0.0476	2.5694 - j0.4862	0.0541	3.0536 - j0.6505	0.0724
2.1	2.4287 - j0.4392	0.0513	2.5653 - j0.5040	0.0589	3.0437 - j0.6638	0.0775
2.2	2.4288 - j0.4518	0.0553	2.5592 - j0.5225	0.0639	3.0313 - j0.6780	0.0830
2.3	2.4266 - j0.4647	0.0595	2.5512 - j0.5411	0.0692	3.0166 - j0.6924	0.0886
2.4	2.4223 - j0.4777	0.0638	2.5418 - j0.5590	0.0746	3.0005 - j0.7064	0.0943
2.5	2.4162 - j0.4904	0.0682	2.5317 - j0.5760	0.0801	2.9838 - j0.7194	0.1001



ตาราง ค.6 (ต่อ)

ความถี่ f (GHz)	ร้อยละการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยแก้วกลบ					
	10		20		30	
	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)
2.6	2.4091 - j0.5025	0.0727	2.5212 - j0.5918	0.0856	2.9672 - j0.7310	0.1057
2.7	2.4015 - j0.5139	0.0772	2.5109 - j0.6062	0.0910	2.9514 - j0.7407	0.1113
2.8	2.3941 - j0.5242	0.0817	2.5013 - j0.6191	0.0964	2.9369 - j0.7483	0.1166
2.9	2.3873 - j0.5331	0.0860	2.4928 - j0.6305	0.1017	2.9238 - j0.7532	0.1215
3.0	2.3816 - j0.5402	0.0902	2.4854 - j0.6400	0.1068	2.9125 - j0.7552	0.1260
3.1	2.3770 - j0.5452	0.0940	2.4794 - j0.6477	0.1117	2.9029 - j0.7544	0.1301
3.2	2.3733 - j0.5483	0.0976	2.4741 - j0.6538	0.1164	2.8940 - j0.7508	0.1337
3.3	2.3700 - j0.5493	0.1008	2.4690 - j0.6584	0.1209	2.8851 - j0.7441	0.1366
3.4	2.3669 - j0.5480	0.1036	2.4639 - j0.6614	0.1251	2.8758 - j0.7343	0.1389
3.5	2.3635 - j0.5443	0.1060	2.4585 - j0.6626	0.1290	2.8657 - j0.7215	0.1405



ตาราง ค.7 ผลการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนและค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีต ตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่ทดลองในช่วงความถี่ 0.5-3.5 GHz อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 และอายุคอนกรีต 7 วัน

ความถี่ f (GHz)	ร้อยละการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบ					
	10		20		30	
	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)
0.5	4.5893 - j0.8707	0.0242	5.9320 - j1.0773	0.0300	7.3036 - j1.3631	0.0379
0.6	4.5278 - j0.8395	0.0280	5.8524 - j1.0523	0.0351	7.2057 - j1.3154	0.0439
0.7	4.4681 - j0.8097	0.0315	5.7757 - j1.0286	0.0401	7.1109 - j1.2698	0.0494
0.8	4.4118 - j0.7822	0.0348	5.7040 - j1.0073	0.0448	7.0215 - j1.2278	0.0546
0.9	4.3600 - j0.7582	0.0380	5.6393 - j0.9894	0.0495	6.9394 - j1.1909	0.0596
1.0	4.3135 - j0.7383	0.0411	5.5826 - j0.9757	0.0543	6.8656 - j1.1606	0.0646
1.1	4.2753 - j0.7239	0.0443	5.5374 - j0.9672	0.0592	6.8044 - j1.1390	0.0697
1.2	4.2401 - j0.7134	0.0476	5.4972 - j0.9631	0.0643	6.7470 - j1.1240	0.0750
1.3	4.2101 - j0.7079	0.0512	5.4642 - j0.9642	0.0697	6.6966 - j1.1174	0.0808
1.4	4.1843 - j0.7074	0.0551	5.4368 - j0.9701	0.0756	6.6516 - j1.1191	0.0872
1.5	4.1613 - j0.7115	0.0594	5.4124 - j0.9805	0.0818	6.6099 - j1.1285	0.0942
1.6	4.1396 - j0.7198	0.0641	5.3888 - j0.9949	0.0886	6.5695 - j1.1449	0.1019
1.7	4.1176 - j0.7320	0.0692	5.3637 - j1.0127	0.0958	6.5284 - j1.1674	0.1104
1.8	4.0942 - j0.7473	0.0748	5.3353 - j1.0334	0.1035	6.4853 - j1.1945	0.1196
1.9	4.0688 - j0.7648	0.0808	5.3027 - j1.0558	0.1116	6.4397 - j1.2245	0.1294
2.0	4.0416 - j0.7831	0.0871	5.2666 - j1.0789	0.1200	6.3920 - j1.2551	0.1396
2.1	4.0116 - j0.8023	0.0937	5.2257 - j1.1028	0.1288	6.3401 - j1.2859	0.1502
2.2	3.9775 - j0.8223	0.1006	5.1788 - j1.1279	0.1380	6.2817 - j1.3168	0.1612
2.3	3.9405 - j0.8422	0.1078	5.1274 - j1.1531	0.1475	6.2177 - j1.3457	0.1722
2.4	3.9016 - j0.8612	0.1150	5.0734 - j1.1772	0.1572	6.1493 - j1.3709	0.1830
2.5	3.8616 - j0.8788	0.1222	5.0180 - j1.1996	0.1668	6.0771 - j1.3915	0.1935



ตาราง ค.7 (ต่อ)

ความถี่ f (GHz)	ร้อยละการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยแก้วกลบ					
	10		20		30	
	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)
2.6	3.8212 - j0.8948	0.1294	4.9620 - j1.2194	0.1764	6.0017 - j1.4071	0.2035
2.7	3.7808 - j0.9089	0.1365	4.9062 - j1.2361	0.1857	5.9239 - j1.4172	0.2129
2.8	3.7407 - j0.9209	0.1434	4.8507 - j1.2489	0.1945	5.8443 - j1.4220	0.2215
2.9	3.7010 - j0.9303	0.1501	4.7957 - j1.2571	0.2028	5.7641 - j1.4214	0.2293
3.0	3.6623 - j0.9366	0.1563	4.7420 - j1.2603	0.2103	5.6852 - j1.4158	0.2363
3.1	3.6252 - j0.9397	0.1621	4.6903 - j1.2585	0.2170	5.6099 - j1.4060	0.2425
3.2	3.5881 - j0.9396	0.1673	4.6384 - j1.2517	0.2228	5.5359 - j1.3920	0.2478
3.3	3.5490 - j0.9358	0.1718	4.5841 - j1.2394	0.2275	5.4605 - j1.3730	0.2521
3.4	3.5088 - j0.9282	0.1756	4.5283 - j1.2215	0.2311	5.3859 - j1.3491	0.2552
3.5	3.4678 - j0.9168	0.1785	4.4718 - j1.1986	0.2334	5.3130 - j1.3206	0.2571



ตาราง ค.8 ผลการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนและค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีต ตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่ทดลองในช่วงความถี่ 0.5-3.5 GHz อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 และอายุคอนกรีต 28 วัน

ความถี่ f (GHz)	ร้อยละการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบ					
	10		20		30	
	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)
0.5	3.3519 - j0.6540	0.0182	4.0778 - j0.6011	0.0167	5.0047 - j0.9277	0.0258
0.6	3.2908 - j0.6334	0.0211	4.0017 - j0.6017	0.0201	4.9325 - j0.9044	0.0302
0.7	3.2320 - j0.6137	0.0239	3.9284 - j0.6027	0.0235	4.8641 - j0.8825	0.0344
0.8	3.1772 - j0.5957	0.0265	3.8598 - j0.6045	0.0269	4.8023 - j0.8631	0.0384
0.9	3.1283 - j0.5800	0.0290	3.7982 - j0.6073	0.0304	4.7495 - j0.8472	0.0424
1.0	3.0867 - j0.5672	0.0316	3.7451 - j0.6116	0.0340	4.7069 - j0.8356	0.0465
1.1	3.0553 - j0.5582	0.0342	3.7043 - j0.6170	0.0378	4.6763 - j0.8291	0.0507
1.2	3.0304 - j0.5521	0.0369	3.6705 - j0.6245	0.0417	4.6527 - j0.8271	0.0552
1.3	3.0139 - j0.5497	0.0398	3.6465 - j0.6337	0.0458	4.6363 - j0.8301	0.0600
1.4	3.0047 - j0.5510	0.0429	3.6310 - j0.6446	0.0502	4.6243 - j0.8376	0.0652
1.5	3.0006 - j0.5558	0.0464	3.6215 - j0.6573	0.0549	4.6134 - j0.8492	0.0709
1.6	2.9993 - j0.5640	0.0502	3.6154 - j0.6717	0.0598	4.6007 - j0.8642	0.0769
1.7	2.9981 - j0.5753	0.0544	3.6098 - j0.6876	0.0650	4.5835 - j0.8821	0.0834
1.8	2.9944 - j0.5891	0.0590	3.6018 - j0.7049	0.0706	4.5601 - j0.9020	0.0903
1.9	2.9863 - j0.6046	0.0639	3.5893 - j0.7232	0.0764	4.5302 - j0.9232	0.0976
2.0	2.9733 - j0.6208	0.0691	3.5718 - j0.7416	0.0825	4.4951 - j0.9446	0.1051
2.1	2.9548 - j0.6376	0.0745	3.5483 - j0.7605	0.0888	4.4547 - j0.9665	0.1129
2.2	2.9305 - j0.6553	0.0802	3.5180 - j0.7802	0.0955	4.4088 - j0.9894	0.1211
2.3	2.9017 - j0.6728	0.0861	3.4825 - j0.7999	0.1023	4.3598 - j1.0124	0.1295
2.4	2.8707 - j0.6897	0.0921	3.4439 - j0.8188	0.1093	4.3103 - j1.0350	0.1382
2.5	2.8396 - j0.7054	0.0981	3.4045 - j0.8362	0.1163	4.2619 - j1.0564	0.1469



ตาราง ค.8 (ต่อ)

ความถี่ f (GHz)	ร้อยละการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยแก้วกลบ					
	10		20		30	
	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)
2.6	2.8100 - j0.7199	0.1041	3.3660 - j0.8518	0.1232	4.2152 - j1.0763	0.1557
2.7	2.7833 - j0.7330	0.1101	3.3299 - j0.8649	0.1299	4.1706 - j1.0938	0.1643
2.8	2.7599 - j0.7444	0.1159	3.2966 - j0.8754	0.1364	4.1272 - j1.1082	0.1726
2.9	2.7398 - j0.7537	0.1216	3.2664 - j0.8826	0.1424	4.0846 - j1.1186	0.1805
3.0	2.7228 - j0.7606	0.1269	3.2392 - j0.8864	0.1479	4.0422 - j1.1241	0.1876
3.1	2.7079 - j0.7647	0.1319	3.2145 - j0.8867	0.1529	4.0002 - j1.1242	0.1939
3.2	2.6936 - j0.7662	0.1364	3.1904 - j0.8837	0.1573	3.9566 - j1.1191	0.1992
3.3	2.6784 - j0.7649	0.1404	3.1650 - j0.8771	0.1610	3.9095 - j1.1080	0.2034
3.4	2.6618 - j0.7604	0.1438	3.1382 - j0.8668	0.1640	3.8603 - j1.0909	0.2064
3.5	2.6437 - j0.7529	0.1466	3.1100 - j0.8529	0.1661	3.8103 - j1.0683	0.2080



ตาราง ค.9 ผลการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนและค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีต ตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่ทดลองในช่วงความถี่ 0.5-3.5 GHz อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.55 และอายุคอนกรีต 90 วัน

ความถี่ f (GHz)	ร้อยละการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบ					
	10		20		30	
	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)
0.5	2.4990 - j0.3194	0.0089	2.7757 - j0.3373	0.0094	3.3177 - j0.4381	0.0122
0.6	2.4598 - j0.3153	0.0105	2.7259 - j0.3383	0.0113	3.2628 - j0.4354	0.0145
0.7	2.4222 - j0.3117	0.0121	2.6781 - j0.3397	0.0132	3.2099 - j0.4333	0.0169
0.8	2.3875 - j0.3088	0.0137	2.6340 - j0.3419	0.0152	3.1608 - j0.4320	0.0192
0.9	2.3568 - j0.3071	0.0154	2.5950 - j0.3451	0.0173	3.1169 - j0.4322	0.0216
1.0	2.3309 - j0.3069	0.0171	2.5622 - j0.3497	0.0195	3.0794 - j0.4342	0.0242
1.1	2.3116 - j0.3082	0.0189	2.5378 - j0.3555	0.0218	3.0510 - j0.4380	0.0268
1.2	2.2963 - j0.3114	0.0208	2.5186 - j0.3633	0.0243	3.0279 - j0.4445	0.0297
1.3	2.2862 - j0.3166	0.0229	2.5060 - j0.3729	0.0270	3.0123 - j0.4535	0.0328
1.4	2.2805 - j0.3238	0.0252	2.4993 - j0.3843	0.0299	3.0032 - j0.4651	0.0362
1.5	2.2782 - j0.3327	0.0278	2.4970 - j0.3974	0.0332	2.9996 - j0.4793	0.0400
1.6	2.2781 - j0.3434	0.0306	2.4976 - j0.4120	0.0367	2.9998 - j0.4960	0.0442
1.7	2.2791 - j0.3555	0.0336	2.4998 - j0.4280	0.0405	3.0024 - j0.5151	0.0487
1.8	2.2800 - j0.3689	0.0369	2.5021 - j0.4452	0.0446	3.0058 - j0.5360	0.0537
1.9	2.2800 - j0.3829	0.0405	2.5033 - j0.4630	0.0489	3.0085 - j0.5582	0.0590
2.0	2.2784 - j0.3970	0.0442	2.5028 - j0.4808	0.0535	3.0095 - j0.5805	0.0646
2.1	2.2752 - j0.4114	0.0481	2.5004 - j0.4989	0.0583	3.0082 - j0.6034	0.0705
2.2	2.2701 - j0.4264	0.0522	2.4957 - j0.5177	0.0634	3.0041 - j0.6274	0.0768
2.3	2.2632 - j0.4415	0.0565	2.4892 - j0.5367	0.0687	2.9971 - j0.6513	0.0833
2.4	2.2551 - j0.4562	0.0609	2.4813 - j0.5553	0.0741	2.9875 - j0.6746	0.0901
2.5	2.2465 - j0.4703	0.0654	2.4728 - j0.5732	0.0797	2.9759 - j0.6965	0.0969





ตาราง ค.9 (ต่อ)

ความถี่ f (GHz)	ร้อยละการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยแก้วกลบ					
	10		20		30	
	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)
2.6	2.2381 - j0.4838	0.0700	2.4645 - j0.5903	0.0854	2.9629 - j0.7170	0.1037
2.7	2.2302 - j0.4966	0.0746	2.4571 - j0.6063	0.0911	2.9492 - j0.7357	0.1105
2.8	2.2235 - j0.5085	0.0792	2.4510 - j0.6211	0.0968	2.9356 - j0.7524	0.1172
2.9	2.2183 - j0.5195	0.0838	2.4465 - j0.6345	0.1024	2.9224 - j0.7669	0.1237
3.0	2.2146 - j0.5293	0.0883	2.4437 - j0.6462	0.1078	2.9101 - j0.7788	0.1300
3.1	2.2124 - j0.5377	0.0927	2.4424 - j0.6558	0.1131	2.8991 - j0.7880	0.1359
3.2	2.2111 - j0.5449	0.0970	2.4419 - j0.6637	0.1182	2.8888 - j0.7949	0.1415
3.3	2.2105 - j0.5511	0.1012	2.4420 - j0.6699	0.1230	2.8784 - j0.7996	0.1468
3.4	2.2100 - j0.5559	0.1051	2.4419 - j0.6742	0.1275	2.8679 - j0.8017	0.1516
3.5	2.2091 - j0.5590	0.1088	2.4411 - j0.6762	0.1317	2.8569 - j0.8012	0.1560



ตาราง ค.10 ผลการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนและค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีต ตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้ากลบที่ทดลองในช่วงความถี่ 0.5-3.5 GHz อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 และอายุคอนกรีต 7 วัน

ความถี่ f (GHz)	ร้อยละการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้ากลบ					
	10		20		30	
	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)
0.5	4.7628 - j1.0663	0.0297	5.7155 - j1.1435	0.0318	6.1568 - j1.7006	0.0473
0.6	4.6788 - j1.0307	0.0344	5.6365 - j1.1079	0.0370	6.0849 - j1.6306	0.0544
0.7	4.5979 - j0.9966	0.0388	5.5612 - j1.0743	0.0418	6.0156 - j1.5637	0.0609
0.8	4.5225 - j0.9655	0.0430	5.4926 - j1.0443	0.0465	5.9507 - j1.5023	0.0669
0.9	4.4550 - j0.9383	0.0470	5.4328 - j1.0195	0.0510	5.8919 - j1.4486	0.0725
1.0	4.3970 - j0.9161	0.0510	5.3831 - j1.0009	0.0557	5.8399 - j1.4043	0.0781
1.1	4.3525 - j0.9003	0.0551	5.3459 - j0.9896	0.0606	5.7977 - j1.3725	0.0840
1.2	4.3156 - j0.8892	0.0594	5.3152 - j0.9843	0.0657	5.7588 - j1.3494	0.0901
1.3	4.2892 - j0.8840	0.0639	5.2918 - j0.9859	0.0713	5.7252 - j1.3372	0.0967
1.4	4.2717 - j0.8846	0.0689	5.2728 - j0.9935	0.0774	5.6954 - j1.3354	0.1040
1.5	4.2605 - j0.8905	0.0743	5.2551 - j1.0063	0.0840	5.6672 - j1.3427	0.1120
1.6	4.2527 - j0.9013	0.0802	5.2356 - j1.0235	0.0911	5.6388 - j1.3579	0.1209
1.7	4.2451 - j0.9163	0.0867	5.2117 - j1.0441	0.0987	5.6083 - j1.3794	0.1305
1.8	4.2349 - j0.9348	0.0936	5.1816 - j1.0672	0.1069	5.5745 - j1.4055	0.1407
1.9	4.2198 - j0.9556	0.1010	5.1451 - j1.0917	0.1154	5.5371 - j1.4341	0.1516
2.0	4.1991 - j0.9773	0.1087	5.1036 - j1.1161	0.1242	5.4966 - j1.4628	0.1628
2.1	4.1720 - j0.9998	0.1168	5.0568 - j1.1411	0.1333	5.4518 - j1.4912	0.1742
2.2	4.1373 - j1.0233	0.1252	5.0040 - j1.1669	0.1428	5.4008 - j1.5189	0.1859
2.3	4.0967 - j1.0466	0.1339	4.9480 - j1.1928	0.1526	5.3450 - j1.5439	0.1975
2.4	4.0525 - j1.0688	0.1427	4.8913 - j1.2178	0.1626	5.2857 - j1.5647	0.2089
2.5	4.0070 - j1.0893	0.1515	4.8354 - j1.2415	0.1727	5.2239 - j1.5805	0.2198



ตาราง ค.10 (ต่อ)

ความถี่ f (GHz)	ร้อยละการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยแก้วกลบ					
	10		20		30	
	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)
2.6	3.9620 - j1.1079	0.1602	4.7810 - j1.2633	0.1827	5.1601 - j1.5909	0.2301
2.7	3.9189 - j1.1240	0.1688	4.7282 - j1.2825	0.1926	5.0950 - j1.5956	0.2397
2.8	3.8783 - j1.1374	0.1772	4.6762 - j1.2983	0.2022	5.0290 - j1.5946	0.2484
2.9	3.8407 - j1.1476	0.1851	4.6243 - j1.3096	0.2113	4.9630 - j1.5880	0.2562
3.0	3.8060 - j1.1539	0.1926	4.5722 - j1.3156	0.2196	4.8979 - j1.5761	0.2630
3.1	3.7741 - j1.1562	0.1994	4.5205 - j1.3158	0.2269	4.8357 - j1.5599	0.2690
3.2	3.7427 - j1.1545	0.2055	4.4667 - j1.3101	0.2332	4.7740 - j1.5390	0.2740
3.3	3.7100 - j1.1482	0.2108	4.4089 - j1.2977	0.2383	4.7104 - j1.5124	0.2777
3.4	3.6759 - j1.1370	0.2151	4.3487 - j1.2786	0.2419	4.6467 - j1.4804	0.2800
3.5	3.6406 - j1.1212	0.2183	4.2879 - j1.2532	0.2440	4.5836 - j1.4432	0.2810



ตาราง ค.11 ผลการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนและค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีต ตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่ทดลองในช่วงความถี่ 0.5-3.5 GHz อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 และอายุคอนกรีต 28 วัน

ความถี่ f (GHz)	ร้อยละการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบ					
	10		20		30	
	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)
0.5	3.3670 - j0.4421	0.0123	3.9365 - j0.5535	0.0154	4.6565 - j0.6797	0.0189
0.6	3.3269 - j0.4432	0.0148	3.8823 - j0.5579	0.0186	4.5917 - j0.6759	0.0226
0.7	3.2875 - j0.4445	0.0173	3.8300 - j0.5625	0.0219	4.5296 - j0.6728	0.0262
0.8	3.2492 - j0.4461	0.0199	3.7809 - j0.5676	0.0253	4.4723 - j0.6711	0.0299
0.9	3.2123 - j0.4482	0.0224	3.7363 - j0.5734	0.0287	4.4214 - j0.6713	0.0336
1.0	3.1772 - j0.4509	0.0251	3.6970 - j0.5802	0.0323	4.3783 - j0.6739	0.0375
1.1	3.1464 - j0.4540	0.0278	3.6654 - j0.5873	0.0359	4.3453 - j0.6789	0.0415
1.2	3.1155 - j0.4582	0.0306	3.6370 - j0.5961	0.0398	4.3176 - j0.6870	0.0459
1.3	3.0870 - j0.4633	0.0335	3.6135 - j0.6059	0.0438	4.2967 - j0.6981	0.0505
1.4	3.0607 - j0.4693	0.0366	3.5938 - j0.6169	0.0480	4.2808 - j0.7120	0.0555
1.5	3.0363 - j0.4762	0.0397	3.5766 - j0.6291	0.0525	4.2677 - j0.7285	0.0608
1.6	3.0135 - j0.4841	0.0431	3.5602 - j0.6424	0.0572	4.2551 - j0.7474	0.0665
1.7	2.9917 - j0.4928	0.0466	3.5434 - j0.6571	0.0621	4.2409 - j0.7683	0.0727
1.8	2.9708 - j0.5023	0.0503	3.5250 - j0.6729	0.0674	4.2233 - j0.7909	0.0792
1.9	2.9505 - j0.5123	0.0542	3.5044 - j0.6896	0.0729	4.2015 - j0.8144	0.0861
2.0	2.9312 - j0.5225	0.0581	3.4820 - j0.7066	0.0786	4.1759 - j0.8377	0.0932
2.1	2.9119 - j0.5330	0.0623	3.4570 - j0.7243	0.0846	4.1458 - j0.8615	0.1006
2.2	2.8916 - j0.5441	0.0666	3.4285 - j0.7431	0.0909	4.1102 - j0.8862	0.1085
2.3	2.8708 - j0.5554	0.0711	3.3977 - j0.7621	0.0975	4.0707 - j0.9108	0.1165
2.4	2.8497 - j0.5665	0.0756	3.3656 - j0.7807	0.1042	4.0290 - j0.9343	0.1247
2.5	2.8283 - j0.5771	0.0803	3.3331 - j0.7982	0.1110	3.9864 - j0.9563	0.1330



ตาราง ค.11 (ต่อ)

ความถี่ f (GHz)	ร้อยละการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยแก้วกลบ					
	10		20		30	
	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)
2.6	2.8067 - j0.5871	0.0849	3.3008 - j0.8141	0.1178	3.9439 - j0.9761	0.1412
2.7	2.7848 - j0.5962	0.0896	3.2690 - j0.8279	0.1244	3.9021 - j0.9933	0.1492
2.8	2.7626 - j0.6043	0.0941	3.2379 - j0.8391	0.1307	3.8615 - j1.0073	0.1569
2.9	2.7403 - j0.6112	0.0986	3.2077 - j0.8473	0.1367	3.8221 - j1.0175	0.1642
3.0	2.7182 - j0.6165	0.1029	3.1785 - j0.8522	0.1422	3.7843 - j1.0235	0.1708
3.1	2.6968 - j0.6201	0.1069	3.1505 - j0.8536	0.1472	3.7486 - j1.0251	0.1768
3.2	2.6753 - j0.6221	0.1107	3.1224 - j0.8519	0.1517	3.7131 - j1.0228	0.1821
3.3	2.6529 - j0.6224	0.1143	3.0926 - j0.8468	0.1555	3.6759 - j1.0159	0.1865
3.4	2.6302 - j0.6207	0.1174	3.0614 - j0.8381	0.1585	3.6377 - j1.0046	0.1900
3.5	2.6075 - j0.6170	0.1201	3.0290 - j0.8261	0.1608	3.5987 - j0.9891	0.1926



ตาราง ค.12 ผลการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนและค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีต ตัวอย่างที่มีการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบที่ทดลองในช่วงความถี่ 0.5-3.5 GHz อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.65 และอายุคอนกรีต 90 วัน

ความถี่ f (GHz)	ร้อยละการแทนที่ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าแกลบ					
	10		20		30	
	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)
0.5	2.3422 - j0.2612	0.0073	2.6957 - j0.3413	0.0095	3.4616 - j0.4323	0.0120
0.6	2.2950 - j0.2598	0.0087	2.6492 - j0.3414	0.0114	3.3998 - j0.4310	0.0144
0.7	2.2497 - j0.2588	0.0101	2.6046 - j0.3420	0.0133	3.3402 - j0.4302	0.0168
0.8	2.2076 - j0.2582	0.0115	2.5636 - j0.3432	0.0153	3.2847 - j0.4302	0.0191
0.9	2.1701 - j0.2584	0.0129	2.5275 - j0.3456	0.0173	3.2348 - j0.4315	0.0216
1.0	2.1382 - j0.2596	0.0144	2.4973 - j0.3493	0.0194	3.1919 - j0.4344	0.0242
1.1	2.1140 - j0.2618	0.0160	2.4751 - j0.3542	0.0217	3.1589 - j0.4389	0.0269
1.2	2.0944 - j0.2654	0.0177	2.4578 - j0.3611	0.0241	3.1315 - j0.4459	0.0298
1.3	2.0808 - j0.2704	0.0196	2.4469 - j0.3698	0.0267	3.1120 - j0.4554	0.0329
1.4	2.0727 - j0.2768	0.0216	2.4412 - j0.3802	0.0296	3.0997 - j0.4673	0.0364
1.5	2.0687 - j0.2846	0.0238	2.4397 - j0.3923	0.0327	3.0931 - j0.4817	0.0402
1.6	2.0678 - j0.2937	0.0261	2.4407 - j0.4058	0.0361	3.0908 - j0.4985	0.0444
1.7	2.0686 - j0.3039	0.0287	2.4430 - j0.4207	0.0398	3.0909 - j0.5175	0.0489
1.8	2.0698 - j0.3151	0.0316	2.4451 - j0.4367	0.0437	3.0920 - j0.5385	0.0539
1.9	2.0705 - j0.3268	0.0345	2.4460 - j0.4534	0.0479	3.0926 - j0.5606	0.0593
2.0	2.0701 - j0.3385	0.0377	2.4452 - j0.4699	0.0523	3.0916 - j0.5829	0.0649
2.1	2.0682 - j0.3505	0.0410	2.4423 - j0.4868	0.0569	3.0885 - j0.6058	0.0708
2.2	2.0645 - j0.3631	0.0444	2.4373 - j0.5044	0.0617	3.0825 - j0.6297	0.0771
2.3	2.0593 - j0.3758	0.0481	2.4305 - j0.5221	0.0668	3.0737 - j0.6537	0.0836
2.4	2.0531 - j0.3883	0.0518	2.4226 - j0.5395	0.0720	3.0625 - j0.6769	0.0904
2.5	2.0464 - j0.4004	0.0557	2.4145 - j0.5564	0.0774	3.0494 - j0.6990	0.0972



ตาราง ค.12 (ต่อ)

ความถี่ f (GHz)	ร้อยละการแทนที่ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้ากลบ					
	10		20		30	
	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)	$\epsilon_r$	$\sigma$ (S/m)
2.6	2.0400 - j0.4123	0.0596	2.4068 - j0.5725	0.0828	3.0351 - j0.7196	0.1041
2.7	2.0343 - j0.4238	0.0636	2.4003 - j0.5877	0.0883	3.0205 - j0.7385	0.1109
2.8	2.0300 - j0.4348	0.0677	2.3954 - j0.6020	0.0938	3.0059 - j0.7556	0.1177
2.9	2.0272 - j0.4455	0.0719	2.3924 - j0.6150	0.0992	2.9920 - j0.7705	0.1243
3.0	2.0261 - j0.4554	0.0760	2.3913 - j0.6265	0.1046	2.9792 - j0.7830	0.1307
3.1	2.0264 - j0.4645	0.0801	2.3917 - j0.6361	0.1097	2.9678 - j0.7929	0.1367
3.2	2.0278 - j0.4729	0.0842	2.3931 - j0.6441	0.1147	2.9571 - j0.8007	0.1425
3.3	2.0300 - j0.4808	0.0883	2.3950 - j0.6508	0.1195	2.9464 - j0.8064	0.1480
3.4	2.0325 - j0.4879	0.0923	2.3968 - j0.6555	0.1240	2.9355 - j0.8097	0.1532
3.5	2.0346 - j0.4939	0.0962	2.3978 - j0.6581	0.1281	2.9241 - j0.8106	0.1578



ภาคผนวก ง  
ผลการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริก ( $\epsilon_r'$ ) ของคอนกรีตตัวอย่างที่ความถี่ 1 GHz และ  
ค่าสภาพนำไฟฟ้า ( $\sigma$ ) ของคอนกรีตตัวอย่างที่ความถี่ 3.2 GHz





ตาราง ง.1 ผลการวัดค่าคงที่ได้อิเล็กทรอนิกส์ของคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) 0.45 ที่ร้อยละการแทนที่เถ้าแกลบต่างกัน

Age (วัน)	% RHA	Dielectric Constant "W/B 0.45"					
		Sample11	Sample12	Sample21	Sample22	Sample31	Sample32
7	10	5.0659	4.8246	4.6002	4.7587	4.1373	4.1345
	20	5.1639	5.2379	4.7713	4.9194	4.7239	4.7102
	30	5.5408	5.5797	5.3458	5.3103	5.6151	5.7038
28	10	3.2101	3.1755	2.8223	2.8799	3.5403	3.5286
	20	3.9625	3.9198	3.9135	3.7758	4.5327	5.9756
	30	5.0741	5.2956	6.0274	4.0168	4.4160	4.5455
90	10	0.6344	0.3876	2.3373	2.2760	2.6675	2.7288
	20	1.0586	0.3461	2.5065	2.3963	2.8635	2.8084
	30	2.5535	1.8914	3.0469	3.0793	3.4636	3.1846

ตาราง ง.2 ค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีต (S/m) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) 0.45 ที่ร้อยละการแทนที่เถ้าแกลบต่างกัน

Age (วัน)	% RHA	Conductivity (S/m) "W/B 0.45"					
		Sample11	Sample12	Sample21	Sample22	Sample31	Sample32
7	10	0.2197	0.2183	0.2022	0.2080	0.2029	0.2017
	20	0.2292	0.2338	0.2230	0.2247	0.2184	0.2121
	30	0.2427	0.2531	0.2408	0.2307	0.2650	0.2874
28	10	0.1315	0.1240	0.1116	0.1220	0.1523	0.1419
	20	0.1633	0.1517	0.1504	0.1493	0.0888	0.1102
	30	0.2077	0.2111	0.2442	0.1592	0.1854	0.1938
90	10	0.0701	0.0640	0.0968	0.0948	0.0994	0.1004
	20	0.0293	0.0165	0.1132	0.1056	0.1283	0.1184
	30	0.2222	0.1641	0.1286	0.1297	0.1382	0.1381



ตาราง ง.3 ผลการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) 0.55 ที่ร้อยละการแทนที่เถ้าแกลบต่างกัน

Age (วัน)	% RHA	Dielectric Constant "W/B 0.55"					
		Sample11	Sample12	Sample21	Sample22	Sample31	Sample32
7	10	4.2525	3.9807	4.4244	4.5964	2.9148	2.4019
	20	5.9748	5.7257	5.6505	5.5007	5.2509	5.3929
	30	6.0450	6.1605	6.9173	6.7486	7.3366	7.9856
28	10	3.0957	3.0274	3.3944	3.2554	2.7995	2.9476
	20	3.9894	4.0703	3.6629	3.6224	3.5830	3.5426
	30	4.9579	4.9901	4.5430	4.0505	4.7368	4.9629
90	10	2.5704	2.5140	2.0520	1.9439	2.4185	2.4867
	20	2.8078	2.7463	2.3762	2.1893	2.6535	2.6002
	30	3.3773	3.2384	3.1159	3.0995	2.6378	3.0076

ตาราง ง.4 ค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีต (S/m) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) 0.55 ที่ร้อยละการแทนที่เถ้าแกลบต่างกัน

Age (วัน)	% RHA	Conductivity (S/m) "W/B 0.55"					
		Sample11	Sample12	Sample21	Sample22	Sample31	Sample32
7	10	0.1663	0.1635	0.1782	0.1839	0.1572	0.1544
	20	0.2163	0.2116	0.2224	0.2230	0.2118	0.2165
	30	0.2307	0.2326	0.2599	0.2398	0.2634	0.2958
28	10	0.1368	0.1359	0.1383	0.1378	0.1268	0.1306
	20	0.1607	0.1741	0.1535	0.1533	0.1487	0.1483
	30	0.2011	0.2052	0.1810	0.1673	0.1941	0.2047
90	10	0.1184	0.1142	0.1003	0.0959	0.1037	0.1099
	20	0.1328	0.1281	0.1120	0.1100	0.1242	0.1216
	30	0.1440	0.1434	0.1399	0.1383	0.1223	0.1333



ตาราง ง.5 ผลการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของคอนกรีตที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) 0.65 ที่ร้อยละการแทนที่เถ้าแกลบต่างกัน

Age (วัน)	% RHA	Dielectric Constant "W/B 0.65"					
		Sample11	Sample12	Sample21	Sample22	Sample31	Sample32
7	10	4.8113	4.4803	2.7645	3.1149	4.1493	4.1472
	20	5.0367	5.0189	5.3722	5.2958	5.6490	5.9259
	30	6.1549	6.0789	5.6283	5.4975	7.0791	10.4373
28	10	2.0469	1.9029	3.1803	3.4649	2.9041	2.8956
	20	4.2763	4.2771	3.6184	3.5605	3.1916	3.2580
	30	4.3312	4.4393	4.7236	4.8755	3.7869	4.1131
90	10	2.7532	2.4134	1.9925	2.0178	1.8793	1.7730
	20	2.5474	2.5057	2.5402	2.3961	1.4621	2.0494
	30	0.8181	0.5938	3.4296	3.2792	2.9763	3.0826

ตาราง ง.6 ค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีต (S/m) ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) 0.65 ที่ร้อยละการแทนที่เถ้าแกลบต่างกัน

Age (วัน)	% RHA	Conductivity (S/m) "W/B 0.65"					
		Sample11	Sample12	Sample21	Sample22	Sample31	Sample32
7	10	0.2181	0.2107	0.1120	0.1376	0.2032	0.1901
	20	0.2145	0.2058	0.2356	0.2251	0.2513	0.2670
	30	0.2816	0.2759	0.2555	0.2501	0.2829	0.3674
28	10	0.0581	0.0641	0.1260	0.1303	0.1203	0.1103
	20	0.1572	0.1607	0.1538	0.1478	0.1443	0.1461
	30	0.1813	0.1835	0.1843	0.1851	0.1776	0.1806
90	10	0.0819	0.0787	0.0834	0.0851	0.0881	0.0879
	20	0.1167	0.1136	0.1158	0.1126	0.0764	0.1054
	30	0.0444	0.0294	0.1457	0.1445	0.1381	0.1419



ตาราง ง.7 ผลการวัดค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของคอนกรีตที่อัตราควบคุมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) ต่างกัน

Age (วัน)	W/B	Dielectric Constant "Concrete Control"					
		Sample11	Sample12	Sample21	Sample22	Sample31	Sample32
7	0.45	6.9836	7.0299	7.1660	7.4244	7.9028	8.5129
	0.55	8.7727	8.0584	8.9551	9.2131	5.5878	3.7027
	0.65	11.2707	11.8005	9.6431	9.2576	9.7936	9.6207
28	0.45	3.3411	3.1443	3.1286	2.9809	2.3825	2.4201
	0.55	3.7763	3.6826	3.2491	3.4276	3.1697	3.1893
	0.65	2.2852	2.0409	3.5898	3.6896	3.9681	4.0330
90	0.45	2.2565	2.2087	2.1743	2.0833	0.7437	0.6988
	0.55	2.3643	2.5176	2.1963	2.2111	1.3016	0.9930
	0.65	3.1849	3.0545	2.8471	2.4459	4.5326	4.5405

ตาราง ง.8 ค่าสภาพนำไฟฟ้าของคอนกรีต (S/m) ที่อัตราควบคุมที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (W/B) ต่างกัน

Age (วัน)	W/B	Conductivity (S/m) "Concrete Control"					
		Sample11	Sample12	Sample21	Sample22	Sample31	Sample32
7	0.45	0.2584	0.2616	0.2771	0.2795	0.3159	0.3226
	0.55	0.3205	0.3060	0.3418	0.3481	0.2729	0.1225
	0.65	0.4297	0.4387	0.3421	0.3343	0.3928	0.3820
28	0.45	0.1381	0.1266	0.1257	0.1174	0.0943	0.0890
	0.55	0.1566	0.1499	0.1366	0.1386	0.1223	0.1340
	0.65	0.0858	0.0757	0.1401	0.1482	0.1590	0.1605
90	0.45	0.0923	0.0921	0.0875	0.0817	0.0187	0.0170
	0.55	0.0985	0.1043	0.0899	0.0928	0.0475	0.0271
	0.65	0.1325	0.1267	0.1153	0.1029	0.1802	0.1840



ภาคผนวก จ  
ภาพประกอบการเตรียมคอนกรีตตัวอย่าง





ภาพประกอบ จ.1 ส่วนประกอบของคอนกรีตตัวอย่าง (1) หินขนาด 3/4 นิ้ว (2) ทราย  
(3) ซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (4) น้ำประปา (5) etailบดละเอียด



ภาพประกอบ จ.2 เครื่องผสมคอนกรีต



ภาพประกอบ จ.3 การผสมส่วนประกอบของคอนกรีต



ภาพประกอบ จ.4 การทดสอบการยุบตัวของคอนกรีต



ภาพประกอบ จ.5 การบรรจุคอนกรีตลงในแบบหล่อ



ภาพประกอบ จ.6 คอนกรีตตัวอย่างที่ถอดออกจากแม่พิมพ์





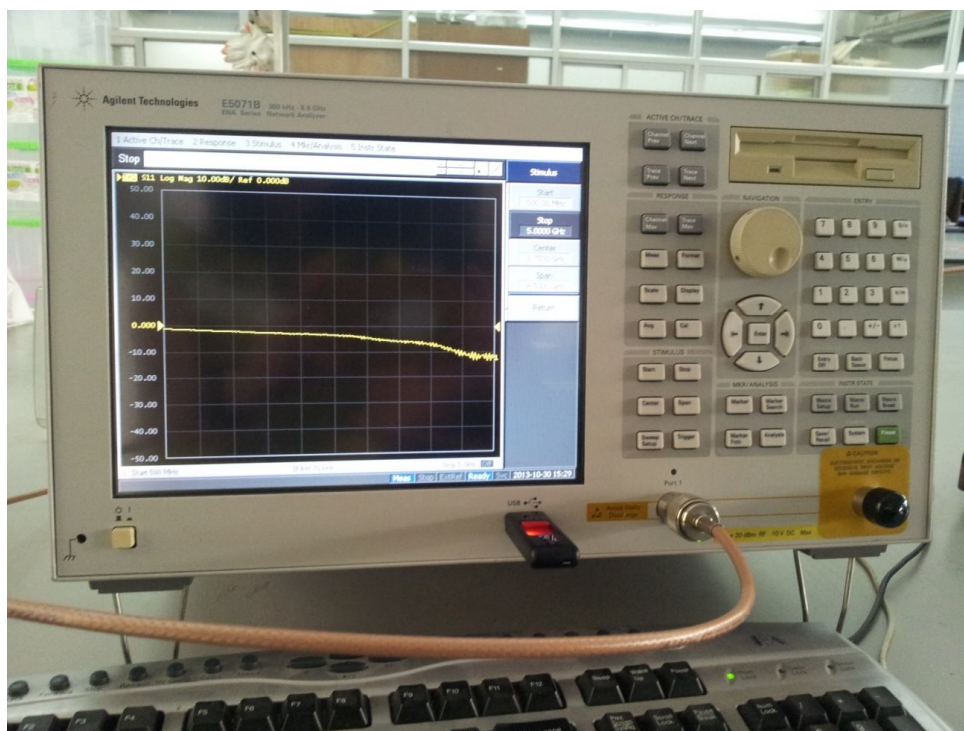
ภาพประกอบ จ.7 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงอัดของคอนกรีต



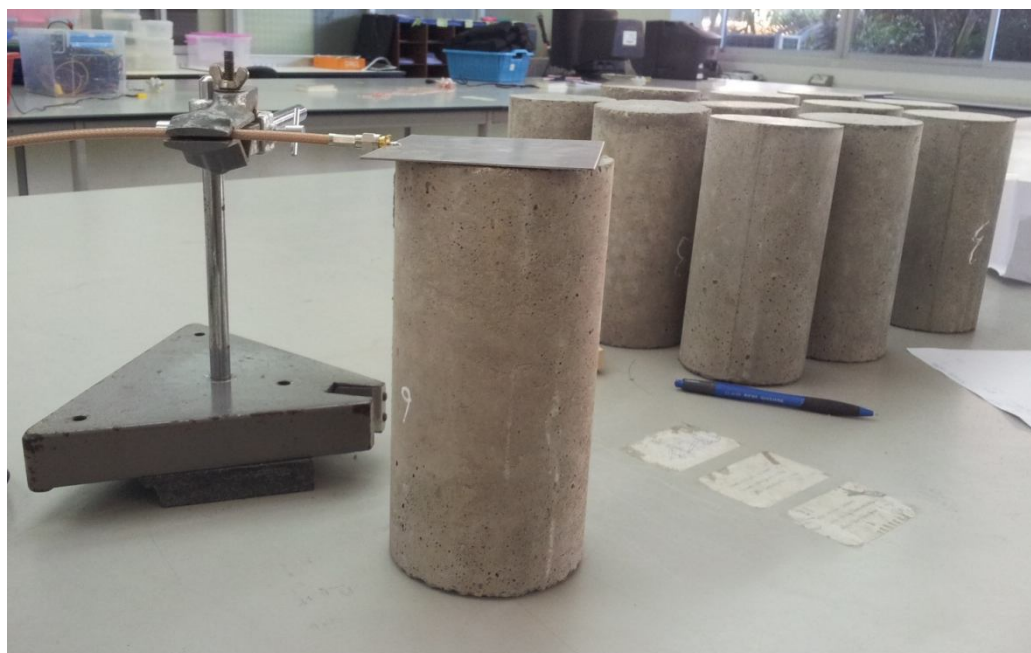
ภาคผนวก ฉ

ภาพประกอบการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตตัวอย่าง

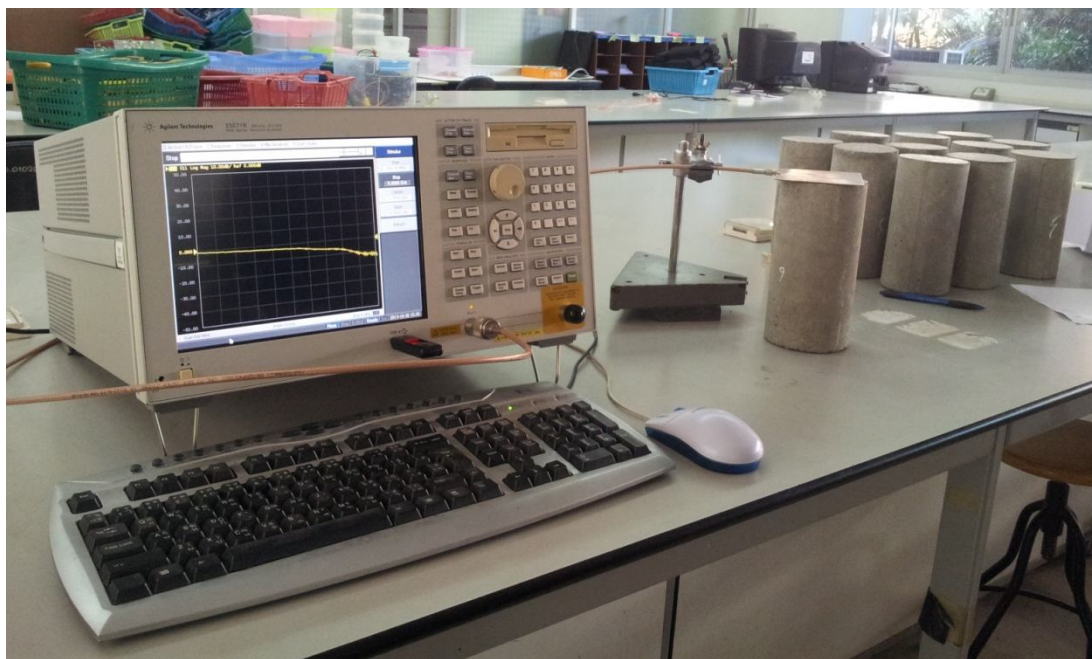




ภาพประกอบ ฉ.1 เครื่องวิเคราะห์ข่ายงานสื่อสาร (Vector Network Analyzer; VNA)



ภาพประกอบ ฉ.2 วิธีการวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตตัวอย่าง



ภาพประกอบ ฉ.3 ระบบสำหรับวัดค่าสภาพยอมทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตตัวอย่าง



ภาคผนวก ช  
แผ่นวงจรพิมพ์ความถี่สูง Arlon AD260A



## PTFE/Woven Fiberglass/Micro-Dispersed Ceramic Filled Laminate for RF & Microwave Printed Circuit Boards

### Features:

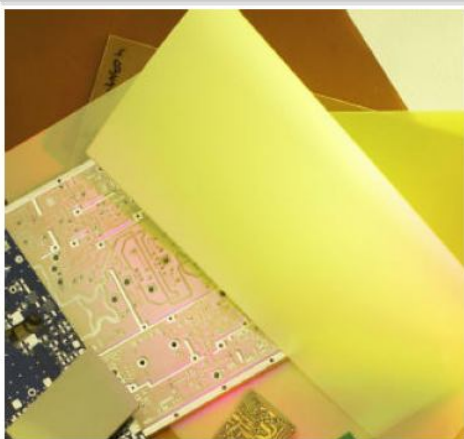
- Low Loss PTFE and Ceramic Filled Composite
- Dielectric Constant (2.60)
- Low Dielectric Loss (Loss Tangent)
- Low Profile Copper (lower conductive losses)
- Low Z-Direction CTE
- Large Panel Sizes Available
- Low Thermal Coefficient of Expansion

### Benefits:

- Low Insertion Loss
- Higher Antenna Efficiencies
- Multiple boards per panel (reduced edge trim waste)
- Large antenna formats

### Typical Applications:

- Digital Audio Broadcasting (DAB) Antennas (Satellite Radio)
- Base Station Antenna Applications
- GPS and RFID Reader Antennas
- Electronic Surveillance, SIGINT and other RF Applications



Arlon's AD260A is a woven fiberglass reinforced PTFE composite material designed as a low cost laminate with excellent low loss characteristics. Features of AD260A include lower loss through the use of optimizing the trade-off between thicker and thinner glass styles as well as a tighter DK tolerance.

This material combines the excellent low loss electrical properties of PTFE resin with the thermal properties of ceramic and the enhanced value of cost effective fiberglass styles to provide low cost laminate materials suitable for high volume commercial wireless communication applications.

The electrical properties of AD260A are highly desired in applications where higher frequency and expectations for increased fidelity with broadband signals are beyond the performance capabilities offered by high temperature or low temperature ceramics and thermosets.

The dielectric constant has been designed with a 2.60 dielectric constant. To maintain high yields with our end customer, Arlon will be using the IPC TM-650 2.5.5.6 (FSR) Test Method on every panel to insure dielectric constant consistency. Stability of PTFE over a wide frequency range and its low loss properties, makes AD260A ideal for a variety of microwave and R/F applications in telecom infrastructure. The inclusion of micro-dispersed ceramic provides thermal stability to the laminate in the form of lower CTE values and greater Phase Stability across temperature.

AD260A is compatible with the processing used for standard PTFE based printed circuit board substrates. Its low Z-axis thermal expansion improves plated through hole reliability compared to typical PTFE based laminates. Low X-Y expansion improves BGA solder-joint reliability.

Typical Properties: AD260A			
Property	Test Method	Condition	Result
Dielectric Constant @ 10GHz	IPC TM-650 2.5.5.5	C23/50	2.60
Dielectric Constant @ ~ 200 MHz	IPC TM-650 2.5.5.6		2.60
Dielectric Constant @ 1MHz	IPC TM-650 2.5.5.3		2.60
Loss Tangent @ 10 GHz	IPC TM-650 2.5.5.6	C23/50	0.00170
Loss Tangent @ 1 MHz	PC TM-650 2.5.5.3		0.00135
Thermal Coefficient of $\epsilon_r$	IPC TM-650 2.5.5.5	-10°C to +140°C	- 80
Copper peel Strength (1oz) lbs (lbs. per linear inch)	IPC TM-650 2.4.8	A, TS	17
Volume Resistivity (M $\cdot$ -cm)	IPC TM-650 2.5.17.1	C96/35/90	1.1 x 10 <sup>9</sup>
Surface Resistivity (M $\cdot$ )	IPC TM-650 2.5.17.1	C96/35/90	4.5 x 10 <sup>7</sup>
Arc Resistance (seconds)	ASTM D-495	D48/50	>180
Tensile Modulus (kpsi)	ASTM D-638	A, 23°C	> 700
Tensile Strength (kpsi)	IPC TM-650 2.4.18	A, 23°C	> 20
Compressive Modulus (kpsi)	ASTM D-695	A, 23°C	> 350
Flexural Modulus (kpsi)	ASTM D-790	A, 23°C	> 540
Dielectric Breakdown (kV)	ASTM D-149	D48/50	> 45
Specific Gravity (g/cm <sup>3</sup> )	ASTM D-792 Method A	A, 23°C	2.30
Water Absorption (%)	IPC TM-650 2.6.2.2	E1/105 + D24/23	0.04
Coefficient of Thermal Expansion (ppm/°C)	IPC TM-650 2.4.24 TMA	0°C to 100°C	
X Axis			16
Y Axis			16
Z Axis			80
Thermal Conductivity (W/mK)	ASTM E-1225	100°C	0.32
Flammability	UL 94 Vertical Burn	C48/23/50, E24/125	UL94-V0

#### Material Availability:

Current Standard Production is based on 0.030" and 0.060" thickness designs. Other thicknesses, may be available upon request. Please contact Arlon Customer Service to discuss your application. AD260A is supplied with 1/2, 1 or 2 ounce electrodeposited copper on both sides. Other copper weights and rolled copper foil are available.

When ordering AD260A, specify dielectric thickness, cladding, panel size and any other special considerations. Typical Panels are cut from a Master Sheet. The master sheet is limited to 36" x 48". Typical panel sizes cut from a master sheet include: 12" x 18", 18" X 24", 16" X 18". Custom sizes are available.

*Results listed above are typical properties; they are not to be used as specification limits. The above information creates no expressed or implied warranties. The properties of Arlon laminates may vary depending on the design and application.*

ภาพประกอบ ช.2 คุณสมบัติของแผ่นวงจรพิมพ์ความถี่สูง Arlon AD260A (2)



# ARLON

**MATERIALS FOR ELECTRONICS**

---

**CONTACT INFORMA**

---

For samples, technical assistance, customer service or for more information, please contact Arlon Materials for Electronics Division at the following locations:

**NORTH AMERICA:**

Arlon LLC  
Electronic Substrates  
9433 Hyssop Drive  
Rancho Cucamonga, CA 91730  
Tel: (909) 987-9533  
Fax: (909) 987-8541

Arlon LLC  
Microwave Materials  
1100 Governor Lea Road  
Bear, DE 19701  
Tel: (800) 635-9333  
Outside U.S. & Canada: (302) 834-2100  
Fax: (302) 834-2574

**EUROPE:**

Arlon LLC  
44 Wilby Avenue  
Little Lever  
Bolton, Lancaster BL31QE  
United Kingdom  
Tel: (44) 120-457-6068  
Fax: (44) 120-479-6463

**SOUTHERN CHINA:**

Arlon LLC  
Room 805, Unit 3, Bldg 4  
Liyuan, Xincun Holiday Road  
Huaqiao Cheng, Shenzhen 518053  
China  
Tel/Fax: (86) 755-269-066-12

**NORTHERN CHINA:**

Arlon LLC  
Room 11/401, No. 8  
Hong Gu Road  
Shanghai, China 200336  
Tel/Fax: (86) 21-6209-0202

2006 Rev A

Or visit us on the web at:  
[www.arlon-med.com](http://www.arlon-med.com)



ภาพประกอบ ช.3 ข้อมูลตัวแทนจำหน่ายแผ่นวงจรพิมพ์ความถี่สูง Arlon AD260A



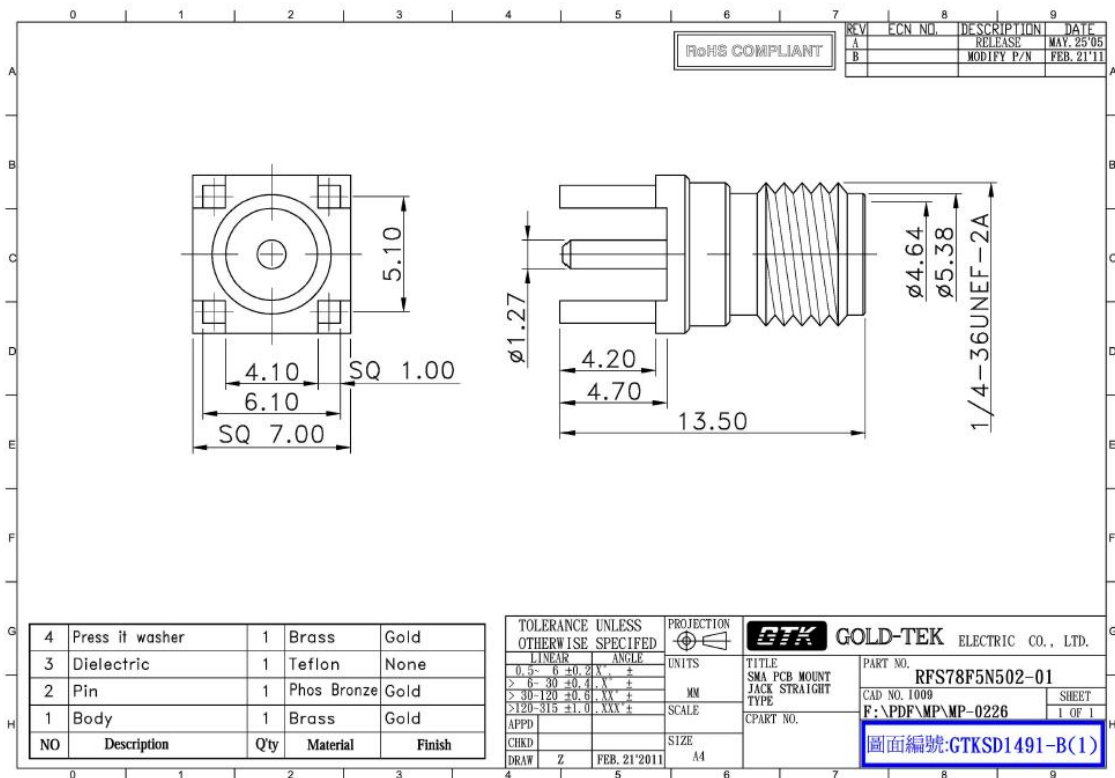


ภาคผนวก ซ  
SMA connector





ภาพประกอบ ซ.1 SMA – 50 Ohm connector

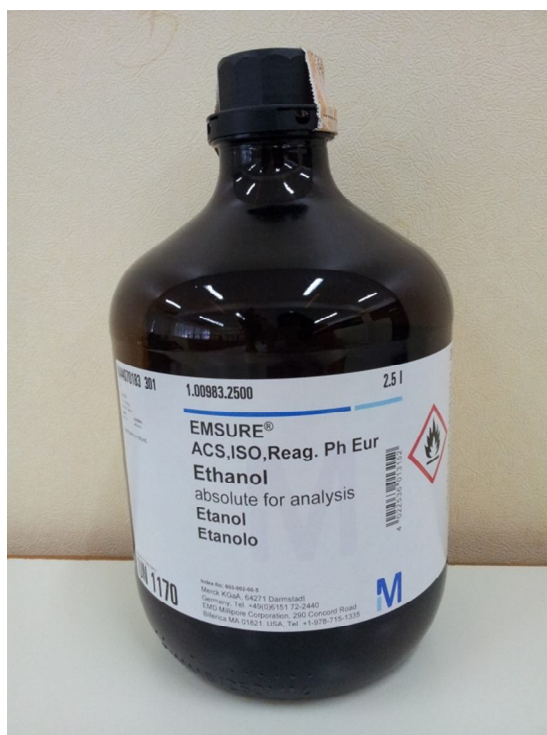


ภาพประกอบ ซ.2 คุณสมบัติและขนาดของ SMA – 50 Ohm connector

ภาคผนวก ฅ

วัสดุที่ใช้ในการสอบเทียบโพรบแกมร่วมแบบแบนและการคำนวณหาค่าสภาพยอม  
ทางไฟฟ้าสัมพัทธ์เชิงซ้อนของคอนกรีตตัวอย่าง





ภาพประกอบ ฌ.1 เอทานอล 99.99% (1)



ภาพประกอบ ฌ.2 เมทานอล 99.99% (2)





ภาพประกอบ ฅ.3 น้ำกลั่น





# Certificate of Analysis

1.00983.2500 Ethanol absolute for analysis EMSURE®  
ACS,ISO,Reag. Ph Eur  
Batch K43940283

	Batch Values	
Purity (GC)	≥ 99.9	%
Identity (IR)	conforms	
Appearance	conforms	
Colour	≤ 10	Hazen
Solubility in water	conforms	
Acidity or Alkalinity	≤ 30	ppm
Titration acid	≤ 0.0002	meq/g
Titration base	≤ 0.0002	meq/g
Density (d 20 °C/20 °C)	0.790 - 0.793	
UV absorption	conforms	
Aldehydes (as Acetaldehyd)	≤ 0.001	%
Fusel oils	conforms	
Substances reducing potassium permanganate (as O)	≤ 0.0002	%
Carbonyl compounds (as CO)	≤ 0.003	%
Readily carbonizable substances	conforms	
Acetone (GC)	≤ 0.001	%
Ethylmethylketone (GC)	≤ 0.02	%
Isoamyl alcohol (GC)	≤ 0.05	%
2-Propanol (GC)	≤ 0.003	%
Higher alcohols (GC)	≤ 0.01	%
Volatile impurities (GC)		
Acetaldehyde and Acetal	≤ 10	ppm
Benzene	≤ 2	ppm
Methanol	≤ 100	ppm
Total of other impurities disregard limit	≤ 300	ppm
Chloride (Cl)	≤ 0.3	ppm
Nitrate (NO <sub>3</sub> )	≤ 0.3	ppm
Phosphate (PO <sub>4</sub> )	≤ 0.3	ppm
Sulphate (SO <sub>4</sub> )	≤ 0.3	ppm
Ag (Silver)	≤ 0.000002	%
Al (Aluminium)	≤ 0.00005	%
As (Arsenic)	≤ 0.000002	%
Au (Gold)	≤ 0.000002	%
Ba (Barium)	≤ 0.00001	%
Be (Beryllium)	≤ 0.000002	%
Bi (Bismuth)	≤ 0.000002	%
Ca (Calcium)	≤ 0.00005	%
Cd (Cadmium)	≤ 0.000005	%
Co (Cobalt)	≤ 0.000002	%
Cr (Chromium)	≤ 0.000002	%
Cu (Copper)	≤ 0.000002	%
Fe (Iron)	≤ 0.00001	%
Ga (Gallium)	≤ 0.000002	%
In (Indium)	≤ 0.000002	%
Li (Lithium)	≤ 0.000002	%
Mg (Magnesium)	≤ 0.00001	%
Mn (Manganese)	≤ 0.000002	%

Merck KGaA, Frankfurter Straße 250, 64293 Darmstadt (Germany), +49 6151 72-0  
EMD Millipore Corporation - A division of Merck KGaA, Darmstadt, Germany  
290 Concord Road, Billerica, MA 01821, USA, Phone: (781) 533-6000

Page 1 of 2

ภาพประกอบ ณ.4 คุณสมบัติเอทานอล 99.99% (1)



## Certificate of Analysis

1.00983.2500 Ethanol absolute for analysis EMSURE®  
ACS,ISO,Reag. Ph Eur

Batch K43940283

	Batch Values	
Mo (Molybdenum)	≤ 0.000002	%
Ni (Nickel)	≤ 0.000002	%
Pb (Lead)	≤ 0.00001	%
Pt (Platinum)	≤ 0.000002	%
Sb (Antimony)	≤ 0.000002	%
Sn (Tin)	≤ 0.00001	%
Ti (Titanium)	≤ 0.000002	%
Tl (Thallium)	≤ 0.000002	%
V (Vanadium)	≤ 0.000002	%
Zn (Zinc)	≤ 0.00001	%
Zr (Zirconium)	≤ 0.000002	%
Evaporation residue	≤ 0.0005	%
Water	≤ 0.1	%

Date of release (DD.MM.YYYY): 05.10.2012

Minimum shelf life (DD.MM.YYYY): 31.10.2017

Dr. Michael Savelsberg

responsible laboratory manager quality control

*This document has been produced electronically and is valid without a signature*

ภาพประกอบ ฅ.5 คุณสมบัตืเอทานอล 99.99% (2)





## Certificate of Analysis

Material : 20647.307  
Batch : 12F140509

Methanol AnalaR NORMAPUR Reagent Ph.Eur.  
Expires end of 06/2017

CHARACTERISTICS	SPECIFICATIONS	MEASURED VALUES
Appearance	Clear colourless liquid	Clear colourless liquid
Assay (on anhydrous substance)	Min. 99,8 %	100,0 %
IR Spectrum	Passes test	Passes test
Acidity	Max. 0,0002 meq/g	0,0001 meq/g
Alkalinity	Max. 0,00006 meq/g	Max. 0,00006 meq/g
Colouration	Max. 10 APHA	Max. 10 APHA
Density (20/4)	0,791 --> 0,792	0,792
Density (20/20)	0,791 --> 0,793	0,793
Distillation range	64,0 --> 65,0 °C	64,1 °C
Substances discoloured by H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Max. 10 APHA	Max. 10 APHA
Acetone + aldehydes (as CH <sub>3</sub> COCH <sub>3</sub> )	Max. 10 ppm	< 1 ppm
Ethanol	Max. 0,1 %	Max. 0,1 %
Evaporation residue	Max. 10 ppm	9 ppm
Formaldehyde	Max. 1 ppm	< 1 ppm
Substances reducing KMnO <sub>4</sub> (as O)	Max. 2 ppm	Max. 2 ppm
Water	Max. 0,05 %	0,02 %
Cl (Chloride)	Max. 0,5 ppm	Max. 0,5 ppm
Al (Aluminium)	Max. 0,1 ppm	Max. 0,1 ppm
B (Boron)	Max. 0,05 ppm	Max. 0,05 ppm
Ba (Barium)	Max. 0,05 ppm	Max. 0,05 ppm
Ca (Calcium)	Max. 0,5 ppm	Max. 0,5 ppm
Cd (Cadmium)	Max. 0,01 ppm	Max. 0,01 ppm
Co (Cobalt)	Max. 0,01 ppm	Max. 0,01 ppm
Cr (Chromium)	Max. 0,02 ppm	Max. 0,02 ppm
Cu (Copper)	Max. 0,01 ppm	Max. 0,01 ppm
Fe (Iron)	Max. 0,1 ppm	Max. 0,1 ppm
K (Potassium)	Max. 0,1 ppm	Max. 0,1 ppm
Mg (Magnesium)	Max. 0,05 ppm	Max. 0,05 ppm
Mn (Manganese)	Max. 0,01 ppm	Max. 0,01 ppm
Na (Sodium)	Max. 0,7 ppm	Max. 0,7 ppm
Ni (Nickel)	Max. 0,01 ppm	Max. 0,01 ppm
Pb (Lead)	Max. 0,01 ppm	Max. 0,01 ppm
Sn (Tin)	Max. 0,1 ppm	Max. 0,1 ppm
Sr (Strontium)	Max. 0,02 ppm	Max. 0,02 ppm
Zn (Zinc)	Max. 0,1 ppm	Max. 0,1 ppm
Absorbance (225 nm)	Max. 0,17	0,07

VWR International bvba/aprl  
Hasselt Research Park Zone 3  
Geldenaaksebaan 464  
B-3001 Leuven  
Tel: +32 (0)16 385 011

Page 1 / 2

ภาพประกอบ ณ.6 คุณสมบัติเมทานอล 99.99% (3)







## Certificate of Analysis

Material : 20847.307  
Batch : 12F140509

Methanol AnalaR NORMAPUR Reagent Ph.Eur.  
Expires end of 06/2017

CHARACTERISTICS	SPECIFICATIONS	MEASURED VALUES
Transmittance (210 nm)	Min. 20 %	52 %
Transmittance (220 nm)	Min. 50 %	55 %
Transmittance (230 nm)	Min. 75 %	94 %
Transmittance (250 nm)	Min. 95 %	99 %
Transmittance (from 260 nm)	Min. 98 %	100 %
Conforms to BDH 10158	Passes test	Passes test

We certify that this batch conforms to the specifications listed above.

BDL : Below detected limit.

Isabelle Gulpain Head of laboratory - Briere  
VWR International

Document printed on 09/09/12

This document has been produced electronically and is valid without a signature.

ภาพประกอบ ณ.7 คุณสมบัติเมทานอล 99.99% (4)



ภาคผนวก ญ  
การหาจำนวนตัวอย่างในการทดสอบที่เหมาะสม



การคำนวณหาจำนวนตัวอย่างทดสอบที่เหมาะสม

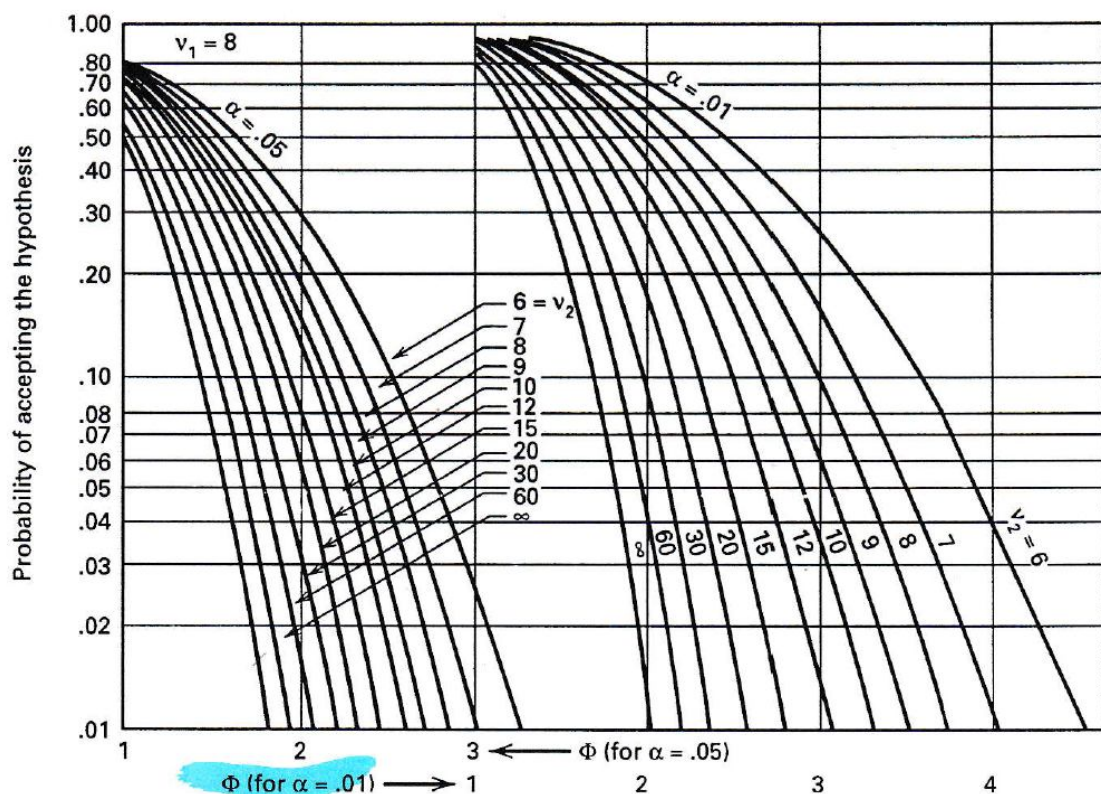
จากสูตร  $\Phi^2 = [(1+0.01P)^2 - 1] n$

กำหนดให้  $a = 4$   $b = 9$   $P = 45\%$   $\alpha = 0.05$  และ  $\beta = 0.1$

$V_1 = (a-1) \cdot (b-1) = (4-1) \times (9-1) = 24$  เลือกใช้ 8 เนื่องจากเป็นค่าสูงสุด

$V_2 = a \cdot b \cdot (n-1) = 4 \times 9 \times (2-1) = 36$

นำค่า  $\Phi$  ไปเปิดหาค่าจาก Operating Characteristic Curves for the Fixed Effects Model Analysis of Variance ได้ค่า  $\beta$



ภาพประกอบ ญ.1 Operating Characteristic Curves for the Fixed Effects Model Analysis of Variance

[41]



ตาราง ญ.1 สรุปจำนวนตัวอย่างขึ้นงานทดสอบที่เหมาะสม

N	$\Phi^2$	$\Phi$	$\beta$	$1-\beta$	$V_1$	$V_2$
2	1.11	1.05	0.51	0.49	8	36
<b>3</b>	<b>2.21</b>	<b>1.49</b>	<b>0.105</b>	<b>0.895</b>	<b>8</b>	<b>72</b>
4	3.31	1.82	0.04	0.96	8	96

สรุป ที่  $\beta = 0.105 \approx 0.1$  จะใช้ตัวอย่างในการทำการทดสอบเท่ากับ 3 ชิ้น จะทำให้ข้อมูลที่ทำการทดลองมีความน่าเชื่อถือ 95%



ประวัติย่อผู้วิจัย



## ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ - นามสกุล	นางสาวนวรรตน์ พิลาดัง
วัน เดือน ปีเกิด	วันที่ 21 มิถุนายน พ.ศ. 2528
จังหวัดและประเทศที่เกิด	จังหวัดมหาสารคาม ประเทศไทย
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2543 มัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนสารคามพิทยาคม อำเภอเมืองมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม พ.ศ. 2546 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนสารคามพิทยาคม อำเภอเมืองมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม พ.ศ. 2550 ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยขอนแก่น พ.ศ. 2551 Master of Engineering (M.Eng.) Electrical and Electronic Adelaide University, Australia พ.ศ. 2558 ปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต (ปร.ด.) สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ตำแหน่ง และสถานที่ทำงาน	อาจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ตำบลขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150
ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้	บ้านเลขที่ 75 หมู่ 14 ซอยวิทยาอำนาจ ตำบลเกิ้ง อำเภอเมืองมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม 44000

### ผลงานวิจัย

Piladaeng N, Judaboot A, Nguenboomrung W, Urasopon A. Application of Microcontroller for Controlling Metal Forming Machine. Journal of Applied Sciences Research 2012; 8[7]: 3235-3240.

