

قياس تأثير سمك العينة على امتصاص الموجات الكهرومغناطيسية الدقيقة

ضو محمد عبد الهادي

قسم الفيزياء ، كلية العلوم ، الجامعة الأسمرية الإسلامية ، زليتن- ليبيا

لمراسلة المؤلف: d.sahal@asmarya.edu.ly

الملخص

في هذا البحث تم دراسة تأثير سمك العينة المكونة من بوليمر حمض اللاكتيك (PLA) والياق ثمرة زيت النخيل (OPEFB) على امتصاص الموجات الكهرومغناطيسية الدقيقة. حضرت العينة بنسبة 30% من الياق ثمرة زيت النخيل ونسبة 70% من بوليمر حمض اللاكتيك ، و استخدم جهاز التحليل الشبكي (N5227) لقياس السماحية الكهربائية للعينة فوجد ان الجزء الحقيقي للسماحية 2.845 والجزء التخيلي لها 0.216 ، علاوة على ذلك استخدم برنامج كومسل للمحاكاة لدراسة المجال الكهربائي للعينات وحساب قيم معامل الانتقال (S_{21}) ومعامل الانعكاس (S_{11}) للموجات الكهرومغناطيسية الدقيقة ذات التردد (8-12GHz) ، حيث كانت قيم معامل الانتقال (S_{21}) تتراوح بين 0.729 و 0.950 و قيم معامل الانعكاس (S_{11}) بين 0.199 و 0.657 عند التردد 10 جيجا هرتز مقاسة بوحدة الديسيبل.

الكلمات المفتاحية: الموجات الكهرومغناطيسية الدقيقة، كومسل، معامل الانتقال، معامل الانعكاس، المجال الكهربائي.

MEASUREMENT OF THE EFFECT OF SAMPLE THICKNESS ON ABSORPTION OF MICROWAVES

Daw Mohammad Abdalhadi

Physics Dept., Faculty of Science, Alasmarya Islamic University, Zliten-Libya

Corresponding author: d.sahal@asmarya.edu.ly

ABSTRACT

This study investigated the effect of sample thickness on microwave absorption for a material composed of polylactic acid (PLA) and oil palm empty fruit bunch (OPEFB) fiber. The sample was prepared with 30% oil palm fiber and 70% PLA polymer. A network analyzer (model N5227) was used to measure the sample's electrical permittivity, with the real part recorded as 2.845 and the imaginary part as 0.216. Additionally, the COMSOL simulation program was employed to examine the electric field distribution in the samples and calculate the transmission coefficient (S_{21}) and reflection coefficient (S_{11}) for electromagnetic waves in the microwave frequency range of 8-12 GHz. The transmission coefficient (S_{21}) values ranged from 0.729 to 0.950, while the reflection coefficient (S_{11}) values varied between 0.199 and 0.657 at a frequency of 10 GHz, expressed in decibels.

Keywords: Electromagnetic Microwave, COMSEL, Transmission coefficient, Reflection coefficient, Electric field.

1. المقدمة

يمكن للمواد الممتصة للموجات الكهرومغناطيسية بشكل عام أن تمتص الإشعاع الكهرومغناطيسي بشكل فعال، وتقلل من تلوثه البيئي، وتحمي جميع أنواع المعدات الإلكترونية والكهربائية من تداخل الموجات الكهرومغناطيسية والحفاظ على التشغيل الآمن والطبيعي للمعدات، ويمكن أن توفر تدابير وقائية ذات فعالية لجسم الإنسان. إنها إحدى الطرق المهمة للتحكم في انتقال الموجات الكهرومغناطيسية ومنع التلوث الذي قد ينشأ منها وحماية جسم الإنسان من التعرض للأذى بسبب الإشعاع الكهرومغناطيسي في بيئة إشعاعية قوية [1]. مع التطور السريع لتكنولوجيا المعلومات الإلكترونية، لا يقتصر تطبيق المواد الممتصة للموجات الكهرومغناطيسية على المجال العسكري فقط، بل يمتد إلى مجالات مكافحة التداخل في الاتصالات، وسرية المعلومات الإلكترونية، وحماية البيئة، وحماية الإنسان والعديد من المجالات الأخرى، والتي عادة ما يتم تصنيعها من مواد مغناطيسية وأشهرها الحديد وغيرها من المعادن الأخرى وأخيراً تم الالتفات إلى مركبات البوليمر وقد اقتصر الاستخدام في بادئ الأمر على البوليمرات المقواة بالألياف الطبيعية مثل البولي بروبيلين والبولي إيثيلين على نطاق واسع في العديد من التطبيقات مثل السيارات والأدوات المنزلية، ولكن مثل هذه المركبات تتحلل جزئياً. وبالتالي، من المهم دراسة المواد المركبة مع المواد الخام القابلة للتحلل مثل بوليمر حمض اللاكتيك [2]. نظراً لأن هذا الحمض يتحلل في التربة وبالتالي فهو صديق للبيئة، لذلك أصبح متعدد حمض اللاكتيك أحد البوليمرات الأكثر طلباً لاستخدامها في التطبيقات التي لا يمكن إعادة تدويرها، وبذلك يمكن أن يحل حمض اللاكتيك PLA محل البوليمرات الاصطناعية التي يمكن أن تتسبب في مشاكل بيئية لها تأثيرات على صحة الإنسان والمخلوقات الأخرى. العديد من الدراسات أجريت حول الخواص الميكانيكية لمركبات الألياف الطبيعية المقواة بمتعدد حمض اللاكتيك PLA باستخدام أنواع مختلفة من الألياف، فدرس Steven [2] و K. Nirmal [3] و Gabriela [4] وآخرون الخواص الحرارية الميكانيكية لمركب متعدد حمض اللاكتيك PLA مع الألياف الطبيعية مثل الياف الخيزران والياص القصب العملاقة لتحل محل الألياف الاصطناعية في مركبات البوليمر وكذلك بحث Agnivesh وآخرون [5] ووجدوا أن متعدد حمض اللاكتيك PLA المقوى بالألياف الطبيعية يتمتع بخواص فيزيائية وميكانيكية ممتازة مما يجعله خياراً مناسباً للمركبات المقواة بالألياف الطبيعية نتيجة لقوتها وخفة وزنها وتحللها البيولوجي. ولقد ركزت دراسات أخرى على المركبات الحيوية وما يصاحبها من ظروف عند تشكيلها والمخاطر البيئية أثناء

وبعد تحضيرها، وبالتالي فإن تعزيز المركبات المقواة بالألياف الطبيعية هو أحد الطرق لتحسين الصلابة وتقليل التكلفة وتعزيز الاستقرار الحراري.

تعتبر ألياف ثمره زيت النخيل واحدة من النفايات الصلبة الرئيسية في كثير من الدول التي تنتج زيت النخيل. ومع ذلك، فإن العيب الرئيسي لاستخدام ألياف ثمره زيت النخيل كمعزز لتقوية المركب هو ضعف الالتصاق البيئي بين المواد البلاستيكية غير القطبية وألياف ثمره زيت النخيل القطبي المحب للماء ويمكن التغلب على هذا العيب بالمعالجة القلوية للألياف وذلك لتحسين الالتصاق البيئي في المركب [6]. تتميز ألياف ثمره زيت النخيل بكونها منخفضة التكلفة والكثافة وعالية القوة والصلابة نسبياً وعند لمسها والتعامل معها ليس لها أي تبعات صحية.

تعتبر مركبات البوليمر الممزوجة بالمواد الصناعية والطبيعية عنصراً رئيسياً في تكوين الأجهزة الكهربائية والإلكترونية وإنتاج أنظمة تلبى المتطلبات الميكانيكية والحرارية وخواص العزل الكهربائي [7]، لذلك فإن وجود الألياف الطبيعية في المركبات الهجينة له تأثير مهم في الخواص الكهربائية للمركب مثل ثابت العزل وعامل الفقد ويؤدي زيادة نسبة الألياف في المركب إلى زيادة قيم ثابت العزل وعامل الفقد [8]. وقد قام أحمد خميس وآخرون بدراسة خواص العزل الكهربائي ومعامل النقل والانعكاس لمركب من راتنجات الإيبوكسي والألياف ثمره زيت النخيل عند التردد 8-12 جيجا هرتز وأظهرت النتائج زيادة في خواص العزل الكهربائي بزيادة نسبة الألياف بينما انخفضت قيم معامل النقل [9]. تتفاعل المادة العازلة مع طاقة الموجات الكهرومغناطيسية عالية التردد وفي نطاقات مختلفة ويمكن التعبير عنها بمعادلة السماحية النسبية المركبة $\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon''$ حيث ϵ' يشير إلى الجزء الحقيقي و ϵ'' يشير إلى الجزء التخيلي والنسبة بينهما هو معامل الفقد للمادة ويعني كمية الطاقة المفقودة ويعبر عنه بالمعادلة $\tan\delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'}$ وكلما كانت قيمة عامل الفقد عالية كان معامل التوهين عالياً [10]. تقاس السماحية النسبية المركبة بطرق مختلفة من بينها تقنية المسبار المحوري المفتوح (OEC) والذي يتم فيها استخدام جهاز التحليل الشبكي (Net Work Analyzer) ويمكن أن يقيس هذا الجهاز العينات سواء كانت صلبة أو على هيئة مسحوق أو سائلة. والهدف من هذه الدراسة هو تحسين الخواص الكهربائية للمركب وقياس تأثير سمك هذا المركب على امتصاص الموجات الكهرومغناطيسية الدقيقة ذات النطاق 8-12 جيجا هيرتز. في العديد من الدراسات وجد أن سمك العينة يؤثر بشكل كبير على أداء امتصاص الموجات الكهرومغناطيسية الدقيقة فوجد أنه مع انخفاض سمك العينة، تحسنت خصائص امتصاص الموجات الكهرومغناطيسية الدقيقة [11].

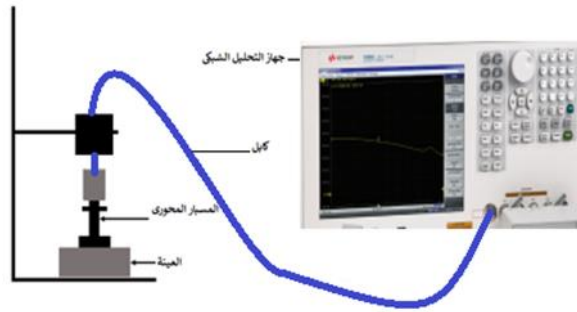
2. المواد والطريقة

المواد هي عبارة عن ألياف ثمرة زيت النخيل (OPEFB) التي تشتهر بها دول شرق اسيا ومتعدد حمض اللاكتيك (PLA)، تم تنظيف الياف ثمرة زيت النخيل بالماء الجاري عدة مرات ثم نقعت الألياف في الماء المقطر لمدة 24 ساعة ثم بعد ذلك نقعت في محلول الاسيتون للتخلص من الزيوت والمواد التي يصعب تنظيفها بالماء، ثم اخذت الألياف ووضعت في فرن درجة حرارته حوالى 80 درجة مئوية لغرض التجفيف و التخلص من الأسيتون والرطوبة، وبعد التجفيف التام وضعت الألياف في آلة الطحن (Model JL1000-55,china) ومن ثم في آلة النخل (الغربال) 500 (Endecotts,UK) وفى هذا البحث تم اختيار الألياف التي اقل 200 بعد ذلك تم وضع بوليمر متعدد حمض اللاكتيك وهو عبارة عن حبيبات بنسبة 70% من الخليط وبوزن (24.5 gm) وبنسبة 30% من ثمرة زيت النخيل وبوزن (10.5gm) في آلة الخلط (Modeln815651,GmbH&CO.KG,germany) عند درجة حرارة 170 درجة مئوية ولمدة 10 دقائق، و وضع الخليط في آلة الكبس الحرارية (Fred S. Carver part No 973110A, USA) بعد تهيئة القالب المناسب لهذا الغرض بطول 70 ملم وعرض 30 ملم ولمدة 20 دقيقة.

3. القياسات والنتائج

أ- قياس السماحية المركبة

بعد تحضير العينة كما سبق بيانه اخذت العينة ووضعت تحت المسبار المحوري الموصل بجهاز التحليل الشبكي كما في الشكل (1)، لقياس السماحية النسبية المركبة حيث كانت قيمة الجزء الحقيقي والتي تمثل ثابت العزل الكهربائي 2.845 وقيمة الجزء التخيلي والتي تمثل الفقد العزلى 0.219 من هذه القيم يرى التأثير الواضح لألياف ثمرة زيت النخيل على الخصائص الكهربائية بزيادة نسبة الألياف تزداد قيم السماحية المركبة ويعزى هذا لاحتواء الألياف على نسبة عالية من الكربون واحتفاظها بالماء [12].



شكل (1) قياس السماحية المركبة باستخدام المسبار المحوري

ولخواص العزل الكهربائية ϵ' , ϵ'' تأثير على سلوك الموجات الكهرومغناطيسية الدقيقة عند مرورها في المادة العازلة ولأهمية هذه الخواص يتم قياسها بدقة عالية وبطرق مختلفة ومن أهمها استخدام تقنية المسبار المحوري [13].

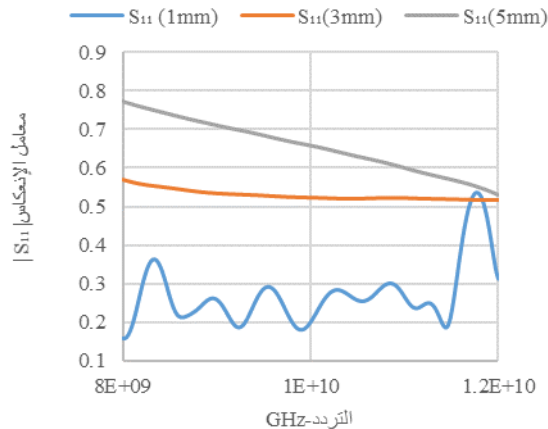
ب - حساب معامل الانعكاس ومعامل الانتقال

معامل الانعكاس للموجات الكهرومغناطيسية الدقيقة (S_{11}) هو معامل يصف مقدار انعكاس الموجة عندما تواجه حاجزا بين وسطين مختلفين. وهو عدد مركب يمثل مقدار ومرحلة الموجة المنعكسة بالنسبة للموجة الساقطة. أما معامل الانتقال (S_{21}) فهو معامل خط النقل الذي يرتبط غالبًا بنقل الموجات الكهرومغناطيسية في شبكات الموجات الكهرومغناطيسية الدقيقة ويمكن أن يصف بشكل مباشر خصائص التوهين لمادة ما [14]. في هذا البحث تم حساب معامل الانعكاس ومعامل الانتقال باستخدام برنامج كومسل (Comsol) للمحاكاة وبطريقة العناصر الدقيقة (FEM)، وذلك لاستخراج قيم معامل الامتصاص لكل سمك وهو 1 ملم، 3 ملم، 5 ملم وفقا للمعادلة

$$Absorption = P_{loss sample} - P_{loss air} \quad (1)$$

ولقد تم حساب القدرة المفقودة باستخدام المعادلة

$$P_{loss sample} = 1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2 - P_{loss air} \quad (2)$$



شكل (2) معامل الانعكاس

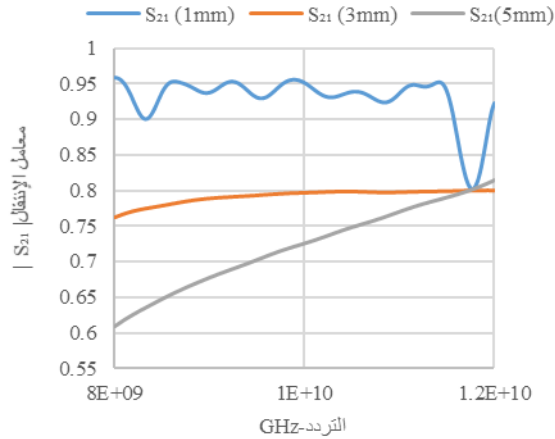
يوضح شكل (2) قيم معامل الانعكاس للعينة وبسمك 1 ملم و 3 ملم و 5 ملم فوجد ان اقل قيمة لمعامل الانعكاس عند السمك 1 ملم ثم يليه السمك 3 ملم ثم السمك 5 ملم ولقد سجلت القراءات عند التردد 10 جيجا هرتز وكما هو موضح بالجدول (1)

جدول (1) قيم معامل الانعكاس عند التردد 10 GHz

Thickness	1mm	3mm	5mm
S_{11}	0.207	0.523	0.656

من الجدول (1) نجد ان قيم معامل الانعكاس قد ازدادت بزيادة سمك العينة حيث سجلت 0.207 و 0.523 و 0.656 للعينات 1 ملم و 3 ملم و 5 ملم على التوالي وهذا تناوله Xiaomin وآخرون في بحثه سنة 2021 [15]، بينما يوضح الشكل (3) قيم معامل الانتقال لكل عينة وكما هو موضح بالجدول (2) فلقد زادت قيم معامل الانتقال بنقصان سمك العينة فنجد ان معامل الانتقال للعينة ذات السمك 1 ملم هو 0.950 وللعينة 3 ملم 0.796 وللعينة 5 ملم 0.723 وبشكل عام يلاحظ ان معامل الانتقال يشهد ثباتا وخاصة بين التردد 8.56 والتردد 1.15 جيجا هرتز بالنسبة للعينة 1 ملم بينما العينة 3 ملم يبدأ معامل الانتقال في الارتفاع تدريجيا حتى يصل الى التردد 10 جيجا هرتز ثم يشهد ثباتا نسبيا حتى التردد 12 جيجا هرتز، ولكن معامل الانتقال للعينة 5 ملم يزداد بزيادة التردد حيث كانت قيمته عند التردد 8 جيجا هرتز 0.608 وعند التردد 12 جيجا هرتز مسجلا ارتفاعا قدره 0.814 جيجا هرتز، بينما كان سلوك معامل الانعكاس على العكس من ذلك ان معامل الانعكاس

يتناقص بشكل كبير بالنسبة للسلك 5ملم مع زيادة التردد، وكذلك الحال للسلك 3ملم ولكنه تناقص نسبي اما بالنسبة للسلك 1ملم فيشهد اضطراب في القيم عند ترددات مختلفة وهذا يرجع الى سمك العينة ولربما الى قلة عدد العناصر الحرة القابلة للحل التي تحتاج الى جهاز كمبيوتر ذو قدرة عالية.



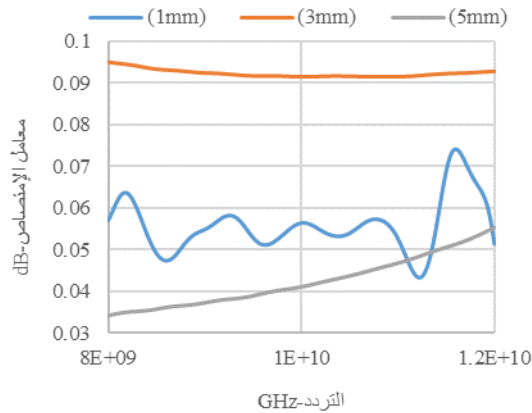
شكل (3) معامل الانتقال

جدول (2) قيم معامل الانتقال عند التردد 10GHz

Thickness	1mm	3mm	5mm
S_{21}	0.950	0.796	0.723

ت - معامل الامتصاص

تم حساب معامل الامتصاص بواسطة برنامج اكسل (Excel) وفقا للمعادلة رقم (2) وكما هو موضح في شكل (4) ان قيم معامل الامتصاص تباينت قراءاتها باختلاف سمك العينة وكما هو موضح بالجدول (3) فان قيم معامل الامتصاص سجلت أكبر قيمة للمعامل عند التردد 10GHz للسلك 3mm هو 0.0914dB ثم السلك 1mm بقيمة 0.0564 dB ثم السلك 5 mm بقيمة 0.0411dB



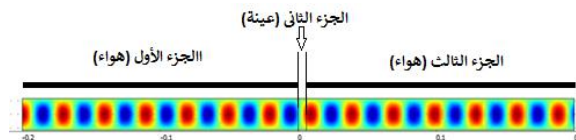
شكل (4) معامل الامتصاص

جدول (4) قيم معامل الامتصاص عند التردد 10GHz

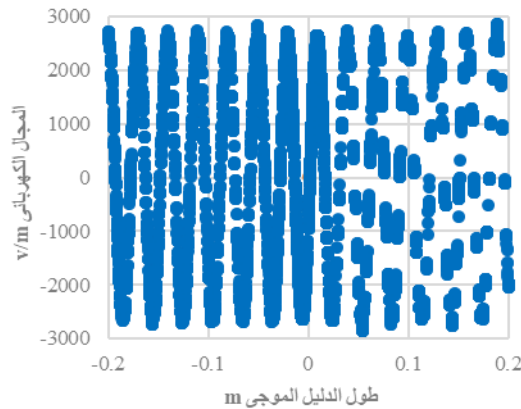
Thickness	1mm	3mm	5mm
Absorption	0.056432	0.091493	0.041121

ج - حساب المجال الكهربائي

تم حساب المجال الكهربائي بواسطة برنامج المحاكاة الفيزيائي متعدد الاغراض كومسل وقد تم تعيين قيم المجال الكهربائي لكل سمك من العينات على حده بما في ذلك عينة الهواء ويوضح الشكل (5) كثافة المجال الكهربائي بدون عينة (هواء) فلا نرى أي تغيير على شدة الألوان التي تحدد شدة المجال الكهربائي او انخفاضه وهذا ما يوضحه الشكل (6) الذي يمثل شكل الموجة التي لم يلاحظ عليها أي تغيير أيضا.

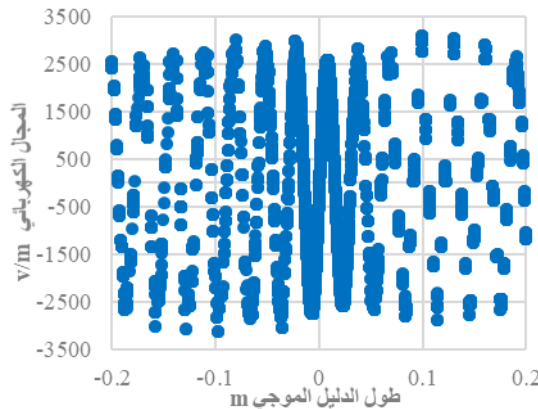


شكل (5) كثافة المجال الكهربائي بدون عينة

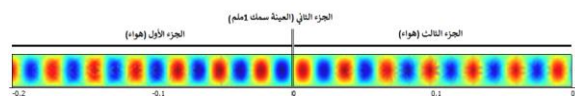


شكل (7) المجال الكهربائي بدون عينة مقابل طول الدليل الموجي

أما بالنسبة للشكل (8) الذي يمثل سعة المجال الكهربائي مقابل طول الدليل الموجي للسلك 1 ملم فمن الملاحظ انه حدث تضائل في شدة المجال الكهربائي عنده خروجه من العينة وتناقصت السعة من 2983.7 فولت لكل متر الى 2300.47 فولت لكل متر بينما توضح الصورة السطحية لكثافة المجال الكهربائي في الشكل (9) تضائل قليل في شدة الألوان وهذا يعنى انخفاض في شدة المجال الكهربائي نتيجة لتأثير سمك العينة عليه

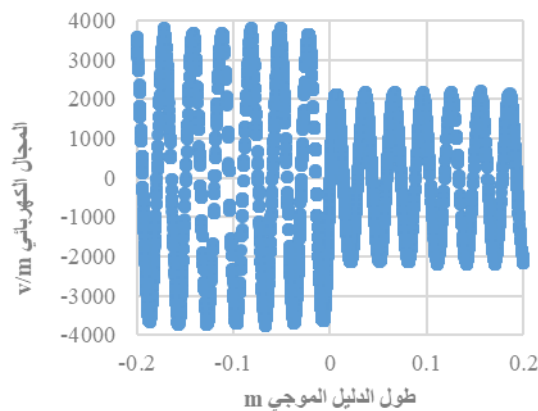


شكل (8) المجال الكهربائي للسلك 1ملم مقابل طول الدليل الموجي

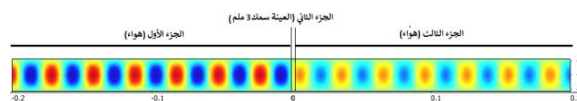


شكل (9) كثافة المجال الكهربائي للعينة سمك 1ملم

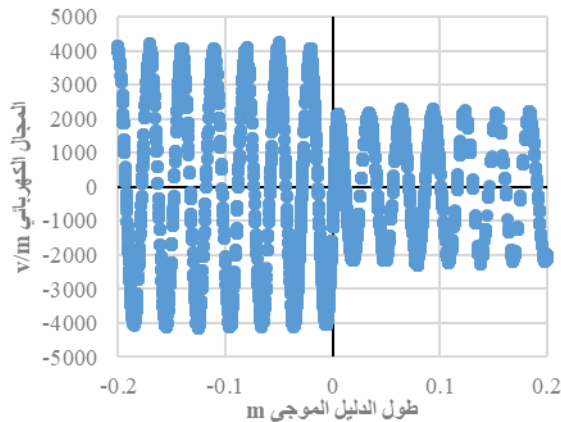
اما بالنسبة لشدة المجال الكهربائي للسلك 3 ملم و 5 ملم فمن الملاحظ من الشكل (11) والشكل (13) ان كثافة المجال انخفضت بشدة مقارنة بعينة الهواء والعينة 1 ملم وبالنظر للشكل (10) والشكل (12) يرى الفرق بكل وضوح بين الموجات الداخلة للعينة والخارجة منها فعندما كان السلك 3 ملم كان المجال الكهربائي الداخل للعينة 3524.69 فولت لكل متر والخارج من العينة 2041.77 فولت لكل متر، وللعينة 5 ملم كان المجال الداخل فيها 4027.34 فولت لكل متر والخارج منها 2056.24 فولت لكل متر، وبذلك نلاحظ ان للسلك تأثير ملحوظ على قيمة المجال الكهربائي وشدته.



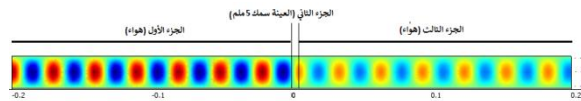
شكل (10) المجال الكهربائي للسلك 3 ملم مقابل طول الدليل الموجي



شكل (11) كثافة المجال الكهربائي للعينة سمك 3 ملم



شكل (12) المجال الكهربائي للسمك 5 ملم مقابل طول الدليل الموجي



شكل (13) كثافة المجال الكهربائي للعينة سمك 5 ملم

4. الخلاصة

في هذه الدراسة استخدم جهاز التحليل الشبكي لقياس السماحية المركبة للعينة المحضرة من بوليمر حمض اللاكتيك و الياف ثمرة زيت النخيل فوجد ان السماحية ازدادت قيمتها بإضافة الألياف الى البوليمر، كما استخدم برنامج كومسل للمحاكاة وبطريقة العناصر المحدودة (FEM) تم حساب شدة المجال الكهربائي ومعامل الانعكاس والانتقال وكذلك معامل الامتصاص لثلاث عينات افتراضية (1mm,3mm,5mm) ، و من حساب النتائج للمعامل (S_{11}) و (S_{21}) كانت قيم (S_{21}) اكبر من قيم (S_{11}) لكل العينات ، وان اكبر قيمة لمعامل الامتصاص للعينة 3 ملم 0.91493 والعينة 1 ملم 0.056432 والعينة 5 ملم 0.041121 ديسيبيل ويمكن استخدام مثل هذه العينات في تطبيقات الموجات الكهرومغناطيسية الدقيقة.

المراجع

- [1] N. Bagotia, "Electromagnetic (EM radiation) interference shielding material epicenter to carbon filler-based composite," Elsevier, 2024, pp. 155–194. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95387-0.00005-4>.
- [2] J. Finnerty *et al.*, "Effect of Mechanical Recycling on the Mechanical Properties of PLA-Based Natural Fiber-Reinforced Composites," *Journal of Composites Science*, vol. 7, no. 4, p. 141, Apr. 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/jcs7040141>.
- [3] K. Nirmal Kumar *et al.*, "Mechanical and Thermal Properties of Bamboo Fiber-Reinforced PLA Polymer Composites: A Critical Study," *International Journal of Polymer Science*, vol. 2022, pp. 1–15, Dec. 2022, doi: <https://doi.org/10.1155/2022/1332157>.
- [4] L. Suárez, Z. Ortega, F. Romero, R. Paz, and M. D. Marrero, "Influence of Giant Reed Fibers on Mechanical, Thermal, and Disintegration Behavior of Rotomolded PLA and PE Composites," *Journal of polymers and the environment*, vol. 30, no. 11, pp. 4848–4862, Sep. 2022, doi: <https://doi.org/10.1007/s10924-022-02542-x>.
- [5] A. K. Sinha, K. R. Rao, V. K. Soni, R. Chandrakar, H. K. Sharma, and A. Kumar, "A Review on Mechanical Properties of Natural Fibre Reinforced PLA Composites," *Current Materials Science*, vol. 15, Dec. 2021, doi: <https://doi.org/10.2174/2666145415666211228163914>.
- [6] "Determining the complex permittivity of oil palm empty fruit bunch fibre material by open-ended coaxial probe technique for microwave applications: BioResources," *@bioresjournal*, 2017. <https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/determining-the-complex-permittivity-of-oil-palm-empty-fruit-bunch-fibre-material-by-open-ended-coaxial-probe-technique-for-microwave-applications/> (accessed Nov. 11, 2024).
- [7] H. A. Dahad, S. F. Hasan, and A. H. Alwan, "Study the Effect of Different Percentages of Natural (Orange Peels and Date Seeds) and Industrial Materials (Carbon and Silica) on the Mechanical and Thermal Properties of Polymeric Reinforced Composites," *Al-Khwarizmi Engineering Journal*, vol. 14, no. 4, pp. 16–23, Nov. 2018, doi: <https://doi.org/10.22153/kej.2018.04.001>.
- [8] N. Sunthrasakaran *et al.*, "Factors that affects the dielectric properties of natural fibre reinforced hybrid biocomposite," *Indonesian Journal of*

Electrical Engineering and Computer Science, vol. 15, no. 2, p. 714, Aug. 2019, doi: <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v15.i2.pp714-722>.

- [9] A. M. Khamis, Z. Abbas, A. F. Ahmad, R. Syahidah Azis, D. M. Abdalhadi, and E. E. Mensah, "Experimental and computational study on epoxy resin reinforced with micro-sized OPEFB using rectangular waveguide and finite element method," *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 14, no. 8, pp. 752–758, May 2020, doi: <https://doi.org/10.1049/iet-map.2019.0085>.
- [10] Ebenezer Ekow Mensah, Z. Abbas, Raba'ah Syahidah Azis, Nor Azowa Ibrahim, and Ahmad Mamoun Khamis, "Complex Permittivity and Microwave Absorption Properties of OPEFB Fiber–Polycaprolactone Composites Filled with Recycled Hematite (α -Fe₂O₃) Nanoparticles," *Polymers*, vol. 11, no. 5, pp. 918–918, May 2019, doi: <https://doi.org/10.3390/polym11050918>.
- [11] N. Tran, M. Y. Lee, W. H. Jeong, T. L. Phan, N. Q. Tuan, and B. W. Lee, "Thickness independent microwave absorption performance of La-doped BaFe₁₂O₁₉ and polyaniline composites," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 538, p. 168299, Nov. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.168299>.
- [12] M. Ma et al., "Design and synthesis of one-dimensional magnetic composites with Co nanoparticles encapsulated in carbon nanofibers for enhanced microwave absorption," *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 652, pp. 680–691, Aug. 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2023.08.031>.
- [13] A. Šarolić and A. Matković, "Dielectric Permittivity Measurement Using Open-Ended Coaxial Probe—Modeling and Simulation Based on the Simple Capacitive-Load Model," *Sensors*, vol. 22, no. 16, p. 6024, Aug. 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/s22166024>.
- [14] E. E. Mensah, Z. Abbas, R. S. Azis, and A. M. Khamis, "Enhancement of Complex Permittivity and Attenuation Properties of Recycled Hematite (α -Fe₂O₃) Using Nanoparticles Prepared via Ball Milling Technique," *Materials*, vol. 12, no. 10, p. 1696, May 2019, doi: <https://doi.org/10.3390/ma12101696>.
- [15] X. Wu, Y. Yao, Y. Fan, Z. Zhao, and J. Zhan, "Designing Co-based microwave absorber with high absorption and thin thickness based on structure regulations," *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 32, no. 24, pp. 28648–28662, Oct. 2021, doi: <https://doi.org/10.1007/s10854-021-07240-3>.