دراسة بعض الخواص الميكانيكية لمادة مركبة بوليميرية مقواة بالألياف

علي إبراهيم الموسوي
المعهد التقني - بابل
مدرس مساعد

الخلاصة

إن الهدف من هذا البحث هو دراسة تأثير تغيير نسبة التقوية بالألياف على الخواص الميكانيكية للمادة المركبة المكونة من راتـنج الإيبوكسي نوع كونبكسترا (EP-10) المقوى بألياف كيفلار بشكل ظفائر محاكة ثنائية الإتجاه (°45-0°) ذات كثافة سـطحية (340 g/cm^3) وقد شملت هذه الخواص كل من مقاومة الصدمة ، مقاومة الشد ، مقاومة الإنثناء ، والصلادة حيث تم في البداية إستخراج الخواص الميكانيكية لراتنج الفينول فورمالدهيد قبل التقوية بالألياف بعدها تم تدعيم الراتنج بنسب وزنية مختلفة من أليـاف كـيفلار (20%, 40%, 60%) و دراسة تأثير ذلك على الخواص المذكورة وكما موضح في المخططات البيانية

الكلمات الدالة: المادة المركبة ، الخواص الميكانيكية ، راتنج الإيبوكسي كونبكسترا ، ألياف كيفلار .

Study of Some Mechanical Properties for Polymeric Composite Material Reinforced by Fibers

Ali I.Al-Mosawi
Technical Institute - Babylon
Assist. Lecturer

Abstract

The objective of this research is to study the effect of changing the reinforcement percentage by fibers on Mechanical properties, for composite material consists of conbextra epoxy (EP-10) resin reinforced by biaxial woven roving kevlar fibers (٠°-٤٥°) with density (340 g/cm^3) which included impact strength , tensile strength , flexural strength and hardness Where the Mechanical properties were extracted for phenol formaldehyde resin before reinforcement by fibers, then we reinforced the resin by different weight percentage from Kevlar fibers(20%,40%,60%) and studied the effect on the above mechanical properties as illustrated in the diagrams .

Keywords:-Composite Material , Mechanical Properties, Conbextra Epoxy Resin , Kevlar Fibers .

المقدمة (Introduction) .

عرفتْ تقنية تصنيع المواد المركبة بأبسط صورها منذ قرون عدة حيث إستخدمها البابليون في بناء بيوتهم عن طريق خلط نشارة الخشب بمادة الطين لتقويته . تتكون المادة المركبة من دمج مادتين أو أكثر وتشمل الخلائط (Blends) والبلاستك (Reinforced Plastic) مختلفتي الخواص الميكانيكية والفيزياوية [علي،١٩٩٩]. إن

عملية الدمج هذه تؤدي إلى الحصول على مادة جديدة ذات خواص هندسية وفيزيائية تختلف عن خواص المواد الداخلة في تركيبها . يعتمد الإستخدام العام للمادة المركبة بشكل كبير على الخواص الميكانيكية والفيزيائية لهذه المواد لذلك فإن دراسة هذه الخواص تحت تأثير القوى والأحمال في ظروف مختلفة يكتسب أهمية كبيرة لمعرفة مدى ملائمة هذه الخواص لمكان عمل هذه المواد . يوجد في الطبيعة الكثير من الأمثلة على المواد المركبة ومنها ألياف السليلوز مع مادة الخشب . أما في الصناعة فإن تقوية الراتنجات بالألياف الصناعية هي الأكثر إنتشاراً. و لتصنيع مادة مركبة يجب توفر مادتين هما :

١- المادة الأساس (Matrix Material) .

تكون مواد الأساس أما مواد معدنية متكونة من المعادن وسبائكها وتتميز بثقل وزنها ومتانتها العالية أو قد تكون مواد سيراميكية والتي تمتاز بخفة وزنها ومقاومتها المرتفعة لدرجات الحرارة العالية ولكنها ضعيفة المقاومة لقوى الصدم. كذلك تكون المادة الأساس مواد بوليميرية وهي الأكثر إستعمالاً وإنتشاراً لما تتميز به من خواص ميكانيكية وحرارية جيدة ، ومن الأمثلة على المواد البوليمرية راتنج الإيبوكسي و الفينول والبولي أستر[عبد الفتاح،٢٠٠٠].

٢- مادة التقوية (Reinforcing Material) .

يجب توفر ميزتين أساسيتين في هكذا مواد وهي المقاومة العالية والمطيلية المنخفضة حتى تستطيع تقوية المواد الأساس . هناك عدة طرق للتقوية منها التقوية بالدقائق(Particulate) والتي تكون بقطر أكبر من (1 µm) وبأشكال مختلفة منها الإبرية والكروية والقِشرية ، كذلك تتم التقوية بالتشتت(Dispersed) ويكون قطر الدقائق أقل من(0.1µm). أما أكثر أساليب التقوية شيوعاً فهي التقوية بالألياف(Fibers) نظراً لما تتميز به من قوة كبيرة مقارنة بالمواد الراتنجية ، وتكون الألياف بأنواع وأشكال مختلفة فمنها ما يكون بشكل مستمر أو مقَطع أو بشكل ظفائر محاكة [عبد الفتاح،٢٠٠٠].

التقوية بالألياف (Fibers Reinforcing) .

إن الهدف الرئيسي من التقوية بالألياف هو لتحسين الخواص الميكانيكية والفيزيائية للراتنجات حيث تزداد مقاومة الشد والصدمة والصلادة بشكل كبير مما يسمح بإستخدام هذه المواد المقواة في مجالات صناعية عنيفة . يطلق على هذه المواد المركبة بالمتقدمة (Advanced Composites) وذلك لتفريقها عن المواد المحشوة البوليمرية (Filled Polymers) [علي،١٩٩٩] .إن الألياف في هذا النوع من المواد المركبة هي المسؤول الرئيسي عن

تحمل الأحمال الخارجية ، ومن أكثر أنواع الألياف شيوعاً في مجال المواد المركبة المتقدمة هي ألياف الزجـاج والكاربون وألياف كيفلار .

راتنج الإيبوكسي (Epoxy Resin) .

ينتمي راتنج الإيبوكسي إلى مجموعة الراتنجات المتصلبة بالحرارة حيث تتميز هذه الراتنجات بعدم إمكانية إعادة تشكيلها بالحرارة بعد تحولها إلى مادة صلبة نتيجة لتكون سلاسل بوليميرية طويلة متشابكة مع بعضها وهو مـا يسمى بالربط التشابكي (Cross Linking) . يحتوي راتنج الإيبوكسي على مجموعتين أو أكثر مـن مجـاميع الإيبوكسايد (Epoxide) التي تتألف من ذرة أوكسجين مرتبطة مع ذرتي كاربون ترتبط مجموعـة الإيبوكـسي كيميائياً مع الجزيئات الأخرى لتشكيل شبكة ثلاثية الأبعـاد ذات ربـط تـشابكي بعمليـة المعالجـة (Curing) [efunda,2000]. يتميز راتنج الإيبوكسي بالصلادة والمقاومة الكيميائية العاليتين نسبياً إضافة إلى ذلك يمتلـك هـذا الراتنج قابلية إلتصاق نوعي عالي بسبب التركيب الكيميائي لهذا الراتنج والمتمثـل فـي مجموعـة الإيثـرات والهيدروكسيل والمجاميع القطبية التي تعطي متانة وإلتصاق عالية وتكسب المادة صلادة وقوة ، لذلك يستعمل في التطبيقات التي تتطلب إداءاً وظيفياً عالياً. تتفاعل هذه الراتنجات مع المصلدات أثناء المعالجة ويكون التفاعل غير مصحوب بإنبعاث الماء أو تحرر أي منتجات ثانوية مما يجعل التقلص الحجمي قليل جداً (أقل من ٢%) وبالتالي يكتسب الراتنج قوة وخواص ميكانيكية عالية إضافة إلى ذلك تمتلك راتنجات الإيبوكسي المعالجة متانـة عاليـة نتيجة للبعد بين نقاط الربط التشابكي ووجود السلاسل الإليفانية المتكاملة [Liyong,2002] .

خواص المواد المركبة (Composite Materials Properties) .

تعتمد الإستخدامات العامة والهندسية للمواد المركبة إلى حد بعيد على خواصها الميكانيكية والفيزيائية مثل مقاومة الشد والمرونة وقابلية المادة للإستطالة ومقاومتها للحرارة والظروف البيئية مثل الرطوبة وأشعة الشمس وغيرها من الخواص التطبيقية الأخرى . إن جميع هذه الخواص تعتمد كثيراً على التركيب الجزيئي للراتنج وعلى وزنه الجزيئي وعلى القوى الجزيئية . كما تعتمد هذه الخواص إلى حد كبير على مواد التقوية وعلى المواد المـضافة مثل الحشوات والملدنات[Morom,1990] . ومن الخواص المناقشة في هذا البحث ما يأتي :

١- مقاومة الصدمة (Impact Strength) .

تُعبر مقاومة الصدمة عن قدرة المادة لمقاومة الكسر تحت تأثير حمل مفاجئ ، كما تعتبر مقياساً لمتانـة المـادة حيث المواد الأكثر متانة هي التي تبدي أعلى مقاومة للصدمة . ويمكن تحـسين مقاومـة الـصدمة للراتنجـات

بإضافة بعض المحسنات مثل مطاط بيوتادين أو إضافة الملدنات أو بترتيب وتراصف السلاسل البوليمرية ولكن أكثر الطرق فاعلية في تحسين مقاومة الصدمة هي التقوية بالألياف[Morom,1990] .

٢- مقاومة الشد (Tensile Strength) .

تعتبر مقاومة الشد مقياساً لقابلية المادة على مقاومة القوى الساكنة التي تحاول سحب المادة وكسرها . تتكون المواد المركبة الليفية من ألياف قوية هشة مغمورة في المادة الأساس التي تتصف بكونها أكثر مطيلية . تبدأ المادة المركبة بالإستطالة بشكل خطي في البداية إستجابة للجهد المسلط ومع إستمرار التحميل يحصل إنحراف نتيجة لوصول المادة الأساس إلى نقطة الخضوع في حين تستمر الألياف بالإستطالة و المقاومة حتى تنهار مقاومتها.وعندما تتهشم المادة الأساس تفشل المادة المركبة كلياً[Mittelman,1990] .

٣- الصلادة (Hardness) .

تُعرف الصلادة على إنها مقاومة المادة للخدش أو الإختراق ، وهنالك عِدة مقاييس عالمية مختلفة لتعيين صلادة المواد اللدائنية وأكثرها شيوعاً صلادة برينل وصلادة روكويل . يحدث الإختراق بمعدل بطيء في سطح النموذج أثناء تسليط القوة لأجل الإختبار مما يؤدي إلى حدوث زحف موضعي ، وبعد زوال القوة المؤثرة تحصل إستعادة بطيئة نسبياً في الإختبار مما يؤدي إلى تغيير أبعاد الأثر المعتمد في حساب صلادة المادة ولمنع حدوث ذلك يتوجب الإلتزام بالفترة الزمنية المحددة لتسليط القوة على سطح النموذج .تبرز أهمية إختبارات الصلادة في إعطاء كشف سريع لما يطرأ من تغيرات على الخواص الميكانيكية للمادة نتيجة لعمليات التصنيع والتغيرات الكيميائية والمعاملات الحرارية والتعتيق والتغيرات المصاحبة لعمليات التشكيل[علي،١٩٩٩].

٤- مقاومة الإنثناء (Flexural Strength) .

وتعتبر هذه الخاصية مقياساً لمقاومة الإنحناء ، ويمكن تعرفها على إنها أقصى حمل ساكن يمكن تسليطه على نموذج الإختبار قبل أن يخضع أو ينكسر وتقاس بوحدات (MPa) . عند تسليط حمل إنثناء على مادة مركبة طبقية فإن الجهود المناظرة تتناسب طردياً مع خواص المرونة للطبقات ومع ترتيبها داخل المادة المركبة الطبقية وإن الاختلافات في خواص الطبقات تؤدي إلى الشروع بالتشقق ضمن الطبقة أكثر منه في السطح الخارجي كما يحصل مع المواد الموحدة الخواص[علي،١٩٩٩].

الجزء العملي (Experimental Work) .

يتضمن الجزء العملي تحضير المواد الأولية وكيفية تحضيرها إضافة إلى الإختبارات الميكانيكية التي تم إجراءها على المادة المركبة .

أولاً- المواد المستخدمة في البحث .

تم في هذا البحث إستخدام المواد التالية والتي تم تصنيع النماذج منها وهي :

١- راتنج الإيبوكسي نوع كونبكسترا (EP-10) .

يتصف هذا الراتنج بخواص مميزة عديدة منها لزوجته المنخفضة وخاصية إلتصاق عالية ويتميز بمعدل زحف واطئ تحت تأثير الأحمال الدائمية ويكون متماسكاً ولا يحدث إنكماش بعد صبه في القالب وتصلبه . تم إستخدام المصلد (Metaphenylene Diamic) الذي يضاف إلى الراتنج بنسبة [٣:١] حيث يحث التفاعل معهما في درجة حرارة الغرفة .

٢- ألياف كيفلار (Kevlar Fibers) .

وهي عبارة عن بوليمر (PolyP-Phenyleneterephthalamide) والذي يحضر بالبلمرة التكثيفية لمركبي (Terephthaloyl Chloride) و(P-Phenylenediamine) . هذه الألياف تكون بهيئة سلسلة بوليمرية خطية غير متقطعة نتيجة الترابط الموجه لحلقات البنزين . تم في هذا البحث إستخدام ألياف كيفلار بشكل طفائر محاكة ثنائية الإتجاه (٤٥°-٠°) ذات كثافة سطحية ($340g/cm^3$) . **الشكل رقم (١)** يوضح التركيب الكيميائي لألياف كيفلار[علي،١٩٩٩].

ثانياً- تحضير النماذج (Test Specimens Preparation) .

تم في هذا البحث تصنيع أربعة أنواع من النماذج خاصة بالإختبارات التي تم إجراءها وهي :

١- نماذج إختبار الصدمة (Impact Specimens) .

تم تصنيع نماذج إختبار الصدمة حسب المواصفات القياسية (ASTM- E23) والملائمة للفحص في جهاز الصدمة نوع شاربي (Charpy Impact) . عمق الحز في النماذج (0.5 mm) ونصف قطر قاعدة الحز(0.25 mm) وبزاوية حز(٤٥°) .

٢- نماذج إختبار مقاومة الشد (Tensile Specimens) .

تم إعتماد المواصفة القياسية (ISO – R – 527) في تصنيع نماذج إختبار مقاومة الشد.

٣- نماذج إختبار الصلادة (Hardness Specimens) .

تم تصنيع نماذج إختبار الصلادة على شكل أقراص دائرية بقطر (25 mm) وسمك (10 mm) .

٤- نماذج إختبار مقاومة الإنثناء (Flexural Strength Specimens) .

أُعتمدت المواصفة القياسية (ASTM D790) في تصنيع نماذج الإختبار والتي كانت على شكل نماذج مستطيلة بأبعاد (10mm×135mm) .

تم تصنيع ثلاث قِطع من كل نموذج لجميع الإختبارات والتي يختلف بنسبة راتنج الفينـول فورمالدهيـد ونـسبة التقوية بألياف كيفلار وكما موضح في **الجدول** رقم (١) .

ثالثاً – الإختبارات الميكانيكية (Mechanical Tests) .

تم إستخدام ثلاثة إختبارات الميكانيكية للتعرف على خواص المادة المركبة ، وهذه الإختبارات هي :

١- إختبار الصدمة (Impact Test) .

أُستخدم جهاز فحص مقاومة الصدمة نوع شاربي (Charpy Impact Instrument) للتعرف على مدى مقاومة المادة المركبة لحِمل الصدم .

٢- إختبار مقاومة الشد (Tensile Test) .

أُستخدم هذا الإختبار لمعرفة خواص المادة المركبة تحت تأثير حِمل شد محوري بإتجاه واحد ، حيث تم إستخدام جهاز الإختبارات العام (Universal Instrument) في قياس هذه الخاصـية وبمعـدل حِمـل (20 KN) . ويمكن حساب مقاومة الشد من القانون الآتي :

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

حيث :

σ = مقاومة الشد . (N/m^2)

F= الحِمل المسلط . (N)

A = مساحة المقطع العرضي للنموذج . (m^2) .

٣- إختبار الصلادة (Hardness Test) .

تم إستخدام طريقة برينل (Brinell Hardness) لحساب صلادة المادة المركبة ، حيث أُستخدمت كرة فولاذيـة بقطر (5 mm) مع تسليط حِمل مقداره (10 Kg) لمدة (15 sec) وبعد زوال القوة المؤثرة يتم قياس قُطر الأثر الناتج على السطح .ويمكن إستخراج قيم الصلادة من العلاقة التالية :

$$HB=\frac{P}{\left(\frac{\pi\times D}{2}\right)\left(D-\sqrt{D^2-d^2}\right)}$$

حيث :

HB = صلادة برينل . (Kg/mm^2)

P = القوة المسلطة . (Kg) .

D = قُطر كرة الإختبار (mm) .

d = قُطر الأثر الناتج على السطح (mm) .

٤- إختبار مقاومة الإنثناء (Flexural Strength Test) .

يمكن قياس مقاومة الإنثناء بطريقة الإختبار ثلاثي النقاط ويتم ذلك بإستخدام مكبس هيدروليكي متعدد الأغـراض لقياس أقصى حمل مسلط على منتصف نموذج الإختبار ، ويمكن حساب مقاومة الإنثناء من المعادلة التالية :

$$\sigma = F \times S = \frac{3PS}{2bt^2}$$

حيث :

P = أقصى حمل يتحمله النموذج (N).

S = البعد بين نقطتي التحميل (mm).

b = عرض النموذج (mm).

t = سمك النموذج (mm) .

VI – النتائج والمناقشة (Results and Discussion) .

تمتلك الخواص الميكانيكية للمادة المركبة أهمية كبيرة في مجال إستخدام هكذا مواد ، حيث يجب أن تكون قـيم هذه الخواص عالية ومقبولة حتى تؤدي عملها بكفاءة . ومن خلال هذه الإختبارات التي أُجريـت علـى راتـنج الإيبوكسي كونبكسترا (EP-10) المقوى بألياف كيفلار ثنائية الإتجاه حـصلنا علـى النتـائج الموضـحة فـي المخططات البيانية والتي تُمثل قيم مقاومة الشد ومقاومة الصدمة والصلادة ومقاومة الإنثناء نـسبة إلـى نـسبة التقوية بالألياف .

١- مقاومة الصدمة . **الشكل رقم (2)** يوضح قيم مقاومة الصدمة مع نسبة التقوية بالألياف ، حيث تعتبر مقاومة الصدمة بشكل عام منخفضة للراتنجات نظراً لهشاشتها ولكن بعد تقويتها بالألياف تزداد قيمة مقاومة الصدمة ويرجع السبب في ذلك إلى كون الألياف سوف تتحمل الجزء الأكبر من طاقة الصدم المسلطة علـى المـادة المركبة مما يحسن هذه المقاومة . وهكذا تزداد مقاومة الصدمة مع زيادة نسبة التقوية بالألياف إلى(٤٠%) و (٦٠%) .

٢- مقاومة الشد . تعتبر الراتنجات من المواد الهشة حيث مقاومتها للشد منخفضة جداً وهذا ما نراه في **الـشكل رقم (3)** ، ولكن عند إضافة الألياف إلى هذه المواد تتحسن مقاومتها للشد بصورة كبيرة حيـث إن الجـزء الأعظم من الجهد المسلط تتحمله الألياف مما يرفع مقاومة الشد للمادة المركبة وذلـك لأن الألـياف تتميـز

بمطيليتها المنخفضة . وتزداد مقاومة الشد بزيادة نسبة الألياف المضافة حيث تشغِل الألياف حيز أكبر داخل الراتنج مما يسمح بتوزيع الحِمل المسلط عليها بشكل أفضل .

٣- الصلادة . تتميز المواد اللدائنية بشكل عام بإنخفاض صلادتها حيث نلاحظ من **الشكل رقم (4)** تـدني قيمـة صلادة راتنج الإيبوكسي كونبكسترا (EP-10) قبل التقوية بالألياف ، إلا إن قيمة الصلادة ترتفع بشكل حـاد عند التسليح بألياف كيفلار نظراً لتوزيع الحِمل على الألياف مما يقلل معدل الإختراق لسطح المادة المركبـة ويرفع قيم صلادتها . وتزداد صلادة المادة المركبة مع زيادة نسبة الألياف المضافة لنفس السبب المـذكور أعلاه .

٤- مقاومة الإنثناء . تمتلك المواد البوليمرية مقاومة إنثناء منخفضة وهذا راجع إلى هشاشة هذه المـواد وكمـا موضح في **الشكل رقم (5)** الذي يمثل إختبار مقاومة الإنثناء لراتنج الإيبوكسي كونبكسترا (EP-10) المقوى بألياف كيفلار ثنائية الإتجاه حيث تكون قيمة مقاومة الإنثناء منخفضة قبل التقوية بالألِيـاف ، ولكـن هـذه المقاومة تبدأ بالإرتفاع لهذا الراتنج بعد تقويته بألياف كيفلار ويعود السبب في ذلك إلى إرتفاع معامل مرونة هذه الألياف مما يؤدي إلى تحملها إلى الجزء الأكبر من الحمل المسلط على المادة المركبة مما يؤدي بدوره إلى زيادة مقاومة الإنثناء لهذه المادة المقواة بالألياف . وتزداد هذه المقاومة مع زيادة نسبة التقوية بالألياف .

الاستنتاجات (Conclusions) .

من خلال النتائج التي تم الحصول عليها يمكن الخروج بالإستنتاجات التالية :

١- إنخفاض قيم الخواص الميكانيكية لراتنج الفينول فورمالدهيد كونه من المواد الهشة .
٢- تحسن قيم هذه الخواص الميكانيكية لراتنج الفينول فورمالدهيد بعد تقويته بألياف كيفلار ثنائية الإتجـاه ، وتزداد قيم الخواص الميكانيكية مع زيادة نسبة الألياف المضافة .

المصادر (References) .

١- علي هوبي حليم" *تحسين خواص المواد اللدائنية المقساة*"، رسالة ماجستير، جامعة بابل،١٩٩٩ .

٢- د. عبد الفتاح محمود طاهر " *أساسيات علم وتقنية البلمرات* " دار المريخ للنشر ، الرياض - المملكة العربية السعودية ، ٢٠٠٠ .

3- ***e***funda Engineering Fundamentals " *Polymer Material Properties* ",2001. (www.efunda.com).

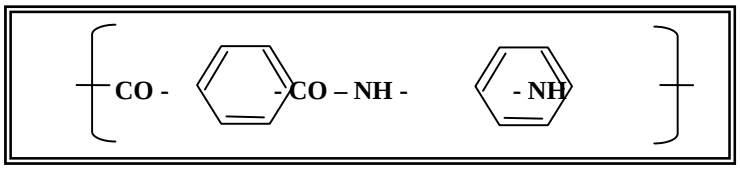
4- Liyong Tong , Adrian P.Mouritz , Michael K.Bannister " *3D Fiber Reinforced Polymer Composites* ", Elsevier Science Ltd , First Edition , 2002.

5- G.Morom , E.Drukkler , A.Weinbery , and J. Banbaji "*Impact Behavior of Carbon/Kevlar Hybrid Composite* " , Composites , Vol.17 , No.2 , 1990 , pp.150-153 .

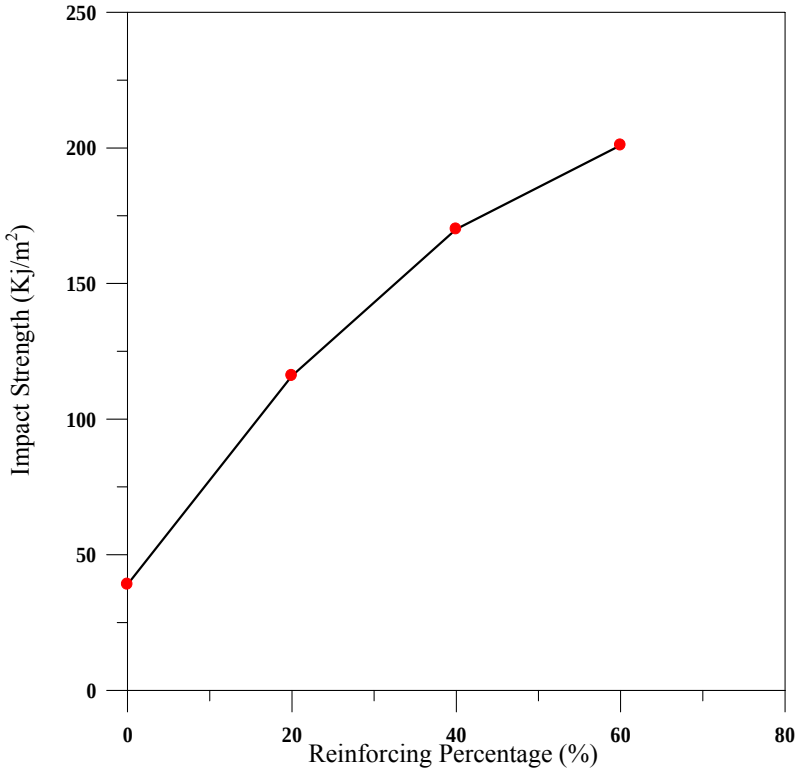
5- Mittelman and I. Roman "*Tensile Properties of Real Unidirectional Kevlar/Epoxy Composite* " , Composites , Vol.21 , No.1 , 1990 , pp.63-69 .

الجدول رقم (١): تركيب نماذج الإختبارات الميكانيكية

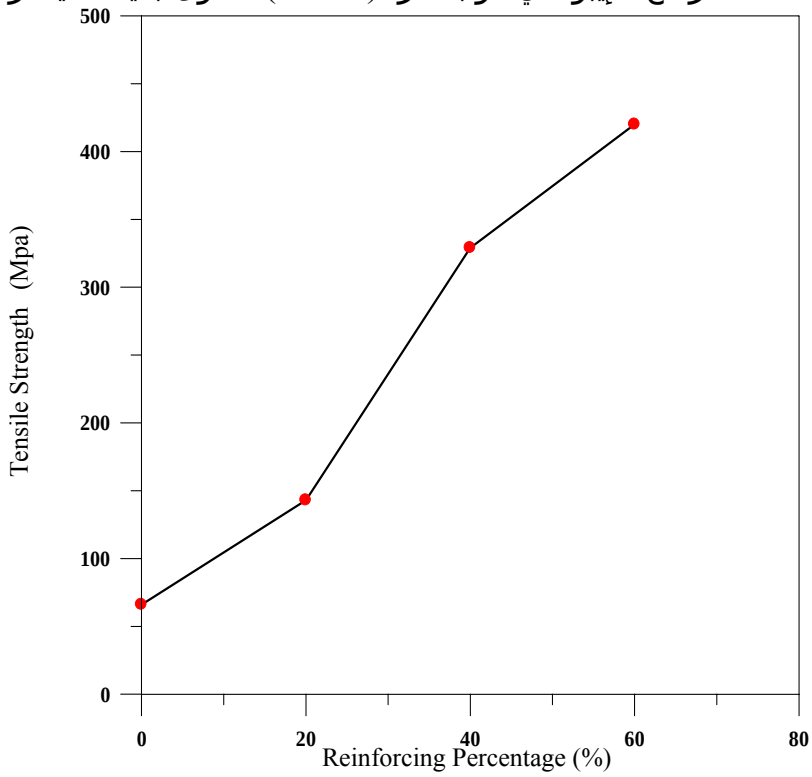
رقم النموذج (القطعة)	النموذج الأول	النموذج الثاني	النموذج الثالث
نسبة الراتنج (نسبة وزنية %)	٨٠	٦٠	٤٠
نسبة الألياف (نسبة وزنية %)	٢٠	٤٠	٦٠



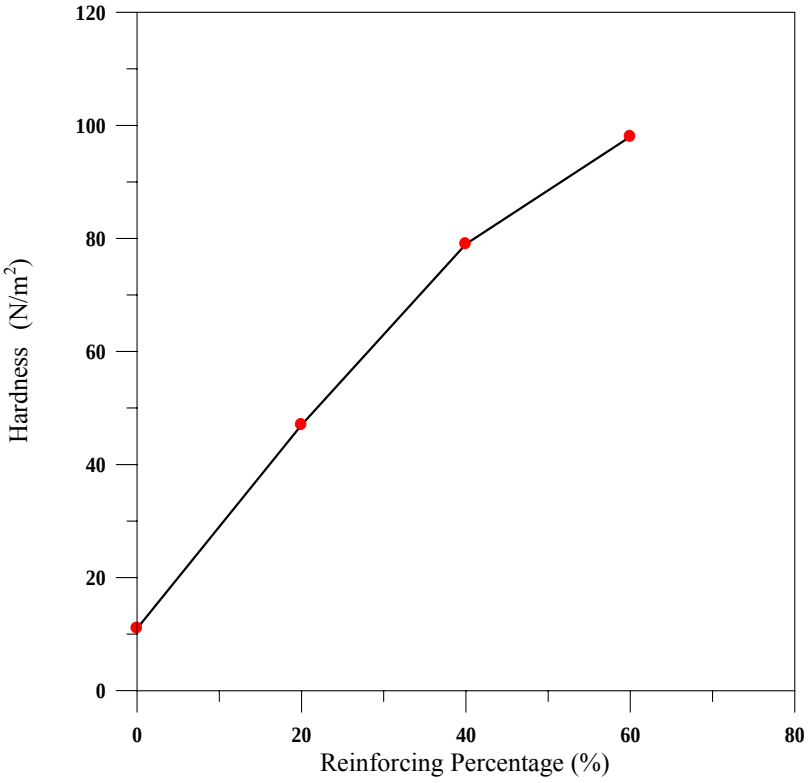
الشكل رقم (١): التركيب الكيميائي لألياف كيفلار[علي،١٩٩٩]



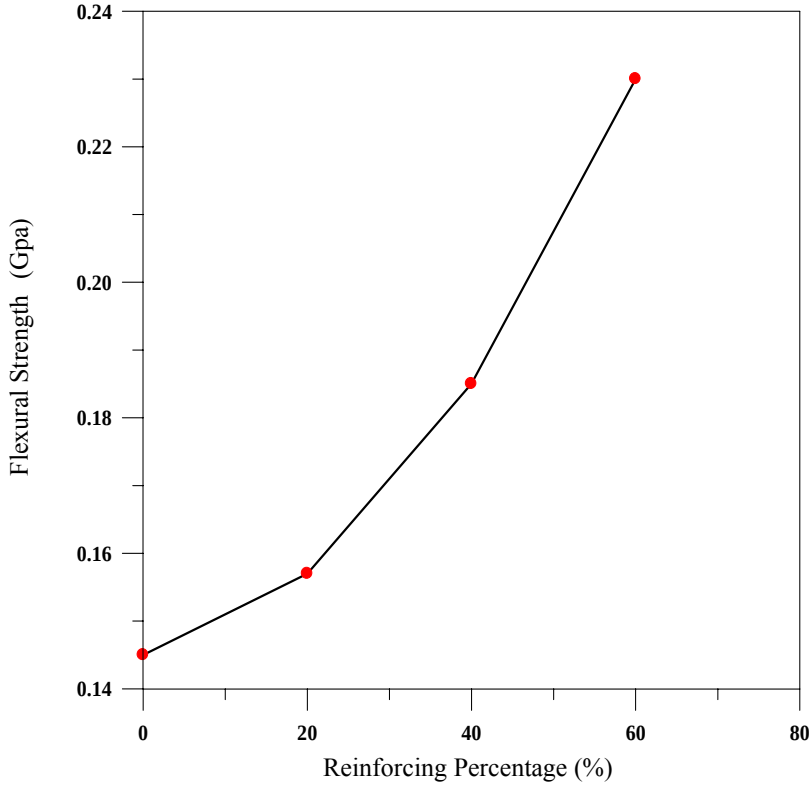
الشكل رقم (2): مقاومة الصدمة لراتنج الإيبوكسي كونبكسترا (EP-10) المقوى بألياف كيفلار



الشكل رقم (3): مقاومة الشد لراتنج الإيبوكسي كونبكسترا (EP-10) المقوى بألياف كيفلار



الشكل رقم (4): الصلادة لراتنج الإيبوكسي كونبكسترا (EP-10) المقوى بألياف كيفلار



الشكل رقم (5): مقاومة الإنثناء لراتنج الإيبوكسي كونبكسترا (EP-10) المقوى بألياف كيفلار