



جمهورية العراق
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة ديالى
كلية العلوم
قسم الفيزياء

تحضير ودراسة بعض الخصائص الفيزيائية لمتراكبات بوليمرية مدعمة بجسيمات نانوية

رسالة مقدمة الى
مجلس كلية العلوم – جامعة ديالى وهي جزء من متطلبات نيل درجة الماجستير في
علوم الفيزياء

قدمتها

حنين مهدي حسن

بكالوريوس علوم فيزياء 2016 م

بإشراف

أ.د. صباح أنور سلمان

2020 م

١٤٤٢ هـ

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

قَالُوا سُبْحَانَكَ لَا عِلْمَ لَنَا إِلَّا مَا عَلَّمْتَنَا إِنَّكَ

أَنْتَ الْعَلِيمُ الْحَكِيمُ ﴿٣٢﴾

سورة البقرة: الآية 32





(الله عز وجل)

إلى... صاحب الفضل الأول والآخر.

إلى... منارة العلم إلى الامي الذي علم المتعلمين الى سيد الخلق اجمعين.

(رسولنا الكريم محمد صلى الله عليه وسلم)

إلى... الارض التي احتضنت الانبياء والاولياء والعلماء...الى الارض التي لأجل العيش فيها دفعنا الدماء تلو الدماء.

(بلدي العراق)

إلى... التي رأني قلبها قبل عينيها الى الظل الذي كنت آوى اليه كل حين الى التي كانت ريحانة الدار وسندسها.

(أمي رحمها الله)

(أبي)

إلى... قوتي الأولى ونبراسي الذي ينير دربي الى من رفعتُ رأسي عالياً افتخاراً به.

إلى... رفيق دربي الى من سار معي نحو الحلم خطوة بخطوة بذرناها معاً وحصدناها معاً وسنبقى معاً بأذن الله جزاك الله خيراً.

(زوجي)

إلى... إلى من أرى فيها حلاوة النجاح وفي ابتسامتها نزول الهموم والصعاب إلى مستقبلي ومن يحمل أفكارى واول فرحتي.

(أبنتي ألمها)

إلى... من أرى التفاؤل في أعينهم والسعادة في ضحكتهم الى الوجوه المفعمة بالبراءة ولمحبتكم ازهرت ايامي وتفتحت براعم الغد.

(اخوتي واخواتي)

(أساتذتي الافاضل)

إلى... اليد التي ساعدتني.

إلى... كل من يُفكر ويبحث للإرتقاء بالعلم في كل مكان.

أهدي إليكم ثمرة جهدي المتواضع

شكر وامتنان

الحمد لله الأول قبل الإنشاء والإحياء، والآخر بعد فناء الأشياء العليم الذي لا ينسى من ذكره، ولا ينقص من شكره، ولا يجيب من دعاه، ولا يقطع رجاء من رجاه باسم من جعلتهم لنا مشكاة لهدينا نشكره ونحمده الذي هدانا لهذا وما كنا لنهتدي لولا أن هدانا الله.

وأنا انهي إرساء دعائم هذا البحث أجد نفسي مدينة بالشكر الجزيل والامتنان إلى المشرف على رسالتي الأستاذ الفاضل (الأستاذ الدكتور صباح أنور سلمان) لأنه كان خير عون لي بان أرشديني إلى أن اسلك الطرق الميسرة لإيصال بحثي إلى بر الأمان بدءاً من اقتراح موضوع البحث مروراً بالتوجيه والمتابعة إثناء فترة البحث وأخيراً بوضع المسات الأخيرة لإتمام متطلبات البحث دون توان أو تقصير فأكرر لك شكري وارجوا إن أكون عند حسن الظن في هذا المجال العلمي الرائع.

ويطيب لي أن أتقدم بشكري وعرفاني الى أساتذتي الأفاضل في كلية العلوم/قسم الفيزياء/جامعة ديالى والى عمادة كلية العلوم لإتاحتهم فرصة أكمل دراستي ودعمهم المتواصل طول مدة الدراسة وعرفاناً مني بالجميل اتقدم بفائق شكري وامتناني الى السيد رئيس القسم (أ.د. زياد طارق خضير) واساتذتي الافاضل جميعاً في القسم ذاكراً منهم (أ.د. نبيل علي بكر، أ. أسعد احمد كامل، أ.م.د. عمار عايش حبيب، أ.م. هند وليد عبدالله) لإبدائهم المساعدة والعون المستمر.

واقدم جزيل الشكر والامتنان الى موظفي مكتبة الكلية في القسم لما ابدهه من مساعدة في استعارة الكتب والاطاريج طول مدة البحث. ومن الوفاء تقديم أعمق آيات الشكر والتقدير لأفراد أسرتي وزوجي لما عانوه معي طيلة الدراسة وإعداد هذه الرسالة ووقوفهم معي وشدهم من أزري فجزاهم الله خير الجزاء وابقاهم لي خير سند.

كما أتقدم بالشكر الجزيل والامتنان العميقين الى خالي (أ.د. حميد صالح حماد) /كلية الزراعة-جامعة ديالى لما قدمه لي من نصح ومشورة ودعم معنوي طيلة مدة الدراسة راجية له من الباري دوام التوفيق.

واخيراً اتقدم بخالص الشكر والثناء والاحترام إلى زملائي طلبة الدراسات العليا واتمى لهم مزيداً من التآلق والنجاح والى كل من أفادني ولو بلفظة أسأل الله ان يوفق الجميع.

الخلاصة

تم في هذه البحث دراسة تأثير اضافة دقائق نانوية متمثلة بـ (أوكسيد المغنيسيوم (MgO)، أو أكسيد الزركونيوم (ZrO_2))، أو أكسيد النحاس (CuO)) الى راتنج الايبوكسي كمادة أساس، فضلاً عن تصنيع مترابكات هجينة من الدقائق النانوية المذكورة والمتمثلة بـ (CuO/ZrO_2 , MgO/ZrO_2) باعتماد راتنج الايبوكسي كمادة أساس أيضاً. وقد تم استعمال طريقة التشكيل اليدوي لتصنيع مترابكات من راتنج الايبوكسي والدقائق النانوية بنسب وزنية مختلفة (0.3, 0.6, 0.9 wt%)، تم إجراء الاختبارات الميكانيكية و الفحوصات الحرارية والكهربائية (العزلية) للمترابكات المحضرة كافة.

أظهرت نتائج اختبار الصدمة ان زيادة النسبة الوزنية لمواد التدعيم تزيد من قيمة متانة الصدمة للأيبوكسي النقي وان اعلى قيمة لمتانة الصدمة هي للمترابك ($EP-ZrO_2$) والتي تساوي (19.59 KJ/m^2). أما نتائج اختبار الصلادة فقد أظهرت ان صلادة الايبوكسي النقي تزداد بزيادة النسبة الوزنية لمواد التدعيم وان اعلى قيمة للصلادة هي للمترابك ($EP-MgO$) والتي تساوي (84.3). بينما أظهرت نتائج اختبار الانحناء (ثلاثي النقاط) ان زيادة النسبة الوزنية لمواد التدعيم تؤدي إلى زيادة الانحراف وقيمة إجهاد الكسر إذ ظهرت أعلى قيمة لأجهاد الكسر عند المترابك الهجين ($EP-MgO/ZrO_2$) والتي تساوي (4307.79 MPa).

تمت أيضاً دراسة تأثير النسبة الوزنية لمواد التدعيم على الخصائص الحرارية للمترابكات البوليمرية كافة، وأظهرت النتائج العملية بأن معامل التوصيل الحراري للمترابكات البوليمرية كافة يسلك سلوكاً غير منتظم بالمقارنة مع الأيبوكسي النقي بزيادة النسبة الوزنية لمواد التدعيم. وان فحص المسعر الحراري التفاضلي (DSC) أظهر بان درجة الانتقال الزجاجي للمترابكات البوليمرية كافة تزداد عند كافة النسب الوزنية لمواد التدعيم بالمقارنة مع الأيبوكسي النقي وان اعلى قيمة لدرجة الانتقال الزجاجي هي للمترابك ($EP-ZrO_2$) والتي تساوي ($89.97 \text{ }^\circ\text{C}$)، وكذلك ان درجة الانصهار البلورية للمترابكات البوليمرية كافة أبدت سلوكاً غير منتظم بالمقارنة مع الأيبوكسي النقي مع زيادة النسبة الوزنية لمواد التدعيم.

وتمت دراسة تأثير النسبة الوزنية لمواد لتدعيم على الخصائص الكهربائية (العزلية) للمترابكات البوليمرية كافة، واظهرت النتائج العملية نقصان ثابت العزل الكهربائي مع زيادة التردد ولكافة النسب الوزنية لمواد التدعيم، وكذلك زيادة ثابت العزل الكهربائي مع زيادة النسبة الوزنية لمواد التدعيم عند التردد نفسه.



المحتويات

الصفحة	الموضوع	الترتيب
	الخلاصة	
I-II	المحتويات	
III-IV	قائمة الرموز	
V	قائمة الجداول	
VII-IX	قائمة الأشكال	
الفصل الأول (المقدمة والدراسات السابقة)		
1	المقدمة	(1-1)
4	تطور المواد المترابطة	(2-1)
6	الدراسات السابقة	(3-1)
10	الهدف من الدراسة	(4-1)
الفصل الثاني (الجزء النظري)		
11	المقدمة	(1-2)
11	المفاهيم الأساسية للبوليمرات	(2-2)
14	تصنيف البوليمرات	(3-2)
19	المواد المترابطة	(4-2)
19	مكونات المواد المترابطة	(5-2)
20	المادة الأساس	(1-5-2)
20	راتنجات الايبوكسي	(1-1-5-2)
21	خصائص راتنجات الايبوكسي	(2-1-5-2)
22	تطبيقات راتنجات الايبوكسي	(3-1-5-2)
22	مواد التقوية	(2-5-2)
22	المواد النانوية	(1-2-5-2)
23	أوكسيد المغنيسيوم	(2-2-5-2)
25	أوكسيد الزركونيا	(3-2-5-2)
26	أوكسيد النحاس	(4-2-5-2)
28	تصنيف المواد المترابطة	(6-2)
34	العوامل المؤثرة في خصائص المواد المترابطة المدعمة بالدقائق	(7-2)
34	حجم الحبيبة	(1-7-2)
34	شكل الدقائق	(2-7-2)
35	المترابطة الهجينة	(8-2)
36	قاعدة الخلائط	(9-2)
38	الخصائص الميكانيكية	(10-2)

38	إختبار الصدمة	(1-10-2)
41	إختبار الصلادة	(2-10-2)
43	إختبار الانحناء	(3-10-2)
45	الخصائص الحرارية	(11-2)
45	التوصيلية الحرارية في البوليمرات	(1-11-2)
48	درجة الانتقال الزجاجي	(2-11-2)
49	درجة الانصهار البلورية	(3-11-2)
49	الخصائص الكهربائية (العزلية)	(12-2)
الفصل الثالث (الجزء العملي)		
57	المقدمة	(1-3)
57	المواد المستعملة	(2-3)
57	مادة الاساس	(1-2-3)
58	مواد التدعيم	(2-2-3)
59	تحضير العينات	(3-3)
61	تقنية التقطيع	(4-3)
68	الاختبارات (الفحوصات) والاجهزة المستخدمة	(5-3)
68	جهاز اختبار الصدمة	(1-5-3)
69	جهاز اختبار الصلادة	(2-5-3)
69	جهاز اختبار الانحناء	(3-5-3)
70	جهاز فحص التوصيلية الحرارية	(4-5-3)
71	جهاز المسعر الحراري التفاضلي	(5-5-3)
72	جهاز الفحص الكهربائي (العزلي)	(6-5-3)
الفصل الرابع (النائب والمنافسة والاستنتاجات)		
74	المقدمة	(1-4)
74	الخصائص الميكانيكية	(2-4)
74	أختبار الصدمة	(1-2-4)
76	إختبار الصلادة	(2-2-4)
78	إختبار الانحناء	(3-2-4)
86	الخصائص الحرارية	(3-4)
86	معامل التوصيل الحراري	(1-3-4)
88	درجة الانتقال الزجاجي	(2-3-4)
89	درجة الانصهار البلورية	(3-3-4)
93	الخصائص الكهربائية (العزلية)	(4-4)
93	ثابت العزل الكهربائي	(1-4-4)
96	الاستنتاجات	(4-5)
97	التوصيات والإعمال المستقبلية	(4-6)

قائمة الرموز

وحدة القياس	المعنى	الرمز
gm/cm ³	كثافة المادة المترابكة	ρ_c
%	الكسر الوزني	V
%	الكسر الوزني للعنصر	V _n
%	الكسر الحجمي لكل من المادة الاساس والتدعيم على التوالي	V _p , V _m
gm/cm ³	الكثافة لكل من المادة المترابكة والاساس والتدعيم على التوالي	ρ_p, ρ_m, ρ_c
gm	وزن كل من المادة المترابكة ومادة الاساس ومادة التدعيم على التوالي	W _p , W _m , W _c
MPa	معامل مرونة	E
KJ/m ²	طاقة الكسر	U
m ²	مساحة المقطع	A
Kg	كتلة الثقل	m
m/sec ²	التعجيل الارضي	g
m	مسافة السقوط	h
mm	طول العينة	L
mm ⁴	عزم الانحناء الهندسي	I _B
mm	عرض العينة	b
mm	سمك العينة	d
N	اقصى حمل مسلط قبل الكسر	P
N/mm ²	أقصى إجهاد قص يحدث في المستوى المتعادل عند مركز العينة	τ_{max}
J	كمية الحرارة المنتقلة	Q
W/K.m	معامل التوصيل الحراري	k
°C	تمثل درجة حرارة القرص (A, B and C)	T _A , T _B , T _C
W.m ² /K	كمية الطاقة	e
m	نصف قطر القرص	r
Volt	فرق الجهد الكهربائي	v
Ampere	التيار الكهربائي المار في ملف المسخن	I
Farad	سعة المتسعة	C
°C	درجة الانتقال الزجاجي	T _g
°C	درجة الانصهار البلورية	T _m
Coulombs	الشحنة المخزونة	q _i
Farad/m	سماحية الفراغ	ϵ_0

m	المسافة بين اللوحين	d_{dis}
Farad	السعة بوجود الفراغ	C₀
Farad/m	سماحية المادة العازلة	ε
Farad	السعة بوجود العازل	C'
-	ثابت العزل الكهربائي	ε_r'
-	عامل فقد العزلي	ε_r''
-	ظل زاوية الفقد	Tan δ
S/m	التوصيلية الكهربائية للمادة	σ
S/m	التوصيلية الكهربائية المستمرة للمادة	σ_{a.c}
S/m	التوصيلية الكهربائية المتناوبة للمادة	σ_{d.c}
V/m	شدة المجال الكهربائي المسلط	\vec{E}
-	الاستقطابية الإلكترونية	α_e
-	الاستقطابية الأيونية	α_i
-	الاستقطابية الاتجاهية	α_d
D	عزم ثنائي القطب الإلكتروني	\vec{m}_e
D	عزم ثنائي القطب الأيوني	\vec{m}_i
D	عزم ثنائي القطب الاتجاهي	\vec{m}_d
J/K	ثابت بولتزمان	K_B
K	درجة الحرارة المطلقة الابتدائية والنهائية على التوالي	T₁, T₂
C/m²	الاستقطاب الأيوني	\vec{P}_i
C/m²	الاستقطاب الإلكتروني	\vec{P}_e
C/m²	الاستقطاب الاتجاهي	\vec{P}_d
C/m²	استقطاب الشحنة الفراغية	\vec{P}_s


قائمة المختصرات


المختصر	المعنى
D_p	درجة البلمرة
wt %	وزن المادة النانوية
EP	راتنج الايبوكسي
MgO	أوكسيد المغنيسيوم
ZrO₂	أوكسيد الزركونيا
CuO	أوكسيد النحاس
PMCs	مادة متراكبة ذات اساس بوليمري
MMCs	مادة متراكبة ذات اساس معدني
CMCs	مادة متراكبة ذات اساس سيراميكي
IS	متانة الصدمة
ASTM	المواصفات الأمريكية للأنظمة القياسية
CNC	ماكينة التقطيع الليزرية
M/S	الميل للجزء الخطي لمنحني (الحمل – انحراف) بأختبار الانحناء
F.S	متانة الانحناء
DSC	المسعر الحراري التفاضلي

قائمة الجداول

الصفحة	العنوان	الجدول
24	بعض خصائص أكسيد المغنيسيوم (MgO)	(1-2)
26	بعض خصائص أكسيد الزركونيا (ZrO_2)	(2-2)
27	بعض خصائص أكسيد النحاس (CuO)	(3-2)
58	بعض خصائص راتج الايبوكسي المستخدم	(1-3)
59	بعض خصائص و منشأ الدقائق النانوية المستخدمة	(2-3)
76	قيم مقاومة الصدمة للايبوكسي النقي و المدعم بالدقائق النانوية (MgO, ZrO_2 , CuO) بنسب وزنية مختلفة	(1-4)
78	قيم الصلادة الصلادة للايبوكسي النقي و المدعم بالدقائق النانوية (MgO, ZrO_2 , CuO) بنسب وزنية مختلفة	(2-4)
85	قيم معامل يونك للايبوكسي النقي و المدعم بالدقائق النانوية (MgO, ZrO_2 , CuO) بنسب وزنية مختلفة	(3-4)
87	قيم معامل التوصيل الحراري للايبوكسي النقي و المدعم بالدقائق النانوية (MgO, ZrO_2 , CuO) بنسب وزنية مختلفة	(4-4)
89	قيم درجة الانتقال الزجاجي (T_g) للايبوكسي النقي و المدعم بالدقائق النانوية (MgO, ZrO_2 , CuO) بنسب وزنية مختلفة	(5-4)
90	قيم درجة الانصهار البلورية (T_m) للايبوكسي النقي و المدعم بالدقائق النانوية (MgO, ZrO_2 , CuO) بنسب وزنية مختلفة	(6-4)

قائمة الاشكال

الصفحة	العنوان	الشكل
3	انواع المواد المترابكة	(1-1)
13	أنواع تراكيب السلاسل البوليمرية	(2-1)
18	تصانيف البوليمرات المشتركة	(2-2)
20	الصيغة الكيميائية التركيبية للأبيوكسي	(3-2)
21	معادلات التفاعل الكيميائي لتحضير الأبيوكسي السائل	(4-2)
24	التركيب البلوري لأكسيد المغنيسيوم (MgO)	(5-2)
25	التركيب الكيميائي لأكسيد الزركونيا (ZrO ₂)	(6-2)
27	التركيب البلوري لأكسيد النحاس (CuO)	(7-2)
31	تصنيف المواد المترابكة على اساس النظام الهندسي لطور التدعيم	(8-2)
34	أمثلة مختلفة للترتيب الهندسي للمترابكات	(9-2)
38	التقوية بدقائق التكتستن وتأثيرها في معامل المرونة	(10-2)
40	مخطط جهاز اختبار الصدمة نوع جاري	(11-2)
43	اداة الغرز بجهاز صلادة شور	(12-2)
44	جهاز إختبار الانحناء ثلاثي النقاط	(13-2)
46	انتقال الحرارة من الوجه الساخن الى الوجه البارد	(14-2)
48	مخطط جهاز قياس التوصيلية الحرارية (قرص لي)	(15-2)
56	أنواع الاستقطاب: (a) الإلكتروني (b) الايوني (c) الاتجاهي (d) البيئي	(16-2)
60	ال قالب المستعمل في تصنيع العينات	(1-3)
62	صورة ماكينة التقطيع الليزرية (CNC)	(2-3)
63	صور عينات اختبار صدمة جاري	(3-3)
63	صورة عينة الأبيوكسي النقي قبل التقطيع	(4-3)
64	صور عينات اختبار الانحناء ثلاثي النقاط	(5-3)
65	صور عينات فحص التوصيلة الحرارية	(6-3)
66	صور عينات فحص المسعر الحراري التفاضلي DSC	(7-3)
66	صور عينات الفحص الكهربائي	(8-3)
67	مخطط الاختبارات والفحوصات المنجزة	(9-3)
68	صورة جهاز اختبار متانة الصدمة	(10-3)
69	صورة جهاز اختبار صلادة شور (D)	(11-3)
70	صورة جهاز إختبار الانحناء	(12-3)
71	صورة جهاز فحص التوصيلية الحرارية (قرص لي)	(13-3)
72	صورة جهاز فحص (DSC)	(14-3)
73	صورة جهاز (LCR Metter)	(15-3)
75	مقاومة الصدمة للأبيوكسي النقي والمدعم بال دقائق النانوية (MgO, ZrO ₂ , CuO) ينسب وزنية مختلفة	(1-4)

77	الصلادة للايبوكسي النقي و المدعم بالدقائق النانوية (MgO, ZrO ₂ , CuO) بنسب وزنية مختلفة	(2-4)
79	منحني (الحمل – انحراف) للمترابك EP-MgO بنسب وزنية مختلفة	(3-4)
79	منحني (الحمل – انحراف) للمترابك EP-ZrO ₂ بنسب وزنية مختلفة	(4-4)
80	منحني (الحمل – انحراف) للمترابك EP-CuO بنسب وزنية مختلفة	(5-4)
80	منحني (الحمل – انحراف) للمترابك الهجين EP-CuO/ZrO ₂ بنسب وزنية مختلفة	(6-4)
81	منحني (الحمل – انحراف) للمترابك الهجين EP-MgO/ZrO ₂ بنسب وزنية مختلفة	(7-4)
81	منحني (الاجهاد – انحراف) للمترابك EP-ZrO ₂ بنسب وزنية مختلفة	(8-4)
82	منحني (الاجهاد – انحراف) للمترابك EP-ZrO ₂ بنسب وزنية مختلفة	(9-4)
82	منحني (الاجهاد – انحراف) للمترابك EP-CuO بنسب وزنية مختلفة	(10-4)
83	منحني (الاجهاد – انحراف) للمترابك الهجين EP-CuO/ZrO ₂ بنسب وزنية مختلفة	(11-4)
83	منحني (الاجهاد – انحراف) للمترابك الهجين EP-MgO/ZrO ₂ بنسب وزنية مختلفة	(12-4)
85	معامل يونك للايبوكسي النقي و المدعم بالدقائق النانوية (MgO, ZrO ₂ , CuO) بنسب وزنية مختلفة	(13-4)
87	معامل التوصيل الحراري للايبوكسي النقي و المدعم بالدقائق النانوية (MgO, ZrO ₂ , CuO) بنسب وزنية مختلفة	(14-4)
90	مخطط (DSC) الحراري للمترابك EP-MgO بنسب وزنية مختلفة	(15-4)
91	مخطط (DSC) الحراري للمترابك EP-ZrO ₂ بنسب وزنية مختلفة	(16-4)
91	مخطط (DSC) الحراري للمترابك EP-CuO بنسب وزنية مختلفة	(17-4)
92	مخطط (DSC) الحراري للمترابك الهجين EP-CuO/ZrO ₂ بنسب وزنية مختلفة	(18-4)
92	مخطط (DSC) الحراري للمترابك الهجين EP-MgO/ZrO ₂ بنسب وزنية مختلفة	(19-4)
94	ثابت العزل الكهربائي كدالة للتردد للمترابك EP-MgO بنسب وزنية مختلفة	(20-4)
94	ثابت العزل الكهربائي كدالة للتردد للمترابك EP-ZrO ₂ بنسب وزنية مختلفة	(21-4)
95	ثابت العزل الكهربائي كدالة للتردد للمترابك EP-CuO بنسب وزنية مختلفة	(22-4)
95	ثابت العزل الكهربائي كدالة للتردد للمترابك الهجين EP-CuO/ZrO ₂ بنسب وزنية مختلفة	(23-4)
96	ثابت العزل الكهربائي كدالة للتردد للمترابك الهجين EP-MgO/ZrO ₂ بنسب وزنية مختلفة	(24-4)



الفصل الاول

المقدمة والدراسات

السابقة

(1-1) المقدمة

Introduction

قد تبلور محور تركيز المصممين والمهندسين في الوقت الحاضر على الدور الفعال للمواد الهندسية التي تدخل في مختلف المجالات الصناعية، لذا تم اختيارها وتصنيعها بعمليات متعددة ومتعاقبة وفقاً لتراكيب تصميمية وإنشائية تتلاءم مع الأداء الوظيفي فضلاً عن تحليل فشلها في ذلك الأداء، إذ يسعى باحثي الهندسة الميكانيكية والمواد الإنشائية لتشكيل تراكيب ذات قوة ومتانة جديرة بالموثوقية (Structures Reliable) من حيث جمالياتها ومقاومتها للتآكل [1]. فقد لاحظ المختصون في مجال علم المواد الهندسية (كالمعادن والسيراميك و البوليمرات) وجود اختلاف في خواص المواد المتوافرة والسلوك العام الناتج عن تأثير الظروف البيئية والخدمية في الأداء الوظيفي للمواد [2].

المعادن ذات كثافة عالية تتميز بتوصيلية حرارية وكهربائية جيدة مع صلادة ومطيلية ومتانة عالية ومقاومة صدمة جيدة فضلاً عن الخواص المغناطيسية كما أن المعادن لها قابلية جيدة على التشغيل والتشكيل لكن مقاومتها للتآكل الكيماوي ضعيفة. إما الزجاج والسيراميك فهي مواد لا عضوية وغير معدنية، مثل: الاوكسيدات والكاربيدات والنتريدات.... الى غير ذلك، إذ تميل المواد السيراميكية إلى أن تكون ذات توصيلية كهربائية وحرارية رديئة أي إنها مواد عازلة وتتصف بالهشاشة (Brittle) الناتجة عن انخفاض المطيلية ومن ثم انخفاض مقاومتها للصددمات. إلا إن هذه المواد تمتلك صلادةً (Hardness) وقوة انضغاط عاليتين وخمولاً كيميائياً عالياً (Chemically Inert) وبناءً على ذلك لا يستعمل السيراميك في التطبيقات الواقعة تحت تأثير الأحمال الصدمية مقارنة بالمعادن، ومع ذلك فإنها ذات مقاومة لدرجات الحرارة العالية [3].

بينما تكون البوليمرات العضوية خفيفة الوزن (Wight Light) وعموماً تمتلك درجة عالية من اللدونة مثل اللدائن [2]. كما تشمل المواد المرنة (Elastomers) على كثير من أنواع اللواصق التي يتم إنتاجها بتصنيع تراكيب جزيئية كبيرة من جزيئات عضوية بعملية تعرف بالبلمرة (Polymerization)، إذ إن مصطلح المواد المرنة يطلق على البوليمرات التي تسمح بتراكيبها بالاستطالة والعودة إلى الشكل الأصلي بعد زوال الحمل المؤثر، إذ تتميز البوليمرات بشكلها العام بانخفاض التوصيلية الكهربائية والحرارية لذا تستعمل بوصفها عوازل كهربائية وحرارية، وعند مقارنتها بالمعادن فإنها تكون ذات كثافة واطئة

واستطالة كبيرة وتمتلك مقاومة عالية للتآكل وجساءة واطئة ولا تعدُّ من المواد الصلدة، أما عندما يتم تطبيق الأحمال عليها فإنها تميل إلى الزحف (Creep) ومن ثم يحدث تغييرٌ في الاستطالة مع مرور الزمن ولذلك فإن خصائصها تعتمدُ بشكلٍ كبيرٍ جداً على درجة الحرارة [3].

إن التطور الصناعي والتكنولوجي يعتمد بشكل كبير على التقدم في حقل المواد ونتيجة لهذا التطور الصناعي الكبير الذي شهده العالم في المجالات كافة ظهرت الحاجة لإيجاد البدائل للمواد ذات الاستعمالات الصناعية المتعددة بحيث تكون تلك البدائل ذات مواصفات ونوعية عالية من حيث الكلفة وخفة الوزن والخواص بصورة عامة وذلك لاعتمادها في التطبيقات الصناعية المتعددة كالمطائرات والرادارات والسفن والسيارات وغيرها ولذلك تم إنتاج ما يعرف بالمواد المترابكة [4]. ويمكن تعريف المواد المترابكة بأنها المادة الناتجة من دمج مادتين أو أكثر وبأسس معينة للحصول على مواد جديدة بخصائص ميكانيكية وفيزيائية متميزة تختلف عن خصائص المواد المكونة لها علماً إن خواصها تعتمد على خواص مكوناتها وتتكون المواد المترابكة من المادة الأساس (Matrix) أو الطور المستمر (Continuous Phase) ومادة التدعيم (Reinforcement Material) التي طالما استعملت بأشكال مختلفة فمنها المساحيق والألياف والحبيبات البيضوية أو الكروية على وفق التطبيق المطلوب انجازه، وتعمل مادة التدعيم غالباً على تحسين أو زيادة مقاومة (Strength) وجساءة (Stiffness) المادة الأساس، ومن الجدير بالذكر إن المادة الأساس ومادة التدعيم لا تؤدي وظيفتها الأساسية إن لم يكن هنالك بينهما رابطة قوية [5].

المواد المترابكة تكون على عدة أنواع فمنها ذات الأساس المعدني مثل الحديد والألمنيوم. إذ تتميز بمتانتها العالية، ولكن ثقل وزنها جعلها محدودة الاستعمال. والنوع الآخر من المواد المترابكة ذات الأساس السيراميكي التي تتحمل درجات الحرارة العالية ولكن مقاومتها للصدمة ضعيفة. إما المواد المترابكة ذات الأساس اللدائني (البوليمري) تعد من أفضل الأنواع وذلك لما تتميز به من صفات ميكانيكية عالية فضلاً عن سهولة تصنيعها [6]، كما مبينة في الشكل (1-1).



الشكل (1-1): أنواع المواد المترابكة [7].

تعد المواد المترابكة ذات الأساس البوليمري من المواد الحديثة الاستعمال في معظم التطبيقات الهندسية والتكنولوجية، ومن أهم متطلبات استعمال هذه المواد المتانة الجيدة والأداء العالي ومقاومتها للاجهادات الداخلية والخارجية المؤثرة فيها فضلاً عن مقاومتها للظروف المحيطة من درجة حرارة وضغط وغيرها [6].

إن من أهم المواصفات الممكن الحصول عليها من هذه المواد هي أن تكون قوية جداً وذات جساءة عالية وتكون هذه النسبة للمواد المترابكة ذات الأساس البوليمري عالية والتي يعبر عنها بنسبة (المتانة الى الوزن) وهي أعلى بعشرات المرات من الفولاذ والألمنيوم فضلاً عن امتلاك هذه المواد مقاومة كلال أفضل من المعادن الهندسية التقليدية وكذلك جساءة ومتانة عاليتين، ولذلك فمع المواد المترابكة يمكن إيجاد مجموعة من الخواص تحتاج إليها التطبيقات الهندسية التي لا يمكن توافرها بصورة عالية في المواد السيراميكية او السبائكية او البوليمرية [8].

على الرغم من مميزات المواد المترابكة إلا أنها تمتلك أيضاً بعض السلبيات مثل اختلاف الخصائص للمادة المترابكة الواحدة بسبب الاعتماد على اتجاه المادة المقوية، وكذلك فإن العديد من المواد المترابكة ذات الأساس من البوليمر تكون عرضة للهجوم من الحوامض وبعض المواد الكيماوية كالمذيبات وأحياناً كلفة طرائق التصنيع تحد من استعمال هذه المواد [9].

(2-1) تطور المواد المتراكبة Evolution of Composite Materials

استعملَ الإنسان منذ مرحلة مبكرة المواد المتراكبة لتلبية احتياجات ومتطلبات حياته اليومية فقد استعمل الطين والصلصال في بناء الجدران إذ ان هذه العملية استمرت حتى وقتنا الحاضر في مجالات البناء البدائية الطراز [10].

بعد ذلك كان هنالك بحث واستيعاب لفهم فكرة اضافة مادة نباتية ليفية الشكل مثل القش والقصب من اجل تحسين نقاط عديدة، اذ أسهمت هذه المادة في تبخير الرطوبة من داخل الجدران والمساعدة على ايقاف توزيع التشققات التي تتشكل وبالتالي زيادة متانة ومقاومة الجدار [11].

كما استعملت المواد المتراكبة في تركيب القنطرات (Vaults) والقبة (Domes) وفي مجال التأسيسات الانشائية فضلاً عن ذلك فقد تم استعمالها في صناعة الاسلحة منذ العصور القديمة جداً، ومن امثلتها الاقواس الطويلة (Long Bows) التي تتركب من الاوتار (Tendons) والخشب (Wood) والحريز (Silk) وترتبط مع المادة الرابطة، ومن الامثلة الاخرى السيوف (Swords) وماسورة المدفع وشفحة الدروع (Armor Plate) [12]. ومنذ ما يقارب (3000 B.C) مضت تم استعمال حشوة القار او الزفت من السومريين لعمل الارضيات كما استخدموا القصب والبردي مع القار في بناء الزوارق كما ان الاشوريين استخدموا مبدأ التسليح في بناء الزقورات عن طريق تقوية طبقات البناء الضخمة بالياف القصب، اما المصريون القدماء فقد استعملوا القش في صناعة الطابوق وذلك بُغية منعه من التشقق في اثناء عملية التجفيف والى جانب ذلك فانهم استخدموا الراتنج النباتية الصمغية في الاغراض المختلفة [13].

في الصناعات اللدائنية ظهرَ مصطلح اللدائن المدعمة (Reinforced Plastics) الذي يتضمن الاشارة الى انتاج مواد من بوليمرات مدعمة باشكال مختلفة (ليفية ودقائقية وصفائح وقشور) [14]. اذ ان المواد اللدائنية (Plastics) هي مواد بوليمرية تعد مثلاً للمواد التركيبية التي تسهمُ في تحسين متطلبات الحياة العصرية، وتستعمل في انتاج اغلب الاجزاء مثل: المادة العازلة في الكيبلات وسطوح الارتكاز وابدان او هياكل الزوارق والمظلات وصهاريج التخزين [15].

تمثلت اهم الامور عن بداية المواد اللدائنية بالاحداث التي حدثت عام (1820) عندما بدأت نظرية النشوء والارتقاء بالكيمياء العضوية، اذ نجد ان هنالك ثلاثة احداث كان لها الأثر الجيد في وصف اللدائن هي [14]:

1- الحدث الاول: عام (1839) عندما اكتشف العالم (Goods Year) طريقة معالجة للتصليد وذلك من اجل تصليد المطاط بالكبريت (Vulcanization of Rubber)، إذ تعد اول محاولة ناجحة في مجال التقدم الصناعي.

2- الحدث الثاني: عام (1868) عندما قام العالم (Hyatt) بتصنيع لدائن (Celluloid Pyroxylin) واكتشف طريقة لا تعدّ تغييراً كيميائياً فقط في مادة توجد طبيعياً وهي السليلوز (Cellulose) من خلال تحويلها الى (Nitrated Cellulose) وانما بإمكانها تحسين التغييرات الكيميائية باضافة الكافور وتقديم انتاج مع اعتبارات نوعية لتنظيم الخصائص التي تتطلبها العملية الصناعية الناجحة.

3- الحدث الثالث: يتضمن اول انتاج للمواد اللدائنية في عام (1909) فقد كانت المواد الداخلة في الانتاج ذات اساس كيميائي مع الفينول (Phenol) والفورمالديهايد (Formaldehyde) التي تكون متحدة معاً بطريقة مسيطر عليها فتنتج مادة فينول فورمالديهايد.

في عام (1920) قام العالم (Staudinger) باقتراح حول تركيب الجزيئات الضخمة التي تشبه المطاط الطبيعي، إذ وجد في البوليمرات العالية ان الكثير من الجزيئات المنفردة تحمل معا بوساطة الاواصر التكافؤية الطبيعية [16] (Normal Valency Bonds).

كما اسس العالم (Carothers) عملاً عن البوليمرات الصناعية في عام (1929)، وان كلاً من العالمين (Carothers و Staudinger) كانت لهما مكانة ثابتة في قاعدة الكيمياء البوليميرية [16]. اما بعد الحرب العالمية الثانية فقد ظهرت الحاجة الى ايجاد مواد مثل النايلون والبولي اثيلين وازداد استعمال اللدائن في المجالات كلها [14].

Literatures Review

(3-1) الدراسات السابقة

بسبب الاستخدام الواسع للمواد المترابكة في المجالات الصناعية والعلمية فقد حظيت هذه المواد بأهتمام الدارسين الباحثين وأجريت عليها دراسات وبحوث كثيرة منها:

❖ درس الباحثان (Zhou and Yu) عام (2010) الخصائص الحرارية والعزلية للمترابكات البوليمرية النانوية (EP-Al₂O₃) بنسب حجمية مختلفة (0, 4, 9, 14, 21, 28, 37 and 48%) والمحضرة بطريقة القولة اليدوية. حيث لوحظ إن درجة الانتقال الزجاجي (T_g) التي سُجلت باستخدام تقنية المسعر الحراري التفاضلي (DSC) سلكت سلوكاً غير منتظماً وان اعلى قيمة لها عند النسبة (14 %)، اما معامل التوصيل الحراري (k) فيزداد مع زيادة نسبة التدعيم، بينما الخصائص الكهربائية العزلية (ثابت العزل الحقيقي (ε')) فلو حظ إنه يقل مع زيادة نسبة التدعيم وزيادة التردد [17].

❖ درس الباحث (Khan et al.) عام (2013) الخصائص الميكانيكية لراتنج الايبوكسي المدعم بأوكسيد الزنك النانوي (ZnO-Nano) بنسب وزنية مختلفة (0, 1, 1.5, and 2%) والمحضر بطريقة الصب اليدوي، ووجد إن معامل المرونة يزداد مع زيادة النسب الوزنية للدقائق النانوية المضافة، كما أن وجود دقائق اوكسيد الزنك يؤدي الى زيادة الصلادة [18].

❖ قام الباحثان (AL-Rawi and Salman) عام (2014) بتحضير مادة مترابكة ذات اساس بوليمري بطريقة الصب اليدوي، حيث حضرت المادة المترابكة من راتنج الايبوكسي كمادة اساس مدعم بمسحوق اوكسيد المغنيسيوم (MgO) بكسور وزنية مختلفة (0, 10, 15, 20, 25 wt%)، وقد اجري عليها اختبار الانحناء (ثلاثي النقاط) واختبار الصلادة الدقيق، وقد اظهرت نتائج البحث ان قيمة معامل المرونة الانحنائي (E_b) تزداد مع زيادة الكسر الوزني لأوكسيد المغنيسيوم، كذلك فإن الصلادة تزداد بعلاقة لاخطية مع زيادة الكسر الوزني لأوكسيد المغنيسيوم [19].

❖ درس الباحثان (Tali and Huang) عام (2015) الخصائص الحرارية لمترابكات بوليمرية مكونة من راتنج الايبوكسي والبولي استر كمادة أساس ودقائق الكرافين النانوية (GNPs) كمادة تدعيم بنسب وزنية مختلفة (0, 0.2, 0.5 and 1 wt%) والمحضرة بتقنية الصب، حيث وجد إن اعلى قيمة لمعامل التوصيل الحراري (k) عند النسبة (1 wt%)، بينما بينت نتائج التحلل الحراري الوزني

(TGA) باستخدام تقنية المسعر الحراري التفاضلي (DSC) وجود فقدان في الوزن بنسبة (48 %) وكانت درجة التحلل الحراري هي نفسها تقريبا عند جميع المتراكبات النانوية [20].

❖ درس الباحث (Jassim et al.) عام (2015) إختبار الصدمة على المتراكبات البوليمرية المكونة من راتنج الايبوكسي (EP) كمادة أساس مع كسر حجمي (1, 3, 5, 7 and 10%) من (SiO₂ Nano و Micro) باستخدام طريقة القولبة اليدوية، حيث وجد إن اعلى قيمة لمقاومة الصدمة للمتراكب (EP-SiO₂ Nano) تساوي (20.11 KJ/m²) عند النسبة (3%)، بينما اعلى قيمة لمقاومة الصدمة للمتراكب (EP-SiO₂ Macro) تساوي (6.74 KJ/m²) عند نفس النسبة [21].

❖ درس الباحث (Abdallah et al.) عام (2016) الخصائص العزلية للمتراكبات النانوية (EP-TiO₂, MgO) ولمدى من الترددات (10² - 10² Hz) وبدرجة حرارة الغرفة، المتراكبات النانوية تم تحضيرها بنسب حجمية (0, 0.05 and 0.1%) بطريقة القولبة اليدوية، وقد اظهرت الدراسة ان قيمة الممانعة تقل بزيادة التردد وكذلك ثابت العزل بجزأيه الحقيقي والخيالي [22].

❖ قام الباحث (Deyaa et al.) عام (2017) بدراسة تأثير اضافة المواد النانوية (MgO,CuO) بحجم حبيبي (30,40nm) على الخصائص الميكانيكية و الفيزيائية (مقاومة الصدمة والصلادة والتوصيلية الحرارية) لخليط من راتنج الايبوكسي (EP) مع مطاط الستايريين (SBR) قبل وبعد الغمر بالماء لمدة (10) اسابيع، حيث تم تحضير النماذج بطريقة القولبة اليدوية، كما تم غمر النماذج في الماء لمدة (9) اسابيع ولوحظ نقصان في قيمة مقاومة الصدمة والصلادة وزيادة في قيمة معامل التوصيل الحراري [23].

❖ قام الباحث (Shen et al.) عام (2017) بدراسة التوصيلية الحرارية (k) للمتراكبات البوليمرية النانوية (EP - Sic NW_s) بنسب وزنية مختلفة (0, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5 and 3 wt%) والمحضرة بطريقة القولبة اليدوية، حيث وجد ان التوصيلية الحرارية (k) تزداد بزيادة نسبة التدعيم وإن اعلى قيمة لها عند النسبة (3 wt%) و تساوي (0.449 w/mk) [24].

❖ قام الباحثان (Jassim and Hamdi) عام (2018) بدراسة تأثير إضافة جسيمات المغنيسيوم النانوية ($MgO \leq 100nm$) وجسيمات الزركونيوم النانوية ($ZrO_2 \leq 100nm$) على بعض الخصائص الميكانيكية المتمثلة بـ (متانة الانحناء ومعامل المرونة وصلابة الكسر ومتانة الكسر والصلادة) لمادة الايبوكسي، حضرت المتراكبات النانوية باستخدام طريقة من ثلاث مراحل (الخلط الميكانيكي و الخلط بالامواج فوق الصوتية واستخدام طريقة التفريغ) بنسب حجمية مختلفة (1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 15 and 20%)، حيث وجد ان كلاً من (متانة الانحناء و معامل المرونة و متانة الكسر) تزداد بزيادة نسبة التدعيم للمتراكبات النانوية وخصوصاً عند النسب الحجمية القليلة، ووجد ان الخصائص الميكانيكية للمتراكبات النانوية تحسنت اكثر من الخصائص الميكانيكية للايبوكسي النقي، ولوحظ ان الفشل في العينة يعتمد على حجم وتركيز الجسيمات النانوية [25].

❖ قام الباحث (Singh et al.) عام (2018) بتحضير متراكبات بوليمرية من راتنج الايبوكسي ودقائق اوكسيد الزركونيوم (ZrO_2) بكسور وزنية مختلفة (0, 2, 4, 6 and 8 wt%) بطريقة القولية اليدوية، إذ درس الخصائص الحرارية والمتضمنة درجة الانتقال الزجاجي (T_g) باستخدام تقنية المسعر الحراري التفاضلي (DSC) لهذه المتراكبات البوليمرية حيث وجد ان اعلى قيمة لدرجة الانتقال الزجاجي (T_g) هي ($70 C^\circ$) عند النسبة (6 wt%) [26].

❖ قام الباحث (Hussein) عام (2018) بتحضير مادة متراكبة من راتنج الايبوكسي واوكسيد الكرافين باستخدام طريقة القولية اليدوية وبنسب تدعيم وزنية مختلفة (0, 1, 3, 5, 7 and 9 wt%)، حيث قام بدراسة الخصائص الحرارية (معامل التوصيل الحراري (k)) باستخدام طريقة قرص لي لهذه المادة المتراكبة، حيث لوحظ ان معامل التوصيل الحراري (k) يزداد مع زيادة نسبة التدعيم، وكذلك قام بدراسة الخصائص الميكانيكية (الصدمة والصلادة) لهذه المادة المتراكبة، فوجد ان مقاومة الصدمة والصلادة تزداد بزيادة نسبة التدعيم لتصل اعظم قيمة لها عند النسبة (5 wt%) وهي (79.8) و ($5.04 KJ/m^2$) على التوالي ثم تبدأ بالانخفاض [27].

❖ قام الباحث (Hameed et al.) عام (2019) بدراسة تأثير مسحوق ثلاثي اوكسيد الانتيمون النانوي (Sb_2O_3) بنسب تدعيم وزنية مختلفة (2, 4, 6, 8 and 10wt%) على بعض خصائص راتنج الايبوكسي، إذ استخدمت طريقة القولية اليدوية لتصنيع المتراكبات النانوية، و تم إجراء بعض

الفحوصات على متراكبات الايبوكسي النانوية مثل الصلادة ومتانة الصدمة والتوصيل الحراري، حيث لوحظ ان الخصائص الميكانيكية والحرارية لمتراكبات الايبوكسي النانوية حُسنّت مقارنة بالايوكسي غير المدعم، ووجدَ ان قيم الصلادة ومتانة الصدمة والتوصيل الحراري تزداد مع زيادة نسبة التدعيم كالآتي: (75.21-79.09) و (7.2823-19.0407 KJ/m²) و (0.37957-0.55438 W^o.C⁻¹.m⁻¹) على التوالي [28].

❖ قام الباحث (Zhaol et al.) عام (2019) بتحضير مادة متراكبة ذات أساس بوليمري بطريقة القولية اليدوية، حيث استخدم راتنج الايبوكسي كمادة أساس واستخدم السليكون (Si-B) بنسب تدعيم وزنية مختلفة (0, 4, 5, 6 and 7 wt%) كمادة تدعيم، حيث قام الباحث بدراسة الخصائص الكهربائية (العزلية) لهذه المادة المتراكبة فوجد ان ثابت العزل الكهربائي (الحقيقي) يقل مع زيادة التردد [29].

❖ قام الباحث (Verma) عام (2020) بتحضير مادة متراكبة ذات أساس بوليمري بطريقة القولية اليدوية، حيث قام الباحث بتدعيم راتنج الايبوكسي (المادة الاساس) باوكسيد الكرافين (GNPs) بنسب وزنية مختلفة (0, 1, 3 and 5 wt%)، اذ قام بدراسة الخصائص الحرارية (T_g) باستخدام تقنية المسعر الحراري التفاضلي (DSC) لهذه المادة المتراكبة، حيث وجد إن درجة الانتقال الزجاجي (T_g) تقل مع زيادة نسبة التدعيم [30].

❖ قام الباحث (Lanna et al.) عام (2020) بتحضير مادة متراكبة مكونة من مادة راتنج الايبوكسي (EP) والمطاط الطبيعي (ENR) مدعمة بدقائق نانوية مكونة من (Nano Silica) و (Nano Cellulose (CNC)) بنسب حجمية مختلفة (0, 0.25, 0.5, 0.75 and 1 %) وباستخدام طريقة القولية اليدوية، حيث قام بدراسة الخصائص الميكانيكية (الصدمة و الصلادة) لهذه المادة المتراكبة، حيث وجد ان اعلى قيمة لمقاومة الصدمة للمترابك (EP+ENR+Nano Silica) تساوي (13.7 KJ/m²) عند النسبة (1.0 %) وللمترابك (EP+ENR+ Nano CNC) تساوي (14.94 KJ/m²) عند النسبة (0.75%)، بينما اعلى قيمة للصلادة للمترابك (EP+ENR+Nano Silica) تساوي (76.83) عند النسبة (1.0 %) وللمترابك (EP+ENR+ Nano CNC) تساوي (65.5) عند النسبة (1.0 %) [31].

The Aim of Search**(4-1) الهدف من البحث**

يهدف هذا العمل الى سُبل تحضير وتطوير مادة متراكبة تُظهر تحسن من خصائص مادة الأساس وبما يأتي:

- 1- إمكانية تصنيع مادة متراكبة مكونة من الايبوكسي المقوى بدقائق نانوية هي (أوكسيد الزركونيوم ZrO_2 وأوكسيد المغنيسيوم MgO وأوكسيد النحاس CuO). فضلاً عن إمكانية تصنيع مواد متراكبة هجينة من الدقائق النانوية المذكورة.
- 2- دراسة تأثير النسب الوزنية المضافة من الدقائق النانوية على بعض الخصائص الميكانيكية التي تضمنت اختبار (الانحناء (ثلاثي النقاط) والصدمة والصلادة) وبعض الخصائص الكهربائية العزلية التي تضمنت فحص ثابت العزل الحقيقي وكذلك بعض الخصائص الحرارية المتضمنة فحص (معامل التوصيل الحراري (k) و درجة الانتقال الزجاجي (T_g) ودرجة الانصهار البلورية (T_m)).



الفصل الثاني

الجزء النظري

(1-2) المقدمة

Introduction

تكتسب المتراكبات البوليمرية المقواة والمستخدمة كمواد صناعية جديدة شهرة واسعة وتعد بدائل للمواد التقليدية (المعادن والسيراميك والبوليمر) نظراً لامتلاكها خواص ومميزات أكثر شمولية. إن أهم ميزة للمواد المتراكبة امتلاكها المتانة العالية فيما يخص وزنها وسهولة تشكيلها وتصنيعها، ولهذه الأسباب بدأ الاهتمام وازداد في الآونة الأخيرة بشكل سريع بهذه المواد، فقد استخدمت في تطبيقات كثيرة تبدأ من القوارب وتنتهي بالسفن الفضائية والاستخدامات الطبية. يمكن عد المواد المتراكبة مواداً متعددة الأطوار (Multiphase) تحوي نسبة مميزة معروفة من مواصفات المكونات بحيث نحصل على مزيج من المواصفات الأفضل للمترالكب النهائي ونتجاوز غير المرغوبة أو السيئة منها، لأن صفات المواد المتراكبة هي دالة لصفات مكوناتها وكمياتها والشكل الهندسي لها (شكل التدعيم وحجمه وتوزيعه واتجاهه). تعد المواد المتراكبة الهجينة (الهجائن Hybrids) من المواد الجديدة التي يمكن الحصول عليها من استعمال نوعين أو أكثر من مواد التقوية في مادة أساس واحدة، أو استعمال أكثر من نوع واحد من مواد الأساس كما هو الحال في الخلائط البوليمرية (Polymer Blends)، علماً أن الهجائن المدعمة بأكثر من نوع من الألياف لها في معظم الأحيان مواصفات أفضل من المتراكبات المدعمة بنوع واحد من الألياف، وتستخدم بصورة رئيسة في وسائل النقل الجوي والأجهزة الرياضية والأطراف الصناعية الخفيفة (Orthopaedic Components) ولاهمية هذه الاستخدامات فمن الضروري التأكد من جودتها ومطابقتها للمواصفات المطلوبة سواء خلال التصنيع أو عندما تكون منتجاً نهائياً [7].

(2-2) المفاهيم الأساسية للبوليمرات

The Basic Concepts of Polymers

إن كلمة بوليمر لاتينية الأصل وهي مركبة من مقطعين هما بولي (Poly) وتعني متعدد ومير (Mer) وتعني الوحدة أو الجزء لذلك فإن كلمة بوليمر (Polymer) تعني متعدد الأجزاء أو متعدد الوحدات. أما تسمية مادة البوليمر فتشتق عادة من اسم الوحدات المكونة له بأضافة كلمة متعدد بولي (Poly) إلى بداية أسم الوحدة. ويطلق على هذه الوحدات في علوم البوليمرات بالمونومرات (Monomers) التي تعد الوحدات الأساس في البنية البوليمرية وهذه الوحدات تشابه وحدة الخلية (Unit Cell) في البنية البلورية في المواد الصلبة. ومن الأمثلة على تسمية مادة البوليمر، بولي حامض الأكريليك وبولي أنثيلين وغيرها. والبوليمر أما أن تكون طبيعية كالمطاط الطبيعي والحريير والسيليلوز أو أن تكون مصنعة كالمطاط الصناعي والبولي أنثيلين وغيرها. وتستحصل البوليمرات المصنعة بتفاعلات كيميائية يطلق عليها بالبلمرة (Polymerization). تعرف البلمرة بأنها عملية الربط بين وحدات كيميائية صغيرة تسمى المونومرات (Monomers) لتكوين جزيئات كبيرة يطلق عليها البوليمر (Polymer)، أذاً البوليمرات

هي عبارة عن مركبات كيميائية عملاقة مكونة من عدد كبير من المجاميع الذرية المرتبطة بعضها مع بعض بأواصر كيميائية مكونة سلاسل طويلة [32,33].

تدعى هذه السلاسل بالوحدات المتكررة (Repeating Units). أما عدد الوحدات المتكررة في السلسلة الكبيرة فيطلق عليها درجة البلمرة (Degree Of Polymerization) ويرمز لها عادة بالرمز (n) وتتراوح من عشرات الى عشرات الالاف. اما اذا كان عدد الوحدات المتكررة قليلاً فيدعى المركب بمتعدد الجزيئات (Oligomer)، لأن البوليمرات التي تمتلك وزناً جزيئياً في مدى (1000-20.000 gm/mol) فتسمى بوليمرات ذات وزن جزيئي واطيء (Low Polymer)، أما البوليمرات التي تمتلك أوزاناً جزيئية اكثر من (20000 gm/mol) تسمى بوليمرات ذات وزن جزيئي عالٍ (High Polymer). لأن الوزن الجزيئي للبوليمر يمكن ان يحدد من درجة البلمرة (n) والوزن الجزيئي للوحدة المتكررة (M). وعلى هذا يمكن أن يكتب بالصيغة الآتية [32,33]:

الوزن الجزيئي للبوليمر = درجة البلمرة (n) x الوزن الجزيئي للوحدة المتكررة (M).

وقد تبين أن جزيئة البوليمر هي ذات وحدات متشابهة أو مختلفة التركيب. فالبوليمر ذو الوحدات المتشابهة يدعى البوليمر المتجانس (Homopolymer)، أما البوليمر ذو الوحدات المختلفة فيدعى البوليمر المشترك (Copolymer). وتتكون السلسلة البوليمرية المتجانسة من ذرات متشابهة، مثل الكربون والكبريت والفسفور وغيرها. فإذا كانت السلسلة الجزيئية مكونة من ذرات الكربون فقط، فيدعى البوليمر عندئذ بالبوليمر المتجانس ذي السلسلة الكربونية (Carbon - Chain) وتتحد الوحدات الصغيرة بعضها مع بعض في السلسلة البوليمرية، مكونة أشكالاً متعددة للجزيئة الكبيرة، فتكون [33,34]:

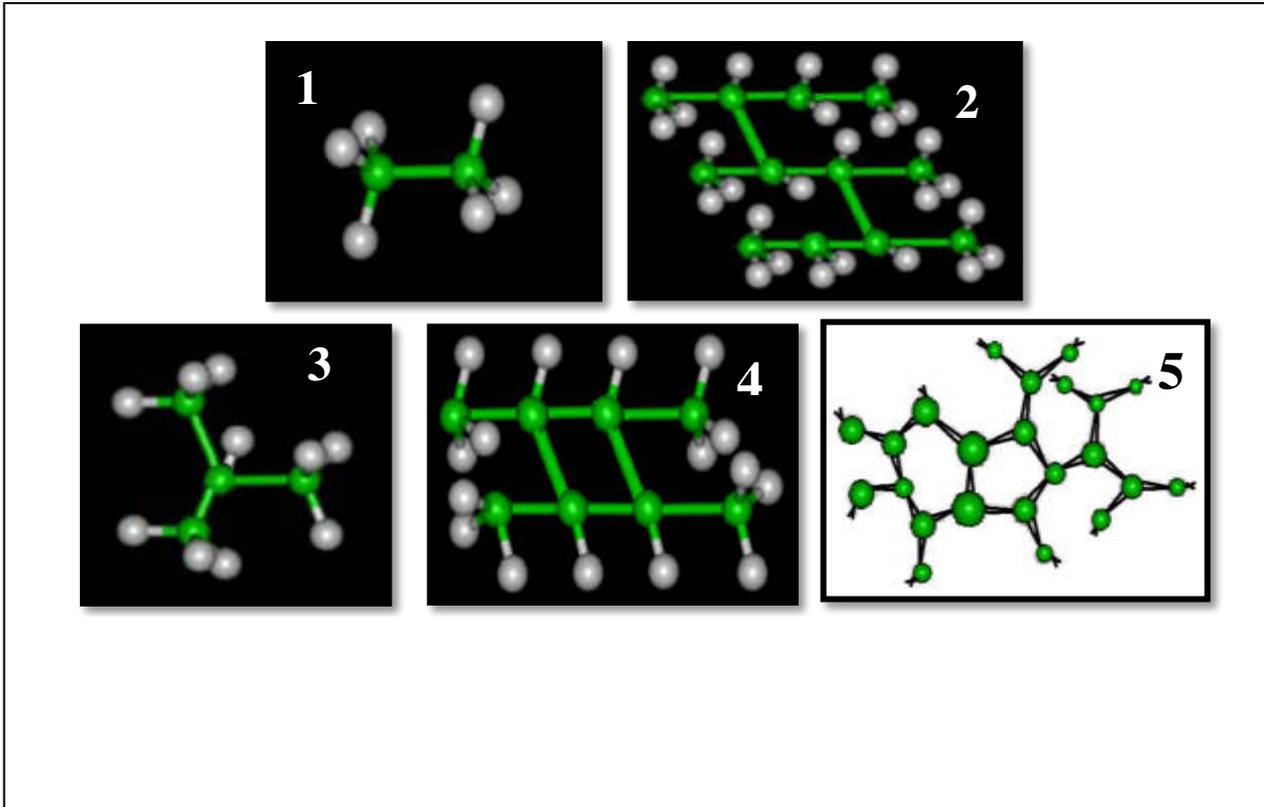
1- خطية (Linear): في هذه البوليمرات تكون الوحدات التركيبية مرتبطة مع بعضها بشكل خطي متواصل، وتحتوى على قوى ربط فاندر فالز بين الاواصر وتكون هذه البوليمرات ذات قابلية على التبلور أكثر من الأصناف البوليمرية الأخرى وتمتاز بخصائصها الميكانيكية المرغوبة، مثل: بولي أنيلين والنايلون وبولي كلوريد الفاينيل وبولي كحول الفاينيل.

2- متشابكة (Cross-linked): ترتبط السلاسل بقوى الربط التساهمية، أحياناً تتحقق من خلال إضافة ذرات أو جزيئات التي بدورها تشكل الربط التساهمي بين السلاسل. فالعديد من أنواع المطاط يمتلك هذا التركيب كمثال عليه. وأن لدرجة التشابك تأثير كبير على صفات البوليمر الميكانيكية والفيزيائية فبإزدياد درجة التشابك تقل الصفات المطاطية. في حين اذا لم تكن درجة التشابك كبيرة فتتكون من خلال ربط السلاسل مع بعضها بواسطة سلاسل جانبية لتكون شبيكة ثنائية الابعاد.

3- متفرعة (Branched): هي البوليمرات التي تمتلك تفرعات مربوطة الى السلسلة الرئيسية، والتفرع يمكن ان يحدث مع البوليمرات الخطية او البوليمرات ذات الربط ألتشابكي ومن أمثلتها، البولي ستايرين والبولي بروبيلين. وتتكون البوليمرات المتفرعة اما بسبب استخدام مونيمرات متعددة المجاميع الفعالة او بسبب حدوث بعض التفاعلات الجانبية، وان كفاءة تعبئة السلاسل تكون منخفضة بالمقارنة مع السلاسل الخطية، أي بمعنى كثافتها تكون قليلة.

4- سلمية (Ladder): تمتلك اثنين من البوليمرات الخطية المربوطة بصورة منتظمة وتكون البوليمرات السلمية اقل صلادة من نظيرتها الخطية.

5- شبكية (Network): وهي الشبكات ثلاثية الابعاد التي تحتوي على درجة تشابك عالية لتعطي البوليمرات صلادة وقوة مثل اللدائن المتصلدة بالحرارة (Thermosetting Plastic) التي تتحلل او تحترق بدلا من انصهارها. وتكون ذات ثلاث مجاميع فعالة (Tri Functional Mers) ومثال عليها: الايبوكسي و الفينول فورمالديهايد. والشكل (1-2) يوضح الانواع لتراكيب السلاسل البوليمرية.



الشكل (1-2): أنواع تراكيب السلاسل البوليمرية [34].

Classification of Polymers

(3-2) تصنيف البوليمرات

ان للبوليمرات تصنيفات عديدة جدا وتقسم الى:

أولاً: بالاعتماد على مصادر البوليمرات Based on the Sources of Polymers وتشمل [35]:

- a- **البوليمرات الطبيعية (Natural Polymers):** تعتبر هذه البوليمرات منتجات طبيعية نباتية او حيوانية ومن الامثلة على ذلك: السليلوز، النشأ، الصمغ العربي، القطن، المطاط الطبيعي، الحرير، الصوف، الشعر، الجلد وغيرها.
- b- **البوليمرات المصنعة (المحضرة) (Synthetic Polymers):** وهذه تشمل البوليمرات التي يجري تحضيرها من مركبات كيميائية بسيطة وتمثل هذه الاغلبية العظمى من البوليمرات المهمة صناعياً. وتشمل البلاستيكات المختلفة والمطاط الصناعي والالياف الصناعية وغيرها.
- c- **البوليمرات الطبيعية المحورة (Modified Natural Polymers):** تشتمل هذه على بعض البوليمرات الطبيعية التي تجري عليها بعض التحويرات اما بتغيير تركيبها الكيميائي كأدخال مجاميع جديدة من البوليمر ، او تغيير تركيب بعض المجاميع الفعالة الموجودة فيه او بتطعيم بوليمر طبيعي على بوليمر صناعي وبالعكس ومن الامثلة على ذلك: خلات السليلوز و القطن المطعم بألياف الاكريلك.

ثانياً: بالاعتماد على الطبيعة الكيميائية للبوليمرات

Based on the Chemical Nature of Polymers

وتشمل [35]:

- a- **البوليمرات العضوية (Organic Polymers):** تحضر هذه البوليمرات من مركبات عضوية او انها ناتجة من مصدر عضوي مثل املاح البولي اسيد العضوية.
- b- **البوليمرات غير العضوية (Inorganic Polymers):** وهذه البوليمرات تتكون عادة من مركبات غير عضوية، تمتاز مثل هذه البوليمرات بمقاومتها العالية للحرارة ولفعال المواد الكيميائية مثل بولي اوكسيد السيليكون.
- c- **البوليمرات العضوية غير العضوية (Organic-Inorganic Polymers):** يشتمل هذا الصنف على البوليمرات التي تتكون من وحدات تركيبية تحتوي على بعض العناصر المعدنية فضلاً عن وجود بعض المجاميع العضوية وتمتاز بمقاومتها الجيدة للحرارة مثل بوليمرات السيليكون.

ثالثاً: بالاعتماد على التصنيف التكنولوجي للبولىمرات

Based on the Technological Aspects of Polymers

وتشمل:

Thermoplastics Polymers

a- البولىمرات المطاوعة للحرارة

يتضمن هذا الصنف البولىمرات التي تتغير صفاتها بتأثير الحرارة، ويتأثير درجة الحرارة تتحول الى منصهرات، وعندما تقترب درجة الحرارة من درجة الانتقال الزجاجي (T_g) تصبح مرنة ثم تزداد مرونتها إلى أن تتحول إلى منصهر لزج، وعندما تنخفض درجة حرارة المنصهر تسترجع حالتها الصلبة مرة اخرى. وتستغل هذه الخاصية في عمليات تصنيع هذا الصنف من البولىمرات، ومن أمثلتها البولى أنيلين (Polyethylene) والبولى بروبيلين (Polypropylene) والبولى ستايرين (Polystyrene) [36].

وتمتاز المواد المطاوعة للحرارة بصفات منها [37]:

- 1- ذات صلادة عالية.
- 2- مقاومة عالية لإجهادات الكسر.
- 3- قابلة للتمدد والاستطالة.
- 4- تكون متباينة الخواص (Anisotropic)، إذ تعتمد على الظروف في أثناء عملية الصب أو التجميد (Solidification).

Thermosets Polymers

b- البولىمرات المتصلدة حرارياً

هي بولىمرات ذات جزئيات متشابكة، تعاني تغيرات كيميائية عند تسخينها وترتبط بواسطة الأواصر التساهمية وتصبح هذه البولىمرات بعد معاملتها حرارياً غير ذائبة وغير قابلة للانصهار وريئة التوصيل الحراري والكهربائي وهي أقوى من البولىمرات المطاوعة للحرارة لذا لا يمكن إعادة تدويرها مرة أخرى ومن أمثلتها هو راتنج الايبوكسي (Epoxy Resin) وراتنج البولى أستر (Polyester Resin) والفينول فورمالديهايد [38].

وتمتاز المواد المتصلدة حرارياً بصفات منها [39]:

- 1- الاستقرار الحراري العالي وذلك يعود إلى أن الجزئيات ذات ربط تشابكي كثيف.
- 2- تكون مادة غير بلورية وذات درجات انتقال زجاجي عالية ($T_g > 300^\circ\text{C}$).

- 3- تمتاز بالجساءة (Stiffness) والقوة (Strong).
- 4- عديمة التوصيل للكهربائية والحرارة.
- 5- عديمة الذوبان في المذيبات الشائعة، ولكن تميل إلى الانتفاخ (Swelling) في المذيبات القوية.

Elastomers Polymers

c- البوليمرات المرنة المطاطية

هي بوليمرات ذات سلاسل خطية طويلة مع وجود تشابك قليل في السلاسل البوليميرية، وتتميز بقابليتها على التقلص والتمدد، ويمكن تصنيفها بأنها مواد بلاستيكية ولكن تتصرف أو تتصف بمواصفات المطاط، وتتميز بانخفاض درجة انتقالها الزجاجي (T_g)، وتبدي هذه البوليمرات معدلات انفعال كبيرة عندما تتعرض للإجهاد، وبإمكانها استرجاع أبعادها الأصلية بعد إزالة الإجهاد، أن قابلية هذا الصنف لإظهار صفات المرونة تعتمد على تركيب الجزيئات البوليميرية ذات السلاسل الطويلة المرنة الموجودة في وضعيات ملتفة على بعضها بصورة عشوائية حيث أن معدل المسافة بين نهايتي جزيئية البوليمير أقل بكثير من المسافة عندما تكون الجزيئية في الوضعية الممتدة ومن أمثلتها المطاط الطبيعي والبولي يورثان (Polyurethane) [40].

تمتلك المواد المرنة المطاطية اثنين من الصفات المهمة هي [41]:

- 1- درجة الانتقال الزجاجي (T_g) تكون أدنى من درجة حرارة الاستعمال.
- 2- جزيئات هذه المواد تكون ذات التواء عالٍ جداً.

Fibers

d- الألياف

يتميز هذا الصنف من البوليمرات بمواصفات خاصة كالقوة والمتانة وقابليتها على التبلور، وتتميز بخواص ميكانيكية وفيزيائية جيدة وكذلك تحملها لدرجات الحرارة [$160^\circ\text{C} < T_g < 260^\circ\text{C}$] وتكون سلاسلها خيطية عالية الترتيب مما يوفر لها مقاومة حرارية وميكانيكية جيدة، وتشمل البوليمرات الصالحة لصناعة الخيوط المستخدمة في صناعة الأقمشة والفرش، ومن أمثلتها السليلوز والنايلون والأكريليك والبولي أسترات الخيطية [42].

رابعاً: بالاعتماد على ميكانيكية التفاعل (التصنيف الكيميائي للبوليمرات)

Based on the Reaction Mechanism (Chemical Classification of Polymers)

وتشمل [35]:

Addition Polymerization

a- بلمرة الاضافة

بلمرة ذات النمو المتسلسل (Chain Growth)، تتكون هذه البوليمرات نتيجة التفاعلات المتسلسلة (Chains Reactions) التي تحصل للجزيئات البسيطة (المونومر). تكون المونومرات المستخدمة عادة لتحضير هذه البوليمرات غير مشبعة (Unsaturated)، ويتم الارتباط بين جزيئات المونومر نتيجة لأنتفاخ الأواصر المزدوجة الموجودة فيها اما بشكل جذور حرة او بشكل أيونات.

Condensation Polymerization

b- بلمرة التكثيف

بلمرة ذات النمو الخطوي (Step Growth)، تتكون هذه البوليمرات عن طريق تكثيف المونومرات الحاوية على مجموعتين فعاليتين (Funcational Groups) او أكثر.

خامساً: بالاعتماد على تجانس البوليمرات

Based on the Homogeneity of Polymers

وتشمل [36]:

Homopolymers

a- البوليمرات المتجانسة

هي البوليمرات التي تتكون من نوع واحد من الوحدات التركيبية، فالبولي اثيلين مثلاً يتكون من نوع واحد من الوحدات التركيبية وهي وحدات الأثيلين (-CH₂-CH₂-)، كما مبين في الشكل (a-2-2).

Copolymers

b- البوليمرات المشتركة

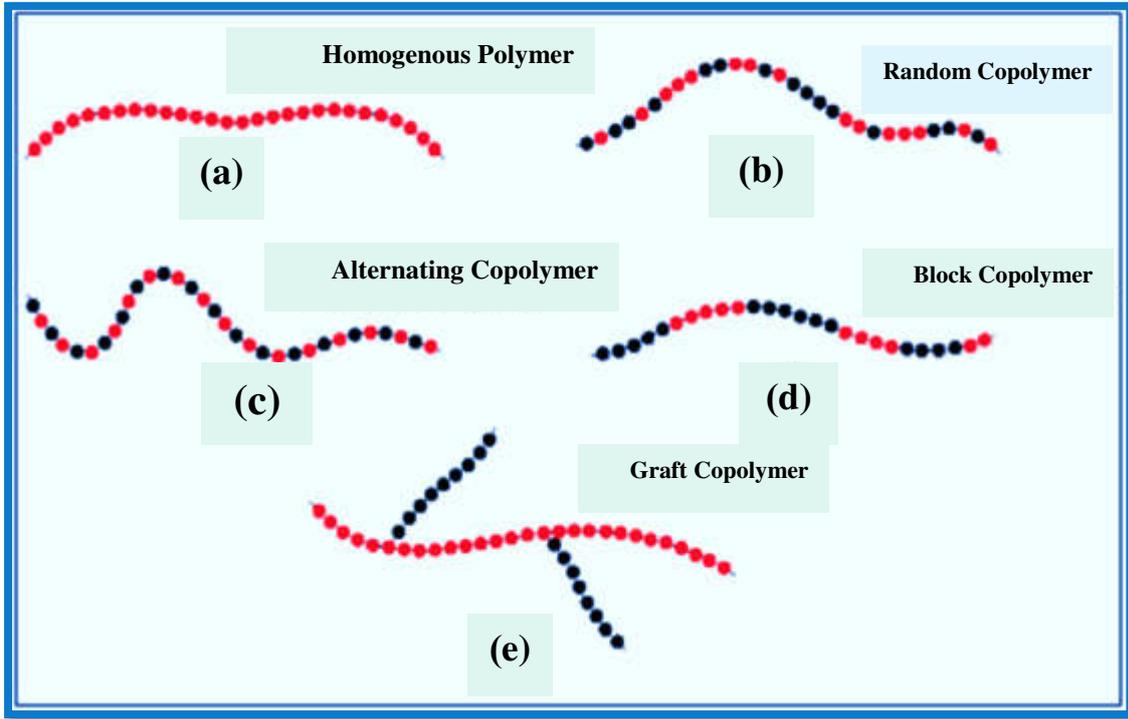
تتكون السلاسل البوليمرية من اكثر من نوع واحد من الوحدات التركيبية، وتتكون هذه البوليمرات نتيجة استخدام اكثر من مونومر واحد، مثل ستايرين-بيوتادين (-CH₂-CH=CH-CH₂-) حيث استخدم كوسيلة للسيطرة على المادة الناتجة. والبوليمرات المشتركة تصنف على اساس طريقة ترتيب المونومر على طول سلسلة البوليمر الى [43, 44]:

1- البوليمرات المشتركة العشوائية (Random Copolymers): وتسمى ايضاً (Statistical Copolymers)، لأن الوحدات التركيبية (المونومرات) تتوزع بشكل عشوائي على طول سلسلة البوليمر مثل Poly(Styrene-Co-butadiene-Co-acrylonitrile)، كما مبين في الشكل (b-2-2).

2- البوليمرات المشتركة المتناوبة (Alternative Copolymers): وتسمى ايضاً (Regular Copolymers)، حيث تتناوب الوحدات التركيبية المختلفة في السلسلة البوليمرية مثل Poly(Ethylene-ALT-Carbonmonoxide)، كما مبين في الشكل (c-2-2).

3- البوليمرات المشتركة القوليةية (Block Copolymers): تكون الوحدات التركيبية مرتبة على هيئة قوالب (Block) حيث ان قالب المونومر الاول يرتبط بقالب المونومر الثاني مثل Poly (Butadiene-b-acrylonitrile)، كما مبين في الشكل (d-2-2).

4- البوليمرات المشتركة المطعمة (Grafted Copolymers): ان السلاسل الجانبية للمونومر الأول ترتبط بالسلسلة الرئيسية للمونومر الثاني وكمثال على ذلك Poly (Styrene-g-acrylonitrile)، كما مبين في الشكل (e-2-2).



الشكل (2-2): تصانيف البوليمرات المشتركة [45].

Composite polymers

c- البوليمرات المترابطة

يقصد بالبوليمرات المترابطة المواد البوليمرية التي تتكون من نوعين من المكونات او اكثر. وتكون عادة متضمنة على طورين او اكثر أي انها غير متجانسة (Heterogeneous) في المدى المجهرى على الأقل. واطافة مكونات اخرى الى البوليمر سوف يغير بعض خصائصه وذلك بأدخال صفات جديدة الى البوليمر مثال على ذلك: البولي اثيلين المقوى بألياف الزجاج.

Polymer Blends

d- خلانط البوليمر

هي تنتج من مزج نوعين من البوليمرات مزجا فيزيائيا. ويكون للمزيج الناتج خصائص ميكانيكية مختلفة. وتكون متضمنة على طورين او اكثر. مثل البولي ستايرين القابل للتمدد.

(4-2) المواد المتراكبة

Composite Materials

تتطلب التقنيات الحديثة مواد غير عادية مع مجموعة من الخصائص التي لا يمكن تلبيتها من المعادن والسبائك المعدنية التقليدية والسيراميك والمواد البوليميرية على سبيل المثال المواد المطلوبة لصناعات المركبات الفضائية ووسائل النقل و مواد ذات استعمالات أخرى. وقد تم تطوير المواد المتراكبة من مواد توجد بصورة غير منفردة الى مواد يمكن أن توفر الخصائص المطلوبة، فربط مادتين أو أكثر مع بعضهما بعضاً نستطيع الحصول على مادة متراكبة جديدة التي هي أقل كثافة وأعلى متانة من أي مادة من المواد المستعملة في صنعها [46,47]. هي تلك الأنظمة الناتجة من اشتراك مادتين أو أكثر حيث يمثل كل مادة طور منفصلاً في النظام، يهدف الحصول على مواد جديدة ذات خواص وتراكيب مناسبة ما بين خواص المواد الأولية الداخلة في تحضير المادة المتراكبة وتتجاوز الصفات الغير مرغوب فيها لتكون أكثر ملائمة للتطبيقات الصناعية، وتكون بشكل ألياف أو دقائق أو صفائح، وتكون مطمورة في مادة أخرى تسمى المادة الأساس (Matrix) وتعطي مادة التدعيم خصائص مختلفة متميزة عن تلك المواد الأساسية للمتراكب. تكون مادة التدعيم أو التسليح والمادة الأساس اما معدناً أو سيراميكاً أو بوليمراً. ونموذجياً فان مواد التدعيم تكون قوية وذات كثافة واطئة، بينما المادة الأساس تكون عادة مطيلية ومتينة، فالمواد المتراكبة إذا صممت ووضعت بشكل صحيح، فأنها ستجمع قوة مادة التدعيم مع متانة المادة الأساس، ونحصل على مزيج من الخصائص المناسبة وغير المتوفرة في أي مادة منفردة. وتعتمد الخصائص الميكانيكية للمواد المتراكبة على عدة عوامل تتضمن الخواص النوعية للمادة الأساس وطور التدعيم، وخاصة الكسر الحجمي وقوة الترابط بين الطورين. المواد المتراكبة عموماً أفضل من أي من المكونات الفردية فيما يتعلق بمقاومتها وقوة التصلب أو التوصيل الحراري. المواد المتراكبة اذا ما حضرت بشكل جيد فانها عادة ما تظهر أفضل الصفات من العناصر المكونة لها، اي تعتمد الخصائص النهائية للمتراكب على خصائص المكونات، وهناك سمة من سمات المواد المتراكبة هي أن تستغل بالكامل مزايا مكوناتها. قد تكتسب خصائص المواد المتراكبة قيماً معينة لا توجد في المكونات. للحصول على الخصائص الأمثل في المواد المتراكبة يتم اختيار عناصرها بحيث تكون مختلفه بشكل كبير ولكن في النتيجة خصائصها متكاملة [47,48].

(5-2) مكونات المواد المتراكبة Components of Composite Materials

تتكون المواد المتراكبة من جزئين أساسيين وهما:

(1-5-2) المادة الأساس

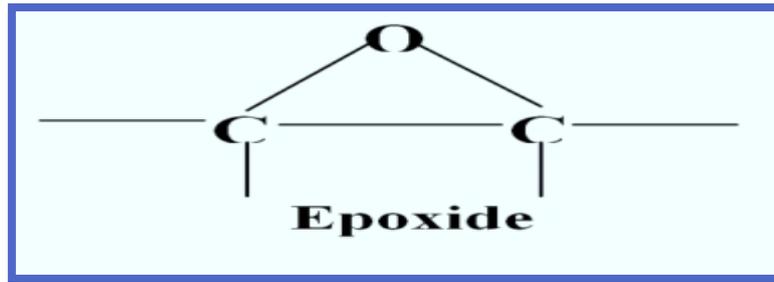
Matrix Material

تمثل المادة الأساسية التي تقوم بربط مواد التقوية ونقل القوى إليها، وتدعى أحيانا بالمادة الرابطة، التي غالبا ما تكون معدنا أو سيراميكاً أو مادة بوليميرية. وفي اغلب الأحيان فان المادة الأساس تعد الطور المستمر في المادة المترابطة. إن الوصف الدقيق والكامل للمواد المترابطة وتركيبها الكيميائي ونوع اطوارها يأتي أساسا من التطبيق المطلوب، وهذا ساعد في اختيار المادة الأساس. والمادة الأساس في المواد المترابطة لا بد من امتلاكها لعدة مميزات تجعل منها مادة أساس صالحة لأداء الغرض المطلوب، وهي أن تكون الوسط الذي يربط مادة التقوية بعضها مع بعض، وتستطيع نقل الإجهاد وتوزيعه على مادة التقوية، وكذلك أن تكون قادرة على حماية مادة التقوية من تلف السطح الناشئ عن التأثير الميكانيكي أو التفاعل الكيميائي مع المحيط الخارجي [49].

(1-1-5-2) راتنجات الايبوكسي

Epoxy Resins

تمثل راتنجات الايبوكسي صنفاً مهماً من البوليمرات المتصلبة حرارياً (Thermosetting) (الراتنجات الحرارية)، والايبوكسي كلمة إغريقية مكونة من مقطعين هما (EP) وتعني بين و (oxy) وتعني أوكسجين، ويحتوي الايبوكسي على مجموعة واحدة أو أكثر من مجاميع الايبوكسايد (Epoxyde) الذي يمثل الوحدة الأساسية لراتنج الايبوكسي، وابطس صيغة له هي الاوكسيران (Oxirane) الذي يمثل بمركب حلقي متكون من ذرة أوكسجين مرتبطة بذرتي كربون، مرتبطتين مع بعضهما ببعض، كما مبين في الشكل (2-3) [50].



الشكل (2-3): الصيغة الكيميائية التركيبية للأيبوكسي [51].

أن أول من حضر راتنج الايبوكسي هو العالم (Dr. Pierrecastan) عام (1936) من خلال تفاعل الايبوكسي كلوروهيدرين (Epichlorohydrin) المشتق من (البروبلين) مع الكحول الثنائي (بس فينول-A) المشتق من (الاسيتون والفينول) وقيم n المختلفة هي ضمن المدى (0-25) وهذا يحدد نهاية استخدام التطبيقات للراتنج، كما مبين في الشكل (2-4) [50,51].

والتي عند وجودها تؤدي الى تكوين فراغات تؤدي الى تقليل قوة الراتنج المتصلد وقابلية عزله الحراري.

- 3- خصائصه الميكانيكية جيدة الى ممتازة (Good-to-Excellent Mechanical Properties).
 - 4- خصائص عزله الكهربائي جيدة جدا (Very Good Electrical Insulating Properties).
- هناك العديد من الخصائص للايبوكسي يمكن ان تعرف له مثال على ذلك توفر الأيبوكسي المدعم بالفضة الذي يمتلك توصيلية كهربائية جيدة بالرغم من انه يمتلك عزلاً كهربائياً [52].

(3-1-5-2) تطبيقات راتنجات الايبوكسي Epoxy Resins Applications

راتنجات الايبوكسي واسعة الانتشار وتستخدم كمواد لاصقة في البناء والترميم والصيانة المنزلية كأكساء السطوح وكذلك الصناعات المعدنية، وايضا يتم استخدام عامل محفز للراتنج وهو المصلد مما يجعله يعمل كمادة لاصقة تستخدم في التطبيقات السابقة، وان راتنجات الايبوكسي تمتلك العديد من الخصائص الفريدة التي تجعلها مرنة ومفيدة في الوقت نفسه. وهناك تطبيقات اخرى للأيبوكسي المعتمدة على المادة المصنعة وهي واسعة جدا وتشمل الطلاءات والمواد اللاصقة او الرابطة والمواد المترابطة لكونه يمتلك جساءة عالية ومقاومة للمواد الكيميائية والمذيبات ومقاومة الحرارة وتقلصه القليل بعد المعالجة وكذلك كونه لا يعطي نواتج عرضية عند المعالجة، كما في الياف الكربون والياص الزجاج المدعمة، التي تستخدم في أجنحة الطائرات وأبدان السيارات وهياكل بعض الاجهزة الكهربائية وكمواد عزل للأسلاك الكهربائية... الخ والعديد من التطبيقات الأخرى ضمن هذا المجال، وأن استخدام الأيبوكسي مع الألياف يحسن من مقاومة الثني ومقاومة الكسر للألياف [50,53].

(2-5-2) مواد التقوية Reinforcement Materials

وهي المواد التي تعمل على تقوية المادة الأساس، فهي تتصف بمقاومة عالية (High-Strength) وبمطيلية واطنة (Low Ductility)، وتكون أما بشكل ألياف (Fibers) أو دقائق (Particles) أو حشوات (Fillers) أو قشور (Flakes) أو على شكل شبكة من مواد زجاجية أو فلزية أو كربونية، لغرض إنتاج المواد المترابطة [54].

(1-2-5-2) المواد النانوية Nanomaterials

كلمة النانو مأخوذة من اللغة اليونانية القديمة وتعني قزم (Nano)، وفي مجال العلوم يعني النانو جزءاً من مليار (جزء من الف مليون)، حيث تستخدم هذه الوحدة للتعبير عن اقطار ومقاييس ذرات وجزئيات المواد المترابطة والجسيمات المجهرية. حيث ان المواد النانوية يمكن تعريفها بانها تلك الفئة المتميزة من

المواد المتقدمة التي يمكن انتاجها بحيث تتراوح مقاييس ابعادها او ابعاد حبيباتها الداخلية بين (1-100 nm)، وقد ادى صغر احجام ومقاييس تلك المواد الى ان تسلك المواد سلوكا مغايرا للمواد التقليدية كبيرة الحجم التي تزيد ابعادها عن (100 nm)، وان تتوفر بها صفات وخصائص شديدة التميز لا يمكن ان توجد مجتمعة في المواد التقليدية. ان المواد النانوية هي مواد البناء للقرن الحادي والعشرين ولبناته الاساسية وتعتبر معيارا لتقدم وحضارة الامم، وتتنوع المواد النانوية من ناحية المصدر، حيث يمكن ان تكون مواد عضوية او غير عضوية او مواد طبيعية او صناعية. حيث تطورت تكنولوجيا النانو بشكل سريع يسمح بالتلاعب بالبولىمرات والحشوات النانوية التي تشكل اللبانات الاساسية للمواد المرغوبة. أن استخدام الحشوات النانوية لتدعيم المواد البوليمرية هي منطقة بحوث مهمة بعكس مواد التدعيم الكبيرة، ان تأثير الجسيمات النانوية لا يمكن التنبؤ به، ففي بعض الاحيان تعزز خصائص المتراكب وفي احيانٍ أخرى تقلل خصائص المتراكب. ويمكن تصنيف المواد النانوية الى مواد نانوية احادية الابعاد، وهي تلك المواد التي لها بعد نانوي واحد، ومن امثلتها الاغشية الرقيقة والتي تستخدم في طلاء الاسطح لغرض حمايتها من الصدأ او التآكل. والى المواد النانوية ثنائية الابعاد، وهي تلك المواد التي لها بعدين بمقياس نانوي، مثل الانابيب والالياف النانوية، وغالبا تستخدم هذه المواد لزيادة الخصائص الميكانيكية للمواد المتراكبة، وكذلك تتصف هذه المواد بالقدرة الفائقة على التوصيل الحراري والكهربائي. اما النوع الآخر هو المواد النانوية ثلاثية الابعاد، حيث تتصف هذه المواد بان تكون ابعادها الثلاث بمقياس نانوي، ومن امثلتها الجسيمات النانوية مثل مساحيق الفلزات واكاسيدها والسيراميك، حيث تدخل هذه في الصناعات الالكترونية والاجهزة الطبية الحديثة وفي مواد البناء والطلاء وغيرها [55].

Magnesium Oxide (MgO)

(2-2-5-2) أوكسيد المغنيسيوم

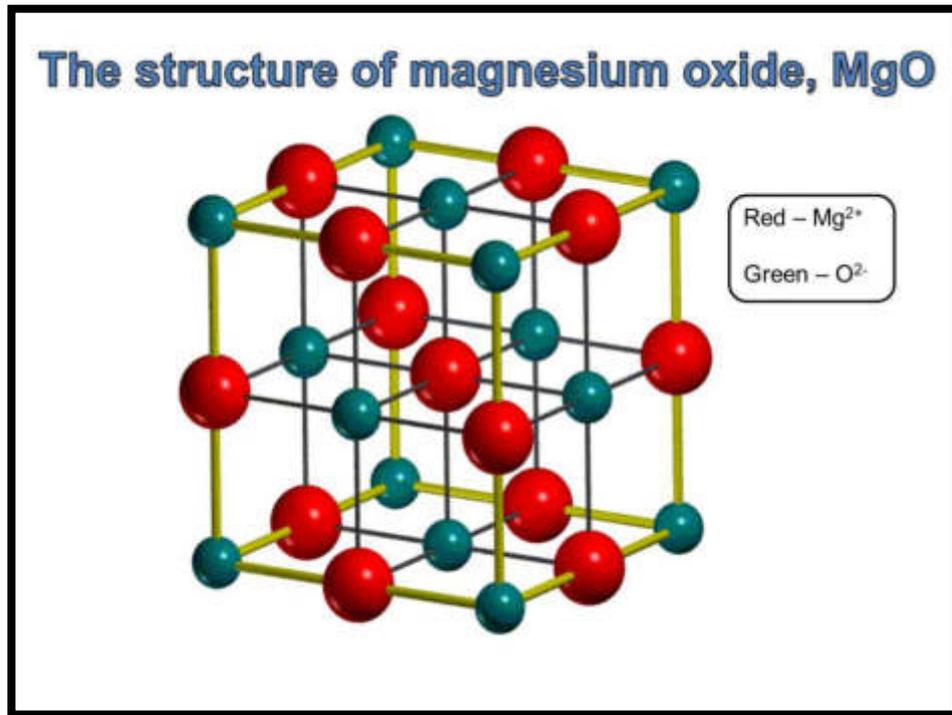
معدن مؤكسد متعدد الاستعمالات لما يمتاز به من خواص كيميائية وفيزيائية فريدة اذ إنه يمتلك درجة انصهار عالية (2800 C°) لذلك يكون مقاوم للدرجات العالية من الحرارة والتمدد المنخفض ومقاومته للتشقق فهو يستعمل في بطانة افران المعادن والزجاج، ويمكن تحضير أوكسيد المغنيسيوم بعدة طرائق منها: التحلل الكيميائي الحراري (CSP) وطريقة المحلول الغروي (Sol_Gel) وترسيب الابخرة الكيميائية (CVD) وغيرها. وتعد طريقة المحلول الغروي الطريقة الأكثر فعالية للحصول على أوكسيد المغنيسيوم (MgO) لكونها قليلة الكلفة وسهلة الاستعمال ويمكن ان تعطي مختلف الاشكال والاحجام لاكثر الاكاسيد. ان حجم جسيمات أوكسيد المغنيسيوم لها تأثير إيجابي على الخصائص الكيميائية والفيزيائية مثل الخصائص التركيبية البصرية والمغناطيسية وغيرها وهناك عوامل تحسن اغلب هذه

الخصائص مثل الكلسنة بدرجات حرارة عالية والتركيز والحامض المستعمل كوقود [56]. والجدول (1-2) يبين بعض خصائص أوكسيد المغنيسيوم (MgO).

العديد من الباحثين اهتم بالوقت الحالي بتحضير اوكسيد المغنيسيوم النانوي نظرا لخصائصه الجديدة والفريدة وتطبيقاته المتعددة، اذ يمكن استعماله كمحفز للعديد من التفاعلات الكيميائية، وأيضا يستعمل بعملية طلاء المعادن لمنع الصدأ ويمكن استعماله في مجال الطب والهندسة الالكترونية وله الفعالية العالية ضد الجراثيم والبكتريا وكذلك الفيروسات وذلك لامتلاكه مساحة سطحية كبيرة كما إنه يمتلك تركيبا مكعبا متمركز الأوجه (FCC) وثابت شبكية (a=4.212nm) [57]. والشكل (2-5) يوضح التركيب البلوري لأوكسيد المغنيسيوم (MgO).

الجدول (1-2): بعض خصائص اوكسيد المغنيسيوم (MgO) [58].

Property	Meleting Point (C°)	Boiling Point (C°)	Density (g/cm ³)	Color	Smell
Value	2800	3600	1.8	White	Odorless

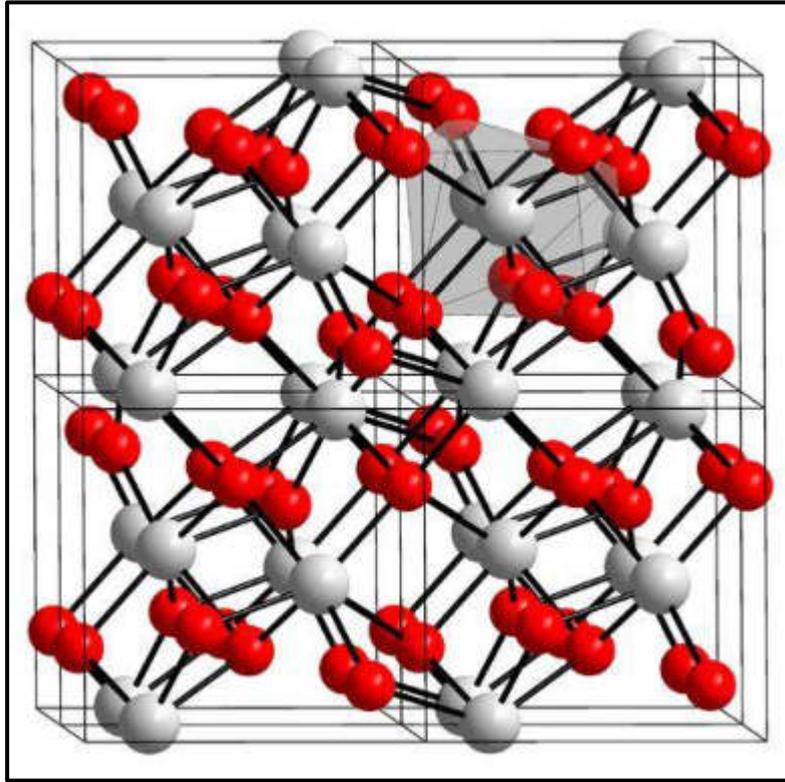


الشكل (2-5): التركيب البلوري لاوكسيد المغنيسيوم (MgO) [58].

Zirconia Oxide (ZrO_2)

(3-2-5-2) أوكسيد الزركونيا

مادة بلورية أحادية التركيب في درجة حرارة الغرفة، يرمز لها بالرمز ($m-ZrO_2$) وتتحول الى مادة بلورية رباعية التركيب بزيادة درجة الحرارة ويرمز لها بالرمز ($t-ZrO_2$). إن صفات هذه المادة تعتمد بصورة رئيسية على درجة استقرارها وكمية استقرارها ونوعية المواد الخام الداخلة في تركيب الزركونيا [59]. والشكل (6-2) يوضح التركيب البلوري لأوكسيد الزركونيا (ZrO_2).



الشكل (6-2): التركيب الكيميائي لأوكسيد الزركونيا (ZrO_2) [60].

ان استخدامات الزركونيا هي:

- 1- من الاستخدامات الحديثة للزركونيا هو ما قامت به شركة آبل (Apple) بوضع براءة اختراع له عام (2006) وذلك في مجال تغليف أجهزة الهاتف المحمول بمادة الزركونيا. حيث أن استعمال السيراميك المصنوع من الزركونيا بدلاً من أغلفة الألمنيوم يحسن في انتقال أمواج الراديو دون الحاجة لاستخدام هوائي خارجي، بل يكون داخل الجهاز [61].
- 2- تدخل الزركونيا في تصنيع الحرارية ما يجعل الأخيرة تتصف بالمتانة العالية (High Strength) في درجة حرارة الغرفة وتحافظ على هذه الصفة في درجات الحرارة العالية الأعلى من ($1500^{\circ}C$) وهذه الخاصية مفيدة ومهمة، إذ يمكن استعمال هذا النوع من الحرارية

كبطانة للأفران، وكذلك هذه الحرارية تتصف بأنها مقاومة للتفاعل مع منصهرات المعادن وقليلة الفشل بسبب تمددها الحراري الواطئ والكثافة الحجمية العالية والتوصيلية الحرارية المنخفضة، ومن الجدير بالذكر أن الزركونيا لا تتفاعل مع المعادن ولهذه الخاصية أهمية في صناعة البوادر (Crucible) [62]. والجدول (2-2) يبين بعض خصائص أوكسيد الزركونيا (ZrO₂).

الجدول (2-2): بعض خصائص أوكسيد الزركونيا (ZrO₂) [59].

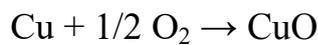
Property	Melting Point (°C)	Boiling Point (°C)	Density (g/cm ³)	Appearance
Value	High About 2715	5000	5.56-6.10	White Solid

Copper (II) Oxide (CuO)

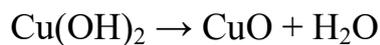
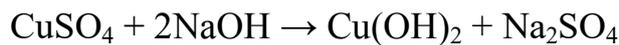
(4-2-5-2) أوكسيد النحاس

يعد النحاس من المواد شبه الموصلة المهمة وذلك لأنه احد المركبات الكيميائية ورمزه الكيميائي (CuO)، يمكن الحصول عليه من أكسدة النحاس المعدني (Metallic Copper) وهو شبه موصل من النوع الموجب (p-type) ويمتلك فجوة طاقة ضمن المدى (المرئي- المنطقة تحت الحمراء)، أما الاسماء العلمية لهذا الأوكسيد فهي (Tenorite) و (Cupric Oxide) [63,64]. ويمكن تحضير أوكسيد النحاس بطرائق مختبرية عديدة ومنها [65]:

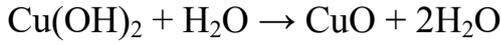
1- يسخن فلز النحاس إلى الاحمرار بدرجة حرارة (800°C) وبمرر الهواء على الفلز أي (أكسدة هوائية) بحسب المعادلة:



2- من ترسيب هيدروكسيد النحاس الناتج من تفاعل كبريتات النحاس المائية مع هيدروكسيد الصوديوم ويسخن المحلول الناتج إلى درجة الغليان ويترسب أوكسيد النحاس بحسب المعادلات:



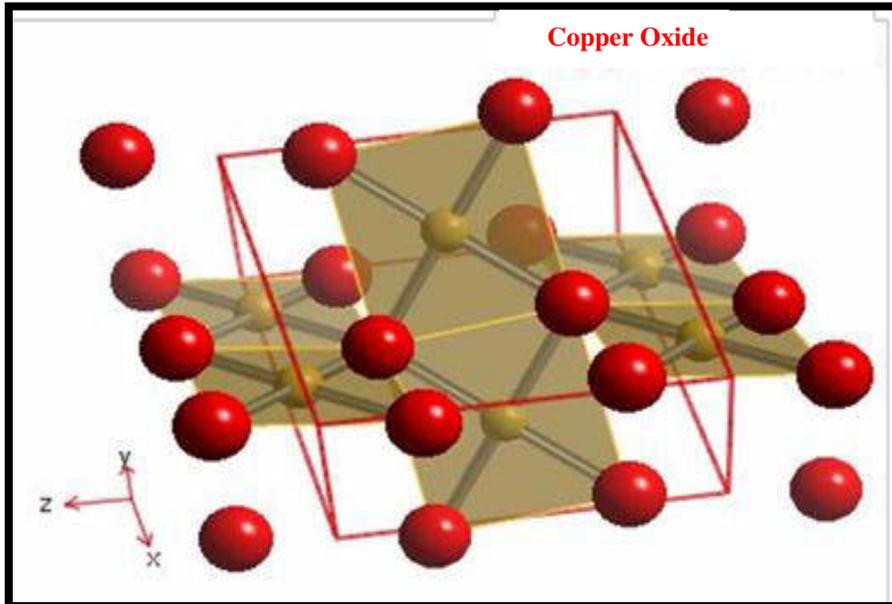
3- من عملية التحلل الكهربائي للماء وذلك بواسطة اقطاب من النحاس وعند عملية التحليل الكهربائي يتكون مسحوق غير ذائب من هيدروكسيد النحاس وعند ارتفاع درجة حرارة المحلول الالكتروليتي أكبر من (40 °C) يتفكك هيدروكسيد النحاس ليتكون منه أوكسيد النحاس حسب المعادلة:



ومن خصائص اوكسيد النحاس انه ذو لون بني غامق مائل إلى اللون الاسود، وذو تركيب احادي الميل (Monoclinic) ووحدة الخلية هي متمركزة القاعدة (BCC) [64] وذو معامل امتصاص عالٍ في المنطقة المرئية (10^4cm^{-1}) عند الطول الموجي (500nm) وعديم الرائحة و غير سام [66]، ويعتبر مادة صديقة الفيرومغناطيسية (Anti-Ferromagnetic) في درجة حرارة ($T_N = 113 \text{ }^\circ\text{C}$). والجدول (3-2) يُبين بعض الخصائص الفيزيائية والكيميائية لأوكسيد النحاس (CuO) [64]. والشكل (7-2) يوضح التركيب البلوري لأوكسيد النحاس (CuO) [64].

الجدول (3-2): الخصائص الفيزيائية والكيميائية لأوكسيد النحاس (CuO) [64].

Symbol	Colour	Crystal Structure	M.Wight (g/mol)	Density (g/cm^3)	Melting Point ($^\circ\text{C}$)	Boiling Point ($^\circ\text{C}$)
CuO	Dark Brown	BCC	79.545	6.31	1201	2000



الشكل (7-2): التركيب البلوري لأوكسيد النحاس (CuO) [64].

استخدم اوكسيد النحاس في كثير من التطبيقات الأخرى أهمها:

- 1- يستخدم في صناعة الخلايا الشمسية وخاصة في الخلايا الضوئية - الحرارية الشمسية (Solar Photo-Thermal)، التي تحتاج إلى استقرار ذات مدى عالٍ وامتصاصية ذات كفاءة عالية ويكونان عاليين في مدى الطول الموجي المرئي [64]. وكذلك يستخدم في نبائط تحويل الطاقة الشمسية [67].
- 2- يستخدم في أوساط الخزن المغناطيسية (Magnetic Storage Mediaes) وفي النبائط المغناطيسية (Magnetic Devices) [68].
- 3- يستخدم في تصنيع النبائط ذات التوصيل الفائق، فعند نقص درجة الحرارة يصبح الأوكسيد مادة فائقة التوصيل. ويستخدم كذلك كمتحسس للغازات (Gases Sensors) [69].
- 4- يستخدم في النبائط الكهروضوئية (Optoelectronic Devices) مثل الدايدوات الباعثة للضوء [68].

Classification of Composite Materials (6-2) تصنيف المواد المترابطة

تصنف المواد المترابطة على اساس النظام الهندسي لطور التدعيم (Reinforcement) وتصنيف اخر يعتمد على المادة الاساس (Matrix) [70].

أولاً: تصنيف المواد المترابطة استناداً الى المادة الاساس:

Classification of Composite Materials Based on the Matrix

Material:

a- مادة مترابطة ذات اساس بوليمري (PMCs)

Composite Material Basis Polymer

تعد المواد المترابطة ذات الأساس البوليمري واحدة من أكثر أنواع المواد المترابطة شيوعاً، فقد زاد الاهتمام بهذه المواد بشكل كبير في الآونة الأخيرة، إذ استخدمت في تطبيقات كثيرة بدءاً من تصنيع القوارب الى أجزاء الطائرات لما تمتاز به من خفة الوزن والمتانة العالية، مما أدى إلى الحصول على مواد مثالية كلفتها قليلة واستهلاكها للطاقة قليل، ونتيجة ذلك فقد اكتسبت الراتنجات المسلحة شهرة واسعة بكونها مادة حديثة تدخل في الصناعة، وعدت بدائل للمواد التقليدية وسبائكها في العديد من الاستخدامات [32,71]. هذه المواد تتكون من الخلط مع البوليمر وتكون لها خواص ممتازة في درجة حرارة الغرفة

الاعتيادية، وهي سهلة التصنيع وذات تكلفة واطئة وتستخدم بكميات ضخمة. والمادة الأساس (Polymeric Matrix Material) البوليمرية غالبا ما تدعم بالألياف نظرا لما تتمتع به الألياف من خصائص ومميزات تختلف بها عن مواد التقوية الأخرى [35]. ولكون البوليمرات تمتاز بأنها منخفضة الكثافة وأنها تفتقر إلى القوة والمتانة لذا يتم إضافة بعض المكونات الأخرى إلى البوليمر المتجانس وتكوين البوليمرات المترابطة بغية تغيير بعض خصائصه وإدخال صفات جديدة عليه ومنها [72]:

- 1- زيادة صلابة (Stiffness) البوليمر وقوته (Strength) وثبات أبعاده (Dimension Stability).
- 2- زيادة مقاومة الصدمة للبوليمر (Impact Strength).
- 3- رفع درجة حرارة التشوه للبوليمر (Distortion Temperature).
- 4- تقليل نفاذية البوليمر للغازات والسوائل.
- 5- تقليل كلفة البوليمر.

إن صفات المترابكات ذات الأساس البوليمري تحددها صفات المكونات المضافة للبوليمر وطبيعة دقاتها وطبيعة التداخل بين البوليمر والمواد المضافة، والنسبة المئوية الوزنية للمواد المضافة، التي تؤدي دورا كبيرا في تحديد الخواص الميكانيكية للمواد المترابطة البوليمرية [35]. ومن محاسن ومساوئ المترابكات ذات الأساس البوليمري [73]:

محاسنها: أن تكون ذات قوة و صلابة عاليتين نسبة الى الكثافة وذات مقاومة ممتازة للتآكل و مقاومة جيدة للكلال و عزل حراري جيد وذات تكلفة منخفضة للمواد الخام.

مساوئها: أساليب إنتاجها قليلة الحجم وتكون مقاومتها ضعيفة للكسر بالنسبة للمواد الهشة ولا تستخدم في درجات حرارية عالية.

b- مادة مترابطة ذات اساس معدني (MMCs)

Composite Material Basis Metal

تصنع المواد المترابطة ذات الأساس الفلزي بعدة طرائق، منها طريقة الرش بالبلازما للمادة الأساس على طبقات الألياف المناسبة، وبواسطة صهر المادة الأساس ومزجها، واستخدام الأساس الفلزي بشكل مسحوق ومزجه مع طور التدعيم، ومن ثم كبسهما وتليبيدهما معاً، والطلاء الكهربائي لطور التدعيم باستخدام المادة الأساس، وطرائق أخرى. وتعد المترابكات ذات الأساس الفلزي ذات كفاءة جيدة عند درجات الحرارة العالية، ولها مقاومة قص وانضغاط عاليتان، مما يؤدي الى قوة ومتانة للمادة الأساس، وارتباط جيد للسطح البيئي. ومن الأمثلة على هذه المترابكات استخدام ألياف البورون في أساس من

الألمنيوم، وألياف الكربون في أساسات من المغنيسيوم و النحاس والألمنيوم. وعلى الرغم من كون تطبيقات المتراكبات ذات الأساس الفلزي ليست واسعة الانتشار مقارنة باللدائن المدعمة، فإن هناك حالات تكون فيها هذه المتراكبات أكثر ملاءمة من غيرها. ومن تطبيقاتها استخدامها في رؤوس المكابس في المحركات الأوتوماتيكية، وريش مراوح التوربينات الغازية، وقبب الرادارات [74]. هذا النوع من المواد المتراكبة عادة ما يستعمل في صناعة السيارات والمحركات، وتعد المعادن وسبائكها كمادة اساس مثل الألمنيوم وسبائكهُ ويتم التدعيم بأحد اطوار التدعيم على هيئة ألياف مثل ألياف كاربيد السليكون او التدعيم بالحبيبات السيراميكية، ويمتاز هذا النوع من المواد المتراكبة بما يأتي [75]:

1- يمكن استعماله في درجات الحرارة العالية التي تتجاوز (1000 °C).

2- له كثافة عالية.

c- مادة متراكبة ذات اساس سيراميكي (CMCs)

Composite Material Basis Ceramic

كانت هذه المتراكبات تستخدم لزمان طويل بشكل الخرسانة المسلحة. وبفعل مقاومة الشد الواطنة لهذه المتراكبات، فإن استخداماتها تكون محدودة على التراكيب الخاضعة الى الانضغاط، ولكون السيراميك معروف جيداً بمقاومته للتأكسد عند درجات الحرارة العالية، وبمقاومته للزحف، فإذا تم السيطرة على تصرفه الهش، فسيكون مناسباً بصورة ممتازة للاستخدام في الأجزاء المعرضة للحرارة في توربينات الطائرات. ومن أمثلة هذا النوع من المتراكبات متراكبات نتريد السيليكون (Si_3N_4) المدعم بكاربيد السيليكون (SiC)، ومتراكبات الزجاج المدعم بألياف الكربون. والسطح البيني في هذه المواد يتضمن ارتباطاً ميكانيكياً مع بعض القوى الناتجة من الانتشار البيني بين الليف والمادة الأساس. والمتراكبات ذات الأساس السيراميكي تمثل صنفاً جديداً نسبياً من المواد، التي أحدثت ثورة في صناعة السيراميك والمواد المتراكبة [74]. ان المادة الاساس في هذا النوع تكون عبارة عن مادة سيراميكية اذ يتم التدعيم فيها باستعمال الحبيبات والألياف القصيرة او ما يسمى (Whiskers) مثل الاليف المصنعة من نتريد البورون وكاربيد السليكون. ويمتاز هذا النوع من المواد المتراكبة بما يأتي [75]:

1- لها قابلية تحمل اجهادات عالية.

2- لها متانة عالية ومقاومة تأكسد عالية.

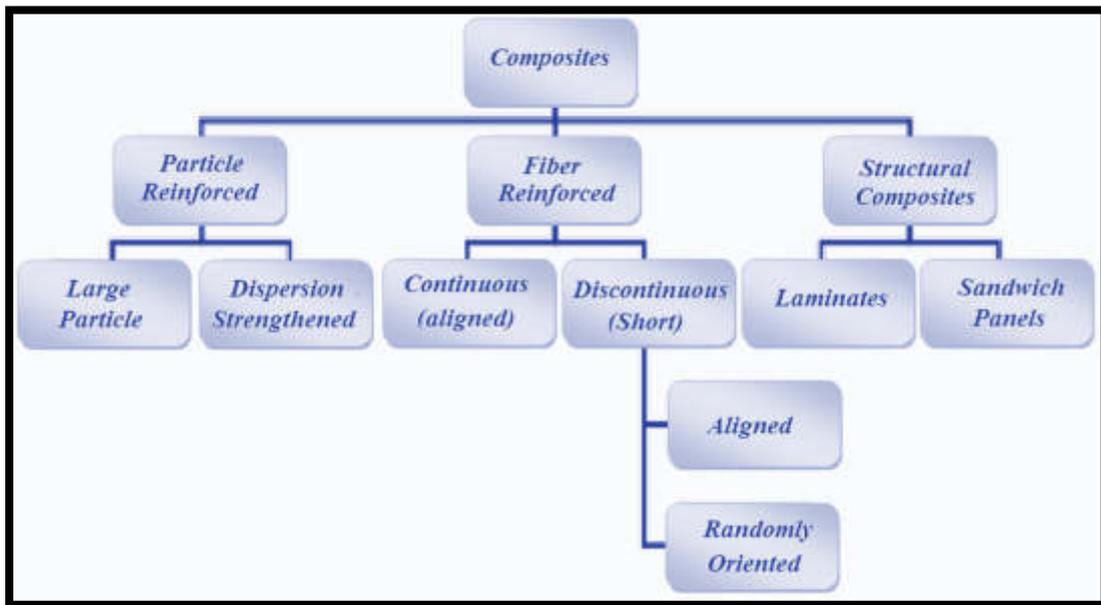
3- ذات معامل تمدد حراري قليل.

4- لها القابلية على تحمل درجات الحرارة المرتفعة، اذ يمكن استعمالها في تطبيقات تصل فيها درجات الحرارة الى اكثر من (1500°C).

ثانياً: تصنيف المواد المتراكبة على اساس التدعيم:

Classification of Composite Materials Based on the Reinforcement

أما التصنيف على أساس طور التدعيم، فهو يعتمد بالدرجة الأساس على الشكل الهندسي للتدعيم (Geometry of Reinforcement)، وعلى ضوء ذلك يمكننا تصنيف المواد المتراكبة والبسيطة في مخطط، كما مبين في الشكل (8-2).



الشكل (8-2): تصنيف المواد المتراكبة على اساس النظام الهندسي لطور التدعيم [75].

ويمكن على أساس ذلك تصنيف المواد المتراكبة إلى خمس مجاميع وهي [76]:

a- المواد المتراكبة المدعمة بالتشتيت

Dispersion Reinforced Composite Materials

ينتج هذا النوع من المواد المتراكبة بتشتيت أو توزيع دقائق مستقرة وذات أحجام صغيرة في المادة الأساس. ويستخدم هذا النوع من التدعيم في الأنظمة الفلزية عادة، بتشتيت طور حامل صلد يتكون من

دقائق بقطر (0.1 Micron) وبتركيز حجمي بين (1-15%) في الوسط الفلزي، حيث تشكل هذه الدقائق عقبات فاعلة أمام حركة الانخلاعات، وتعمل على زيادة حد المرونة، لأنها تقلل من اجهادات التشويه، ومن أمثلتها أكاسيد الفلزات كأوكسيد الألمنيوم (Al_2O_3) المتميز بخموله واستقراره الحراري العالي. إن المادة الأساس في المتراكبات المدعمة بالتشيت تتحمل الاجهادات المسلطة، والدقائق المشتتة ستعيق الانزلاقات في المدى الدقيق جدا، مما يؤدي الى زيادة المقاومة للتشوه اللدن. ولكون توزيع الدقائق المشتتة في المادة الأساس يكون بشكل عشوائي، لذا فان مقاومة المادة المتراكبة وخصائصها الأخرى تكون متماثلة في جميع الاتجاهات (Isotropic) [77].

b- المواد المتراكبة المدعمة بالدقائق

Particules Reinforced Composite Materials

تكون هذه المواد مشابهة للمواد المتراكبة المقواة بالتشيت، ولكنها تختلف عنها في كون قطر الدقائق فيها أكبر من (1 Micron)، والكسر الحجمي أكبر، وكذلك تختلف عنها من ناحية الية التدعيم، فالدقائق فيها تتقاسم الحمل مع المادة الأساس، أي أن لها القابلية على تحمل جزء من القوة المسلطة على المادة المتراكبة. وهذه الدقائق قد تكون فلزية أو لافلزية، تراكيزها الحجمية تتراوح بين (20% إلى 40%) وتجعل الوسط أكثر جساءة، وتحسن من معامل التمدد الحراري وتزيد المقاومة الحرارية ومقاومة الزحف (Creep) ومقاومة الصدمة (Impact Strength)، ويطلق على هذا النوع من مواد التقوية بالحشوات (Fillers)، وتكون على أشكال مختلفة منها الكروية (Spherical) والابرية (Needle-Type) والخطية (Linear)، وتعتمد خواص المادة المتراكبة على خصائص الحشوات وكسرها الحجمي. ومن الأمثلة على هذه المواد استخدام دقائق الكربون لتقوية المطاط، واستخدام دقائق النحاس لتقوية راتنج الايبوكسي وجعله أكثر صلابة وقوة [77,78].

c- المواد المتراكبة المدعمة بالألياف

Fibers Reinforced Composite Materials

إن معظم المواد المتراكبة يتم تدعيمها بالألياف، إذ يمكن استخدام الألياف مع أنواع المواد الأساس جميعها، سواء كانت معدنية أو بوليمرية أو سيراميكية، فالألياف تمتاز بأن لها معامل مرونة ومقاومة شد أعلى من المادة الأساس التي تعمل على توزيع الحمل على الألياف، إذ أن الألياف قد تكون متقطعة أو مستمرة أو محاكاة بشكل حصيرة. وتكمن أهمية التقوية بالألياف في تحسين الخصائص الميكانيكية،

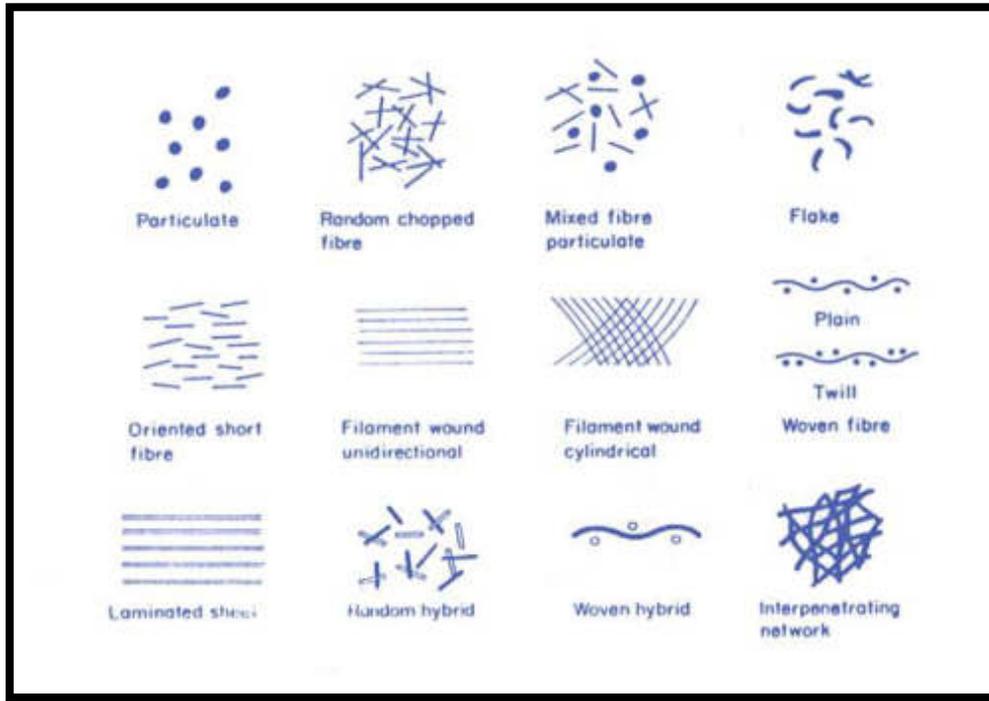
اذ من المعروف أن مقاومة المادة المقاسة عمليا هي أقل بكثير من المقاومة النظرية للمادة، وهذا الاختلاف في قيمة المقاومة يعزى إلى وجود الشوائب والعيوب في المادة، مثل الشقوق (Cracks)، ولذا يتم اللجوء إلى التدعيم بالألياف المصنوعة من مواد بوليميرية أو غير بوليميرية، التي تبدي مقاومة عالية جدا على طول المادة. حيث أن صغر مساحة المقطع العرضي لمادة الألياف يؤدي إلى عدم إمكانية استخدام الألياف مباشرة في التطبيقات الهندسية، ولذا فهي تطمر في داخل مادة الأساس لتشكل مادة متراكبة مدعمة بالألياف، وتعد البوليمرات من أهم وأنسب المواد المستخدمة كمادة أساس لإمكانية الحصول على مواد خفيفة الوزن وذات خصائص التصاق عالٍ. وهناك أنواع عديدة من الألياف شائعة الاستخدام في تصنيع المواد المتراكبة مثل ألياف الزجاج والكفلر والكاربون والبورون والاسبستوس والأسلاك المعدنية، مثل أسلاك النحاس (Copper Wires) وأسلاك الألمنيوم (Aluminium Wires) وأسلاك الحديد (Steel-Wires) [77].

d- المواد المتراكبة الصفائحية Laminates Composite Materials

تمثل نوعا مهما من أنواع المواد المتراكبة، وتتألف من طبقتين أو أكثر موضوعة إحداهما فوق الأخرى وباتجاه معين وترتبطان معا بالمادة الأساس. وتتكون المتراكبات الصفائحية إما من عدة طبقات للمادة نفسها، كالصفائح اللدائنية المدعمة بالألياف، ولكن بتوجيه مختلف للألياف في الطبقات المتناوبة، أو تتألف من طبقات من مواد مختلفة مرتبطة سوية، كالبوليمر والمعدن [77].

e- المواد المتراكبة الليفية الهجينة Hybrid Fibrous Composite Materials

هي تمثل أنظمة جديدة من المتراكبات تربط نوعين مختلفين أو أكثر من الألياف في مادة الوسط نفسها، أو نوع واحد من الألياف ضمن أساسين مختلفين مرتبطين في نظام واحد، ويتسع التعريف ليشمل مواد تقوية متعددة. والهدف من جمع أنواع مختلفة من المواد الأساس أو مواد التقوية أو كلاهما معا هو الحصول على موازنة جيدة للخصائص بصورة عامة وإمكانية توحيدها في مادة واحدة، وتصنيع مادة جديدة تحتفظ بمميزات موادها الأساس، وجعلها مناسبة للاحتياجات المطلوبة التي صممت لأجلها، ومن هذه العوامل الكلفة والوزن والسلوك ما بعد الفشل (Post – Failure Behaviour)، وتجنب إنتاج مواد متراكبة هجينة أضعف من موادها الأساس أو لتحسين خاصية معينة، كمقاومة الصدمة، بدون خسارة كبيرة في باقي الخصائص كالصلابة والقوة [54,77]. والشكل (2-9) يوضح أمثلة مختلفة للترتيب الهندسي للمتراكبات.



الشكل (2-9): أمثلة مختلفة للترتيب الهندسي للمترابكات [77].

(7-2) العوامل المؤثرة في خصائص المواد المترابكة المدعمة بالدقائق

Factors Affecting in Properties Particules Reinforced Composite Materials

Grain Size

(1-7-2) حجم الحبيبة

إن زيادة الصلابة (Stiffness) مع نقصان حجم الحبيبة هي علاقة خطية تحت الحجم (0.2 Micron)، وكذلك يرتبط حجم الحبيبة مع قوة الخضوع والاستطالة بنفس الطريقة، ولكنها تُعدّل (Modify) مع الاحجام الحبيبية الأكبر [79].

Particles Shape

(2-7-2) شكل الدقائق

شكل دقائق الحشوات هو أكثر أهمية من التركيب الكيميائي، إذ أُجريت دراسات على كريات زجاجية كروية (Spherical Glass Bead) ولوحظ أن كريات الزجاج ودقائق اسطوانية ناعمة وصغيرة أخرى تقوى بتأثير التشابك المؤقت (Temporary Crosslinking)، أما الدقائق الأكبر فهي حشوات غير مقوية (Non-Reinforcing) [79].

(8-2) المتراكبات الهجينة

Hybrid Composites

تعد الهجائن (Hybrids) من المواد الجديدة التي يمكن الحصول عليها من استعمال نوعين أو أكثر من مواد التدعيم في مادة أساس واحدة، أو استعمال أكثر من نوع واحد من مواد الأساس كما هو الحال في الخلائط البوليمرية (Polymer Blends)، وكذلك ان الهجائن المدعمة بأكثر من نوع من الألياف لها في معظم الاحيان مواصفات أفضل من المتراكبات المدعمة بنوع واحد من الألياف، فهي تستعمل بصورة رئيسية في وسائل النقل الجوي والأجهزة الرياضية والأطراف الصناعية الخفيفة، ولأهمية هذه الاستعمالات فمن الضروري التأكد من جودتها ومطابقتها للمواصفات المطلوبة خلال التصنيع أو عندما تكون منتجاً نهائياً [80].

إن أهمية المواد المتراكبة الهجينة تعزى إلى [81]:

- 1- إمكانية تقليل الكلفة والتي يمكن الحصول عليها من إبدال ألياف عالية الثمن بألياف أرخص ثمناً للحصول على نفس هدف التدعيم.
- 2- إمكانية الحصول على مدى واسع من الخصائص الفيزيائية والميكانيكية بالاختبار الأمثل للألياف المستعملة والكسر الحجمي للألياف المناسب لها.
- 3- إمكانية الحصول على خصائص فريدة لا يمكن الحصول عليها عند استعمال نوع واحد من الألياف. هناك أنواع عديدة من المتراكبات الليفية الهجينة، توصف وفقاً لطريقة مزج مكوناتها بـ [82]:
- 1- الهجائن الشطيرية (Sandwich Hybrids): تمثل مادة واحدة توضع بين طبقتين من مادة أخرى.
- 2- الهجائن الصفائحية أو الطباقية (Laminate Hybrids): تتكون من طبقات من نوعين مختلفين أو أكثر، وترصف فيها الطبقات بصورة متعاقبة.
- 3- الهجائن المخلوطة جيداً (Intimately Mixed Hybrids): تصنع خلال خلط الألياف جيداً بضمان عدم وجود تركيز لأحد الألياف في منطقة معينة مقارنة بالمناطق الأخرى.
- 4- الهجائن ضمن الطباقية (Intimately or (tow by tow) Hybrids): في هذه الهجائن تخلط ظفيرة (Tow) لأحدى المواد مع ظفيرة من مادة أخرى بطريقة معينة (منتظمة) أو عشوائية.

(9-2) قاعدة الخلانط

Rule of Mixtures

قاعدة الخلط يمكن أن تنتبأ بخواص المواد المترابكة المقوأة بـ (الدقائق او الالياف او الصفائح) إعتماًداً على الكسر الحجمي (الوزني) وخواص المواد المستخدمة في تحضير المادة المترابكة. إن العلاقة الرياضية التي تربط بين مكونات المواد المترابكة المقوأة بالدقائق لأي صفة تحت الدراسة سوف تعتمد على الكسر الحجمي (الوزني) للأطوار المكونة لها، علاوة على قيم تلك الصفة لكل مكون على إنفراد، حيث ان المادة تسلك سلوك المادة الأساس، عند احتوائها على دقائق بكسر وزني قليل، بينما تسلك المادة سلوكاً مشابهاً للدقائق (مادة التدعيم) عند احتوائها على دقائق بكسر وزني عالٍ، لذلك عند القيم الواطئة للكسر الوزني فإن خصائص المادة الأساس يمكن ان تحدد سلوك المادة المترابكة [83]. ويمكن حساب كثافة المادة المترابكة من العلاقة الآتية [84]:

$$\rho_c = \sum V_i \rho_i = V_1 \rho_1 + V_2 \rho_2 + \dots + V_n \rho_n \dots\dots\dots (1-2)$$

حيث أن:

ρ_c : كثافة المادة المترابكة.

ρ_1, ρ_2, ρ_n : الكثافة لكل عنصر.

V_1, V_2, V_n : الكسر الحجمي (الوزني) لكل عنصر.

ويمكن حساب كمية المادة الأساس ومادة التدعيم كما يأتي [37]:

1- بدلالة الكسر الحجمي:

$$V_p = \frac{\rho_c}{\rho_p} W_p \times 100\% \dots\dots\dots(2-2)$$

$$V_m = \frac{\rho_c}{\rho_m} W_m \times 100\% \dots\dots\dots(3-2)$$

حيث ان:

V_p, V_m : الكسر الحجمي لكل من المادة الأساس والتدعيم على التوالي.

ρ_p, ρ_m, ρ_c : الكثافة لكل من المادة المترابكة والاساس والتدعيم على التوالي.

W_p, W_m : الكسر الوزني لكل من المادة الاساس والتدعيم على التوالي.

2- بدلالة الكسر الوزني:

$$W_p = \frac{w_p}{w_c} \times 100\% \dots\dots\dots (4-2)$$

$$W_m = \frac{w_m}{w_c} \times 100\% \dots\dots\dots (5-2)$$

حيث أن:

W_p, W_m, W_c : وزن كل من المادة المترابكة ومادة الاساس ومادة التدعيم على التوالي، وهنا يجب ملاحظة ما يأتي:

$$W_p + W_m = 1 \dots\dots\dots (6-2)$$

$$V_p + V_m = 1 \dots\dots\dots (7-2)$$

استنتج الباحثون في هذا المجال أن هناك حداً أعلى (Upper Bound) وحداً أدنى (Lower Bound) لقيم كل خاصية والمبينة في الشكل (10-2) الذي يوضح التقوية بدقائق التنكستن والمتمثلة في العلاقتين (8-2) و (9-2) على التوالي وتأثيرها في معامل المرونة [85].

$$E_c = E_m V_m + E_p V_p \dots\dots\dots (8-2)$$

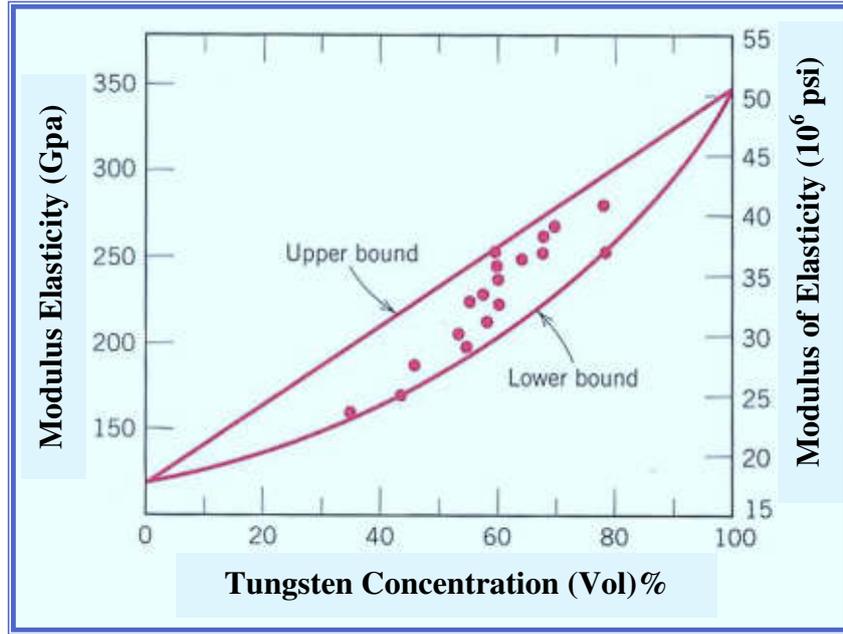
$$E_c = \frac{E_m E_p}{V_m E_p + V_p E_m} \dots\dots\dots (9-2)$$

حيث أن:

E : معامل المرونة.

V : الكسر الحجمي (الوزني).

p, m, c : ترمز للمادة المترابكة والاساس والتدعيم على التوالي.



شكل (10-2): التقوية بدقائق التنكستن وتأثيرها في معامل المرونة [85].

Mechanical Properties

(10-2) الخصائص الميكانيكية

إن منافسة المواد البوليمرية المترابكة للمواد الأخرى تعتمد على خواصها الميكانيكية المرغوبة من حيث قوتها العالية ومرونتها فضلاً إلى سهولة تصنيعها ورخصها نسبياً. والخواص الميكانيكية تميز المواد عندما تسلط قوة على المادة، وعادة تتعلق بالسلوك المرن واللدن للمادة. فعند إختيار البوليمر المناسب لاختبارات معينة يجب دراسة مدى مقاومة البوليمر لأنواع الاجهادات المختلفة التي يمكن ان تكون ثابتة كما موضح في إختبار الزحف أو متحركة كما في إختبار الصدمة أو إجهادات قوى ساكنة كالانحناء والانضغاط. ومن هذه الاختبارات هي [35]:

Impact Test

(1-10-2) إختبار الصدمة

يُعد اختبار الصدمة من الطرق التي تعطي علاقة واضحة عن قوة المادة ومقاومتها للكسر تحت تأثير اجهادات بسرعات عالية. يعرف الكسر بأنه انفصال الجسم إلى قسمين أو عدة اقسام بسبب تأثير قوى طبيعية خارجية ويتولد عن الانفصال سطوح جديدة. ان عملية كسر المادة بصورة عامة أمر غير مرغوب فيه، والاسباب التقنية التي تحول دون اجراء إختبارات الكسر هي ما يأتي:

- 1- الظروف المعطاة.
 - 2- مقارنة خصائص الكسر لمادة معينة ضد معيار محدد.
 - 3- تأثير الظروف المحيطة في متانة المادة.
 - 4- دراسة تأثير التغيرات التركيبية المايكروية (Micro structural) في متانة المادة.
- يبدأ الكسر في اختبار الصدمة عادة بتكوين الشق (Crack Initiation) ثم يبدأ بامتداد الشق (Crack Propagation) [86].
- تكون الكسور على نوعين:

1- الكسور الهشة (Brittle Fractures).

2- الكسور المطيلية (Ductile Fractures).

اذ تعد الكسور الهشة من الكسور الخطرة وتحدث بصورة مفاجئة دون المرور بالتشوه اللدن. اما الكسور المطيلية فتكون اقل خطورة لانها تحصل بصورة بطيئة ويمكن ملاحظتها. تعتمد درجة الكسر الهش او المطيلي بالدرجة الاساس على القيم النسبية لقوة القص وقوة التماسك للمادة، فاذا كانت قوة القص اكبر من قوة التماسك عندئذ تنهار المادة بطريقة هشة ولكن اذا كانت قوة القص اقل من قوة التماسك تصبح المادة مطيلية وتتشوه بصورة لدنة. و تبدي المواد المتصلدة حرارياً كسراً هشاً بينما تبدي المواد المطاوعة للحرارة كسراً مطيلاً [86].

ويعتمد نوع الفشل الذي يحدث في المادة على عدة عوامل وتشمل الآتي [86]:

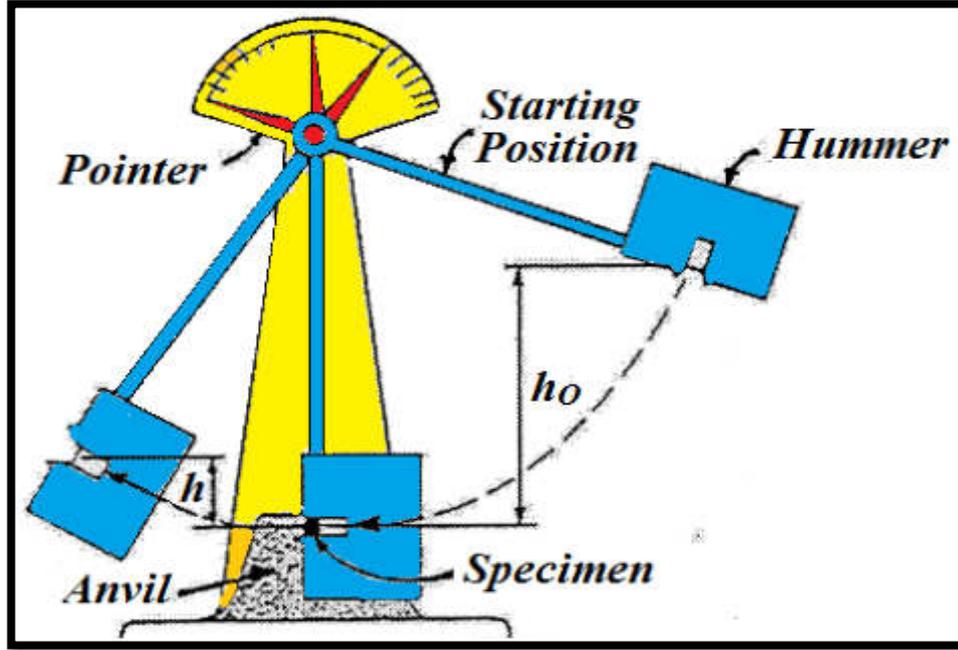
- 1- طبيعة المادة وتركيبها.
- 2- نوع الاجهاد (Type of Stressing).
- 3- معدل الاجهاد (The rate of Stressing).
- 4- درجة الحرارة (Temperature).
- 5- الوسط (Environment).

وهناك عدة إختبارات قياسية للصدمة المطبقة في الوقت الحاضر وهي [87,88]:

- 1- إختبار چاربي (Charpy Test): في هذا الاختبار يتم وضع العينة أفقياً وتضرب في وسطها بالمطرقة بوزن معين وهو الاختبار المتبع في هذه الدراسة، كما مبين في الشكل (2-11).

2- إختبار أيزود (Izod Test): في هذا الإختبار يتم وضع العينة عمودياً في جهة معينة وتضرب من نفس الجهة.

3- إختبار قياس الصدمة بطريقة الاجسام الساقطة (Falling Body Impact): هو إختبار لقياس الطاقة المطلوبة للكسر بأستعمال أثقال بكتل مختلفة وبتأثير التعجيل الارضي (السقوط الحر).



الشكل (11-2): مخطط جهاز أختبار الصدمة نوع جاري [89].

كل من إختبار (Izod و Charpy) يتضمن السماح لبندول ذي وزن معلوم بالسقوط من ارتفاع (h_0) ليصطدم بعينة الإختبار القياسية في أوطاً نقطة من تأرجحه ليقاس بعدها الارتفاع (h) وهو الارتفاع الذي يصله البندول بعد اصطدامه بعينة الإختبار، والذي يمثل قياساً لطاقة الكسر، فإذا كانت هذه الطاقة كبيرة، يكون مقدار الفقدان كبيراً، وبهذا يصبح الارتفاع (h) الذي يصله البندول بعد اصطدامه بعينة الإختبار قليلاً، في الوقت نفسه يُسجل المؤشر على الطاقة اللازمة للكسر لتقسّم على مساحة المقطع فيتم الحصول على قيمة متانة الكسر ان أهم مساوي إختبار الصدمة بالبندول تكمن في ان طاقة السقوط الزائدة عن الطاقة اللازمة للكسر تُخزن في عينة الإختبار نفسها، وبهذا فقد نحصل على قيمة عالية للطاقة المقاسة. بما ان عينة إختبار چاربي لاتحتاج للتثبيت في موضعها (كما هو الحال في عينة أختبار أيزود) فانها تستعمل بسهولة للإختبار عند درجات حرارة مختلفة، وتبعاً لذلك حل إختبار چاربي حالياً وبشكل كبير محل إختبار أيزود [86].

متانة الصدمة تحسب من العلاقة الآتية [90]:

$$I.S = U/A \quad \dots\dots\dots (10-2)$$

حيث ان:

$$I.S = \text{متانة الصدمة وتقاس بوحدات } (KJ/m^2).$$

$$U = \text{طاقة الكسر بوحدات } (KJ).$$

$$A = \text{مساحة المقطع بوحدات } (m^2).$$

أما فيما يخص إختبار الصدمة بالوزن الساقط، فيتم اجراؤه بإسقاط أداة صدم (Impactor) بحرية من ارتفاع معلوم. [91,92]. ويمكن حساب طاقة الكسر (E) في هذه الحالة من العلاقة الآتية [90]:

$$E=mgh \quad \dots\dots\dots (11-2)$$

حيث أن:

$$m: \text{كتلة الثقل بوحدات } (kg).$$

$$g: \text{التعجيل الارضي } (9.806 \text{ m/sec}^2).$$

$$h: \text{مسافة السقوط بوحدات } (m).$$

Hardness Test

(2-10-2) إختبار الصلادة

تعرف الصلادة عادة بأنها مقاومة السطح للغرز (Indentation) ولكنها في الوقت نفسه تعطي فكرة جيدة جداً ونسبية عن متانة وتماسك كتلة المادة أيضاً، باستعمال أحمال صغيرة، وهو اختبار غير اتلافي لعدم اتلاف العينة (Nondestructive)، اذ لاتتكسر العينة عند الاختبار ولا تتشوه بشكل مفرط اذ يكون التشوه بشكل ثقب صغير جداً فوق سطح العينة. وفي الدراسة الحالية تم اعتماد صلادة شور لأن صلادة شور تعتمد لقياس صلادة المواد البوليمرية وهناك نوعان من صلادة شور وهما:

الاول: يعرف بشور (Shore A): ويستعمل للبلاستيك اللين (Softer).

والثاني: يعرف بشور (Shore D): ويستعمل للبلاستيك الصلب (Harder).

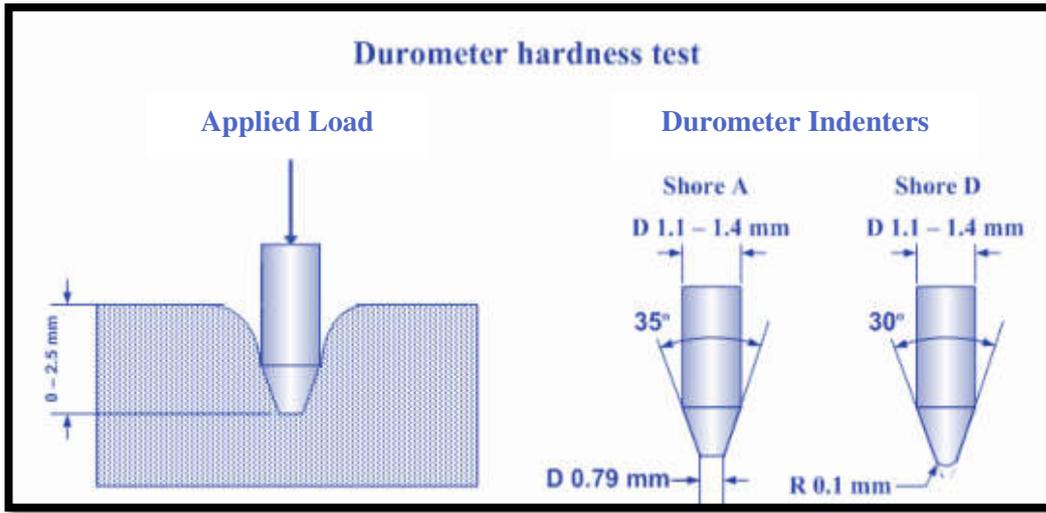
وأيضاً من أسباب الأفضلية لأختبار الصلادة هو سهولة الاختبار ورخص الاجهزة المستعملة نوعاً ما لايحتاج الى تحضير عينة خاصة [93,94].

تتأثر الصلادة بعوامل كثيرة منها درجة الحرارة والزمن، ومتغيرات الاختبار الأخرى كالحمل المستخدم وطرق تصنيع المادة والمعاملة الحرارية التي أجريت لها. حيث تعد الصلادة من الخصائص السطحية المهمة التي من الواجب معرفتها نظراً لتعرض المواد اللدائنية الى اختراق او خدش من قبل معدات اصلد منها، ويمكن تعريف الصلادة بأنها مقاومة المادة للتشوه اللدن الموضعي (Localized Plastic Deformation) مثل الغرز أو الخدش [93].

وهناك ست طرائق لقياس الصلادة ومنها [94]:

- 1- صلادة روكويل (Rockwell Hardness).
- 2- صلادة فيكرز (Vicker's Hardness).
- 3- صلادة برينل (Brinell Hardness).
- 4- صلادة الارتداد النسبية (Relative Rebound Hardness).
- 5- صلادة مقياس التحمل (Shore Durometer Hardness).
- 6- صلادة نوب المايكروية (Knoop Microhardness).

يتم قياس صلادة البوليمرات المطاطية (Elastomer) بجهاز صلادة شور (A) و (D) الذي يحوي أداة غرز نقطية، وبتغلغل أداة الغرز داخل سطح المادة تحت تأثير حمل معين سيعطي الجهاز قراءة في مؤشر العداد الرقمي المثبت في الجهاز ويمثل هذا الانحراف مقدار الخدش لسطح المادة، يختلف قياس صلادة شور (A) عن (D) في شكل نهاية أداة الغرز، كما مبين في الشكل (2-12). يعطي جهاز صلادة شور دلالة واضحة عن خصائص البوليمر المطاطي في الشد، فكلما زادت استطالة العينة قبل الكسر قلت صلادتها، حيث تتميز بذلك البوليمرات ذات الصلادة المتوسطة (50-70 Shore A)، وتقل هذه الصلادة للبوليمرات الطرية أو الصلدة جداً [93,94].

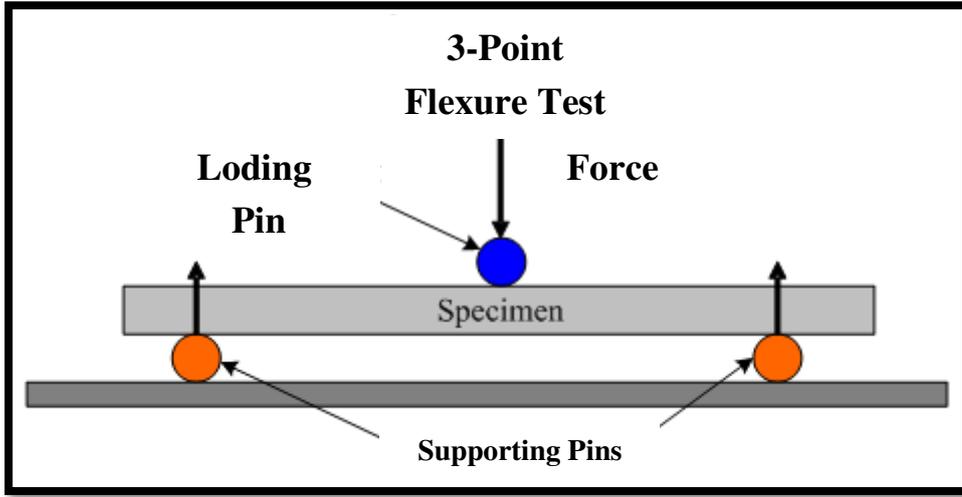


الشكل (2-12): أداة الغرز بجهاز صلادة شور [95].

Bending Tests

(3-10-2) إختبار الانحناء

عندما تنحني العارضة (Beam) يحدث تغير مستمر بشكلها ويكون بشكل اجهاد شد على احد السطحين واجهاد انضغاط على السطح الاخر. ان ابسط اختبار للانحناء ولمتانة الانحناء يجري بطريقة الاختبار ثلاثي النقاط حيث تسند العينة على مسندين طرفيين ويسلط الحمل على نقطة في منتصف العينة، كما مبين في الشكل (2-13). من الجدير بالذكر ان اختبار الانحناء هو اكثر ملاءمة للمواد الهشة (Brittle Materials) من اختبار الشد، ففي حالة وجود أي عيب بسيط او خدش سطحي، فأن ذلك قد يؤدي الى تركيز الاجهادات فيه وبالتالي فشله بسهولة، انذاك يكون اختبار الانحناء هو المناسب للحصول على منحنى (الحمل - الانحراف) [96].



الشكل (13-2): جهاز اختبار الأنحاء ثلاثي النقاط [96].

تعرف متانة الانحاء (Flexural Strength) بأنها مقاومة المادة لاجهادات الانحاء المسلطة عليها. يتم حساب معامل يونك للانحاء (E) (Young's Modulus) الذي يقاس بوحدة (MPa) أو (N/mm²) من العلاقة الآتية [92]:

$$E = MgL^3 / 48I_B S \dots\dots\dots (12-2)$$

حيث ان:

M/S = الميل للجزء الخطي لمنحني (الحمل- الانحراف) باختبار الانحاء.

g = التعجيل الارضي (9.806 m/sec²).

L = طول العينة بوحدات (mm).

I_B = عزم الانحاء الهندسي بوحدات (mm⁴) ويكون مساوياً:

$$I_B = bd^3 / 12 \dots\dots\dots (13-2)$$

حيث ان:

b = عرض العينة بوحدات (mm).

d = سمك العينة بوحدات (mm).

ويمكن حساب متانة الانحاء (F.S) بالعلاقة الآتية [92]:

$$F.S = 3PL / 2bd^2 \dots\dots\dots (14-2)$$

حيث ان:

$$P = \text{اقصى حمل مسلط قبل الكسر بوحدات (N)}.$$

بما إن هناك قوى قص (Shear Forces) علاوة على قوى الشد (Tensile Forces) وقوى الانضغاط (Compression Forces)، فيمكن حساب قيمة إجهاد القص (Shear Stress) من العلاقة الآتية [92]:

$$\tau_{\max} = 3P/4bd \dots\dots\dots (15-2)$$

حيث ان:

τ_{\max} : أقصى إجهاد قص يحدث في المستوى المتعادل عند مركز العينة بوحدات (N/mm²).

P: أقصى حمل تتحمله العينة بوحدات (N).

b: عرض العينة بوحدات (mm)، d: سمك العينة بوحدات (mm).

Thermal Properties

(11-2) الخصائص الحرارية

إن التركيب الفيزيائي للبوليمرات مسؤول عن الكثير من الخواص التطبيقية للبوليمرات كشفافيتها (Transparency) وقوتها (Strength) ومرونتها (Elasticity) وله دور هام ومميز في معظم الخواص الميكانيكية التي تتطلبها الاستخدامات العملية لهذه البوليمرات. للتركيب الفيزيائي للبوليمرات تأثير في الخواص الأخرى للبوليمرات مثل قابلية ذوبانها وإمتصاصها للأصبغ ومقاومتها للظروف البيئية المختلفة كالتشقق (Cracking) الذي يحصل للبوليمرات عند تعرضها لإجهاد معين أو تعرضها لفعل بعض المذيبات العضوية. وللتركيب الفيزيائي تأثير كبير في الخصائص الحرارية للبوليمرات. ومن الخصائص الحرارية المهمة للبوليمرات هي التوصيل الحراري (k)، درجة الانتقال الزجاجي (T_g) ودرجة الانصهار البلورية (T_m) والانتشار الحراري والتحلل الحراري [44,53]:

(1-11-2) التوصيلية الحرارية في البوليمرات

Thermal Conductivity in Polymers

تعد البوليمرات من المواد رديئة التوصيل للحرارة، وان هذا الواقع يدفع الى التعرف على احدى أهم الخصائص الحرارية التي تؤثر بصورة عامة في اغلب التطبيقات الصناعية والتي تعرف بالتوصيلية الحرارية (Thermal Conductivity) [92].

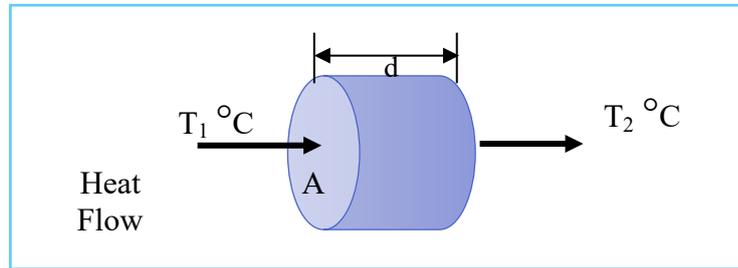
الحرارة كما نعرفها نوع من أنواع الطاقة شأنها شأن باقي الطاقات الأخرى مثل الطاقة الكهربائية والطاقة الصوتية وغيرها، وإذا توفرت حرارة فان ذلك يكون بقدر الشغل المبذول في توليدها. تنتقل الحرارة من الموضع الساخن الى الموضع البارد ببعض أو بكل من الطرائق الآتية:

1- التوصيل (Conduction).

2- الحمل (Convection).

3- الإشعاع (Radiation).

فمن الجدير بالذكر ان انتقال الحرارة بالتوصيل أو الحمل بطيء بالنسبة لانتقال الحرارة بالإشعاع لان سرعة الإشعاع هي سرعة الضوء. هنا في هذه الدراسة سوف يتم تسليط الضوء على انتقال الحرارة بالتوصيل لان انتقال الحرارة بالحمل لا يحدث الا في السوائل والغازات حيث تكون الجزيئات حرة الحركة. لذلك نفترض ان لدينا شريحة متوازية الوجهين من مادة ما وان سُمك الشريحة (d) ومساحة احد الوجهين (A) وان درجة حرارة الوجه الساخن (T_1) ودرجة حرارة الوجه الآخر (T_2) وان هذه الدرجات الحرارية تتغير وان ($T_2 < T_1$)، كما مبين في الشكل (14-2) [97].



الشكل (14-2): انتقال الحرارة من الوجه الساخن الى الوجه البارد [98].

هذه الحالة تسمى بالحالة الثابتة (Steady State) حيث تنتقل الحرارة بمعدل ثابت وعموديا على الوجهين، وان كمية الحرارة (Q) مقاسة بالجول والتي تنتقل في زمن (t) مقاس بالثانية تتناسب طرديا مع الزمن والمساحة (A) وفرق درجات الحرارة ($T_1 - T_2$)، وعكسيا مع السُمك (d)، وكما موضح في العلاقة الآتية [97]:

$$Q = k * A ((T_1 - T_2) / d) t \dots\dots\dots (16-2)$$

حيث ان:

k: ثابت يختلف باختلاف المادة ويسمى التوصيلية الحرارية أو معامل التوصيل الحراري، ويمكن تعريفه: بانه كمية الحرارة التي تنتقل بالتوصيل في الثانية الواحدة من احد وجهي شريحة ($1m^2$)

متوازية سُمكها (1m) والفرق في درجة الحرارة بين وجهيها (1K) في الحالة الثابتة، ووحدات التوصيلية الحرارية (k) هي (W/m.K) وتسمى الكمية $((T_1-T_2)/d)$ بالانحدار الحراري (Thermal Gradient) [98].

طرائق قياس معامل التوصيل الحراري:

بصورة عامة تختلف طرائق قياس التوصيلية الحرارية (k) تبعاً لنوع المادة، موصلة كانت ام عازلة وكما يأتي:

1- تقاس التوصيلية الحرارية لمادة جيدة التوصيل الحراري مثل النحاس باستعمال طريقة سيرل (Searle's Method) حيث ان مبدأ القياس هو تطبيق لقانون فورير (Fourier's Law).

2- تقاس التوصيلية الحرارية لمادة رديئة التوصيل الحراري على شكل قرص مثل المواد ذات الاساس البولييمري باستعمال طريقة قرص لي (Lee's Disc Method) وفيها يوضع الانموذج (S) بين قرصين من النحاس (A,B) ويمس القرص (B) المسخن كهربائياً (H) ثم يليه القرص (C) وبالاعتماد على كمية الحرارة المارة خلال عينة من المادة والمتمثلة بالقرص (S)، اذ يتم حساب قيمة (k) من العلاقة الآتية [99]:

$$k \{(T_B-T_A) / ds\} = e [T_A + 2/r (d_A + I /4ds) T_A + 1/2r ds T_B] \dots\dots\dots (17-2)$$

حيث ان:

e: كمية الطاقة الحرارية المارة عبر وحدة مساحة القرص لكل ثانية (W/m². K) وتحسب من العلاقة الآتية [99]:

$$IV = \pi r^2 e (T_A + T_B) + 2\pi r e [d_A T_A + ds 1/2(T_A + T_B) + d_B T_B + d_C T_C] \dots\dots\dots (18-2)$$

حيث ان:

T_A, T_B, T_C : درجة حرارة القرص (A, B, C) على التوالي وتقاس بوحدات (°C).

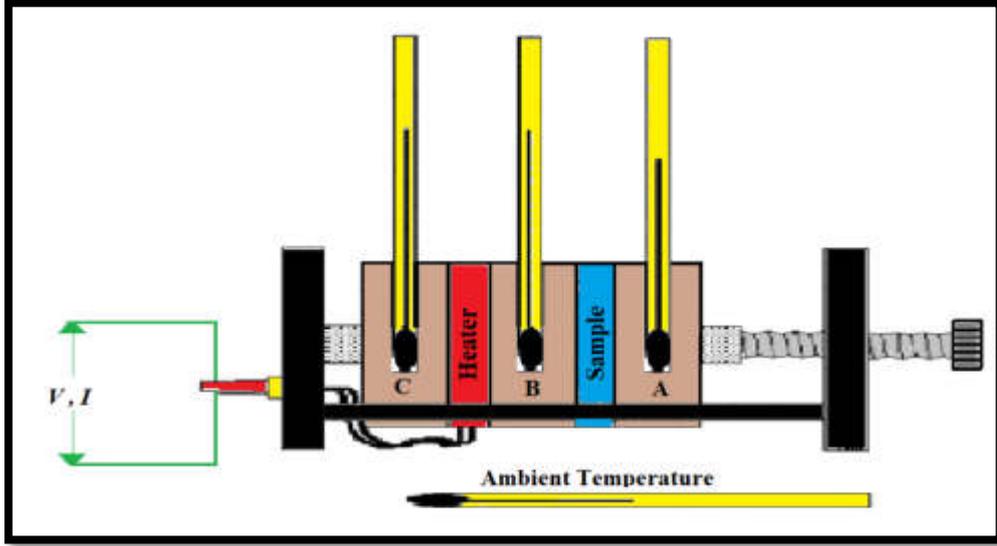
d: سُمك القرص بوحدات (mm).

r: نصف قطر القرص بوحدات (mm).

I: التيار المار في ملف المسخن بوحدات (Amper).

V: فرق الجهد على طرفي ملف المسخن بوحدات (Volt).

الشكل (2-15) يوضح مخطط جهاز قياس التوصيلية الحرارية (قرص لي). وبصورة عامة تزداد التوصيلية الحرارية مع زيادة درجة الحرارة في منطقة دون درجة الانتقال الزجاجي (T_g) ولكن فوق درجة الانتقال الزجاجي (T_g) فان التوصيلية الحرارية تبدأ بالنقصان مع زيادة درجة الحرارة [100].



الشكل (2-15): مخطط جهاز قياس التوصيلية الحرارية (قرص لي) [101].

(2-11-2) درجة الانتقال الزجاجي (T_g) Glass – Transition Temperature

من خصائص الحالة الزجاجية في البوليمرات تغير صفاتها الميكانيكية والفيزيائية عند درجة حرارة معينة تدعى بدرجة الانتقال الزجاجي والتي يرمز لها عادة بالرمز (T_g) ويمكن تعريفها بأنها الدرجة الحرارية التي يتحول عندها البوليمر من مادة صلبة قوية الى مادة مرنة وفوق درجة الانتقال الزجاجي يكون البوليمر مرناً (Flexible) [102]. تمتلك اللدائن مجموعة تحولات (Transitions) مختلفة تحت تأثير ارتفاع درجات الحرارة، فعند درجات حرارة أقل من درجة الانتقال الزجاجي تكون المادة البوليمرية عبارة عن مادة صلبة قوية، تتحول عند الانتقال الى مادة لدائنية لينة ومرنة ومن ثم تتحول الى الحالة المطاطية في حالة البوليمرات غير المطاوعة للحرارة، وسوائل عالية اللزوجة في حالة اللدائن المطاوعة للحرارة [102,103]. تعتمد درجة الانتقال الزجاجي على حركة مجاميع الذرات والجزئيات في المادة البوليمرية وبالتالي فكلما تعقد الربط وازدادت قوة الأواصر وزاد الوزن الجزيئي امتلكت المادة البوليمرية درجة انتقال زجاجي أعلى، وسنحتاج الى طاقة أعلى لتحريك المجاميع الجزيئية [103].

(3-11-2) درجة الانصهار البلورية (T_m) Crystalline Melting Temperature

تعدُّ درجة الانصهار البلورية من الثوابت الفيزيائية المهمة بالنسبة للبوليمرات المتبلورة من الناحية التكنولوجية إذ تحصل عند هذه الدرجة تغيرات كبيرة في الخصائص الفيزيائية للبوليمر مثل تغير الحجم النوعي (Specific Volume) والسعة الحرارية (Heat Capacity) ولزوجة البوليمر (Polymer Viscosity). وعليه، يمكن استخدام تغير هذه الخصائص كوسائل لقياس درجة أنصهار البوليمر المتبلور غير أن البوليمرات المتبلورة تنصهر عادة ضمن مدى من درجات الحرارة، وذلك لتغير تراكيب المناطق المتبلورة من حيث حجمها ومن حيث تكاملها. فالتراكيب البلورية غير المتكاملة والصغيرة الحجم تنصهر قبل غيرها.

إنَّ مصطلح درجة الانصهار البلورية يمثل الدرجة الحرارية التي تختفي عندها آخر التراكيب البلورية. وإنَّ درجة الانصهار البلورية تعتمد على الكثير من العوامل منها ما يتعلق بتركيب البوليمر ومنها ما يتعلق بطرق قياس درجة الانصهار البلورية مثل سرعة التسخين (Heating Rate). ولغرض الحصول على درجة انصهار بلورية دقيقة يجب أن تكون سرعة التسخين بطيئة جداً لأن درجة الانصهار المعينة تكون أعلى كلما ازدادت سرعة التسخين لأن معظم البوليمرات رديئة التوصيل للحرارة [104].

(12-2) الخصائص الكهربائية (العزلية) Dielectric Properties

يعد ثابت العزل الكهربائي للبوليمرات ذا أهمية كبيرة وقد ازدادت أهميته عندما استعملت البوليمرات بوصفها مواد عازلة لما لها من أهمية للتطبيقات الهندسية، ويقاس ثابت العزل الكهربائي من سعة المكثف الكهربائي الذي يتضمن المادة البوليمرية كوسط عازل إلى سعة المكثف الكهربائي عندما يتضمن الهواء فقط كوسط عازل [105,106]. إذ تعتمد التوصيلية الكهربائية بصورة عامة على وجود الأيونات أو الإلكترونات الحرة وحركتها، وتكون هذه الأيونات أو الإلكترونات في المواد العازلة مقيدة نتيجة الارتباط القوي بين الذرات والذي يكون بوساطة أوامر تساهمية قوية، أي بمعنى آخر أن الإلكترونات تكون عالية التمرکز في الذرات ولا تكون حرة الحركة [107]، وبسبب هذا الارتباط القوي للإلكترونات في حالة المواد العازلة ومنها البوليمرات سوف يؤدي إلى وجود فجوة طاقة كبيرة مما يسبب في توصيلية كهربائية واطئة، وتختلف هذه التوصيلية من بوليمر إلى آخر ففي البوليمرات ذات الربط التشابكي ترتفع قيمة التوصيلية الكهربائية بمقدار معين نتيجة الربط التشابكي الذي يجعل الإلكترونات تتحرك بسهولة أكبر [108].

عند تسليط فولتية على لوحين موصلين مفصولين عن بعضهما بواسطة الفراغ (Vacuum) سوف يتوقع عدم مرور تيار كهربائي ولكن عوضا عن ذلك، فالشحنة الكهربائية الناتجة بواسطة الفولتية سوف تبقى مخزونة في الدائرة الكهربائية وقيمة هذه الشحنة المخزونة بين اللوحين الموصلين تدعى السعة (Capacitance) ويرمز لها بالرمز (C) وتتناسب مع الفولتية بواسطة العلاقة الآتية [109]:

$$q = C V \quad \dots\dots\dots (19-2)$$

حيث ان:

q: الشحنة الكهربائية المخزونة بوحدات (Coulomb).

V: الفولتية عبر اللوحين الموصلين بوحدات (Volt).

C: السعة بوحدات (Coulomb/Volt) أو بوحدات (Farad).

السعة تعتمد على المادة الموجودة بين اللوحين الموصلين والحجم والشكل الهندسي والمسافة الفاصلة بينهما، فعندما يكون الفاصل هو الفراغ فالسعة تعطى بالعلاقة الآتية [109]:

$$C_o = \epsilon_o (A/d_{dis}) \quad \dots\dots\dots (20-2)$$

حيث ان:

ϵ_o : سماحية الفراغ وتساوي (8.85×10^{-12}) بوحدات (Farad/m).

d_{dis} : المسافة الفاصلة بين اللوحين الموصلين بوحدات (m).

A: المساحة السطحية للوح الموصل بوحدات (m^2).

C_o : السعة بوجود الفراغ بوحدات (Farad).

فعندما يكون السطح الفاصل بين اللوحين الموصلين مادة عازلة يحصل استقطاب في العازل ويسمح بشحنه اضافية ان تخزن وبذلك تزداد السعة حسب العلاقة الآتية:

$$C = \epsilon (A/d_{dis}) \quad \dots\dots\dots (21-2)$$

حيث ان:

ϵ : سماحية المادة العازلة بوحدات (Farad/m).

C: السعة بوجود مادة عازلة بوحدات (Farad).

لوصف قابلية المادة للاستقطاب و تخزين الشحنة الكهربائية فتعطي بواسطة السماحية النسبية (Relative Permittivity) أو ثابت العزل (Dielectric Constant) (ϵ_r). وتعرّف على انها النسبة بين سماحية المادة العازلة الى سماحية الفراغ [110].

$$\frac{\hat{C}}{C_0} = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \epsilon_r \dots\dots\dots (22-2)$$

فان سعة المتسعة (\hat{C}) المقاسة تستخدم لحساب ثابت العزل (ϵ_r') وذلك باستخدام العلاقة الآتية:

$$\epsilon_r' = \hat{C} d_{dis} / \epsilon_0 A \dots\dots\dots (23-2)$$

وإن الفقد العزلي (Dielectric Loss) ($\tan \delta$) فيعطى بالعلاقة الآتية [105]:

$$\tan \delta = \epsilon_r'' / \epsilon_r' \dots\dots\dots (24-2)$$

حيث ان:

$\tan \delta$: عامل الفقد (Dissipation Factor).

يتضح مما تقدم أن ثابت العزل الكهربائي (ϵ_r) هو كمية غير حقيقية لكنه كمية عقدية (Complex) تمتلك جزءا حقيقيا يمثل (ϵ_r') وهو مقياس السعة والاستقطاب وجزءا خياليا (ϵ_r'') وهو مقياس الفقد في العوازل.

ان التوصيلية الكهربائية المتناوبة ($\sigma_{a.c}$) يمكن ان تحسب باستخدام العلاقة الآتية [105]:

$$\sigma_{a.c} = \omega \epsilon_0 \epsilon_r'' \dots\dots\dots (25-2)$$

نحصل من العلاقة (25-2) على علاقة تربط بين التوصيلية الكهربائية المتناوبة ($\sigma_{a.c}$) وفقدان العازل (ϵ_r'') والتردد الزاوي ($\omega = 2\pi f$) [111]. ويجدر أن نوضح هنا أمرا بالغ الأهمية قد يغفله الكثيرون وهو أن التوصيلية الكهربائية المبينة بالعلاقة (25-2) لاتمثل التوصيلية الكهربائية في المعادن وأشباه الموصلات بل تمثل التوصيلية الكهربائية المتناوبة ($\sigma_{a.c}$)، التي هي مقياس للقدرة المفقودة عند تسليط مجال كهربائي متناوب عبر العازل وليست هي مقياس لكمية الشحنات الكهربائية التي يمكن ان تنتقل خلال المادة من قطب إلى آخر. إذن فالتوصيلية الكهربائية المتناوبة ($\sigma_{a.c}$) في العازل هي مقياس للحرارة التي قد تتولد نتيجة دوران ثنائيات الأقطاب في مواضعها، أو اهتزاز الشحنات الكهربائية بتغير اتجاه المجال الكهربائي المتناوب، ولهذا نجد أن التوصيلية الكهربائية المتناوبة ($\sigma_{a.c}$) في العلاقة (25-2)

تعتمد على التردد، ويمكن أخذ التوصيلية الكهربائية التي تنجم عن انتقال الشحنات الكهربائية خلال المادة عندما يكون التيار الكهربائي مستمرا أو عند الترددات الواطئة، وفي كل الأحوال يمكن عدّ التوصيلية الكهربائية للمادة مكوّنة من مركبتين:

$$\sigma = \sigma_{a.c} + \sigma_{d.c} \dots\dots\dots (26-2)$$

حيث ان:

$\sigma_{d.c}$: توصيلية المادة الكهربائية للتيار المستمر.

$\sigma_{a.c}$: توصيلية المادة الكهربائية للتيار المتناوب والتي تعبر عن الفقد في العازل.

يعتمد ثابت العزل الكهربائي على الاستقطاب (Polarization) والذي يحصل داخل المادة العازلة. ويعتمد مقدار ثابت العزل الكهربائي للمادة العازلة على عدة عوامل وهي:

Temperature

1- درجة الحرارة

عند زيادة درجة حرارة المواد العازلة اللاقطبية فان نسبة عدد الجزيئات لوحدة الطول تتناقص بسبب التمدد الحراري لتلك المواد وبالتالي يتناقص مقدار ثابت العزل الكهربائي. اما بالنسبة للمواد العازلة القطبية فان ثنائيات الاقطاب تجد صعوبة في تدوير نفسها عند درجات الحرارة الواطئة جداً، وعند زيادة درجة حرارتها فان دوران هذه الثنائيات يصبح سهلاً وهذا يزيد من قيمة ثابت العزل الكهربائي لتلك المادة. اما عند الاستمرار في زيادة درجة الحرارة فان درجة ترتيب ثنائيات الاقطاب تقل بسبب الاهتزاز الحراري مما يؤدي إلى تناقص في مقدار ثابت عزلها الكهربائي [112].

Frequency

2- التردد

ان تناوب المجال الكهربائي المتمثل بتردد الفولتية المسلطة على المادة العازلة ينعكس تأثيره في مدى تأثير استقطابية المادة بمدى تردد الفولتية على الخصائص العزلية للمادة من خلال التغيرات في استقطابية المادة وان هذا التغير يعتمد على نوع الاستقطاب وكما يأتي [112]:

Electronic Polarization

أولاً: الاستقطاب الإلكتروني

يُعرف بأنه إجهاد في الذرة، يحدث نتيجة لحصول تشويه في توزيع الشحنة الكهربائية، كما مبين في الشكل (a-16-2)، ناشئ عن وجود مجال كهربائي خارجي، يعمل على إزاحة الإلكترونات (الشحنات الكهربائية السالبة الموجودة في أغلفة الذرة) بالاتجاه المعاكس للمجال الكهربائي في حين تبقى نواة الذرة (الشحنة الكهربائية الموجبة) باتجاه المجال الكهربائي نفسه، وبالتالي يحدث

الاستقطاب بسبب تولّد ثنائيات قطبية محتثة، ولا يعتمد الاستقطاب الإلكتروني على درجة الحرارة، ويعرف هذا النوع من الاستقطاب بالاستقطاب البصري، لأنّ حدوثه يتمّ عند الترددات العالية (الترددات البصرية)، أو الأشعة فوق البنفسجية (Ultraviolet Ray) [113,114]. ويتناسب عزم ثنائي القطب (\vec{m}_e) الناتج من الاستقطاب الإلكتروني طردياً مع شدة المجال الكهربائي المسلط (\vec{E})، ويمكن تمثيل ذلك بالعلاقة الآتية [115]:

$$\vec{m}_e = \alpha_e \vec{E}_e \dots \dots \dots (27-2)$$

حيث إن: α_e : ثابت الاستقطابية الإلكترونية.

هذا النوع من الاستقطاب يحدث خلال مدة زمنية وجيزة بحدود (10^{-15} s) [115].

Ionic Polarization

ثانياً: الاستقطاب الأيوني

يعرّف بأنه إجهاد إلكتروني يتولد في مركب كيميائي يمتلك الصفة الأيونية، كما مبين في الشكل (b-16-2)، ويحدث الاستقطاب الأيوني عند وقوع المادة تحت تأثير مجال كهربائي، إذ يعمل المجال الكهربائي على تغيير طول الأواصر الأيونية عن طريق إزاحة الأيون الموجب إلى اليمين باتجاه المجال الكهربائي والأيون السالب إلى اليسار [113,114]، ونتيجة لذلك يتولد صافي عزم ثنائي القطب في الجزيئة ويتناسب عزم ثنائي القطب (\vec{m}_i) طردياً مع شدة المجال الكهربائي كما في العلاقة الآتية [115]:

$$\vec{m}_i = \alpha_i \vec{E} \dots \dots \dots (28-2)$$

حيث إن: α_i : ثابت الاستقطابية الأيونية.

لا يعتمد هذا النوع من الاستقطاب على درجة الحرارة، ويعرف هذا النوع من الاستقطاب باستقطاب الأشعة تحت الحمراء (Infrared Polarization)، أو الاستقطاب الذري، لأنه يحدث نتيجة للإزاحة النسبية الحاصلة في الذرات نفسها داخل الجزيئة، وضمن مدى التردد الواطئ (Low Frequency). لا يمكن فصل الاستقطاب الذري عن الاستقطاب الإلكتروني إلا في حالة الجزيئة أحادية الذرة (Monatomic Molecule) إذ أن الاستقطاب الأيوني لا يحدث في مثل هذه الجزيئات وإن الزمن المستغرق لتكوين ثنائيات الأقطاب هو بحدود (10^{-13} - 10^{-12}) s [113,114].

ثالثاً: الاستقطاب الاتجاهي

Orientational Polarization

هو ذلك النوع من الاستقطاب الذي يحدث في الجزيئات التي تمتلك عزمًا ثنائي القطب الدائم حتى في حالة غياب المجال الكهربائي، كما مبين في الشكل (2-16-c)، وتدعى هذه الجزيئات بالجزيئات القطبية (Polar Molecules) أو المواد الثنائية القطبية، وفي هذه المواد وعلى الرغم من أن الجزيئات المنفردة فيها تمتلك عزوماً دائمية فان صافي الاستقطاب يكون صفراً، بسبب أن العزوم الجزيئية تكون عشوائية الاتجاهات مما يؤدي إلى إلغاء عزوم بعضها البعض. أما في حالة تسليط مجال كهربائي على المواد الثنائية القطبية فان الثنائيات ستميل باتجاه المجال الكهربائي إذ يعمل المجال الكهربائي على تراصف الجزيئات (الثنائية القطبية) باتجاهه [113,114]، ومن المعروف أنه بزيادة درجة الحرارة تزداد صعوبة التحكم في توجيه الجزيئات من قبل المجال الكهربائي لذا فان هذا النوع من الاستقطاب (\bar{m}_d) يعتمد بشكل كبير على درجة الحرارة وكما في العلاقة الآتية [115]:

$$\bar{m}_d = \sqrt{3\alpha_d k_B T} \dots \dots \dots (29-2)$$

حيث إن:

α_d : ثابت الاستقطابية الاتجاهية.

k_B : ثابت بولتزمان (1.38×10^{-23} J/K).

T: درجة الحرارة المطلقة.

و إن زمن الاسترخاء (Relaxation Time) المرتبط بهذا النوع من الاستقطاب طويل نسبياً، اعتماداً على شدة المجال الكهربائي ونوع المادة [115].

رابعاً: الاستقطاب البيني

Interfacial Polarization

هذا النوع من الاستقطاب يحدث في المواد المتغايرة الخصائص (Heterogeneity)، كما مبين في الشكل (2-16-d)، نتيجة لاحتواء معظم بلورات هذه المواد على عيوب (Defects) والتي قد تكون على شكل ذرات شائبة أو فراغات في البلورة أو فقاعات هوائية في السائل أو مناطق غير متجانسة من المادة. وقد تتخلل المادة حواجز تنجم عن هذه العيوب أو قد تكون الحواجز ناجمة عن وجود شقوق. وان وقوع مثل هذه الشوائب تحت تأثير مجال كهربائي، ولكونها مشحونة سيمكّنها ذلك من الانتقال خلال البلورة مما يجعلها سهلة الاصطياد من قبل العيوب الأخرى، أو أنها تتراكم عند هذه العيوب، وبالتالي فأنها تؤدي إلى خلق تراكم محلي للشحنات الكهربائية، والذي يعمل على حث شحنات كهربائية معاكسة في الجهة

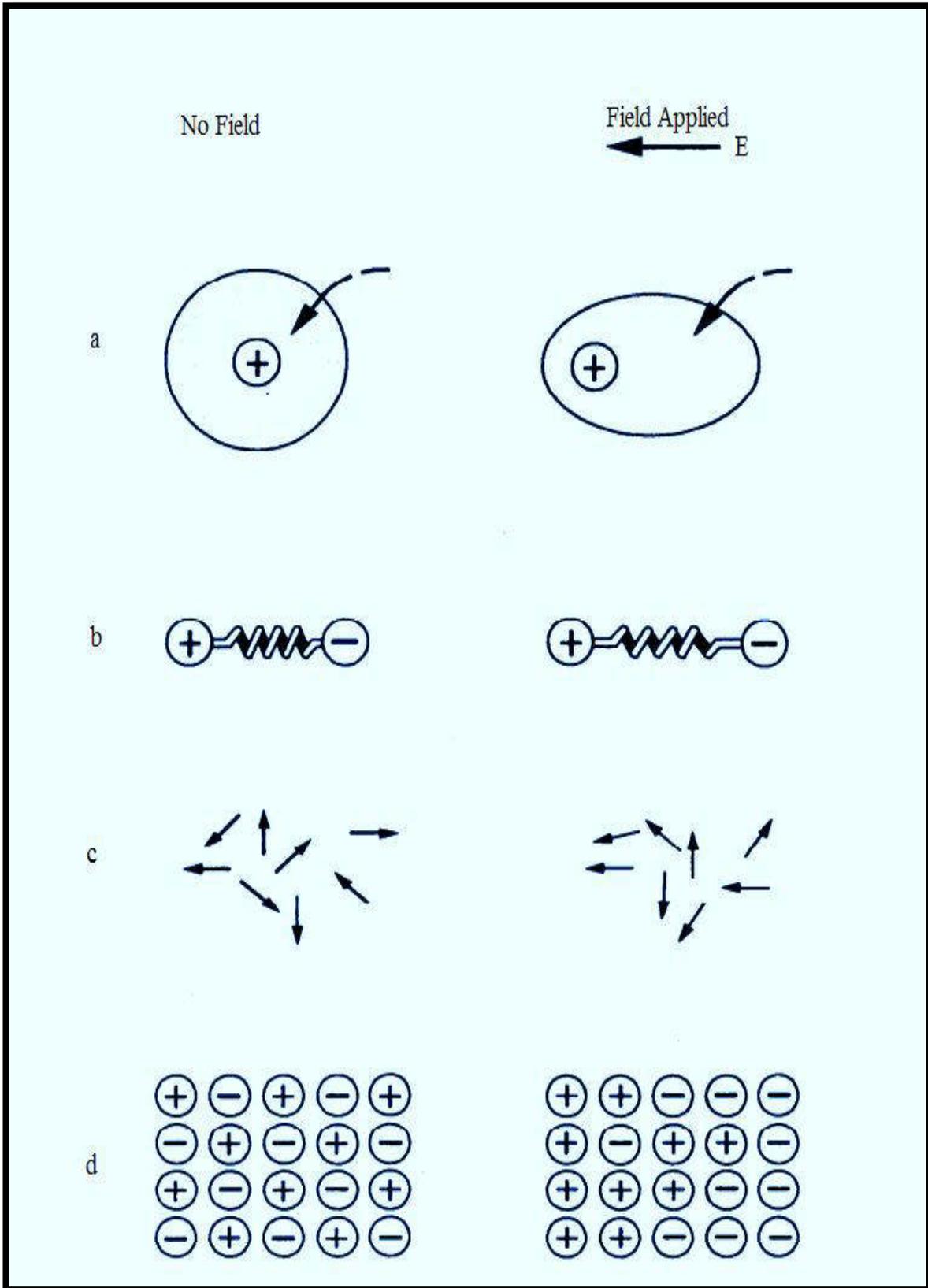
الأخرى مؤدية بذلك إلى نشوء ثنائيات قطبية في المادة، وهذه الثنائيات سوف لا تقتصر على ذرة واحدة، أو جزيئة بل تمتد ضمن مناطق كبيرة في المادة. ويعتمد هذا النوع من الاستقطاب على مقدار تجانس المادة، ونسبة خلوها من العيوب بخلاف الأنواع الأخرى من الاستقطاب التي تعتمد على التركيب الكيميائي ومكوناتها، يحدث هذا النوع من الاستقطاب في الترددات الراديوية، وقد تمتد حتى الترددات الواطئة دون الموجات السمعية، اعتمادا على نوع العيوب أو فقد التجانس المسبب للاستقطاب وإن الزمن الذي يستغرق لحدوث ظاهرة الاستقطاب البيئي (\bar{m}_s) هي بحدود ثوان أو دقائق [113,114]، ينشأ عزم ثنائي الأستقطاب بوحدة الحجم للمادة العازلة من خلال إسهام الأنواع المختلفة للاستقطاب، ويمكن تمثيله بمجموعة الاستقطابات المختلفة إذ ينشأ كل منها بميكانيكية خاصة كما هو مبين في العلاقة الآتية [115]:

$$\vec{P} = \frac{\sum \bar{m}_e + \sum \bar{m}_i + \sum \bar{m}_d + \sum \bar{m}_s}{V} \dots\dots\dots(30-2)$$

$$\vec{P} = \vec{P}_e + \vec{P}_i + \vec{P}_d + \vec{P}_s \dots\dots\dots(31-2)$$

حيث إن:

$\vec{P}_e, \vec{P}_d, \vec{P}_i, \vec{P}_s$: الاستقطاب الالكتروني والايوني والاتجاهي والبيئي على التوالي [116].



الشكل (16-2): أنواع الاستقطاب: (a) الإلكترونوني (b) الأيوني (c) الاتجاهي (d) البييني [116].



الفصل الثالث

الجزء العملي

Introduction

(1-3) المقدمة

يتضمن هذا الفصل الجانب العملي للبحث، ويشمل محورين رئيسيين، بعد التعرف على المواد الأولية المستعملة في تحضير المادة المترابكة وأهم خصائصها ومميزاتها، فالمحور الأول يتعلق بأسلوب تحضير العينة مع عرض تخطيطي لإشكال هذه العينات وأبعادها مع صور توضيحية لها والأنظمة العالمية المتبعة لتحضير العينات المستعملة في البحث، أما المحور الثاني فقد تضمن تعريفاً للأجهزة المستعملة لأجراء الفحوصات و الاختبارات المعتمدة في البحث.

لقد تم إجراء مجموعة من الاختبارات والفحوصات للمترابكات البوليمرية، وهي الاختبارات الميكانيكية والتمثلة بـ (الصدمة و الصلادة والانحناء (ثلاثي النقط))، والفحوصات الحرارية والتمثلة بـ (معامل التوصيل الحراري (k) ودرجة الانتقال الزجاجي (T_g) ودرجة الانصهار البلورية (T_m))، والفحوصات الكهربائية والتمثلة بـ (ثابت العزل الكهربائي (ε')).

Materials Used

(2-3) المواد المستعملة

في الدراسة الحالية تم استخدام المواد الأتية:

Matrix Material

(1-2-3) مادة الأساس

أستخدم راتنج الايبوكسي كمادة اساس في المادة المترابكة البوليمرية، والراتنج المستخدم من نوع (Nitofill, EPLV) المصنع في شركة (Fosroc Jordan.) وهو عبارة عن المكونين (A and B) حيث المكون A هو راتنج الايبوكسي والمكون B هو المصلد للراتنج (Metaphenylene Diamic)، والأيبوكسي عبارة عن سائل شفاف متوسط اللزوجة له قابلية التصاق عالية وقليل الأنكماش قابل للمعالجة الى الحالة الصلبة عند تصليده بإضافة محلول مصلد (Hardener) والمصلد عبارة عن مادة سائلة خفيفة القوام شفافة (عديمة اللون) تضاف بنسب دقيقة معروفة مسبقاً (3:1) (أي كل 3gm من الأيبوكسي يضاف إليه 1gm من المصلد) وأن المدة التي يستغرقها الراتنج للتصلب هي أكثر من (3) ساعات عند درجة حرارة الغرفة إذ يتم تركها لمدة أسبوعين وذلك لإتمام المعالجة (Full Curing) وبعدها يتم تقطيع العينات ضمن المواصفات القياسية للاختبارات والفحوصات المستعملة في البحث. يمتاز الايبوكسي المستعمل بكون لزوجته واطنة (Low Viscosity) وكثافته واطنة (Low Density) كما انه يمتلك خاصية التصاق عالية (High Adhesive) ومقاومة كيميائية عالية (High Chemical Resistant) ومعدل زحف واطى (Low Creep). والجدول (1-3) يبين بعض خصائص الايبوكسي المستخدم.

الجدول (1-3): بعض خصائص راتنج الايبوكسي المستخدم.

Properties of Epoxy Resin	
Test Mehtod	Typical Results
Compressive Strength (BS 6319)	N/mm ² 70.0 @ 20 °C 93.0 @ 35 C
Tensile Strength (BS 6319)	26.0 N/mm ² @ 35 °C
Flexural Strength (BS 6319)	63.0 N/mm ² @ 35 °C
Young's Modulus in Compression	16 GPa
Pot Life	90 minutes @ 20 °C
Specific Gravity	1.04
Mixed Viscosity	1.0 poise @ 35 °C

Reinforcement Materials

(2-2-3) مواد التدعيم

تم في هذا البحث استخدام ثلاث انواع من الدقائق النانوية وهي اوكسيد المغنيسيوم (MgO-Nano Particles) وأوكسيد الزركونيوم (ZrO₂-Nano Particles) و أوكسيد النحاس (CuO-Nano Particles). والجدول (2-3) يبين بعض خصائص ومنشأ الدقائق النانوية المستخدمة.

الجدول (2-3): بعض خصائص ومنشأ الدقائق النانوية المستخدمة.

Particles	Origin	Manufacturer	Purity	Particle Size (nm)
Mgo	German	Nanjing Nano Technology	99.9%	30-40
ZrO ₂	China	Hongwu Nanometer	99.9%	40-50
CuO	USA	US Research Nanomaterials, Inc.	99.5%	50

Specimens Preparation

(3-3) تحضير العينات

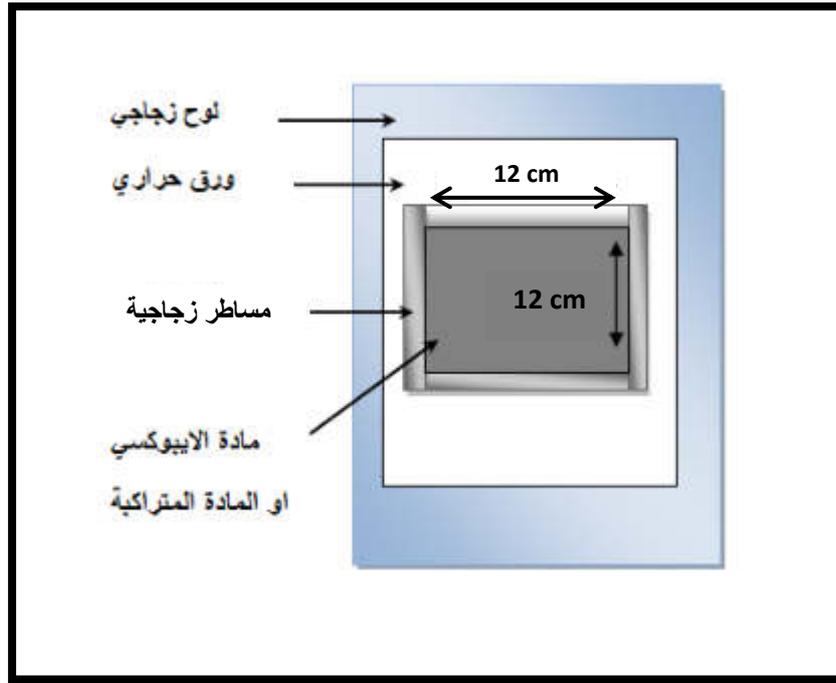
تم اعتماد طريقة القولبة اليدوية (Hand Lay-Up Molding) في عملية تحضير العينات، وتم اختيار هذه الطريقة دون الطرائق المعقدة الأخرى لسهولة التصنيع بهذه الطريقة وإمكانية تصنيع نماذج بأحجام مختلفة وبحسب الحجم المطلوب والأبعاد المطلوبة، والكلفة بهذه الطريقة تكون أقل من بقية طرائق التصنيع الأخرى.

إن عملية تحضير العينات تتم بعدة خطوات وهي كما يأتي:

Create Templates

1- تهيئة القوالب

وتشتمل إعداد قالب خاص لعملية الصب وهو عبارة عن لوح من الزجاج يمثل قاعدة القالب مغلف بالورق الحراري الشفاف (وذلك لمنع التصاق الراتنج على اللوح الزجاجي وسهولة إخراج القطع المصنعة) بحيث يكون اللوح موضوعاً على درجة عالية من الاستواء (إذ يتم التأكد من استواء السطح بواسطة ميزان التسوية)، إما جوانب القالب فتتكون من مساطر زجاجية بالسلك المطلوب مغلفة بالفابلون اللاصق الحراري بوصفه مادة عازلة وذلك لضمان عدم التصاق الراتنج على المساطر الزجاجية، إذ يصبح شكل القالب، كما مبين في الشكل (1-3).



الشكل (1-3): القالب المستعمل في تصنيع العينات.

Preparation and Molding Samples

2- تحضير وصب العينات

وتتلخص طريقة تحضير وصب العينات بالخطوات الآتية:

- a-** يتم وزن كمية من مادة الايبوكسي على وفق حجم القالب المصمم وتتم إضافة المصلد بنسبة (3:1).
- b-** يتم وزن كمية من مادة التدعيم (الدقائق النانوية) بحسب الكسر الوزني المطلوب.
- c-** تبدأ بعدها عملية مزج مادة التدعيم والمادة الأساس عند درجة حرارة الغرفة ويخلط المزيج بشكل مستمر وببطء لتجنب حدوث الفقاعات خلال عملية المزج، ويستمر المزج مدة (8-10min) حتى يتجانس الخليط مع ملاحظة البدء بارتفاع درجة حرارة المزيج الذي يعد دليلاً على بدء عملية التفاعل، من المهم للخليط أن يمتلك لزوجة عملية معينة لحماية الدقائق النانوية من الترسيب، إذ ان من المعروف ان المواد النانوية تميل الى التكتل بسبب المساحة السطحية العالية لها، ثم يخلط محلول المادة النانوية ومادة الايبوكسي بأستعمال حمام الموجات فوق الصوتية (Ultrasonic Bath) لمدة (1h) للحصول على توزيع متجانس من المادة

النانوية داخل المحلول ومن ثم يخلط أيضاً هذا المحلول مع محلول المصلد (Hardener) بأستعمال الخلاط المغناطيسي (Magnetic Stirrer) لمدة $(\frac{1}{2} h)$.

d- يتم صب المزيج السائل في منتصف القالب (لتجنب حدوث فقاعات هوائية في المصبوبة التي تسبب حدوث الفشل فيها) بحيث ينساب إلى كل مناطق القالب بصورة مستمرة ومنتظمة إلى أن يمتلئ القالب إلى المستوى المطلوب وهنا يجب أن يكون القالب بشكل مستو تماماً.

e- تترك المصبوبة في القالب مدة (24h) لكي تتصلب بشكل نهائي قبل اخراجها من القالب ثم بعد إخراجها تترك لمدة (15) يوماً وهذه العملية مهمة لإكمال البلورة.

Cutting Technique

(4-3) تقنية التقطيع

في الوسائل القديمة يتم التقطيع عن طريق استخدام الطرق اليدوية أو الأجهزة التقليدية (كالكوسره) التي غالباً ماتسبب الشروخ في العينة قبل تسليط الاجهادات عليها المراد دراستها وعلاوة على حقيقة أن هذه الطرق مهما اجتهدنا في تحقيق هدف الوصول من خلالها الى ادق القياسات وضمن المواصفات القياسية (ASTM, ISO) للعينات المقطعه لن نصل الى ذلك الهدف وعلية تم استخدام ماكنة التقطيع الليزرية (CNC)، كما مبينة صورتها في الشكل (2-3) والتي يعمل على برمجتها بأعطاء الابعاد القياسية ويتم التقطيع بشكل نظامي وتمتاز بدقة عالية وتتلخص طريقة هذه التقنية بما يأتي:

1- يتم تثبيت القطعة على الفرش أي المنضده باستخدام المنكنة أو المثبتات حسب نوع القطعة وتكون محاطة بجدار واقٍ من تطاير الرايش وسائل التبريد ويكون مثبتاً على القاعدة المرتبطة بالجسم العام للماكنة وأما حركتها فنتم بأستخدام محركات كهربائية ويتم السيطرة عليها من خلال منظومة السيطرة العددية (NC) والتي تحتوي على شاشة وجهاز السيطرة اليدوي (Hand Wheel) والموجود في صندوق السيطرة.

2- رأس التشغيل ويكون مثبتاً على الجزء العمودي من الماكنة وتكون حركته الى الأعلى والأسفل ومثبتاً فيه محور الدوران والذي يستقبل السرعة المطلوبة من (NC) بواسطة البرنامج أو عند التشغيل اليدوي بأستخدام مزولة تحكم السرعة، وكذلك مثبت فيه أداة مسك العدة والمراد منها تشغيل الهولدر بها (وتعمل بضغط الهواء).

3- عدة القطع (سكينة القطع) وتكون على عدة اشكال ويتم اختيارها حسب الحاجة اليها، وتصنف ايضاً حسب اقطارها وعدد شفرات القطع التي تثبت فيها.

4- كابينة السيطرة الكهربائية والتي تضم جميع الأجهزة الكهربائية الخاصة بالماكنة.

5- بورد الشاشة (Oberation Banel) ويحتوي على أزرار التحكم والسيطرة على الماكينة، ومن خلال تلك الأزرار تثبت القياسات ويتم تقطيع العينة حسب الأبعاد المطلوبة. من خلال شكل العينات التي تبدو للعين المجردة ومع قياسها بالفيرنية يتم التأكد من أنها مطابقة للأبعاد المطلوبة.



الشكل (2-3): صورة ماكينة التقطيع الليزرية (CNC).

عموماً ان العينات المستخدمة في الاختبارات والفحوصات تم أعدادها حسب مواصفات النظام القياسي وكما يأتي:

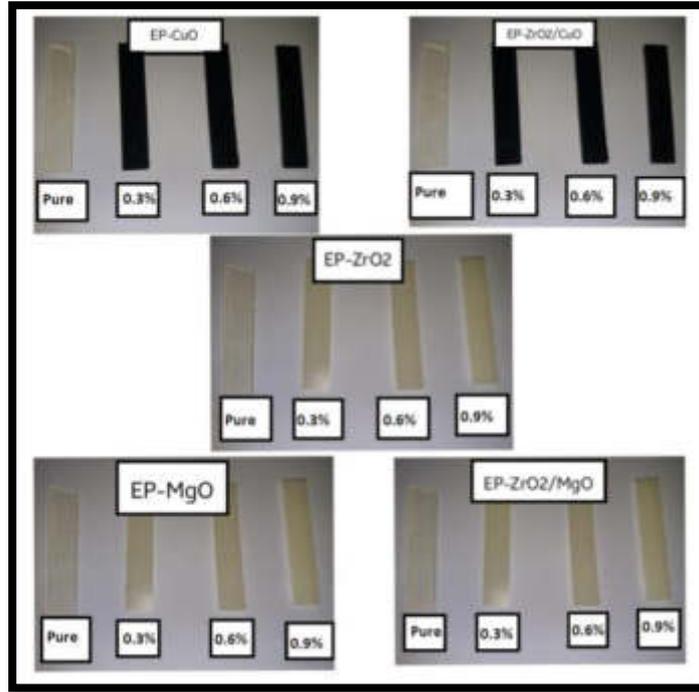
Mechanical Tests

1- الاختبارات الميكانيكية

Impact Test

a- اختبار الصدمة

لغرض اجراء اختبار صدمة جاري وحساب طاقة الكسر تم تقطيع العينات بطول (25 mm) وعرض (10 mm)، كما مبينة صورتها في الشكل (3-3).



الشكل (3-3): صور عينات اختبار صدمة جاريبي.

Hardness Test

b- اختبار الصلادة

تم استخدام العينات قبل التقطيع لهذا الاختبار بطول (12 cm) وعرض (12 cm)، كما مبينة صورتة في الشكل (3-4) لعينة الايبوكسي النقي.

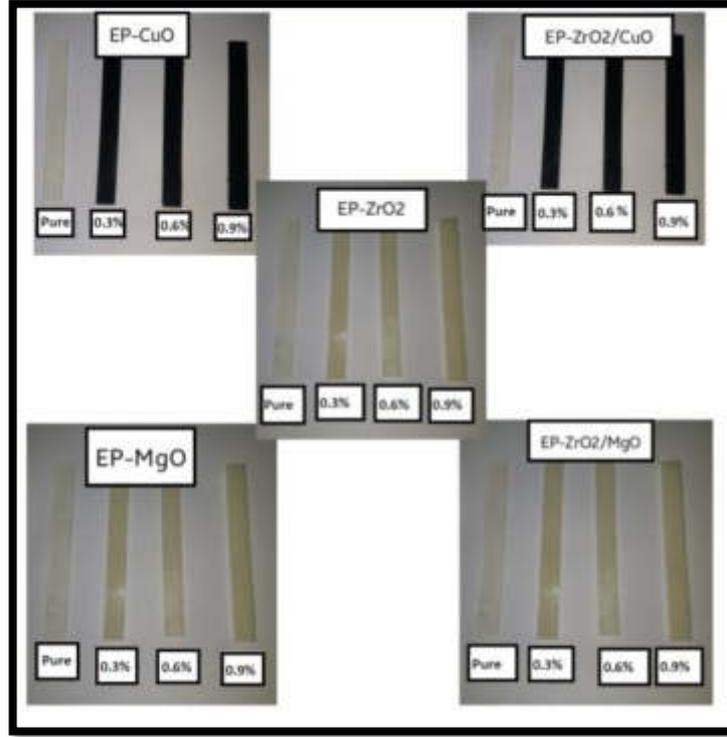


الشكل (3-4): صورة عينة الايبوكسي النقي قبل التقطيع.

Bending Test

c- اختبار الانحناء

لغرض اجراء اختبار الانحناء ثلاثي النقاط وحساب معامل يونك حي تم تقطيع العينات بطول (55 mm) وبعرض (10 mm)، كما مبينة صورها في الشكل (5-3).



الشكل (5-3): صور عينات اختبار الانحناء ثلاثي النقاط.

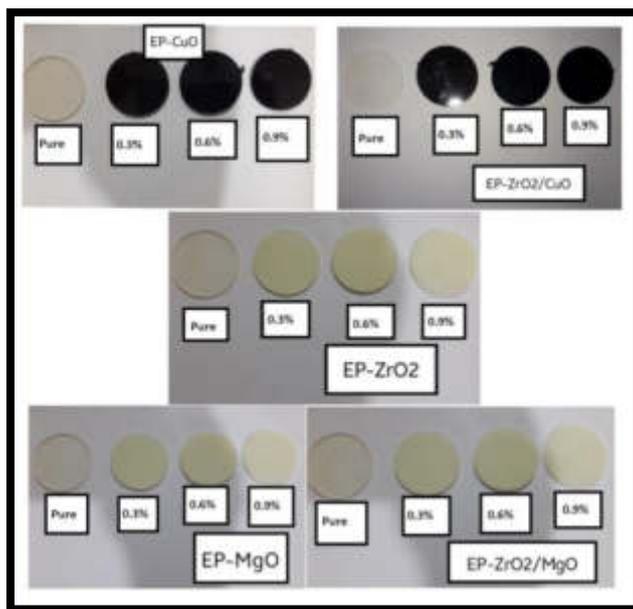
Thermal Tests

2- الفحوصات الحرارية

Thermal Conductivity Test

a- فحص التوصيلة الحرارية

تم تقطيع العينات بقطر (40mm) وسمك (2.5mm)، كما مبينة صورها في الشكل (6-3)، وهذه العينات خاصة بجهاز قرص لي (Lee's Disc) المستعمل بهذا الفحص.

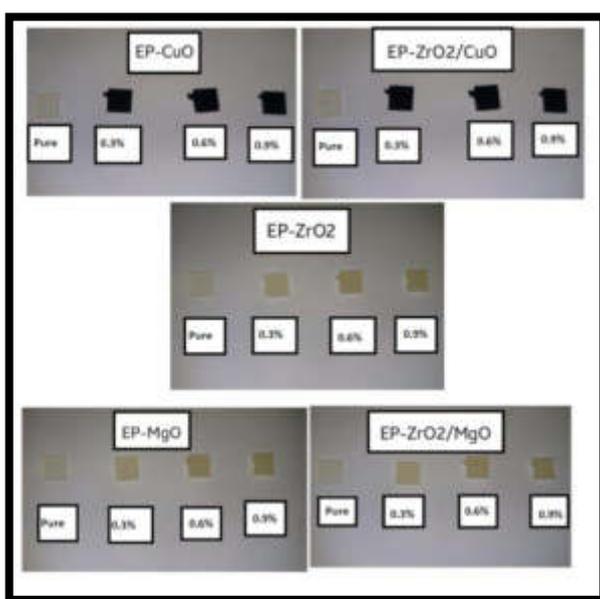


الشكل (3-6): صور عينات فحص التوصيلة الحرارية.

b- فحص المسعر الحراري التفاضلي

Differential Scanning Calorimetry (DSC) Test

تم تقطيع العينات بطول (1cm) وعرض (1cm)، ومن ثم يؤخذ نموذج منها بوزن (10 mg) لغرض اجراء الفحص، كما مبينة صورها في الشكل (3-7).

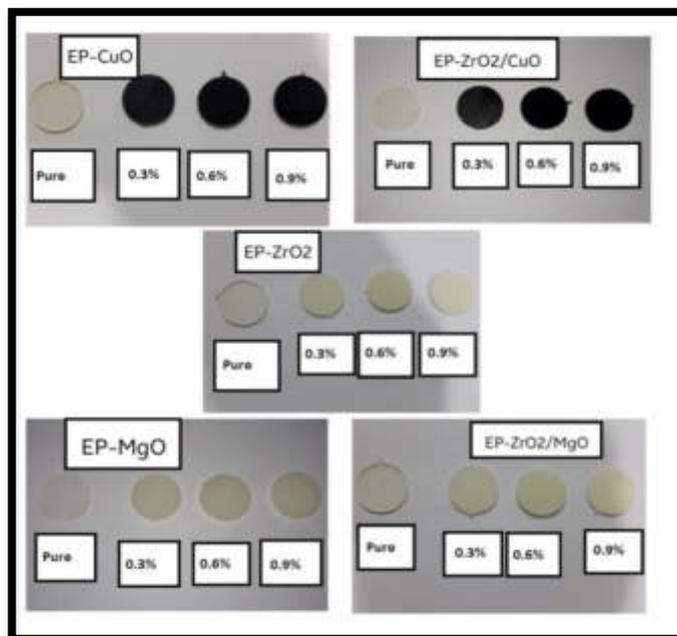


الشكل (3-7): صور عينات فحص المسعر الحراري التفاضلي DSC.

Electrical Test

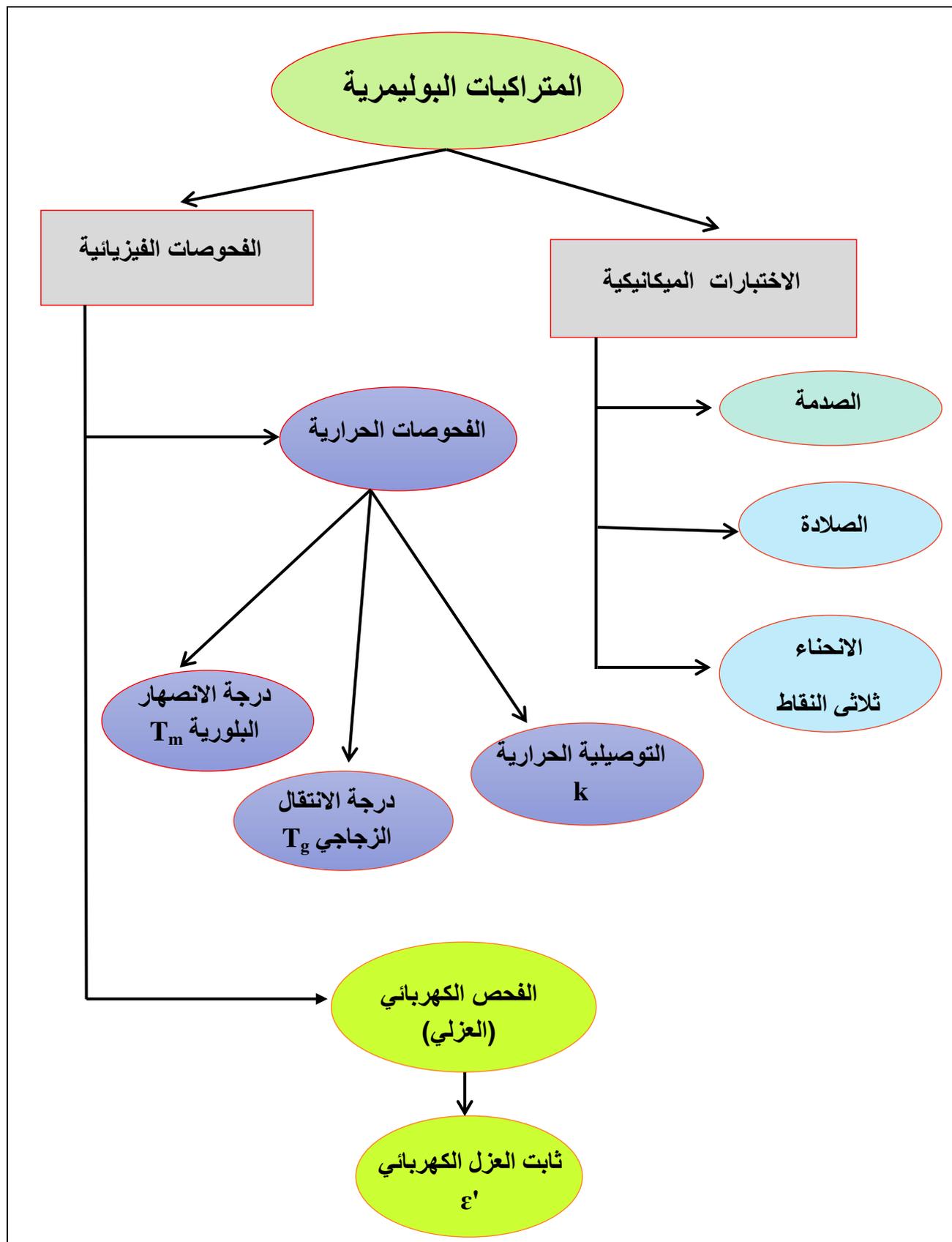
c- الفحص الكهربائي (العزلي)

تم تقطيع العينات بقطر (20mm) وسمك (2.5mm)، كما مبينة صورها في الشكل (8-3).



الشكل (8-3): صور عينات الفحص الكهربائي.

الشكل (9-3) يوضح مخطط الاختبارات والفحوصات المنجزة.



الشكل (9-3): مخطط الاختبارات والفحوصات المنجزة.

(5-3) الاختبارات (الفحوصات) والاجهزة المستخدمة

The Tests and Used Equipment

يتضمن هذا الجزء استعراضاً لمجموعة الاجهزة الخاصة بالاختبارات الميكانيكية والفحوصات الفيزيائية المستخدمة في الدراسة وطريقة إجراء الفحص بها.

Impact Test Instrument

(1-5-3) جهاز اختبار الصدمة

لغرض حساب الطاقة المطلوبة للكسر والتي يمكن حساب مقاومة الصدمة للمادة من خلالها، تم استخدام جهاز اختبار متانة الصدمة - چاربي (Charpy Test) الموضح صورته في الشكل (3-10) والمصنع من قبل شركة (TMI (Test Machines INC. AMITYVILLE, New York Machine) في الولايات المتحدة الامريكية والموجود في الجامعة التكنولوجية / قسم العلوم التطبيقية. يثبت في هذا الجهاز بندول مثبت بطرفه مطرقة، حيث أستخدم البندول بطاقة (5Joule) عن طريق رفع المطرقة الى أقصى ارتفاع وتثبيت جيداً. ويتكون الجهاز أيضاً من لوحة التدريجات الخاصة لحساب الطاقة المصروفة لكسر العينة وتكون هذه اللوحة متصلة بالطرف الأعلى من البندول وتوضع العينة عند عتبة صغيرة في الموقع المخصص لها بين ألمسنتين في أسفل الجهاز، وبعدها يتم تصفير لوحة التدريجات (مقياس الطاقة أولاً) قبل البدء بالاختبار ثم يحرر البندول باستعمال العتلة المثبتة على المقياس وبحركة تارجحية تتحول الطاقة الكامنة الى طاقة حركية يفقد جزء منها في كسر العينة فيقرأ مؤشر المقياس قيمة طاقة كسر العينة ومن ثم حساب متانة الصدمة.



الشكل (3-10): صورة جهاز اختبار متانة الصدمة.

Hardness Test Instrument

(2-5-3) جهاز اختبار الصلادة

وفي الدراسة الحالية تم قياس الصلادة للعينات بطريقة شور (D) والجهاز المستعمل لهذا الاختبار هو من نوع (Shore D Hardness Tester TH210) والموجود في الجامعة التكنولوجية / قسم العلوم التطبيقية، ويكون عبارة عن جهاز يدوي يتكون من نابض مُحمل باداة غرز بشكل ابرة تخترق سطح العينة وبعدها يسجل الرقم الذي يظهر على شاشة الجهاز (طريقة الأرتداد، طاقة ممتصة تظهر على الشاشة). والشكل (11-3) يوضح صورة جهاز صلادة شور (D) المستخدم.

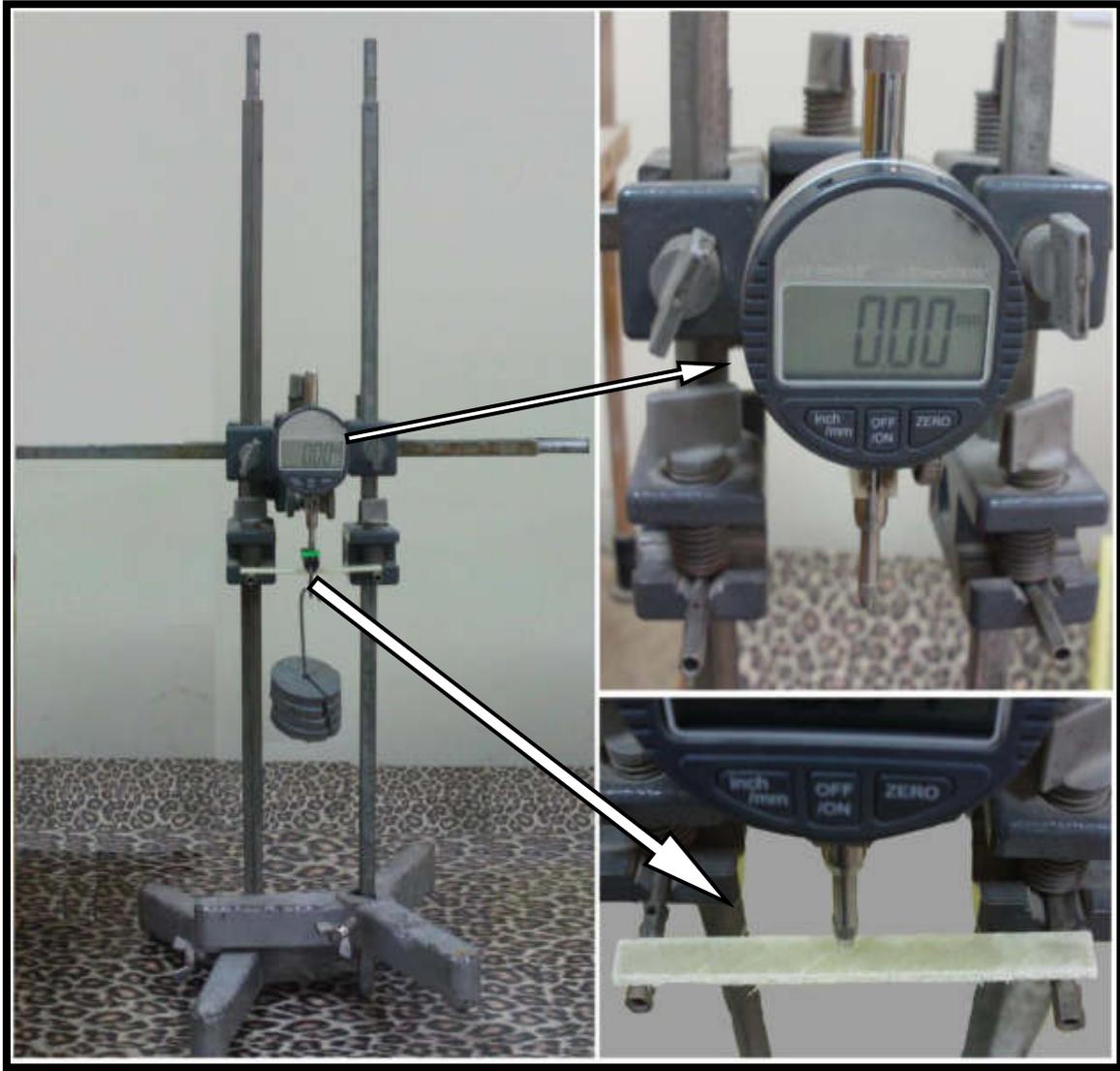


الشكل (11-3): صورة جهاز اختبار صلادة شور (D).

Bending Test Instrument

(3-5-3) جهاز اختبار الانحناء

استخدم في هذا الاختبار الجهاز الموضحة صورته في الشكل (12-3) والمصنع من قبل شركة (Phywe) الالمانية الموجود في الجامعة التكنولوجية / قسم العلوم التطبيقية والذي تثبت فيه العينة من طرفيها على مرتكزين وتعلق الكتل (Masses) عليه بصورة تدريجية على الحامل المثبت عند منتصف العينة مما يسبب انحناءها تدريجياً ويوجد فوق منتصف موضع العينة مؤشر مقياس الانحراف الرقمي (Digital Gauge) ومن خلاله يمكن قراءة مقدار الانحراف (Deflection) الحاصل للعينة عند وضع كل ثقل وبصورة تدريجية كما ذكرنا سابقاً ومن ثم يتم رسم شكل بياني بين الكتل ومقدار الانحراف الحاصل.



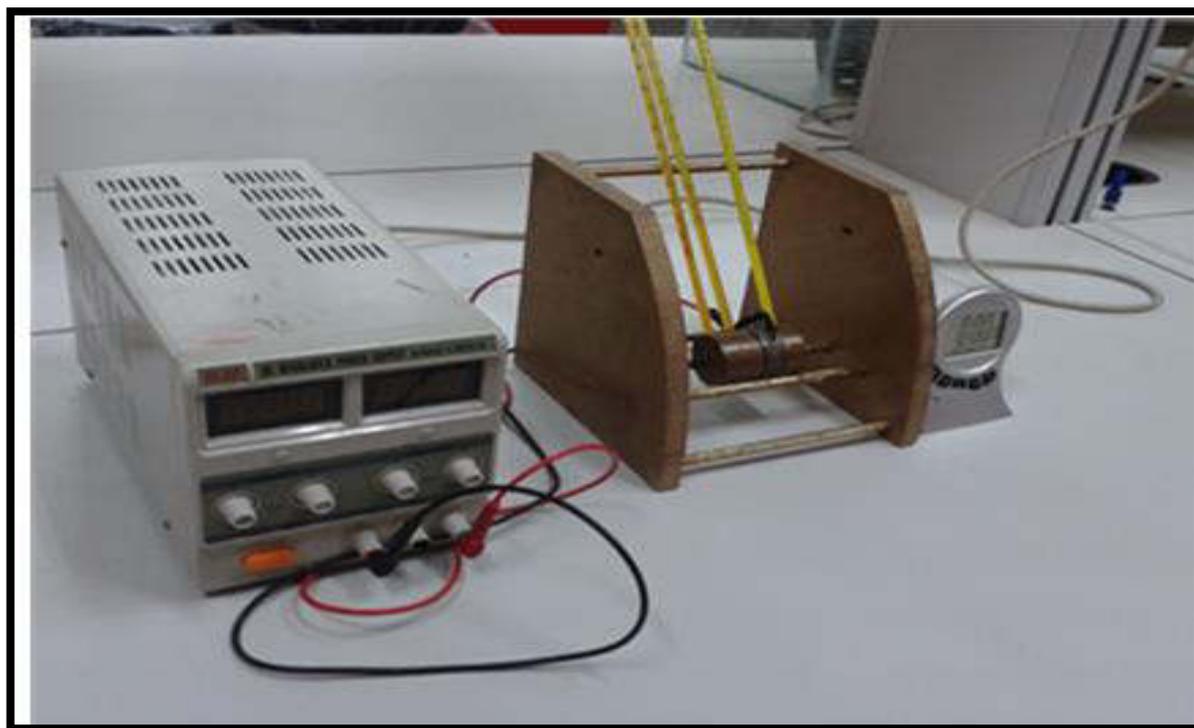
الشكل (3-12): صورة جهاز اختبار الانحناء.

(3-5-4) جهاز فحص التوصيلية الحرارية

Thermal Conductivity Test Instrument

أستعمل جهاز قرص ليّ (Lees Disc) المصنوع من قبل شركة (Griffen&George) الموجود في جامعة ديالى / كلية العلوم / قسم الفيزياء والموضحة صورته في الشكل (3-13)، والذي يتكون من ثلاثة أقراص (A,B,C) ومسخن كهربائي (Heater) يربط الى دائرة كهربائية، بحيث توضع العينة بين القرصين (A,B)، ويوضع المسخن الكهربائي بين القرصين (B,C)، وعند تشغيل جهاز القدرة لتشغيل المسخن الكهربائي تسخن الأقراص ويبدأ انتقال الحرارة من المسخن الى القرص الذي يليه حتى تصل الحرارة الى القرص الأخير وعند الوصول الى حالة الاتزان الحراري تسجل قراءة المحارير الموجودة في كل قرص وهي (T_a, T_b, T_c) .

من خلال معرفة قيمة سُمك القرص (d_s) (mm) ونصف قطر القرص (r) (mm) وكمية التيار المار بالملف (I) البالغة (0.25 Ampere) وفرق الجهد على طرفي الملف (V) المساوي (6 Volt). يمكن حساب قيمة (e) التي تمثل كمية الطاقة الحرارية المارة عبر وحدة مساحة القرص لكل ثانية والتي تقاس بوحدات ($W/m^2 \cdot ^\circ K$) باستخدام العلاقة (2-18) وبالنتيجة حساب التوصيلية الحرارية (k) والتي تقاس بوحدات ($W/m \cdot ^\circ K$) باستخدام العلاقة (2-17).



الشكل (3-13): صورة جهاز فحص التوصيلية الحرارية (قرص لي).

(3-5-5) جهاز فحص مسعر المسح التفاضلي

Differential Scanning Calorimetry (DSC) Test Instrument

جهاز يستخدم لايجاد الفرق في كمية الحرارة عندما ترفع درجة الحرارة للعينة، ويعطي هذا الجهاز درجة الانتقال الزجاجي (T_g) و درجة الانصهار البلورية (T_m) والتحليل الحراري الوزني (TGA)، وتم استخدام جهاز من نوع (STA. PT-1000 Linseis) ذات المنشأ (Linseis Company - Germany) الموجود في جامعة بغداد / كلية التربية للعلوم الصرفة (ابن الهيثم) / المختبر الخدمي المركزي والموضحة صورته في الشكل (3-14)، يؤخذ نموذج بوزن لايزيد عن (9-21 mg) ويتم وضعة بالجهاز بوجود غاز الاركون، ويتكون الجهاز من وعائين احدهما

توضع المادة المراد قياسها فيه والاخر يتترك فارغا وهو الوعاء المرجعي ومن ثم يوضع الوعائين في فرن يسخن عادة بمعدل (10) درجات في الدقيقة. يحتوي كل وعاء على لاقط حراري موصل إلى شاشة الحاسوب يسجل التغير في درجات الحرارة اللازمة لوصول العينة لنفس درجة حرارة مادة العينة الموضوعه وينشأ هذا الفرق في درجات الحرارة من أنّ أحد الوعائين يحتوي على المادة والثاني فارغ. كلما كانت المادة أكبر احتجنا الى زمن اطول لتسخينها، وتسجل درجات الحرارة وترسم بيانياً ومن خلال الرسوم البيانية يمكن معرفة درجة الانتقال الزجاجي (T_g) ودرجة الانصهار البلورية (T_m) ودرجة التبلور (T_c) والفقدان بالوزن مع ارتفاع درجة الحرارة (TGA). وكذلك يحسب الحاسب الالي الفرق في درجة الحرارة بين العينة والوعاء الفارغ المرجعي ويحولها الى تدفق حراري. والشكل (14-3) يوضح صورة جهاز (DSC) المستخدم.



الشكل (14-3): صورة جهاز فحص (DSC).

(6-5-3) جهاز الفحص الكهربائي (العزلي) Electrical Test Instrument

تم اجراء الفحص الكهربائي (العزلي) والمتمثل بثابت العزل الكهربائي (ϵ') كدالة للتردد بأستخدام جهاز (LCR Metter) من نوع (Agilent Impedance Analyz 4294A) ذي المنشأ (Tawan)

الموجود في جامعة ديالى / كلية العلوم / قسم الفيزياء وبمدى تردد (50Hz-5MHz) وبدرجة حرارة الغرفة. والشكل (15-3) يوضح صورة جهاز (LCR Metter) المستخدم.



الشكل (15-3): صورة جهاز (LCR Metter).



الفصل الرابع

النتائج والمناقشة

والاستنتاجات

(1-4) المقدمة

Introduction

يتضمن هذا الفصل عرضاً موجزاً لنتائج الاختبارات والفحوصات التي أجريت على عينات المواد المترابطة (EP-MgO, EP-ZrO₂, EP-CuO, EP-CuO/ZrO₂, EP-MgO/ZrO₂) بنسب وزنية مختلفة ((0, 0.3, 0.6, 0.9) wt%) وكذلك مناقشة كافة النتائج التي تم التوصل إليها في الدراسة الحالية والتي تضمنت:

- 1- الخصائص الميكانيكية (إختبار مقاومة الصدمة و إختبار الصلادة وإختبار الانحناء (ثلاثي النقاط)).
- 2- الخصائص الحرارية (معامل التوصيل الحراري (k) ودرجة الانتقال الزجاجي (T_g) ودرجة الانصهار البلورية (T_m)).
- 3- الخصائص الكهربائية (ثابت العزل الكهربائي (ε')).

(2-4) الخصائص الميكانيكية

Mechanical Properties

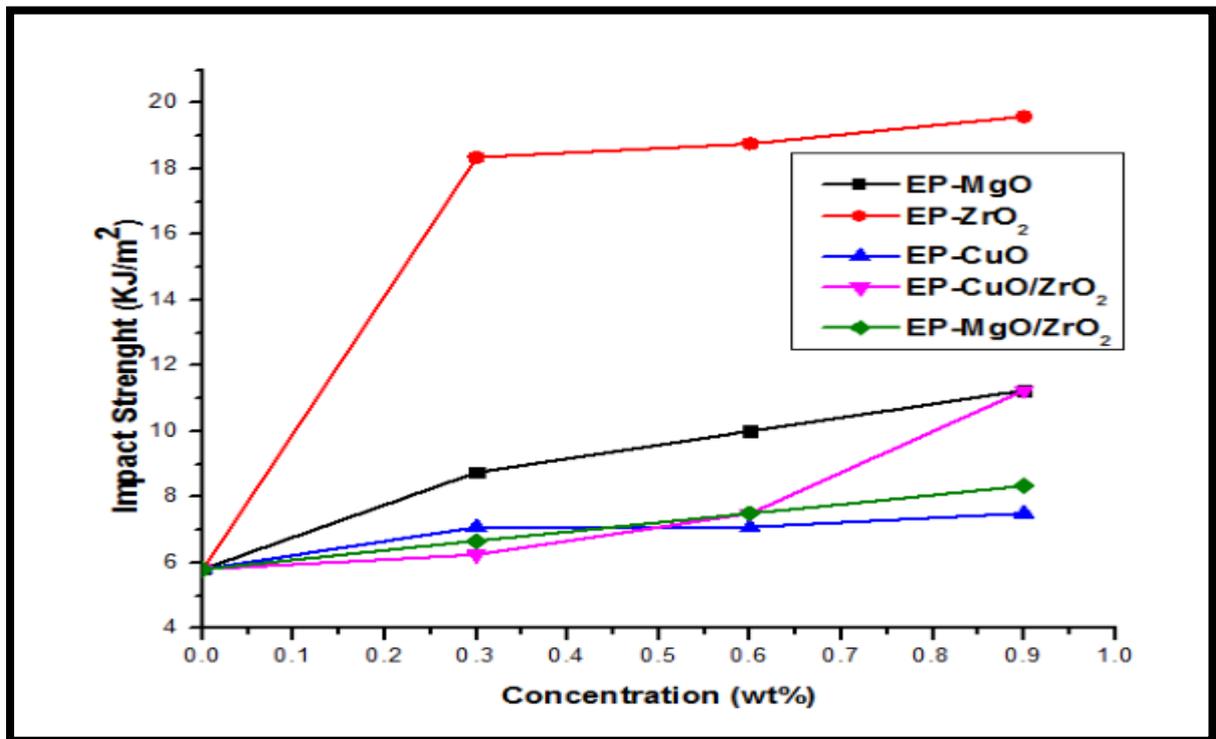
(1-2-4) إختبار الصدمة

Impact Test

إن إختبار الصدمة هو احد الاختبارات الميكانيكية الديناميكية المهمة لتعيين متانة المواد للصدمة وفيه يتم تحديد الطاقة الفعلية المطلوبة لكسر عينة الاختبار، وقد تم إجراء إختبار الصدمة لعينات المواد المترابطة باستخدام جهاز جاري، حيث أن مبدأ العمل هذا يستند على ان بعض من الطاقة الأولية الموجودة كالتحريك للمطرقة تُمتص من قبل العينة قبل حدوث الكسر والطاقة الممتصة من قبل العينة تعتمد على طبيعة المكونات الداخلة في تصنيع المواد المترابطة ومقدار مقاومتها للإجهاد الخارجي المسلط عليها [117].

إن آلية الفشل الذي يحدث في المادة بالإجهادات السريعة يكمن في أن المواد المترابطة قد تكون مطيلية (Ductile) تحت تأثير الإجهادات الساكنة مثل المطاط، ولكنها تبدو هشة (Brittle) تحت تأثير الإجهادات السريعة مثل الأيوكسي [117]. تم إجراء إختبار الصدمة بطريقة (Charpy Impact Test) وتم حساب مقاومة الصدمة للأيووكسي قبل وبعد التدعيم بالدقائق النانوية (MgO, ZrO₂, CuO) بنسب وزنية مختلفة ((0, 0.3, 0.6, 0.9) wt%) بالأعتماد على العلاقة (10-2). يبين الشكل (1-4) تأثير النسبة الوزنية للتدعيم على الطاقة الممتصة لكسر الأيووكسي النقي والمدعم بالدقائق النانوية، حيث نلاحظ ان الطاقة الممتصة لكسر الأيووكسي النقي تزداد عند التدعيم بالدقائق النانوية كافة وبالتالي تزداد مقاومة الصدمة له، ان الفشل في مادة راتنج الأيووكسي غير

المدعم والخاضع لأختبار الصدمة هو بسبب كسر الروابط والقوى في البوليمر لأن تأثير الاجهادات يسبب نمو الشقوق الأولية وفي الحقيقة تنمو هذه الشقوق بسرعة نحو السطح فيتم الفصل بين سلاسل البوليمر لان القوى بين هذه السلاسل هي متمثلة بقوى فاندرفالز والتي تتطلب الى طاقة منخفضة للتغلب عليها، وظهرت النتائج ان زيادة النسبة الوزنية للتدعيم تؤدي الى زيادة في متانة الصدمة ايضاً، لان الدقائق النانوية تشارك مادة الاساس في الحمل من القوى والضغوط وتمنع ايضاً حركة الانخلاعات (Dislocation) لانها تخترق داخل مادة الاساس وكذلك تعمل على تقليل الفجوات (Gaps) والتي تتشكل اثناء عملية التشكيل [28]. ونلاحظ ايضاً ان قيم متانة الصدمة للمترابك EP-ZrO₂ هي اكبر من قيم متانة الصدمة للمترابكات الاخرى وذلك بسبب التفاعل الفيزيوكيميائي (Physicochemical) القوي بين مادة الاساس ومادة التدعيم والذي يؤدي دوراً مهماً في النتائج التي تم الحصول عليها وان الترابط الكيميائي القوي يُحسن من الخصائص الميكانيكية، وايضاً بسبب تكون سطح بيني (Interface) وكذلك كون المواد السيراميكية ذات مقاومة عالية مما يؤدي الى امتصاص ميكانيكي اعلى وكذلك تعمل هذه الدقائق النانوية كمراكز ضغط قوية تقاوم انتشار الشقوق [118]. ومن خلال الشكل (1-4) نلاحظ ايضاً ان المترابك EP-CuO يمتلك قيم لمتانة الصدمة اقل من قيم متانة الصدمة للمترابكات الاخرى. الجدول (1-4) يوضح قيم مقاومة الصدمة للمترابكات المحضرة كافة.



الشكل (1-4): مقاومة الصدمة للأبيوكسي النقي والمدعم بالدقائق النانوية (MgO, ZrO₂, CuO) بنسب وزنية مختلفة.

الجدول (1-4): قيم مقاومة الصدمة للأيبوكسي النقي والمدعم بالدقائق النانوية (MgO, ZrO₂, CuO) بنسب وزنية مختلفة.

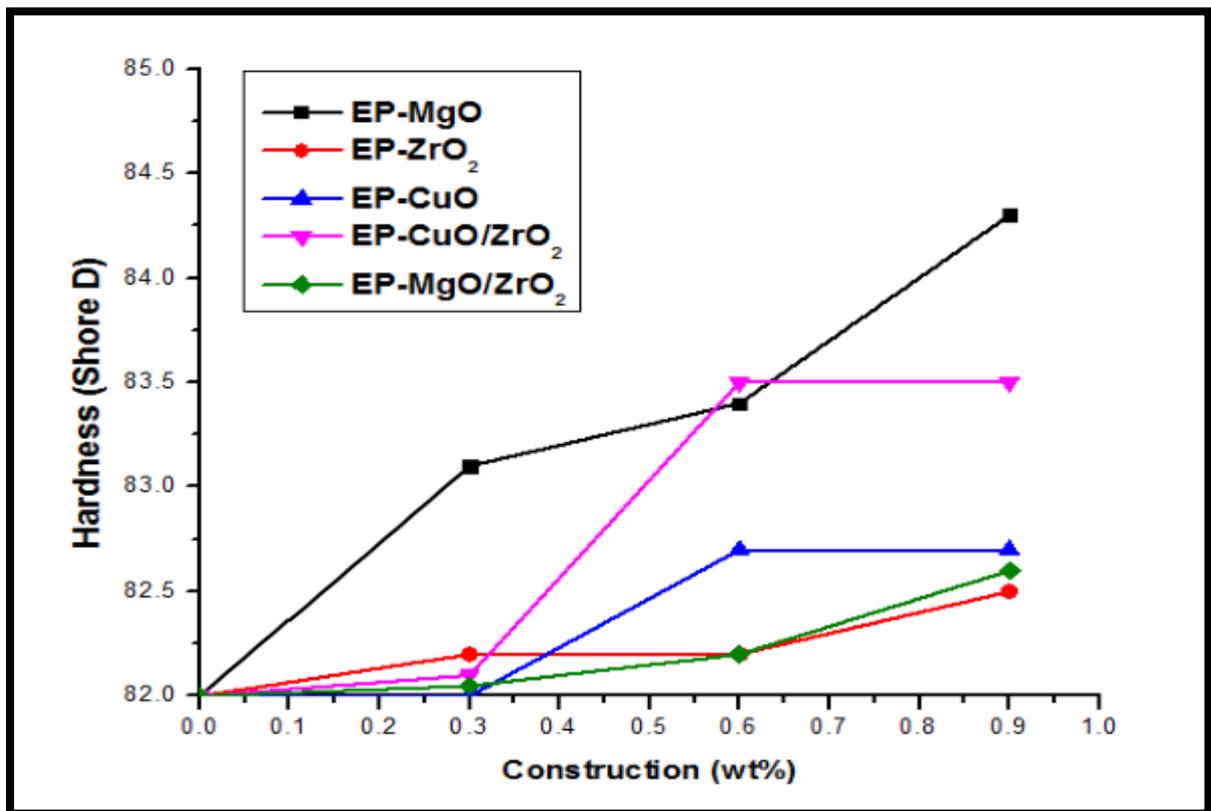
Weight Ratio (wt %) of Nanoparticles	Impact Strength (KJ/m ²)				
	EP-MgO	EP-ZrO ₂	EP-CuO	EP-CuO/ZrO ₂	EP-MgO/ZrO ₂
EP	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8
0.3 %	8.75	18.34	7.08	6.25	6.67
0.6 %	10.008	18.76	7.08	7.50	7.50
0.9 %	11.25	19.59	7.50	11.25	8.34

Hardness Test

(2-2-4) إختبار الصلادة

تم اختيار اختبار صلادة نوع (Shore D) للأيبوكسي قبل وبعد التدعيم بالدقائق النانوية (MgO, ZrO₂, CuO) بنسب وزنية مختلفة ((0, 0.3, 0.6, 0.9) wt%). يبين الشكل (2-4) تأثير النسبة الوزنية للتدعيم على الصلادة للأيبوكسي النقي و المدعم بالدقائق النانوية، حيث نلاحظ إن الصلادة للأيبوكسي النقي تزداد عند التدعيم بالدقائق النانوية كافة وتزداد أكثر مع زيادة النسبة الوزنية للتدعيم، ويعود سبب ذلك الى شكل دقائق التدعيم وحجمها النانوية وصلابتها والى سهولة تغلغلها بين الفسح الموجودة بين السلاسل البوليمرية، وذلك يؤدي الى زيادة التراص للسلاسل البوليمرية وهذا بدوره سيقيد حركة السلاسل البوليمرية ويرفع من صلادة المادة التي تم تحضيرها. ونلاحظ أيضاً ان قيم الصلادة للمترابك EP-MgO هي أكبر قليلاً من قيم الصلادة للمترابكات الأخرى و قد يكون سبب ذلك هو لزوجته منصهر المترابك البوليمري او بسبب التجانس بين مادة الاساس ونوع الدقائق النانوية المدعمة، وهذا بدوره سوف يقلل من قابلية تغلغل مادة الاساس السائلة إلى داخل المسامات البينية والفسح البينية الموجودة داخل المادة المترابكة وبالتالي تزداد صلادة المادة المترابكة المحضرة [119]. ومن مفهوم الصلادة فيمكن عدها مقياساً للتشوة اللدن والذي يمكن ان تعاني فيه المادة تحت تأثير اجهاد خارجي وبما ان صلادة أكسيد المغنيسيوم (MgO) هي الأكبر اذ ان هذه الدقائق النانوية سيراميكية والمواد السيراميكية تمتاز بالصلادة العالية فأن اضافة الدقائق النانوية السيراميكية ترفع من صلادة المادة نتيجة لزيادة مقاومتها للتشوة اللدن، وهذا يفسر زيادة الصلادة للمادة المترابكة مع زيادة النسبة الوزنية

للتدعيم [120]. ونلاحظ أيضاً أن المتراكبين (EP-ZrO₂, EP-MgO/ZrO₂) لهما أقل قيم للصلادة مقارنة بالمتراكبات الأخرى، أن هذا الفارق في نسبة الزيادة بقيمة الصلادة يعود إلى كون خاصية الصلادة في أكسيد الزركونيا (ZrO₂) تكون أقل مما هي عليه في المتراكبات الأخرى، وبالتالي فإن قلة نسبة مادة الأساس بزيادة النسبة الوزنية للتدعيم يؤدي إلى إضعاف ارتباط مادة التدعيم بمادة الأساس وبالتالي عدم حدوث زيادة كبيرة في قيمة الصلادة بزيادة النسبة الوزنية للتدعيم [121]. الجدول (2-4) يوضح قيم الصلادة للمتراكبات المحضرة كافة.



الشكل (2-4): الصلادة للايبوكسي النقي والمدعم بالدقائق النانوية (MgO, ZrO₂, CuO) بنسب وزنية مختلفة.

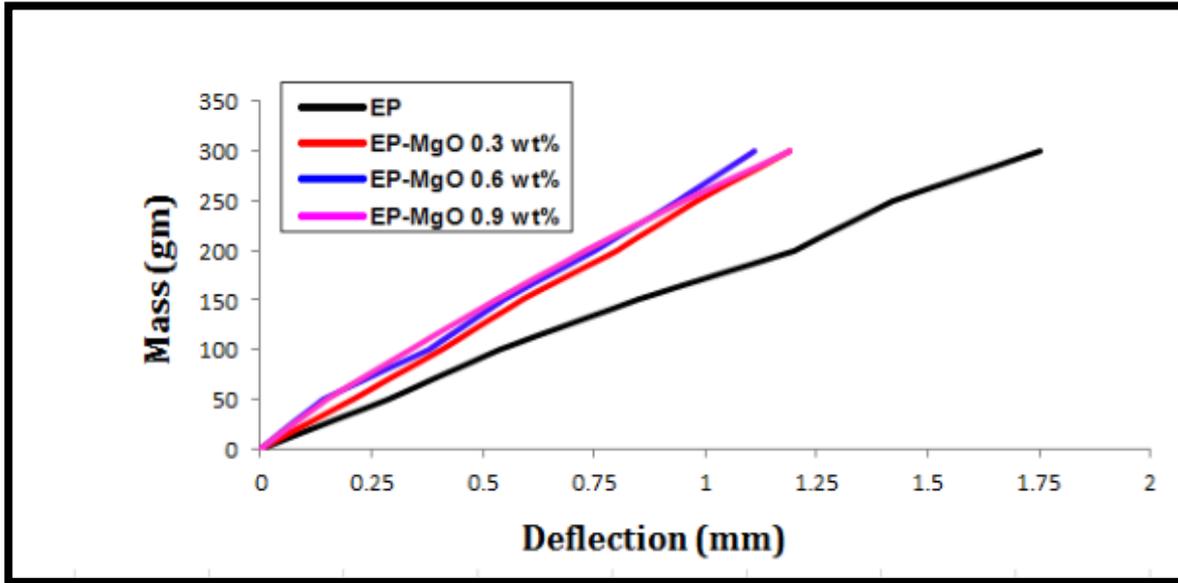
الجدول (2-4): قيم الصلادة للايبوكسي النقي والمدعم بالدقائق النانوية (MgO, ZrO₂, CuO) بنسب وزنية مختلفة.

Weight Ratio (wt %) of Nanoparticles	Hardness (Shore D)				
	EP-MgO	EP-ZrO ₂	EP-CuO	EP- CuO/ZrO ₂	EP- MgO/ZrO ₂
EP	82	82	82	82	82
0.3 %	83.1	82.2	82	82.1	82.05
0.6 %	83.4	82.2	82.7	83.5	82.2
0.9 %	84.3	82.5	82.7	83.5	82.6

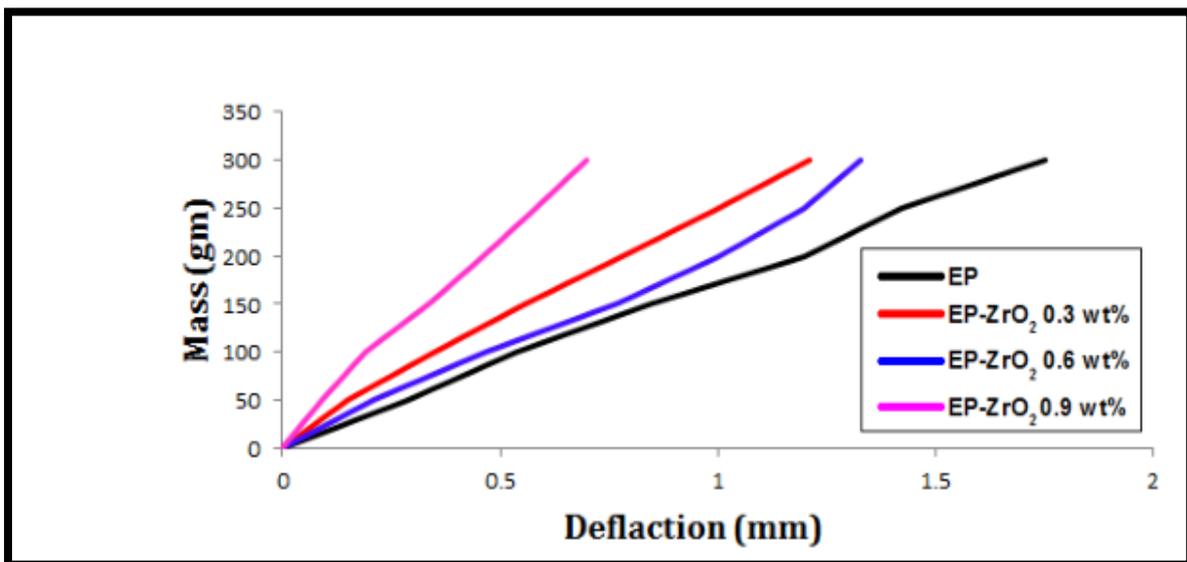
Bending Test

(3-2-4) إختبار الانحناء

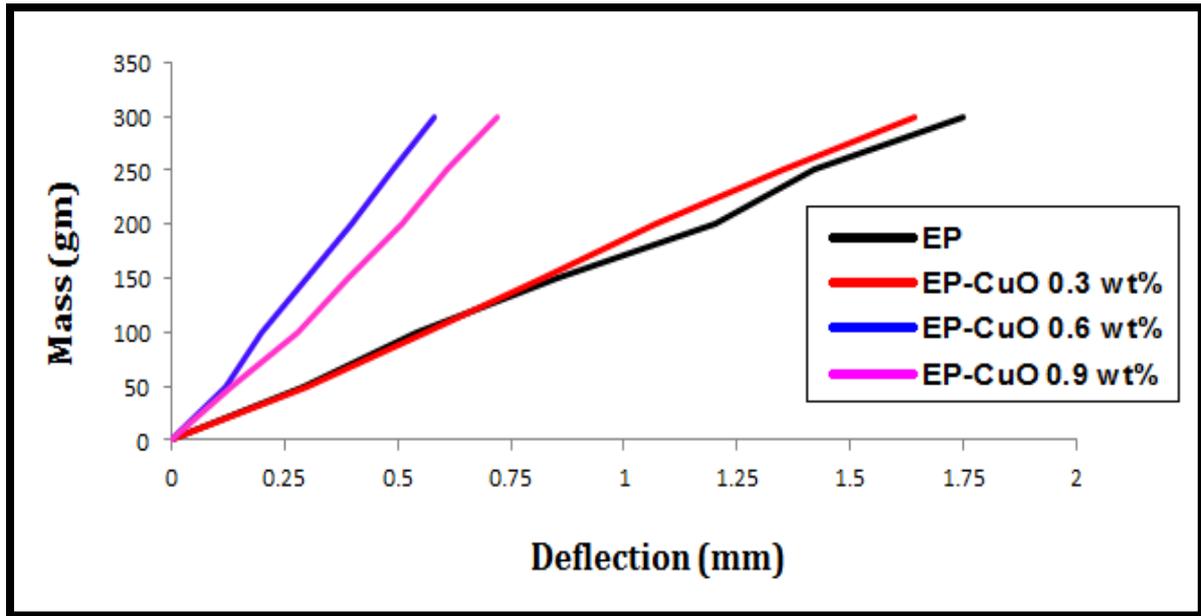
يعد اختبار الانحناء من الاختبارات المهمة إذ يمكننا من خلاله معرفة خاصية مهمة للمادة وهي الجساءة (Stiffness) وتعرف بأنها مدى مقاومة الجزء للانحناء عند تعرضه للثني. ان هذا النوع من الاختبارات يتعرض الى نوعين من القوى الاولى قوة ضغط (Compression Force) والثانية قوة شد (Tension Force). ان الهدف الرئيس من اختبار الانحناء هو التعرف على السلوك الخطي او ما يدعى في اغلب الاحيان (Hooken Behavior) للمادة الواقعة تحت تأثير الحمل المسلط بالاتجاه العمودي على مستوى سطحها [122]. تم إجراء اختبار الانحناء ثلاثي النقاط للايبوكسي قبل وبعد التدعيم بالدقائق النانوية (MgO, ZrO₂, CuO) بنسب وزنية مختلفة ((0, 0.3, 0.6, 0.9) wt%) وتم الحصول على منحنيات (الحمل – انحراف) وكما مبين في الاشكال من (3-4) الى (7-4).



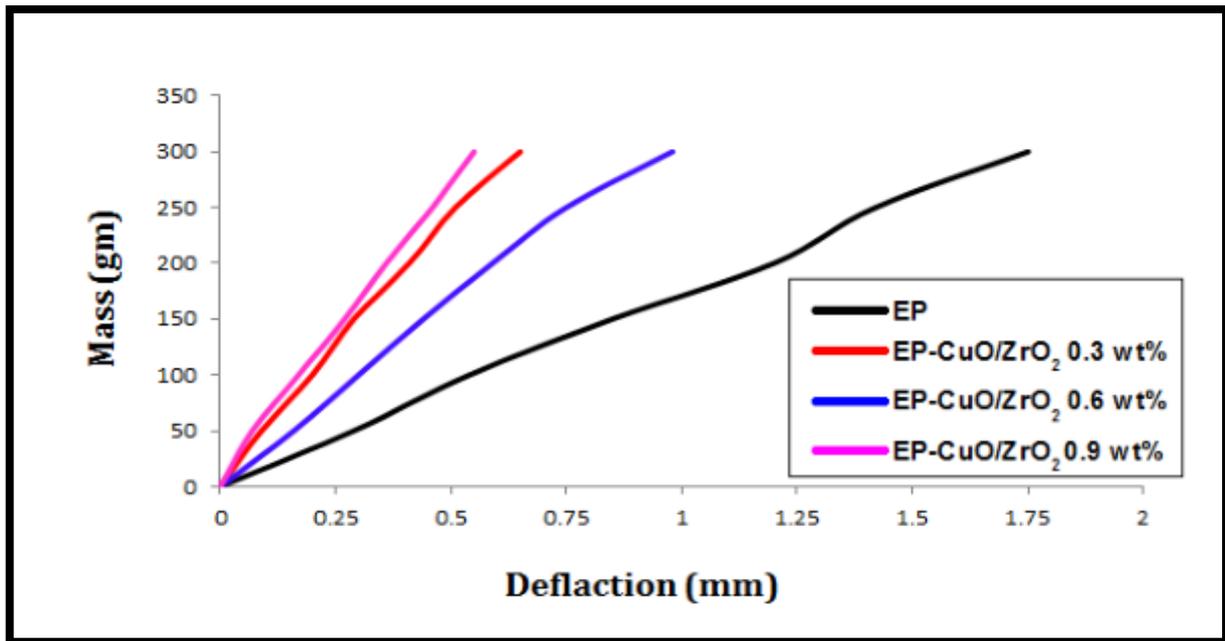
الشكل (3-4): منحنى (الحمل - انحراف) للمترابك EP-MgO بنسب وزنية مختلفة.



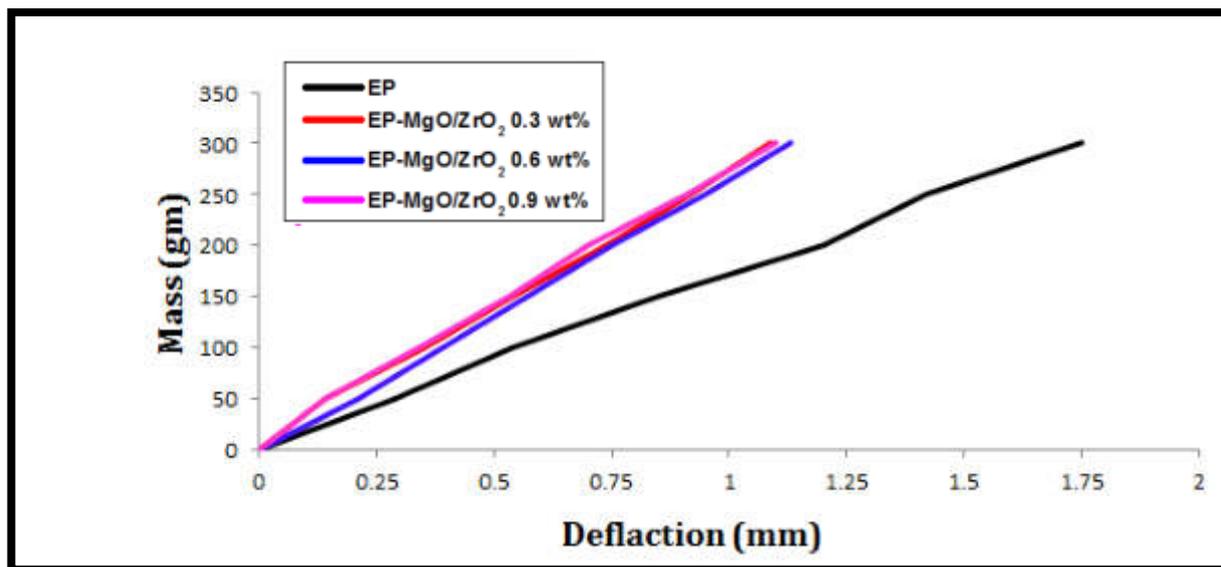
الشكل (4-4): منحنى (الحمل - انحراف) للمترابك EP-ZrO₂ بنسب وزنية مختلفة.



الشكل (4-5): منحنى (الحمل - انحراف) للمركب EP-CuO بنسب وزنية مختلفة.

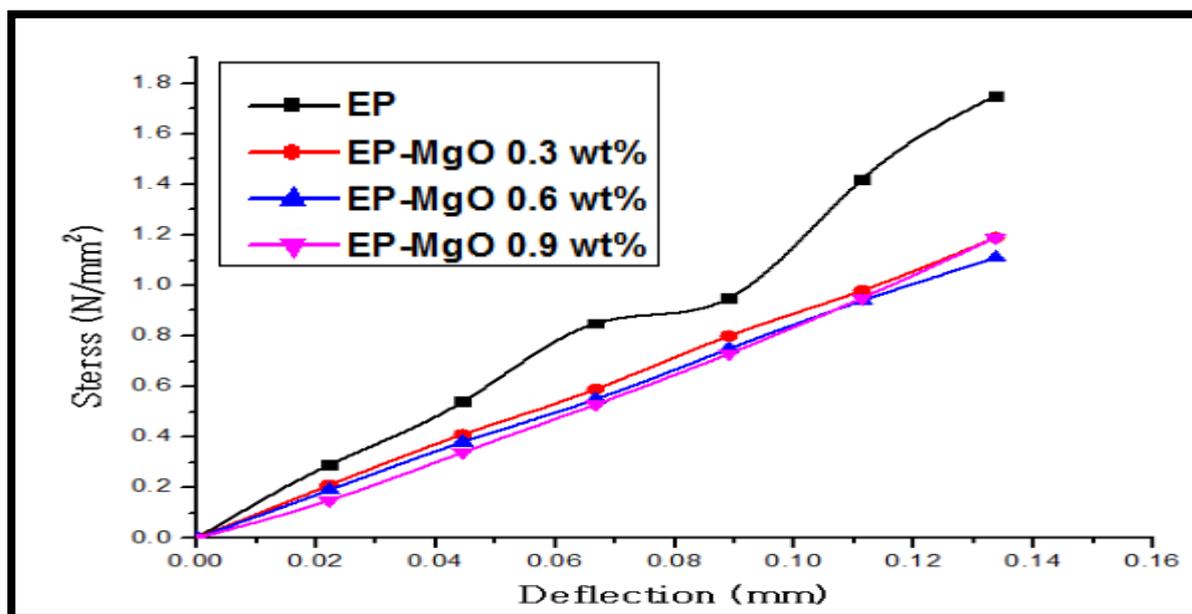


الشكل (4-6): منحنى (الحمل - انحراف) للمركب الهجين EP-CuO/ZrO₂ بنسب وزنية مختلفة.

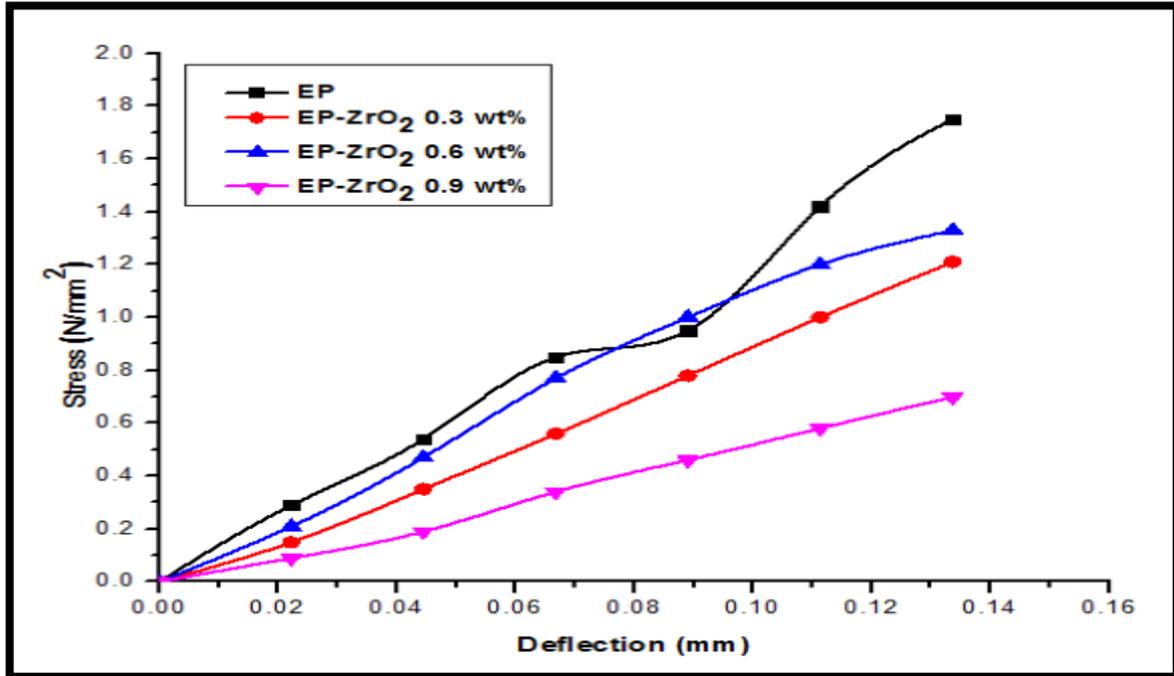


الشكل (7-4): منحنى (الحمل – انحراف) للمركب الهجين EP-MgO/ZrO₂ بنسب وزنية مختلفة.

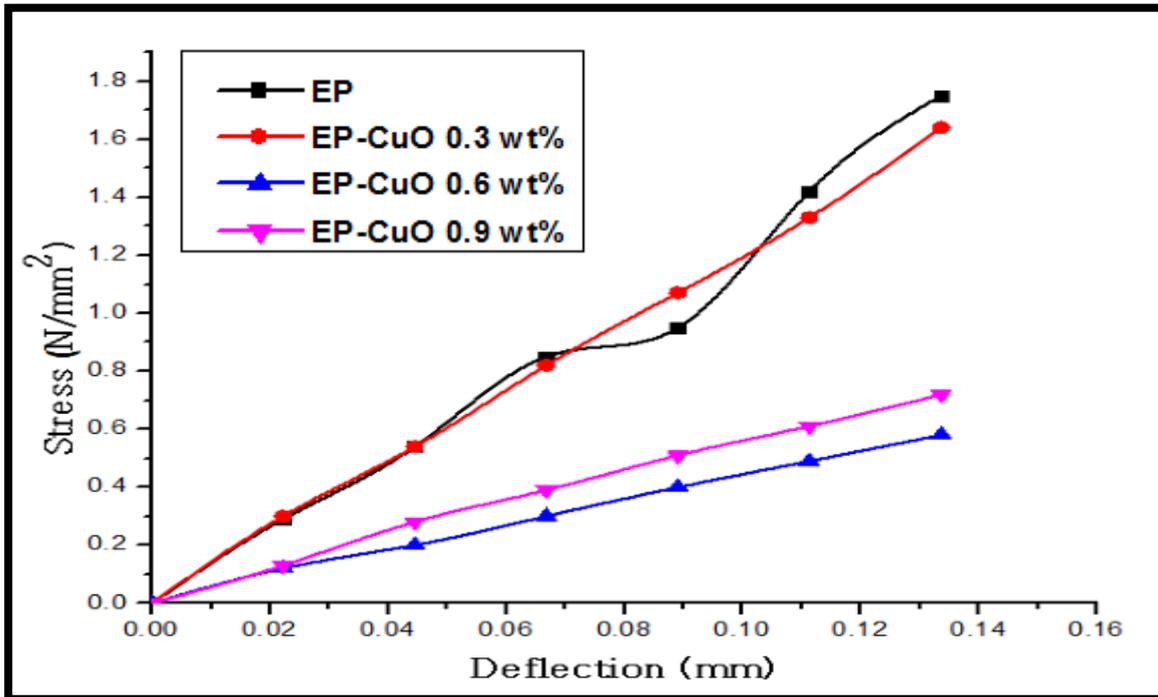
ومن منحنيات (الحمل – انحراف) تم الحصول على منحنيات (الإجهاد – انحراف) وكما مبين في الأشكال من (8-4) الى (12-4). يلاحظ من هذه الأشكال والأشكال السابقة ان الانحراف (Deflection) يتناسب طردياً مع الحمل المحدث له فعند زوال الحمل المسلط تسترد المادة حالتها الأولى (Elastic) ضمن حد التشوه المرن والذي يتناسب فيه الانفعال (ϵ) تناسباً طردياً مع الاجهاد (σ) وينتج من ذلك ان المادة تخضع لقانون هوك (Hook's Law) [123].



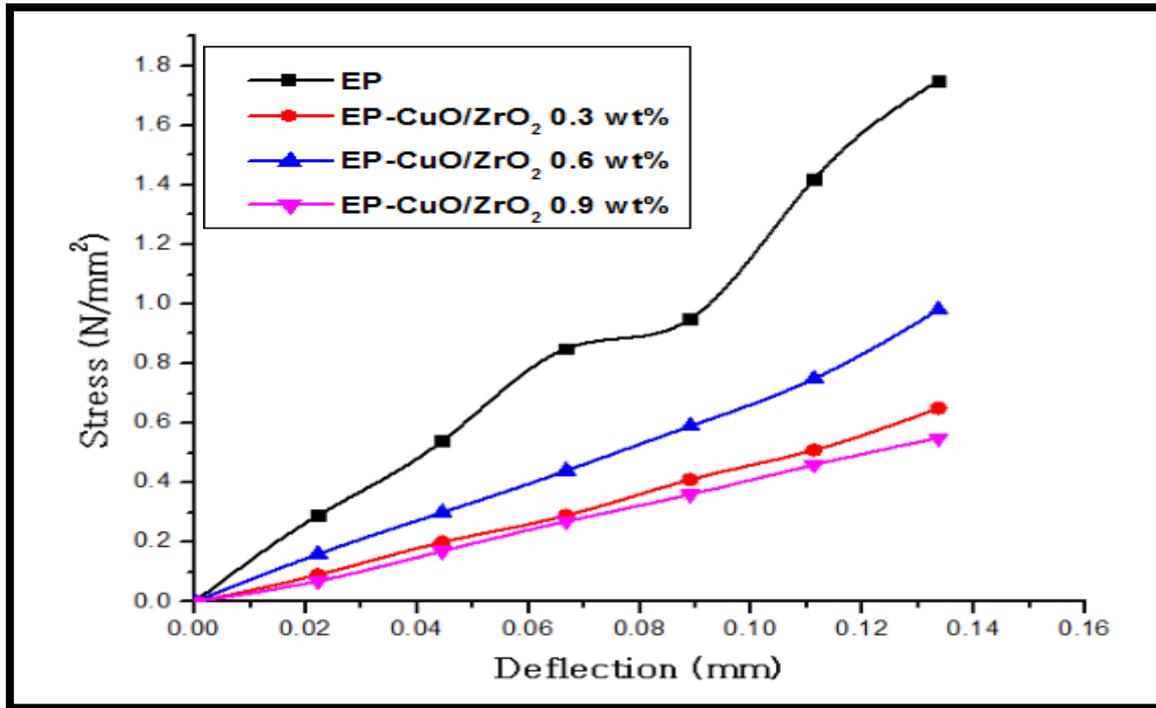
الشكل (8-4): منحنى (الاجهاد – انحراف) للمركب EP-MgO بنسب وزنية مختلفة.



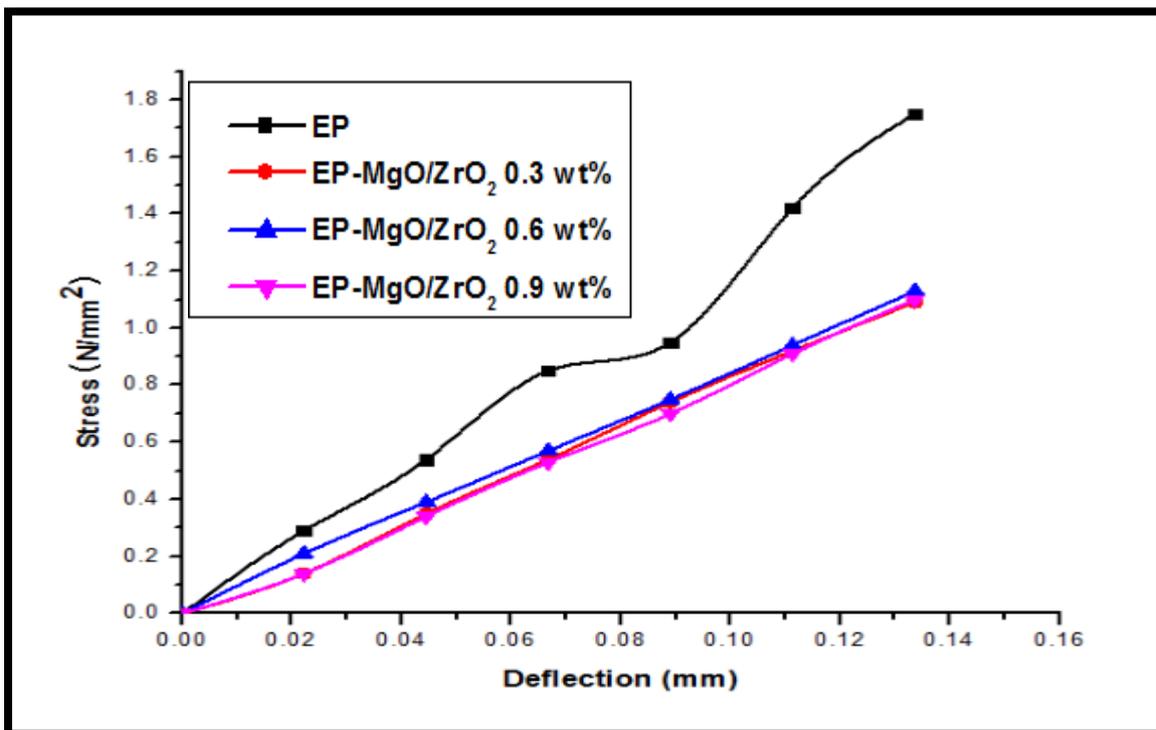
الشكل (9-4): منحنى (الاجهاد - انحراف) للمترابك EP-ZrO₂ بنسب وزنية مختلفة.



الشكل (10-4): منحنى (الاجهاد - انحراف) للمترابك EP-CuO بنسب وزنية مختلفة.

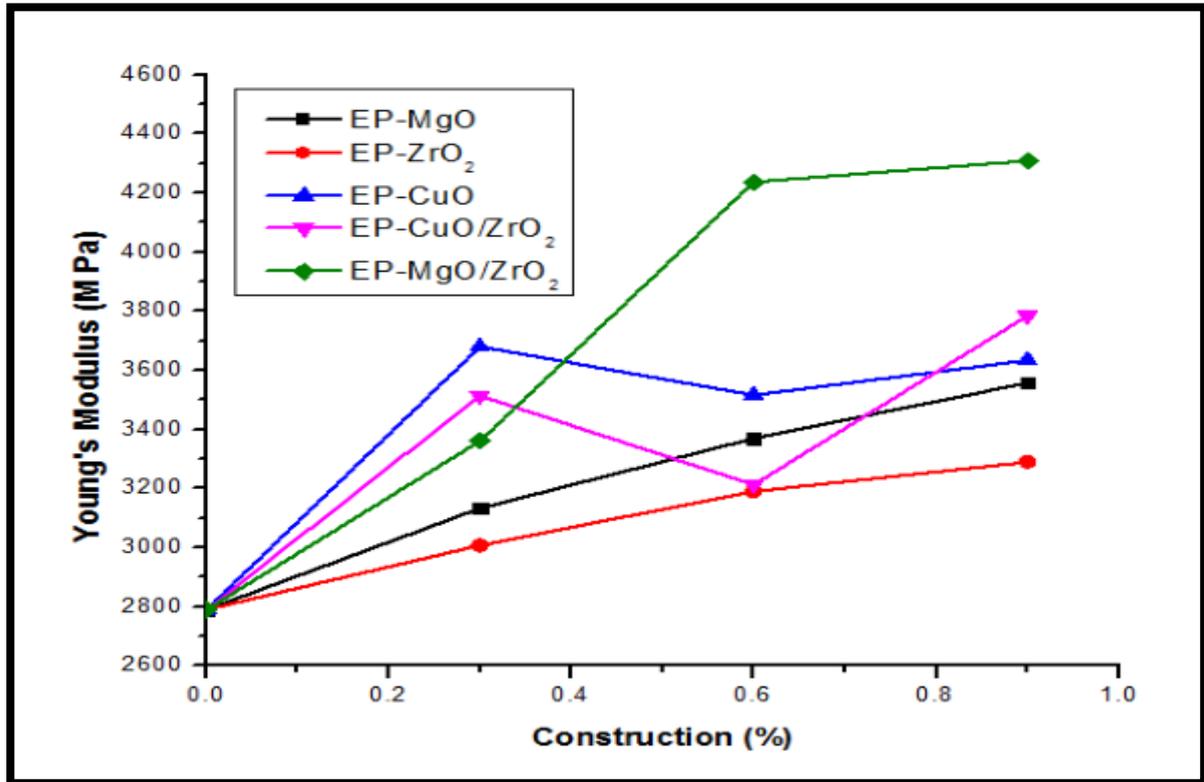


الشكل (11-4): منحنى (الاجهاد - انحراف) للمترابك الهجين EP-CuO/ZrO₂ بنسب وزنية مختلفة.



الشكل (12-4): منحنى (الاجهاد - انحراف) للمترابك الهجين EP-MgO/ZrO₂ بنسب وزنية مختلفة.

ان النسبة بين (Mass/Deflection) هي مقدار ثابت ويمثل الميل (Slope)، إذ تم من خلال هذا الاختبار حساب معامل يونك (E) من خلال العلاقة (2-12) للأبيوكسي قبل وبعد التدعيم بالدقائق النانوية (MgO, ZrO₂, CuO) بنسب وزنية مختلفة (0, 0.3, 0.6, 0.9) wt%. الشكل (4-13) يبين تأثير النسبة الوزنية للتدعيم على معامل يونك للأبيوكسي النقي والمدعم بالدقائق النانوية، حيث نلاحظ ان معامل يونك للأبيوكسي النقي يزداد عند التدعيم بالدقائق النانوية كافة ويزداد اكثر مع زيادة النسبة الوزنية للتدعيم، وهذه الزيادة في معامل يونك تعود الى معامل المرونة الكبير الذي تتمتع به مواد التدعيم مقارنة بمعامل مرونة مادة الاساس، وكذلك تعود هذه الزيادة في معامل يونك الى أن مواد التدعيم تعمل كمعوقات لحركة جزيئات مادة الاساس حيث أن وجود مادة التدعيم يؤدي الى توزيع الاجهاد وعدم تركزه عند نقاط معينة مما يعطي للمادة الاساس ثبات في مواقع جزيئاتها والذي سوف ينعكس على قلة الانفعال المرن مع زيادة النسبة الوزنية للتدعيم [121]. ومن خلال الشكل (4-13) نلاحظ ايضاً ان المتراكب الهجين EP-MgO/ZrO₂ يمتلك قيم لمعامل يونك اكبر من قيم معامل يونك للمترابكات الاخرى، والسبب في ذلك ان الدقائق النانوية الموزعة بشكل منتظم تعمل على اختزال الفراغات والتي يمكن ان تتكون خلال عملية تصنيع المواد المترابكة، وبذلك يزداد التداخل والترابط ما بين مادة الاساس والدقائق النانوية ولهذا فعند تسليط اجهاد معين على المادة فإن الانفعال الناتج يقل مع زيادة النسبة الوزنية للتدعيم نتيجة لحدوث التداخل ما بين مادة التدعيم ومادة الاساس وهذا يعيق حركة السلاسل البوليمرية وبالتالي تزداد قيمة معامل يونك [124]. وان النقصان في قيم معامل يونك للمترابك EP-CuO والمتراكب الهجين EP-CuO/ZrO₂ عند النسبة الوزنية (0.6 wt%) للتدعيم يعود سببه الى تراكم الحشوة وقوة تلاحقها بمادة الاساس [19]. ومن خلال الشكل (4-13) نلاحظ ايضاً ان المتراكب EP-ZrO₂ يمتلك قيم لمعامل يونك اقل من قيم معامل يونك للمترابكات الاخرى. الجدول (4-3) يوضح قيم معامل يونك للمترابكات المحضرة كافة.



الشكل (4-13): معامل يونك للإيبوكسي النقي والمدعم بالدقائق النانوية (MgO, ZrO₂, CuO) بنسب وزنية مختلفة.

الجدول (4-3): قيم معامل يونك للإيبوكسي النقي والمدعم بالدقائق النانوية (MgO, ZrO₂, CuO) بنسب وزنية مختلفة.

Weight Ratio (wt %) of Nanoparticles	Young's Modulus (M Pa)				
	EP-MgO	EP-ZrO ₂	EP-CuO	EP-CuO/ZrO ₂	EP-MgO/ZrO ₂
EP	2789.64	2789.64	2789.64	2789.64	2789.64
0.3 %	3133.55	3007.48	3680.19	3513.8	3360.91
0.6 %	3369.63	3190.3	3516.12	3213.53	4237.4
0.9 %	3556.93	3290	3633.85	3784.42	4307.79

Thermal Properties

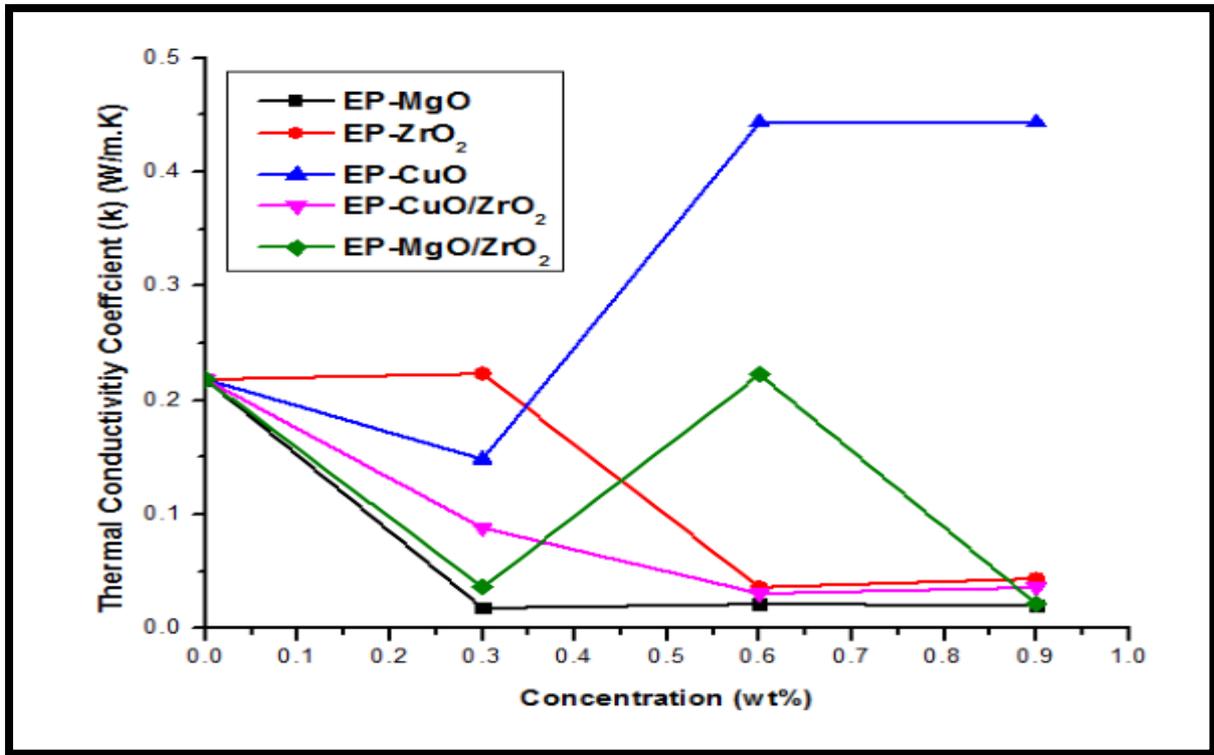
(3-4) الخصائص الحرارية

Thermal Conductivity Coefficient

(1-3-4) معامل التوصيل الحراري

تم حساب معامل التوصيل الحراري (k) باستخدام طريقة قرص لي (Lee's Disc Method) بالاعتماد على العلاقتين (17-2) و (18-2) على التوالي للأيوكسي قبل وبعد التدعيم بالدقائق النانوية (MgO, ZrO₂, CuO) بنسب وزنية مختلفة (0, 0.3, 0.6, 0.9 wt%). الشكل (14-4) يبين تأثير النسبة الوزنية للتدعيم على معامل التوصيل الحراري للأيوكسي النقي والمدعم بالدقائق النانوية، حيث نلاحظ ان قيمة معامل التوصيل الحراري للأيوكسي النقي تكون (0.21825 (W/m.K)) وعند تدعيم الأيوكسي بالدقائق النانوية كافة نلاحظ تغير في قيمة معامل التوصيل الحراري اذ تسلك سلوك غير منتظم، حيث نلاحظ ان جميع قيم معامل التوصيل الحراري للأيوكسي المدعم بالدقائق النانوية كافة (عند كافة النسب الوزنية للتدعيم) هي اقل من قيمة معامل التوصيل الحراري للأيوكسي النقي وذلك لان الدقائق النانوية في طبيعتها تكون مسامية وتحتوي على فراغات لذلك تصبح موصليتها الحرارية اقل [126]، باستثناء المترابك EP-ZrO₂ عند النسبة الوزنية (0.3 wt%) للتدعيم والمترابك EP-CuO عند النسبة الوزنية (0.6, 0.9 wt%) للتدعيم والمترابك الهجين EP-MgO/ZrO₂ عند النسبة الوزنية (0.6 wt%) للتدعيم فأنهم يملكون قيم لمعامل التوصيل الحراري اكبر من قيمة معامل التوصيل الحراري للأيوكسي النقي لان وجود هذه الدقائق النانوية في مادة الاساس تعمل على تقليل درجة التشابك بين السلاسل الجزيئية والتي تعطيها حرية اكبر في الحركة وبالتالي تزداد قابليتها على الحركة الاهتزازية مما يؤدي الى زيادة قيمة معامل التوصيل الحراري في المترابك، فضلاً عن ذلك فأن هذه الدقائق النانوية تعمل على تراص مكونات المواد المترابكة وتقليل عدد الفراغات التي يمكن ان تتكون خلال عملية تصنيع المترابك وبالتالي تزداد قيمة معامل التوصيل الحراري [125]. ان المعدن موصل جيد للحرارة إذ ان المعادن تعتمد على الإلكترونات الحرة في انتقال الحرارة، إما بالنسبة للسيراميك فيعتمد في انتقال الحرارة على اهتزازات فونونات (Phonons) الشبيكية، لان الفونونات تمثل اهتزازات الشبيكية وتكون هي مسؤولة على انتقال الحرارة في المواد الصلبة العازلة [126]. ان عدم انتظام قيمة معامل التوصيل الحراري ربما يكون بسبب عدم التجانس بين مادة الاساس ومواد التدعيم بسبب كبر المساحة السطحية لمواد التدعيم [127]، أو بمعنى اخر ربما يعود ذلك الى عدم توزيع الدقائق النانوية بشكل متجانس داخل مادة الاساس لان الدقائق النانوية تميل الى التكتل بسبب المساحة السطحية الكبيرة لها [128]. ومن خلال الشكل (14-4) نلاحظ ايضاً ان المترابك EP-CuO يمتلك قيم لمعامل التوصيل الحراري اكبر من قيم معامل التوصيل الحراري للمترابكات الاخرى بينما المترابك EP-MgO يمتلك

قيماً لمعامل التوصيل الحراري اقل من قيم معامل التوصيل الحراري للمترابكات الاخرى. (الجدول 4-4)
 (4) يوضح قيم معامل التوصيل الحراري للمترابكات المحضرة كافة.



الشكل (4-14): معامل التوصيل الحراري للابوكسي النقي والمدعم بالدقائق النانوية (MgO, ZrO₂, CuO) بنسب وزنية مختلفة.

الجدول (4-4): قيم معامل التوصيل الحراري للابوكسي النقي والمدعم بالدقائق النانوية (MgO, ZrO₂, CuO) بنسب وزنية مختلفة.

Weight Ratio (wt %) of Nanoparticles	Thermal Conductivity Coefficient (k) (W/m.K)				
	EP-MgO	EP-ZrO ₂	EP-CuO	EP-CuO/ZrO ₂	EP-MgO/ZrO ₂
EP	0.21825	0.21825	0.21825	0.21825	0.21825
0.3 %	0.01790	0.22326	0.14822	0.08817	0.03635
0.6 %	0.02159	0.03621	0.44310	0.03075	0.22274
0.9 %	0.02055	0.04362	0.44310	0.03616	0.02164

Glass-Transition Temperature

(2-3-4) درجة الانتقال الزجاجي

ان الانتقال الزجاجي هي عملية ماصة للحرارة تحصل ضمن مدى من درجات الحرارة، فبعد حصول الانتقال الزجاجي يستقر سلوك المادة لمدى من درجات الحرارة تقريباً حتى (320 °C) ومن ثم تعاني المادة من عملية تحلل حراري اعتماداً على نوع الاصرة والطاقة اللازمة لكسرها [129]. تم تسجيل درجة الانتقال الزجاجي (T_g) للأبيوكسي قبل وبعد التدعيم بالدقائق النانوية (MgO, ZrO₂, CuO) بنسب وزنية مختلفة (0, 0.3, 0.6, 0.9 wt%)، وذلك باستخدام جهاز المسعر الحراري التفاضلي (DSC)، الاشكال من (4-15) الى (4-19) تظهر قيم درجة الانتقال الزجاجي للمتراكبات كافة وكما هو موضح بالجدول (4-5)، حيثُ نلاحظ ان درجة الانتقال الزجاجي للأبيوكسي النقي تساوي (79 °C) وعند تدعيم الأبيوكسي بالدقائق النانوية كافة نلاحظ تغير في درجة الانتقال الزجاجي، حيث نلاحظ عند المتراكبات (EP-MgO, EP-ZrO₂, EP-CuO) ان درجة الانتقال الزجاجي تزداد مع زيادة النسبة الوزنية للتدعيم وصولاً عند النسبة الوزنية (0.9 wt%) للتدعيم فتقل عندها درجة الانتقال الزجاجي مع بقاء قيم درجة الانتقال الزجاجي اكبر عند المتراكبين (EP-MgO, EP-ZrO₂)، واصغر عند المتراكب EP-CuO على التوالي من درجة الانتقال الزجاجي للأبيوكسي النقي، كما نلاحظ عند المتراكب الهجين EP-CuO/ZrO₂ ان درجة الانتقال الزجاجي تسلك سلوكاً غير منتظم ولكن تبقى جميع قيم درجة الانتقال الزجاجي (عند كافة النسب الوزنية للتدعيم) لهذا المتراكب الهجين هي اكبر من درجة الانتقال الزجاجي للأبيوكسي النقي، كما نلاحظ عند المتراكب الهجين EP-MgO/ZrO₂ ان درجة الانتقال الزجاجي تزداد عند النسبة الوزنية (0.3 wt%) للتدعيم وبعدها تقل درجة الانتقال الزجاجي مع زيادة النسبة الوزنية للتدعيم مع بقاء قيم درجة الانتقال الزجاجي اكبر من درجة الانتقال الزجاجي للأبيوكسي النقي. ان الزيادة في درجة الانتقال الزجاجي بزيادة النسبة الوزنية للتدعيم تدل على تحول المادة من حالة الاكثر مرونة الى الاقل مرونة وان هذه الزيادة دليل على الترابط بين مادة التدعيم ومادة الاساس، فزيادة ترابط مادة التدعيم مع مادة الاساس يزداد معدل الوزن الجزيئي وبالتالي يتسبب في اعاقه حركة السلاسل البوليمرية والتي تحتاج الى كمية حرارة (طاقة) اعلى لتصل الى درجة حرية الحركة المناسبة لتنتقل الى الحالة المطاطية وبالتالي الى زيادة درجة الانتقال الزجاجي [130]. ان النقصان في درجة الانتقال الزجاجي يمكن ان يكون بسبب تكتل مواد التدعيم في مادة الاساس بسبب كبر مساحتها السطحية (مواد التدعيم) او قد يكون امتصاص الرطوبة سبباً في نقصان درجة الانتقال الزجاجي [131].

الجدول (5-4): قيم درجة الانتقال الزجاجي (T_g) للأبيوكسي النقي والمدعم بالدقائق النانوية (MgO, ZrO_2, CuO) بنسب وزنية مختلفة.

Weight Ratio (wt %) of Nanoparticles	Glass Transition Temperature (T_g) °C				
	EP-MgO	EP-ZrO ₂	EP-CuO	EP-CuO/ZrO ₂	EP-MgO/ZrO ₂
EP	79	79	79	79	79
0.3 %	82.48	82.22	82.12	86.28	85.15
0.6 %	86.75	89.97	85.12	79.18	84.06
0.9 %	82	83.05	78.82	83.64	79.71

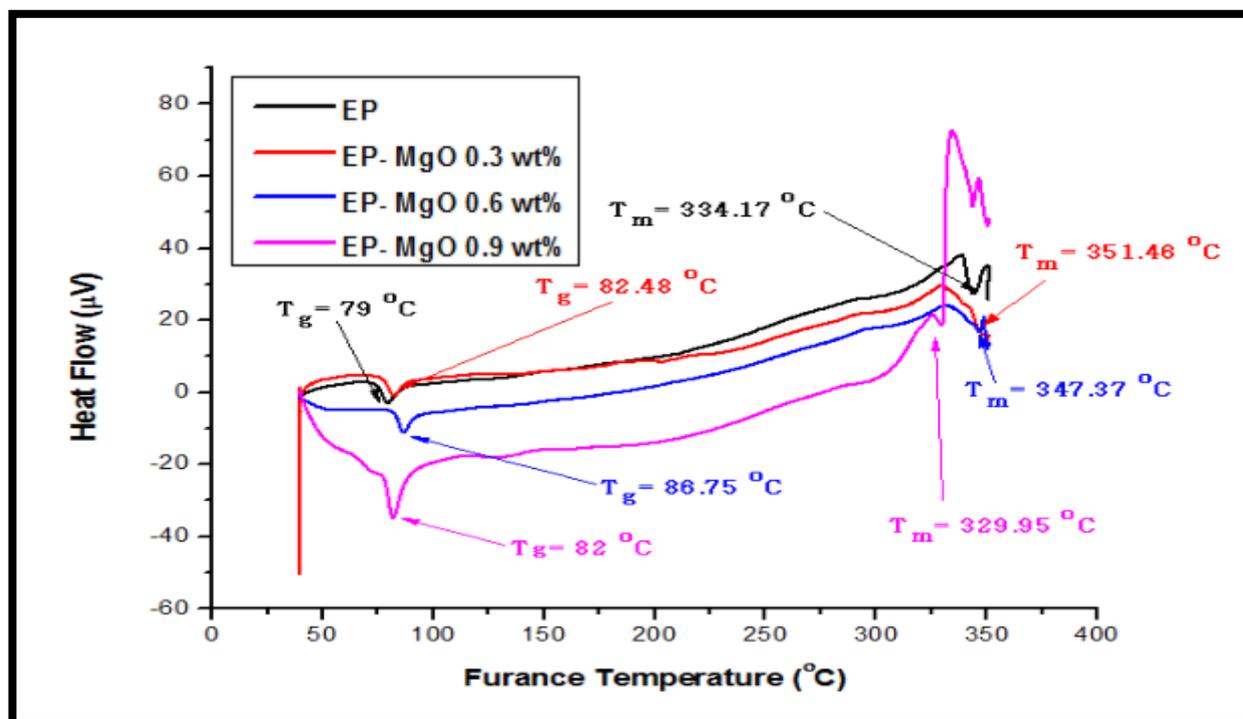
Crystalline Melting Temperature (3-3-4) درجة الانصهار البلورية

تستخدم درجة الانصهار البلورية لتحديد طبيعة المادة ودرجة نقائها [132]. تم تسجيل درجة الانصهار البلورية (T_m) للأبيوكسي قبل وبعد التدعيم بالدقائق النانوية (MgO, ZrO_2, CuO) بنسب وزنية مختلفة (0, 0.3, 0.6, 0.9 wt%)، وذلك باستخدام جهاز المسعر الحراري التفاضلي (DSC)، الأشكال من (4-15) إلى (4-19) تظهر قيم درجة الانصهار البلورية للمتراكبات كافة وكما هو موضح بالجدول (4-6)، حيث نلاحظ ان درجة الانصهار البلورية للأبيوكسي النقي تساوي ($334.17\text{ }^\circ\text{C}$) وعند تدعيم الأبيوكسي بالدقائق النانوية كافة لوحظ تغير في درجة الانصهار البلورية، حيث نلاحظ عند المتراكبين (EP-MgO, EP-MgO/ZrO₂) ان درجة الانصهار البلورية تزداد عند النسبة الوزنية (0.3 wt%) للتدعيم وبعدها تقل درجة الانصهار البلورية مع زيادة النسبة الوزنية للتدعيم مع بقاء قيم درجة الانصهار البلورية اكبر (عند النسبة الوزنية (0.6 wt%) للتدعيم) وأصغر (عند النسبة الوزنية (0.9 wt%) للتدعيم) على التوالي من درجة الانصهار البلورية للأبيوكسي النقي، كما نلاحظ عند المتراكبات (EP-ZrO₂, EP-CuO, EP-CuO/ZrO₂) ان درجة الانصهار البلورية تزداد مع زيادة النسبة الوزنية للتدعيم وصولاً عند النسبة الوزنية (0.9 wt%) للتدعيم فتقل عندها درجة الانصهار البلورية مع بقاء قيم درجة الانصهار البلورية اكبر من درجة الانصهار البلورية للأبيوكسي النقي. ان النقصان في درجة الانصهار البلورية بالمقارنة مع الأبيوكسي النقي يعزى الى عدم انتظام وتوزيع وتجانس الدقائق النانوية في مادة الاساس [133]، وهناك سبب اخر لهذا النقصان وهو حصول تفاعل بين السلاسل البوليمرية لمادة الاساس والدقائق النانوية والتي تمنع حركة هذه السلاسل البوليمرية وبالتالي تقل درجة الانصهار البلورية [134]. ان الزيادة وعدم الاستقرار في درجة الانصهار البلورية

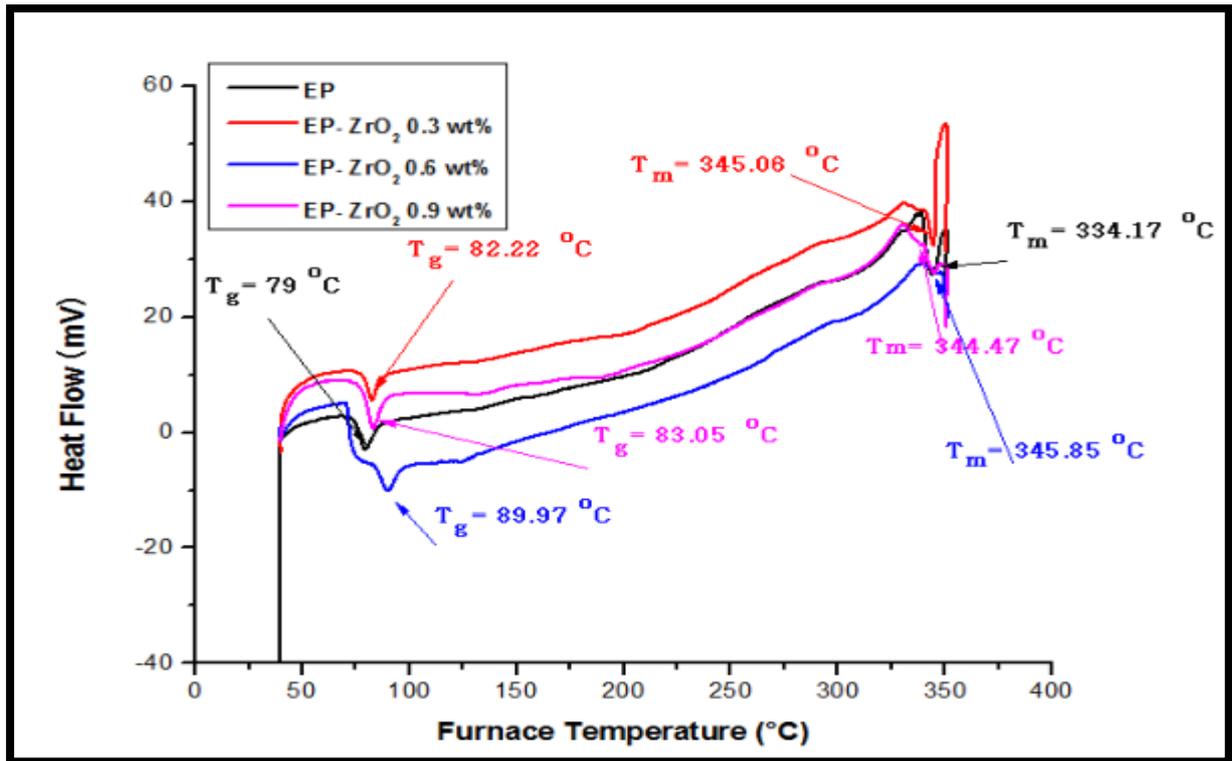
تعزى الى الثبات الحراري العالي للدقائق النانوية والتفاعل الحاصل بين مادة الاساس ومواد التدعيم [135]. ان هذا التزايد والتناقص في درجة الانصهار البلورية بالمقارنة مع الايبوكسي النقي يمكن ان يكون ناتج عن تجمع كتل الدقائق النانوية في مادة الاساس والذي يؤدي الى انشاء حاجز وقائي [135].

الجدول (6-4): قيم درجة الانصهار البلورية (T_m) للايبيوكسي النقي والمدعم بأدقائق النانوية (MgO, ZrO₂, CuO) بنسب وزنية مختلفة.

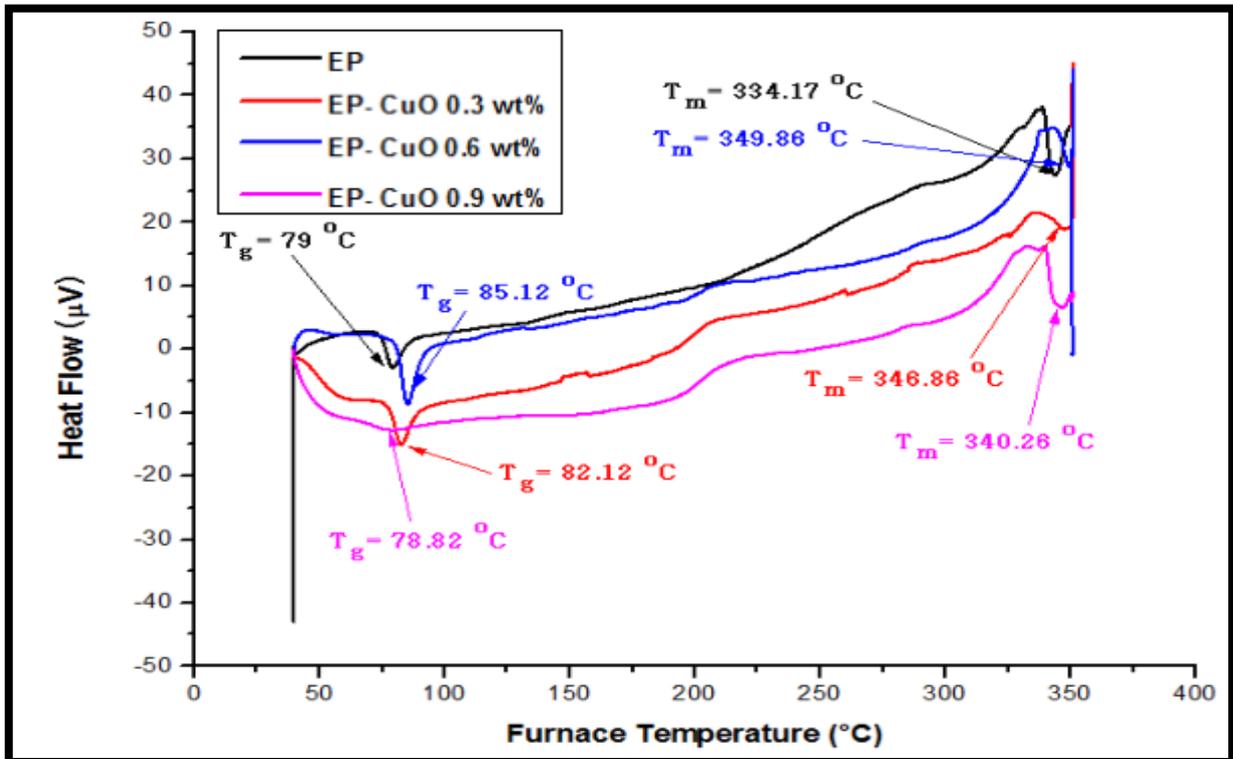
Weight Ratio (wt %) of Nanoparticles	Crystalline Melting Temperature (T_m) °C				
	EP-MgO	EP-ZrO ₂	EP-CuO	EP-CuO/ZrO ₂	EP-MgO/ZrO ₂
EP	334.17	334.17	334.17	334.17	334.17
0.3 %	351.46	345.06	346.86	346.74	345.46
0.6 %	347.37	345.85	349.86	349.86	338.09
0.9 %	329.95	334.47	340.26	340.26	330.03



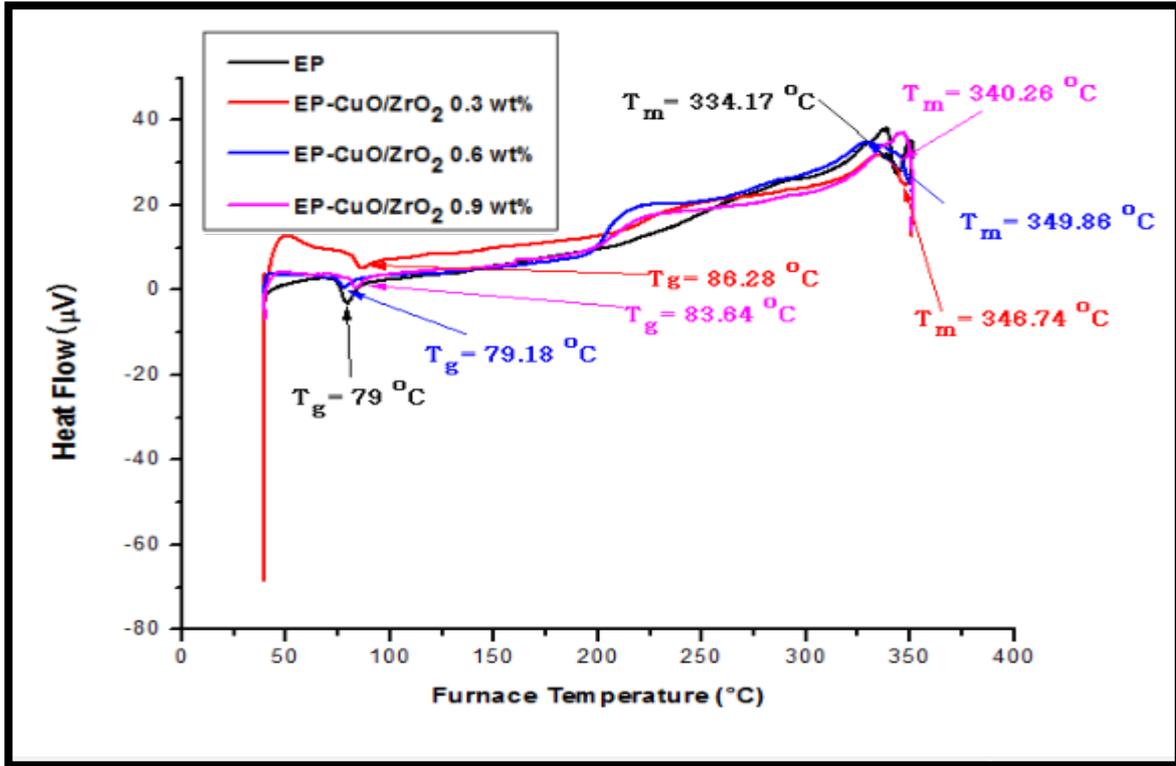
الشكل (4-17): مخطط (DSC) الحراري للمترابك EP-MgO بنسب وزنية مختلفة.



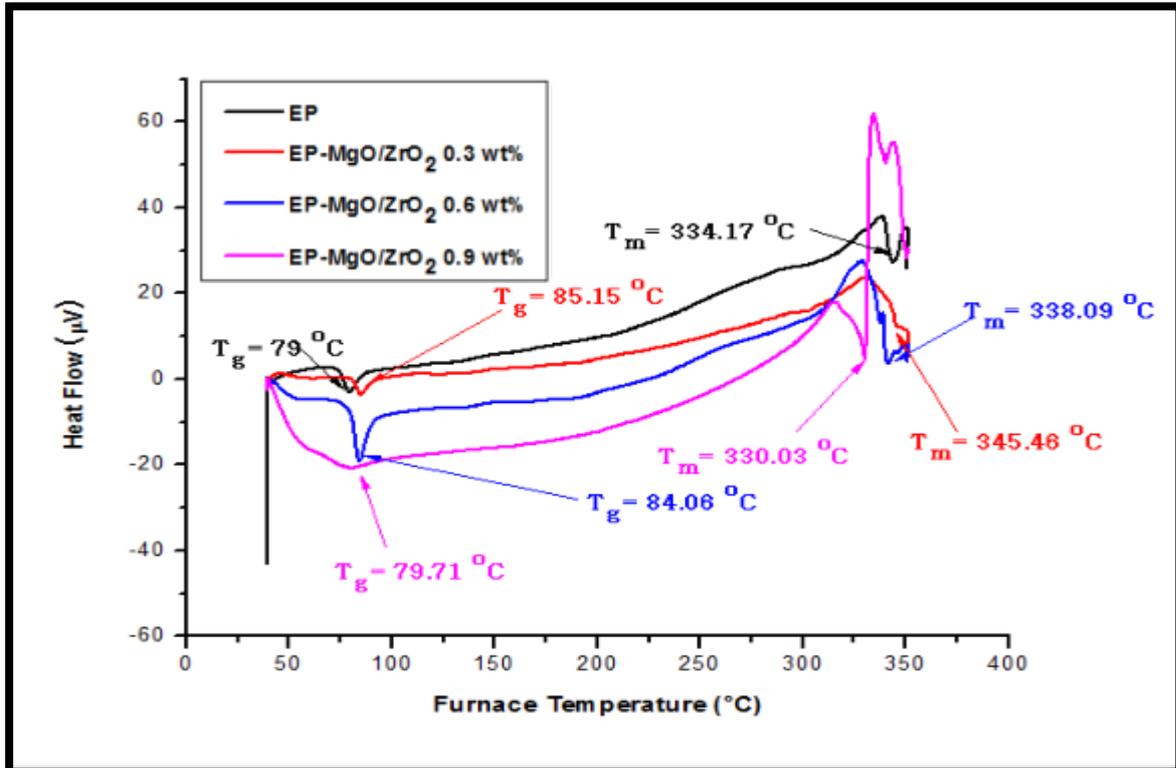
الشكل (16-4): مخطط (DSC) الحراري للمركب EP-ZrO₂ بنسب وزنية مختلفة.



الشكل (17-4): مخطط (DSC) الحراري للمركب EP-CuO بنسب وزنية مختلفة.



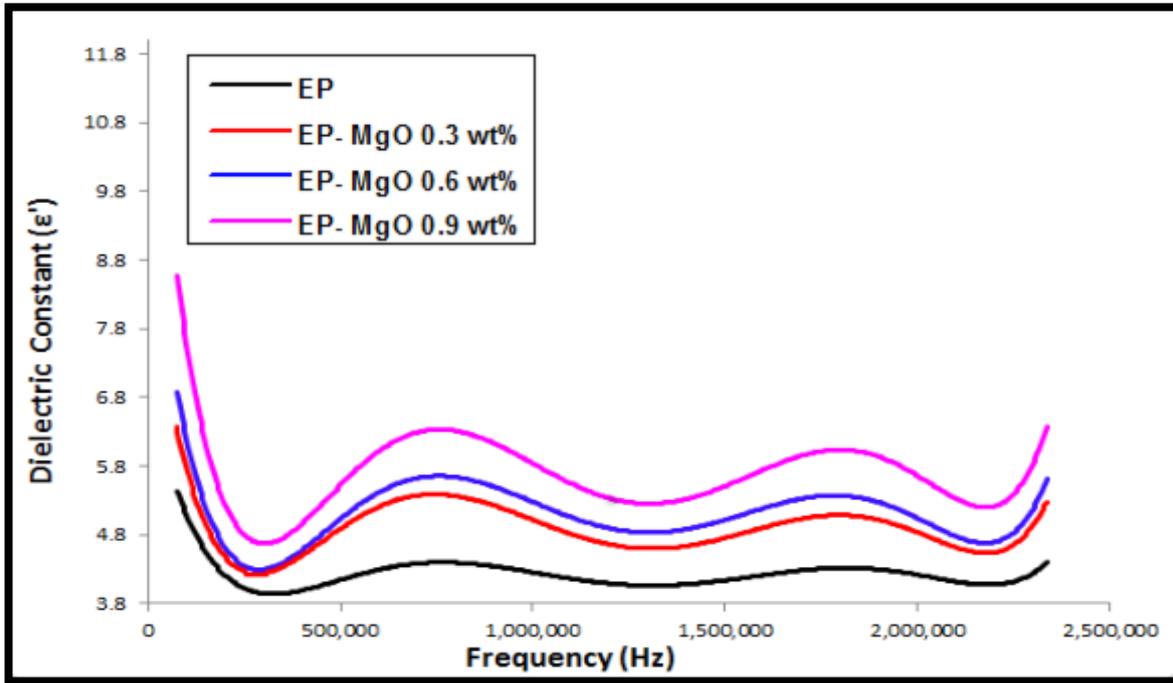
الشكل (18-4): مخطط (DSC) الحراري للمترابك الهجين EP-CuO/ZrO₂ بنسب وزنية مختلفة.



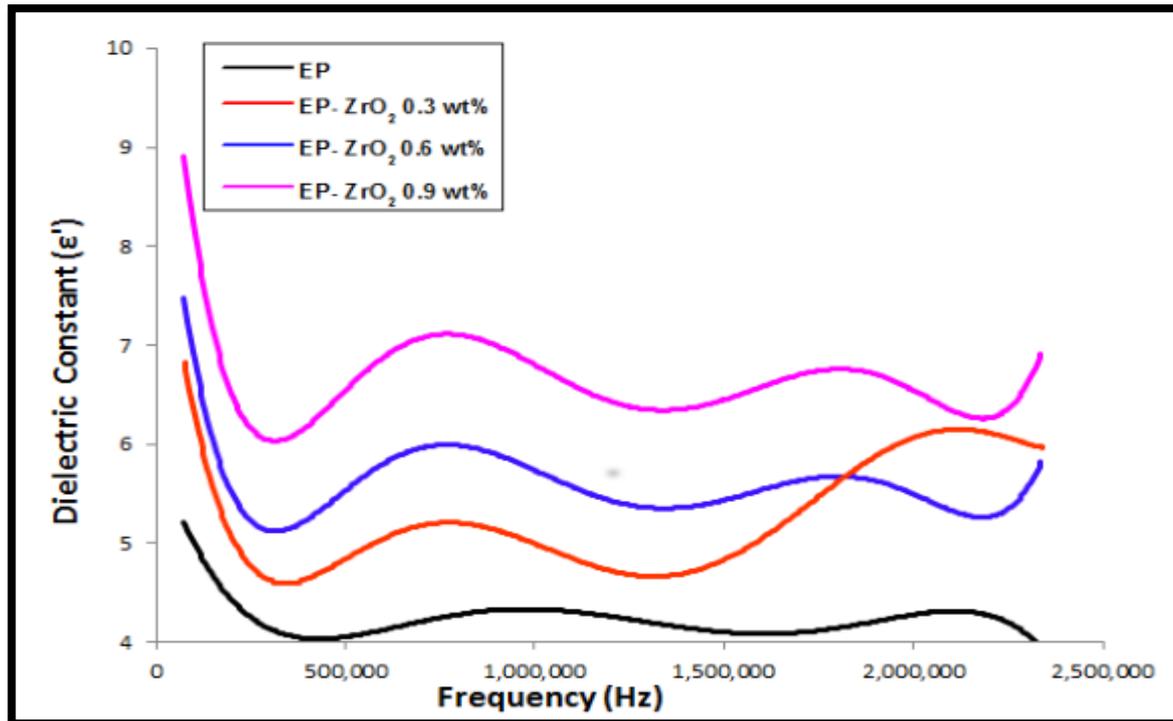
الشكل (19-4): مخطط (DSC) الحراري للمترابك الهجين EP-MgO/ZrO₂ بنسب وزنية مختلفة.

Dielectric Properties**(4-4) الخصائص الكهربائية (العزلية)****Dielectric Constant****(1-4-4) ثابت العزل الكهربائي (ϵ')**

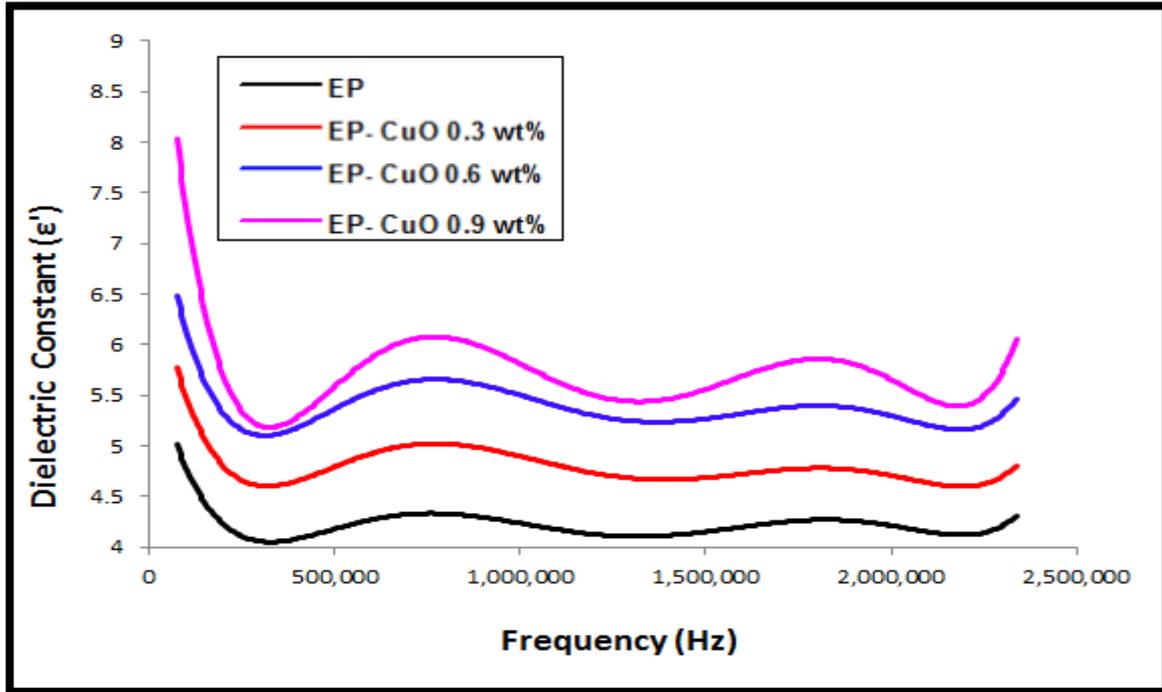
إن دراسة الخصائص الكهربائية (العزلية) للمواد تزودنا بمعلومات عن مجالات استخدام المواد في الأجهزة الكهربائية وغيرها. حيث تستخدم المواد ذات ثابت العزل القليل والمستقر مع مدى من الترددات في التطبيقات الإلكترونية، أما المواد ذات ثابت العزل العالي فيمكن استخدامها في المتسعات ذات الخزن العالي. ولهذا الغرض يتم دراسة الخصائص الكهربائية (العزلية) للمواد. حيث تم تسجيل ثابت العزل الكهربائي للأبيوكسي قبل وبعد التدعيم بالدقائق النانوية (MgO, ZrO₂, CuO) بنسب وزنية مختلفة ((0, 0.3, 0.6, 0.9) wt%) وبمدى ترددات (50Hz-5MHz) في درجة حرارة الغرفة وكما مبين في الأشكال من (4-20) الى (4-24)، حيث نلاحظ ان ثابت العزل الكهربائي يقل مع زيادة التردد ولجميع المترابكات، وهذا السلوك معروف للمواد العازلة كهربائياً [136]، وان تأثير الاستقطاب هو السبب في ذلك، لان ثابت العزل الكهربائي يعتمد بصورة رئيسة على الية الاستقطاب بأنواعه المختلفة (الاستقطاب الإلكتروني، الاستقطاب الأيوني، الاستقطاب الاتجاهي والاستقطاب الناتج عن السطح البيني) [137]. في منطقة الترددات الواطئة تحدث جميع انواع الاستقطاب، لذلك نرى قيم ثابت العزل الكهربائي اكبر ما يمكن، ولكن هذه القيم العالية لثابت العزل الكهربائي ناتجة بشكل فعلي عن استقطاب السطح البيني وذلك لكبر قيمته بالنسبة الى الانواع الاخرى من الاستقطاب. ففي منطقة الترددات الواطئة يكون تأثير الاستقطاب اكثر اهمية لان جزيئات المواد العازلة تحصل على زمن استرخاء كافٍ لتوجيهها باتجاه المجال الكهربائي المطبق عند تسليط الجهد الكهربائي، وبعد ذلك يصبح تأثير الاستقطاب غير مهم عند منطقة الترددات العالية بسبب عدم حصول الجزيئات على زمن استرخاء كافٍ لتوجيه نفسها باتجاه المجال الكهربائي البديل المطبق. لايعتمد ثابت العزل الكهربائي على التردد فقط بل يعتمد أيضاً على النسبة الوزنية للتدعيم، اذ نلاحظ ان ثابت العزل الكهربائي يزداد مع زيادة النسبة الوزنية للتدعيم عند نفس التردد للمترابكات كافة بسبب زيادة الاستقطابية [138]، ولكن عند المترابك الهجين EP-MgO/ZrO₂ نلاحظ ان ثابت العزل الكهربائي يزداد عند النسبة الوزنية (0.3 wt%) للتدعيم عند نفس التردد وبعدها يقل ثابت العزل الكهربائي مع زيادة النسبة الوزنية للتدعيم عند نفس التردد بحيث تصبح قيم ثابت العزل الكهربائي اقل من قيم ثابت العزل الكهربائي للأبيوكسي النقي عند نفس التردد، وربما يعود السبب في هذا النقصان بثابت العزل الكهربائي الى التوزيع غير المتجانس لمواد التدعيم داخل مادة الاساس، او ربما بسبب زيادة الوزن الجزيئي للسلاسل البوليمرية نتيجة ارتباطها بمواد التدعيم مما يسبب صعوبة دوران هذه السلاسل البوليمرية مع المجال الكهربائي المسلط مما يؤدي الى نقصان استقطابية المادة وبالتالي الى نقصان ثابت العزل الكهربائي [139].



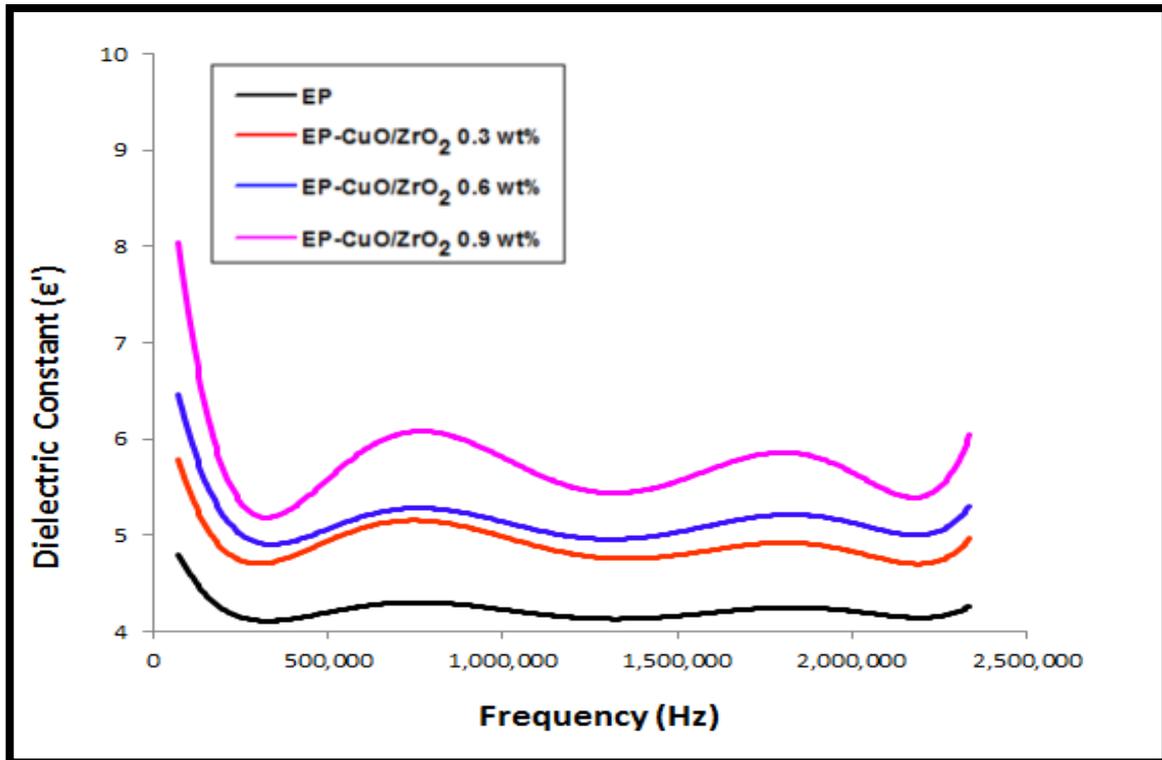
الشكل (20-4): ثابت العزل الكهربائي كدالة للتردد للمترابك EP-MgO بنسب وزنية مختلفة.



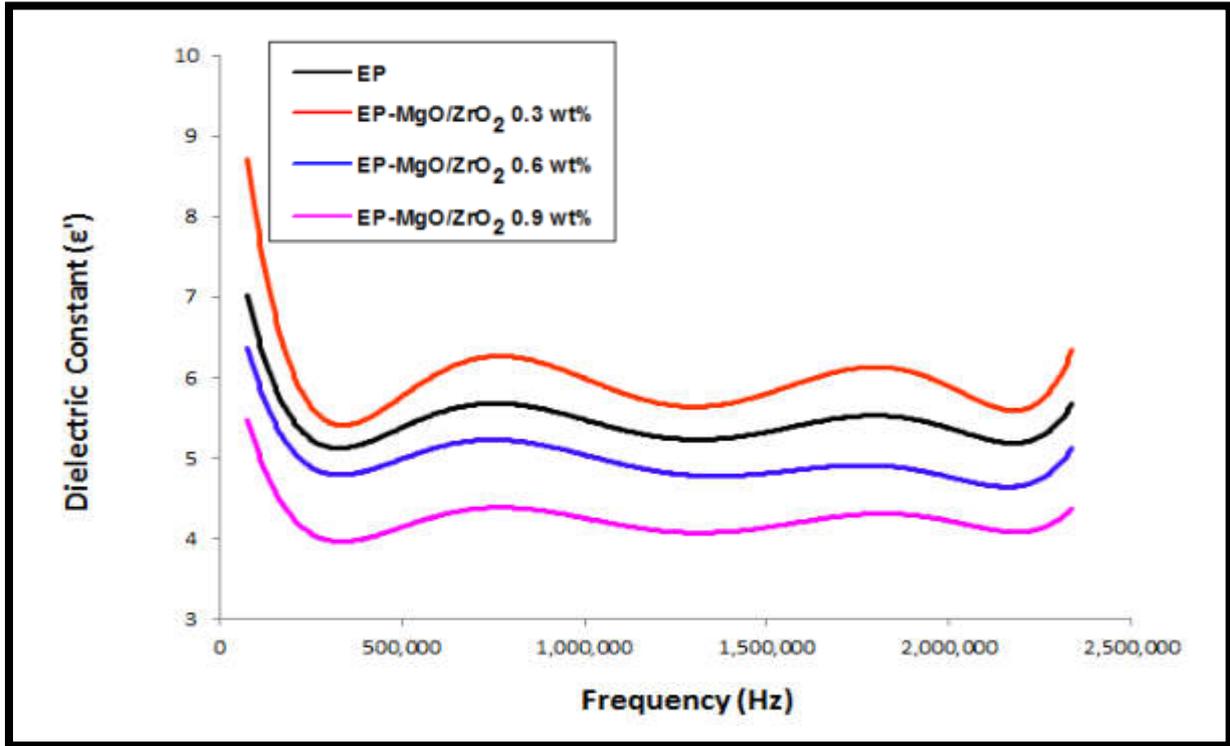
الشكل (20-4): ثابت العزل الكهربائي كدالة للتردد للمترابك EP-ZrO₂ بنسب وزنية مختلفة.



الشكل (20-4): ثابت العزل الكهربائي كدالة للتردد للمترابك EP-CuO بنسب وزنية مختلفة.



الشكل (20-4): ثابت العزل الكهربائي كدالة للتردد للمترابك الهجين EP-CuO/ZrO₂ بنسب وزنية مختلفة.



شكل (4-24): ثابت العزل الكهربائي كدالة للتردد للمترابك الهيدن EP-MgO/ZrO₂ بنسب وزنية مختلفة.

Conclusions

(5-4) الاستنتاجات

بعد إجراء الدراسة والبحث حول آلية التدعيم بالدقائق النانوية (MgO, ZrO₂, CuO) وتأثيرها في الخصائص الميكانيكية والحرارية والكهربائية (العزلية) لمادة بوليمرية صناعية تمثلت براتنج الايبوكسي تم التوصل الى أهم الاستنتاجات الخاصة بهذه الدراسة:

❖ الدقائق النانوية كافة تسبب تحسناً في الخصائص الميكانيكية لمترابكات الايبوكسي، ويتدرج هذا التحسن بالزيادة حتى اعلى قيمة للتدعيم عند النسبة الوزنية (0.9 wt%)، ويشير ذلك الى التأثير الايجابي للدقائق النانوية في المادة المترابكة البوليمرية، لأنها تعمل على تقليل هشاشة الراتنجات، وان اضافة مادة نانوية الى مادة الاساس فأنها تعمل على ان تكون مادة الاساس أكثر تراص وذات فجوات قليلة بين جزيئات مادة الاساس مما يجعل مادة الاساس أكثر قوة ومتانة وذات عمر طويل وكذلك تعمل على زيادة الكفاءة الانتاجية. وبذلك يمكن ان تستخدم هذه المترابكات البوليمرية في صناعة قاعدة طقم الاسنان لما تحوية هذه المترابكات البوليمرية من خصائص ميكانيكية جيدة من مقاومة للصدمة والصلاده والانحناء العالية لها.

- ❖ إن معامل التوصيل الحراري للمتراكبات البوليمرية كافة بعد التدعيم بالدقائق النانوية بنسب وزنية مختلفة سلك سلوكاً غير منتظم بالمقارنة مع الايبوكسي النقي، ووجد أن معامل التوصيل الحراري لهذه المتراكبات البوليمرية صغير جداً ولهذا يمكن ان تستخدم هذه المتراكبات البوليمرية كدرع عازل للحرارة.
- ❖ أظهر الفحص بجهاز المسعر الحراري التفاضلي (DSC) لمادة الايبوكسي النقي بأن درجة الانتقال الزجاجي تزداد بشكل غير منتظم مع زيادة النسبة الوزنية للتدعيم بالدقائق النانوية، وبذلك فإن هذه المتراكبات البوليمرية يمكن ان تستخدم كمثبطات للهب، بينما درجة الانصهار البلورية تزداد بشكل غير منتظم مع زيادة النسبة الوزنية للتدعيم بالدقائق النانوية ولكن نلاحظ ان درجة الانصهار البلورية سلكت سلوكاً غير منتظم عند بعض النسب الوزنية للتدعيم بالدقائق النانوية بالمقارنة مع الايبوكسي النقي.
- ❖ زيادة ثابت العزل الكهربائي مع زيادة النسبة الوزنية للتدعيم بالدقائق النانوية عند نفس التردد لبعض المتراكبات البوليمرية، ونقصان ثابت العزل الكهربائي مع زيادة التردد للمتراكبات البوليمرية كافة ولجميع النسب الوزنية للتدعيم، وفي منطقة الترددات العالية فإن هذه الخصائص العزلية لاتعتمد على التردد وتبقى ثابتة مما يشير الى امكانية استخدام هذه المتراكبات البوليمرية في الاجهزة التي تتطلب استقرار في الخصائص العزلية في الترددات العالية.

(4-6) التوصيات والإعمال المستقبلية

Recommendations and Future Works

- ❖ دراسة خاصة الانتشارية و تأثير الغمر في بعض المحاليل (المذيبات) على الخصائص الفيزيائية لمتراكبات الايبوكسي المدعمة بالجسيمات النانوية (MgO, ZrO₂, CuO).
- ❖ دراسة تأثير درجة الحرارة على الخصائص الفيزيائية لمتراكبات الايبوكسي المدعمة بالجسيمات النانوية (MgO, ZrO₂, CuO).
- ❖ تحضير متراكبات بوليمرية مدعمة بالجسيمات النانوية (MgO, ZrO₂, CuO) على اساس الخليط البوليمري (EP-PS) ودراسة بعض الخصائص الفيزيائية لها.
- ❖ دراسة بعض الخصائص الميكانيكية مثل (الانضغاطية والزحف والكلال) والتحلل الحراري الوزني (TGA) لمتراكبات الايبوكسي المدعمة بالجسيمات النانوية (MgO, ZrO₂, CuO).

❖ دراسة تأثير بعض المواد المشعة على الخصائص المورفولوجيا والفيزيائية لمتراكبات بوليميرية مادة اساسها الايبوكسي ومدعمة بالجسيمات النانوية (MgO, ZrO₂, CuO).



المصادر

References

- [1] R. Donald, Askeland and P. P. Phule, "**The Science & Engineering Of Material**", 4th ed. PWC, (2006).
- [2] V. Raghavan, "**Materials Science & Engineering-Afirst Course**", 2nd.ed, Prentice- Hall of India Private Limited, New Delhi, (1979).
- [3] W. Bolton, "**Engineering Materials Technology**", 3rd ed., a Member of Reed Elsevier Group, (1998).
- [4] Department of Defense Hand Book, "**Composite Material Hand Book**", Polymer Matrix Composites, Vol.1, U.S.A., (2002).
- [5] D. L. James, "**Degradation, Fatigue, and Failure of Resin Dental Composite Materials**", Journal of Dental Research, Vol. 87, No. 8, pp. (710-719), (2008).
- [6] M. C. Gupta and A. P. Gupta, "**Polymer Composite**", New Age International LTD, Publishers, (2005).
- [7] B. Harris, "**Engineering Composite Material**", Institute of Materials London, (1999).
- [8] M. A. Meyers and K. K. Chawla, "**Mechanical Behavior of Materials**", Prentice - Hall, Inc New Jersey, (1999).
- [9] فانتن نعمان عبدالله، "دراسة تأثير الحجم الحبيبي للدقائق ودرجة حرارة التشكيل على الخواص الميكانيكية للمواد المتراكبة ذات الاساس من البوليمر"، مجلة الهندسة والتكنولوجيا، المجلد 25، العدد 5، (2007).
- [10] L. Holliday, "**Composite Materials**", Elsevier Publishing Company, London, (1966).

- [11] ثعبان كاظم خضير، "الكيمياء الصناعية"، الطبعة الاولى، دار المسيرة للنشر والتوزيع، عمان، (2007).
- [12] R. M. Jones, "**Mechanics of Composite Materials**", Scripta Book Company, New York, (1975).
- [13] M. O. W. Richarson, "**Polymer Engineering Composites**", Applied Science Pub .LTD, London, (1977).
- [14] S. S. Schwartz, "**Plastics Materials & Processes**", Van Nostrand Reinhold Company Inc, New York, (1982).
- [15] P. A. Thernton and V. J. Colangelo, "**Fundamentals of Engineering Materials**", Prentice- Hall, Inc., (1985).
- [16] G. S. Misra, "**Introductory Polymer chemistry**", New Age International (p) Limited, Publishers, New Delhi, (1993).
- [17] W. Zhou and D. Yu, "**Thermal and Dielectric Properties of the Aluminum Particle/Epoxy Resin Composites**", Journal of Applied Polymer Science, Vol. 118, pp. (3156–3166), (2010).
- [18] R. Khan, U. A. Samad, M. A. Alam, M. Boumaza and S. M. Al-Zahrani, "**Effect of ZnO Nano Powder on Mechanical Properties of Epoxy/Polyiminomide Adduct Coating**", Interantional Jouranal of Advances in Computer Science and Technology (IJACST), Vol. 2, No. 11, pp. (25-28), (2013).
- [19] خالد راشد الراوي و رفقه عامر سلمان، "دراسة بعض الخواص الميكانيكية لمتراكب Epoxy-MgO"، مجلة جامعة النهرين، المجلد (17)، العدد (1)، ص (10-14)، (2014).

- [20] M. T. Le and S. C. Huang, "**Thermal and Mechanical Behavior of Hybrid Polymer Nanocomposite Reinforced with Graphene Nanoplatelets**", *Materials*, Vol. 8, pp. (5526-5536), (2015).
- [21] N. Jassim, A. J. Farhan and R. Hilal, "**Charpy Impact Test for SiO₂ (Nano-Micro) Particles/Epoxy Composites**", *International Journal of Recent Scientific Research*, Vol. 6, pp. (4623-4628), (2015).
- [22] A. Q. Abd Allah, H. S. Hussain and K. S. Mohan, "**Dielectric properties of Ep/TiO₂; Ep/MgO Nano Composites**", *Iraqi Journal of Physics*, Vol. 14, No. 31, pp. (116-121), (2016).
- [23] B. M. Deyaa and T. M. Hameed, "**A Study of the Effect of Nano Materials on the Physical Properties of Epoxy Composites**", *Iraqi Journal of Physics*, Vol. 15, No. 32, pp. (68-76), (2017).
- [24] D. Shen, Z. Zhan, Z. Liu, Y. Cao, L. Zhou, Y. Liu, W. Dai, K. Nishimura, C. Li, Ch. T. Lin, N. Jiang and J. Yu, "**Enhanced Thermal Conductivity of Epoxy Composites Filled with Silicon Carbide Nanowires**", *Scientific Reports*, Vol. 7, pp. (1-11), (2017).
- [25] W. H. Jassim and S. A. Salih, "**Comparing the Behaviors of ZrO₂ and MgO Nanoparticles in Mechanical Properties Improvement of Epoxy Composite**", *Journal of the College of Basic Education*, Vol. 24, No. 100, pp. (133-146), (2018).
- [26] S. K. Singh, A. Kumar and A. Jain, "**Effect of Nanoparticles Dispersion on Viscoelastic Properties of Epoxy-Zirconia Polymer Nanocomposites**", *Materials Science and Engineering*, Vol. 330, pp. (1-5), (2018).

- [27] S. I. Hussein, "On Mechanical and Thermal Properties of Epoxy/Graphene Nanocomposites", Nano Hybrids and Composites, Vol. 22, pp. (23-33), (2018).
- [28] N. A. Hameed, W. H. Jassim and B. M. Dheyaa, "Study of the Properties of Epoxy Nano Composite Reinforced with Different Weight Percentages of Antimony Trioxide", Diyala Journal for Pure Sciences, Vol. 15, No. 2, pp. (2222-8373), (2019).
- [29] W. Zhao¹, Y. Fan and H. Chen, "Dielectric Properties and Corona Resistance of Si-B/Epoxy Nano-Composites", Journal of Materials Science: Materials in Electronics, Vol. 30, pp. (16298–16307), (2019).
- [30] S. Verma¹, S. Mohanty and S. K. Nayak, "Preparation of Hydrophobic Epoxy Polydimethylsiloxane Graphene Oxide Nanocomposite Coatings for Antifouling Application", Soft Matter, Vol. 10, pp. (1-47), (2019).
- [31] A. Lanna, M. Suklueng, Ch. Kasagepongsan and S. Suchat, "Performance of Novel Engineered Materials from Epoxy Resin with Modified Epoxidized Natural Rubber and Nanocellulose or Nanosilica", Hindawi Advances in Polymer Technology, Vol. 10, pp. (1-11), (2020).
- [32] Seymours, "Polymeric Composites", Vsp. Vtrecht. The Netherlands, Aldenpress Oxford, (1990).
- [33] G. Premamoy, "Polymer Science and Technology of Plastics and Rubbers", TATA MC Graw –Hill, New Delhi, (1990).
- [34] P. M. Jean, Z. Gérald and W. Kurz, "Introduction to Materials Science", Chapter 15 - Polymer Structures, University of Tennessee, Dept. of Materials Science and Engineering, Elsevier, (2002).

- [35] A. Al. A. Georgis. and A. K. Al. G. Hussein, "**Technology and Polymer Chemistry**", Faculty of Science - University of Basra, (1983).
- [36] J. R. Frid, "**Polymer Science & Tevhnology**", 2nd Ed, (2003).
- [37] D. Hull, "**An Introduction to Composite Materials**", Cambridge University Press, First Published, (1981).
- [38] R. J. Crawford, "**Plastic Engineering**", 2nd Ed., Pergamon Press, NewYork, (1987).
- [39] H. S. Kaufman, and J. J. Falcetta, "**Introduction of Polymer Science and Technology**", John Wiely and Sons, Inc., NewYork, (1997).
- [40] الديري، فواز، "الجزيئات الضخمة والصناعات البلاستيكية"، جامعة دمشق - كلية العلوم، (1996).
- [41] وسن جبار مناتي، "دراسة السلوك الدقائقي لمادة متراكبة بوليميرية دقائقية"، رسالة ماجستير، قسم العلوم التطبيقية، الجامعة التكنولوجية، (2005).
- [42] A. A. Mohammed, "**Plastics Chemistry**", Library Printing and Publishing, University of Mosul. (1993).
- [43] R. H. John, Translation., N. Al. Z. Mehdi. and A. S. Qais, "**Principles of General Chemistry and Organic and Bio**", Part 2, John Riley House Publishers, Basra, (1978).
- [44] H. M. Al. S. Bushra, "**Study Mechanical Properties of Polymer Blend Using Thermoplastic Polymers**", Master Thesis, Department of Material Applied Sciences, University of Technology, (2007).
- [45] R. J. C. Ford, "**Plastics Engineering**", 2nd Ed., Pergamon Press, U.K., (1987).

- [46] Q. A. AL-Jbouri, "**Studying Mechanical and Physical Properties for Polymer Matrix Composite Material Reinforced by Fibers and Particles**", M.Sc. Thesis, Material Engineering, (2008).
- [47] F. Kreith, "**Mechanical Engineering Handbook (Section-12-Composites by Victor A. Green hut**", CRC Press LTD., (1999).
- [48] S. L. Kakani and A. Kakani, "**Material Science**", New Age International LTD., Publishers, pp. (594-596), (2004).
- [49] M. A. Meyers and K. K. Chawal, "**Mechanical Behaviour of Materials**", Prentice Hall, (1999).
- [50] A. H. Charles, "**Modern Plastics Handbook**", Mc-Graw Hill Co., (2000).
- [51] R. S. Bauer, "**Applications of Epoxy Resins in Advanced Composites**", Proc. 34th Internatl. Sampe Symposium, Reno, Nevada, PP. 1889-1990, May (1989).
- [52] Y. Li and S. Mao, "**Study on the Properties and Application of epoxy resin/Polyurethane Semi-interpenetrating polymer networks**", J. Appl. Polym. Sci., Vol.61, pp. (2059-2063), (1996).
- [53] M. A. Marciano, R. Ordinola-Zapata, T. V. R. N. Cunha, M. A. H. Duarte, B. C. Cavenago, R. B. Garcia, C. M. Bramante, N. Bernardineli and I. G. Moraes, "**Analysis of Four Gutta-Percha Techniques Used To Fill Mesial Root Canals of mandibular Molars**", International Endodontic Journal, Vol. 44 ,No. 4, pp. (321–329), (2011).
- [54] D. Hull. and T. W. Clyne, "**An Introduction to Composite Materials** ", 2nd Ed., Cambridge University Press, New York, (1996).
- [55] محمد شريف الاسكندراني، "تكنولوجيا النانو من اجل غد افضل"، عالم المعرفة، (2010).

- [56] Q. Zhu, A. R Oganov and A. O. Lyakhov, "**Novel Stable Compound in Mg-O System Under High Pressure**", Physical Chemistry.chmical.physics Journal, Vol. 15, No. 20, pp. (2696-7700), (2013).
- [57] G. Dercz, K. Prusik, L. pajaki, R. Pielaszek, J. J. Malinowski and W. pudlo, "**Structure Studies On NanoCrystalline Powder of MgO Xerogel Prepared By The Sol-Gel Method**", Journal of Materials Science-Poland, Vol. 27, No.1, pp. (202-207), (2009).
- [58] حسن عباس جاسم، "تحضير ودراسة بعض الخصائص الفيزيائية لطلاء الايبوكسي الراتنجي المدعم بحبيبات اوكسيد المغنيسيوم النانوية لمقاومة تآكل الحديد الكربوني في الاوساط المائية"، رسالة ماجستير، قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة ديالى، (2018).
- [59] J. J. Bone, "**Zirconium Dioxide**", Class and Ceramics, Vol. 38, No. 2, pp. (60-63), (1991).
- [60] C. Suci, A. C. Hoffmann and L. Gagea, "**Sol-Gel Production of ZrO₂ and 8YSZ with New Organic Precursor**", Elsevier Science, PP.4, Mar. (2006).
- [61] Apple Insider 30 November, "**Apple Seeks Patent on Radio-Transparent Zirconia CE Cosings**", (2006).
- [62] C. Aksel, "**Ceramic International**", No. 29, pp.(313-316), (2002).
- [63] Z. M. Jazebaki, "**Oxide Semiconductors**", Vol.4, New York, (1974).
- [64] J. B. Forsyth and S. Hull, "**The Effect of Hydrostatic Pressure on the Ambient Temperature Structure of CuO**", J. Phys. Condens. Matter 3, pp. (5257-5261), (1991).

- [65] W. M. Haynes and D. R. Lide, **"CRC Hand Book of Chemistry Physics"**, 95 Thed, CRC press, (2014) .
- [66] Z. H. Gan, G. Q. Yu, B. K. Tay, C. M. Tan, Z. W. Zhao and Y. Q. Fu, **"Preparation and Characterization of Copper Oxide Thin Films Deposited by Filtered Cathodic Vacuum Arc"**, J. of Physics D. Applied Physics Vol. 37, No. 1, p. 81, (2004).
- [67] B. Balamurugan and B. R. Mehta, **"Optical and Structural Properties of Nanocrystalline Copper Oxide Thin Films Prepared by Activated Reactive Evaporation"**, Thin Solid Films, Vol. 396, pp. (90-96), (2001).
- [68] M . Ando, T. Kobayashi and M. Haruta, **"Optical CO Detection by Use of CuO/Au Composite Films"**, Sensors and Actuators B: Chemical, Vol. 25, No. (1-3), pp. (851-853), (1995).
- [69] P. O. Larsson, A. Andersson, R. L. Wallengerg and B. Svensson, **"Combustion of CO and Toluene; Characterisation of Copper Oxide Supported on Titania and Activity Comparisons with Supported Cobalt, Iron, and Manganese Oxide"**, Journal of Catalysis, Vol. 163, No. 2, pp. (279-293), (1996).
- [70] W. G Milton, **"The Theory of Composites"**, Cambridge University Press, (2004).
- [71] R. M. A. Najla, **"The Manufacture and Study The Mechanical and Thermal Properties of Polymer blends and Other are Subsidized"**, Ph.D. thesis, Department of Applied Science - University of Technology, (2002).
- [72] F. W. Billmeyer, **"Text book Polymer Science"**, John Wiley and Sons, Inc. New York, (1971).
- [73] N. G. Mccrum, C. P. Buckley and C. B. Bucknall, **"Principles of Polymer Engineering"**, 2nd Edition, John Wiley & Sons, New York, (1997).

- [74] J. P. Schaffer, S. Ashok, "The Science and Design of Engineering Materials", Richard D. Irwin, Inc., (1995).
- [75] D. J. Collins, "Damage Detection in Composite Materials Using Acoustic Emission and Self-Sensing Fibers", Department of Metallurgy and Materials School of Engineering, the University of Birmingham (2009).
- [76] A. Kaw, "Mechanics of Composite Materials," Taylor & Francis, (2006).
- [77] Z. A. I. Al-Jeboory, "Study of The Physical Properties of Reinforced Polymer Blends", A Master Thesis, College of Science , Al-Mustansiriyah University, (2004).
- [78] W. Bolton, "Engineering Materials Technology", Third Edition Butter Worth-Heineman, (1998).
- [79] M. S. Bhanthnagar, "A Text Book of Polymers Chemistry and Technology Polymers, Processing and Applications", S. Chand and co. ltd, Ram Nagar, New-Delhi-110, Vol. 111, (2004).
- [80] رنا مهدي صالح العبيدي، "دراسة الخواص الميكانيكية لبعض المتراكبات الهجينة متعددة الطبقات"، رسالة ماجستير، قسم العلوم التطبيقية، الجامعة التكنولوجية، (2004).
- [81] D. Hull, "An Introduction to Composite Materials", Cambridge University Press, First Pub., (1981).
- [82] زيد عاصم اسماعيل، "دراسة الخواص الفيزيائية لخلانط بوليمرية مدعمة"، رسالة ماجستير، الجامعة المستنصرية، كلية العلوم، قسم الفيزياء، (2004).
- [83] M. M. Schwartz, "Composite Materials Hand Book", Mc Graw Hill Company, New York, (1984).
- [84] Kleinhdz R. and J. Molinir, "Vetrotex Fiber Work", Journal of Materials Science, Vol. 22, (1986).

- [85] W. D. Callister, "**Materials Science & Engineering An Introduction**", 6th Ed., John, Wiley and Sons, Inc., NewYork, (2003).
- [86] W. David, "**Metal Structure and Thermal Properties and Transactions**", Translated by Jafar Al-Haidari and Adnan Nama, Baghdad University of Technology, (1989).
- [87] M. A. Meyers and K. K. Chawla, "**Mechanical Behavior of Materials**", 2nd Ed., Cambridge University Press, (2009).
- [88] S. Siti and A. G. Supri, "**LDPE-Isophthalic Acid-Modified Egg Shell Powder Composites (LDPE/ESPI)**", Journal of Physical Science, Vol. 20, No. 1, pp. (87-98), (2009).
- [89] ASTM, "**Annual Book of ASTM**", Standard Section 15- General Products, Vol. 15, No. 3, (1985).
- [90] R. J. Crawford, "**Plastics Engineering**" 2nd Ed Pergamom Press, New Yourk, (1987).
- [91] I. B. David, "**An Introduction to Polymer Physics**," Cambridge University Press, (2002).
- [92] R. L. Timings, "**Engineering Materials**" Vol.1, 2nd Ed., Pearson Education LTD, England, (1998).
- [93] D. C. William, "**Fundamentals of Materials Science and Engineering**" John Wiley & Sons, Inc., (2003).
- [94] G. A. Dieter, translated by I. K. Abdul Razak and M. A. Abdul Wahab, "**Mechanical Metallurgy**" University of Technology, Department of Production Engineering and Minerals, (1994).
- [95] D. Kopeliovich, "**Shore (Durometer) Hardness Test**," Subs & Tech, last modified: 28 Apr, (2012).

- [96] ASTM D790-10, "Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials", Dostupné také z: <http://www.astm.org/Standards/D790.htm>, (2010).
- [97] I. S. Ibrahim, "Physics (1) Heat and Properties of the Material and Sound," Mnchoat House Salary for University Research, Beirut, Lebanon, (1983).
- [98] J. Comyn, "Polymer Permeability", Elsevier Applied Science Publishers LTD, (1985).
- [99] E. Grimsehl, "A Textbook of Physics", Blackie & Sons, London, Vol. 11, (1994).
- [100] H. J. Ott, "Thermal Conductivity of Composite Materials", Plastics & Rubber Processing Applications, Vol. 1, No. 1, (1981).
- [101] M. P. Duncan and J. Mark, "Thermal Conductivity of PTFE and PTFE Composites", Material Characterization by Thermal Analysis and Calorimetry, Vol. 392–393, No. 15, pp. (231–236), (2002).
- [102] R. O. Bolt and J. G. Carrol, "Radiation Effect of Organic Materials", Academic press, New York, (1963).
- [103] Y. Sheng, S. Jiang and H. Tsao, "Effects of Geometrical Characteristics of Surface Roughness on Droplet Wetting", The Journal of Chemical Physics, Vol. 27, pp. 234704-1–234704-7, (2007).
- [104] علي عبد الستار صلال السارة، "تحضير اغشية خليط بوليمري (PVA/PVP) ودراسة خصائصه الفيزيائية" رسالة ماجستير، كلية العلوم، جامعة ديالى، (2019).
- [105] K. C. Kao, "Dielectric Phenomena in Solid", Elsevier Academic press, (2004).

- [106] H. R. Allcocke, F. W. Lampe and J. E. Mark, "**Contemporary Polymer Chemistry**", 3rd Ed, Pearson Education, Inc, Upper Saddle River, New Jersey, (2003).
- [107] W. D. Callister and G. David, "**Material Science and Engineering, An Introduction**", 9th Ed, John wiley and Sons Inc, (2014).
- [108] Z. Han and A. Fina, "**Thermal Conductivity of Carbon Nanotubes and their Polymer Nanocomposites**", Progress in Polymer Science, Vol. 36, No. 7, pp. 914-944, (2011).
- [109] A. Gupta and K. Santosh, "**Materials Science for Engineering**", CBS Publishers and Distributors, New Delhi, (2004).
- [110] S. C. Tjong and Y. M. Mai, "**Physical Propertise and Applications of Polymer Nanocomposites**", Woodhead Publishing Limited, (2010).
- [111] R. E. Nwenham, "**Propertise of Materials Anisotropy Symmetry, Structure**", Oxford University Press, (2005).
- [112] R. A. Abbas, "**Studing Some Dielectric Properties and Effective Parameters of Composite Materials Containing of Novolak Resin**", Eng-ineering and Technology, Vol. 25, No. 8, pp. 277-288, (2007).
- [113] T. W. Dakin, "**Conduction and Polarization Mechanisms and Trends in Dielectrics**", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 22, No. 5, pp. 11-20, (2006).
- [114] P. Maheshwari, "**Electronic Components and Processes**", New Age International Publishers: New Delhi, India, (2007).
- [115] نورظايف حايف الشواك، "تحضير و دراسة الخصائص الفيزيائية لمادة متراكبة ذات اساس بوليمري مدعمة بمواد نانوية"، رسالة ماجستير، كلية التربية، الجامعة المستنصرية، (2014).

- [116] J. Behari, "**Microwave Dielectric Behavior of Wet Soils**", Springer Netherlands, (2005).
- [117] H. J. Abdul Hussein, "**The Effect of Immersion in Chemical Solutions on the Mechanical and Physical Properties of Polymeric Composite Reinforcement by Nano-Alumina Particles**", Iraqi Journal of Sciences, Vol. 56, No. 3, pp. 1952- 1963, (2015).
- [118] N. A. Ali, S. I. Hussein, M. K. Jawad and I. A. AL-Ajaj, "**Effect of Al₂O₃ and SiO₂ Nanoparticle on Wear, Hardness and Impact behavior of Epoxy Composites**", Chemistry and Materials Research, Vol. 7, No. 4, pp. 2225-3224, (2015).
- [119] H. S. Hamad and W. B. Salih, "**Study of Effect Add of Nanoparticles Zirconium Oxide with Yttrium (ZrO₂Y₂O₃) and Zirconium Oxide (ZrO₂) on the Mechanical Properties of Unsaturated Polyester**", Anbar University Journal of Pure Sciences, Vol. 13, No. 3, (2017).
- [120] K. R. Al-Rawi, A. A. Bander and S. J. Aljoboury, "**Fracture Toughness and Hardness studying for Polymer Ceramic Composite**", Baghdad Journal of Science, Vol. 11, No. 3, pp. 545-553, (2014).
- [121] H. M. Ali, R. A. Rasool and S. Y. Moustafa, "**Reinforcement Effect of Alumina and Silica on the Mechanical Properties of Mixture Polyesters (Unsaturated Polyester / Polyurethane)**", Rafidain Journal of Science, Vol. 29, No. 2, pp. 51-63, (2020).
- [122] M. Meyers and K. Chawla, "**Mechanical Behavior of Materials**", Prentice Hall, New Jersey (1999).

- [123] H. H. Thanon, "Effect of Temperature on Mechanical and Thermal Properties of Polyester Matrix Reinforced by Ordinary Glass Powder", Al-Rafidain Science Journal, Vol. 24, No. 3, pp. 75-85, (2013).
- [124] اريج رياض سعيد و د.بسه وينج نور الدين رفيق، "دراسة الخصائص الميكانيكية لمتراكبات البولي اثيلين المدعم بدقائق مسحوق الصدف"، مجلة الهندسة والتكنولوجيا، المجلد (29)، العدد (15)، ص (607-620)، (2011).
- [125] H. H. Thanoun and N. A. Hussein, "Mechanical and Physical Properties of Composites of Epoxy and Polyester Unsaturated is Reinforced with Glass fibers and Nano Alumina Powder", Journal of Education and Science, Vol. 28, No. 1, pp. 273-293 (2019).
- [126] H. H. Thanon Albyate and A. A. Mohammed Al jaboury, "Effect of Nano Silica Nano Alumina and Short Carbon Fibers Addition on Mechanical and Physical Properties of Blend Epoxy – Polyester", Iraqi Academic Journals, Vol. 14, No. 4, pp. 2616-6801, (2019).
- [127] V. Kovacevic, M. Leskovac and S. Blagojevic, "Morphology and Failure in Nanocomposites. Part II: Surface Investigation", Journal of Adhesion Science and Technology, Vol. 16, pp. 1915-1921 (2002).
- [128] I. F. Mokhtar, "Effect of MgO Additive On A.C & D.C Electrical Properties & Thermal Conductivity for Epoxy–MgO Composite", M.sc thesis, Baghdad University, College of Science, (2003).
- [129] هدى جبار عبد الحسين، "تصنيع عوازل حرارية وكهربائية من متراكبات الايبوكسي الدقائقية"، مجلة كلية التربية الأساسية، المجلد (21)، العدد (89)، ص (1-16)، (2015).
- [130] N. G. Mccrum, C. P. Buckly and C. B. Bucknall, "Principle of polymer Engineering", 2nd Ed., Jhon Wiley & Sons, New York, (1997).

- [131] S. S. Vaisakh, A. P. Mohammed, M. Hassanzadeh, J. F. Tortorici, R. Metz and S. Ananthakumar, "**Effect of Nano-modified SiO₂/Al₂O₃ Mixedmatrix Micro-Composite Fillers on Thermal, Mechanical, and Tribological Properties of Epoxy Polymers**", Polymer Advanced Technologies, Vol. 27, pp. 905-914, (2016).
- [132] O. W. Guirguis and M. T. H. Moselhey, "**Thermal and Structural Studies of Poly vinyl Alcohol and Hydroxypropyl Cellulose Blends**", Natural Science, Vol. 4, No. 1, pp. 57- 67, (2012).
- [133] D. Frihi, A. Layach¹, S. Gherib, S. Grgory, M. V. Karine, H. Satha and S. Roland, "**Crystallization of Glass-Fiber-Reinforced Polyamide 66 Composites: Influence of Glass-Fiber content Cooling Rate**", Composite Science and Techology, Vol. 130, pp. 70-77, (2016).
- [134] A. K. Bodempudi and N. Vasanthan, "**Crystallization Studies of Poly(Trimethylene Terephthalate)/Silica Nanocomposites Prepared by Sol–Gel Technique**", ACS Omega, Vol. 3, pp. 17797-17804, (2018).
- [135] N. Ibrahim, M. Jollands and R. Parthasarathy, "**Mechanical and Thermal Properties of Melt Processed PLA/Organoclay Nanocomposites**", IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 191, pp. 899-1757, (2017).
- [136] O. Hussin, "**Study The Dielectric Properties of (Polymer–Ceramic) Composite**", M.Sc thesis, Diyala University, College of Science, pp. 87 -90, (2012).
- [137] E. M. Abdelrazek, I. S. Elashmawi, A. El-Khodary, and A. Yassin, "**Structural, Optical, Thermal and Electrical Studies on PVA/PVP**

-
- Blends Filled with Lithium Bromide"**, Current Applied Physics, Vol. 10, No. 2, pp. (607-613), (2010).
- [138] G. C. Psarras, K. G. Gatos, P. K. Karahaliou, S. N. Georga, C. A. Krontiras and J. Karge, "**Relaxation Phenomena in Rubber/Layered Silicate Nanocomposites**", Express Polymer Letters, Vol. 1, p.p. 837-845, (2007).
- [139] S. Basavaraja, "**Dielectric Properties of PMMA and its Composites with ZrO₂**" Physics Procedia, Vol. 49, pp.15-26, (2013).

Abstract

In this research the additive effect of (Magnesium Oxide (MgO), Zirconium Oxide (ZrO₂), Copper Oxide (CuO)) nanoparticles to epoxy resin as a matrix have been studied, In addition to manufacturing hybrid composites from the same nanoparticles which are (CuO/ZrO₂, MgO/ZrO₂) to epoxy resin as a matrix too. The hand lay-up method was used to manufacturing the composites from the epoxy resin and the nanoparticles with different weight ratios (0, 0.3, 0.6, 0.9 (wt%)), the mechanical, thermal and electrical (dielectric) tests have been done for all prepared composites.

The results of the impact test are shown the increasing the weight ratio of the reinforcement materials increases the impact strength value for pure epoxy and the highest value of impact strength was for the composite (EP-ZrO₂) which equal (19.59 KJ/m²). And the hardness test results showed that the hardness of the pure epoxy increases with increasing the weight ratio of the reinforcement materials and the highest value of hardness was for the composite (EP-MgO) which equal (84.3). While the results of the bending (three points) test are shown the increasing the weight ratio of the reinforcement materials increases the deflection and the value of the fracture stress and the highest value of fracture stress at hybrid composite (EP-MgO/ZrO₂) which equal (4307.79 MPa).

The effect of the weight ratio of the reinforcement materials on the thermal properties of all polymer composites have been studied also, The practical results have shown that the thermal conductivity coefficient of all polymer composites behaves irregularly compared with pure epoxy by increasing the weight ratio of reinforcement materials. The differential scanning calorimetric (DSC) test has showed that the glass transition temperature of all polymer composites increases at all weight ratios of reinforcement materials compared

with pure epoxy and the highest value of glass transition temperature was for the composite (EP-ZrO₂) which equal (89.97 °C), also the crystalline melting temperature of all polymer composites has showed irregular behavior compared with pure epoxy by increasing the weight ratio of reinforcement materials.

The effect of the weight ratio of the reinforcement materials on the electrical (dielectric) properties of all polymer composites have been studied, the practical results have shown a decrease in dielectric constant with increase the frequency for all weight ratios of reinforcement materials, and also increasing the dielectric constant with increasing the weight ratio of the reinforcement materials at the same frequency.

Republic of Iraq
Ministry of Higher Education
and Scientific Research
University of Diyala
College of Science
Department of Physics



***Preparation and Study of Physical
Properties of Polymeric Composites
Reinforced by Nanoparticles***

A Thesis

Submitted to the Council of the College of Science-University of Diyala
in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of
Science in Physics

by

Haneen Mahdi Hassan

B. Sc. in Physics (2016)

Supervised by

Prof. Dr. Sabah Anwer Salman

2020 A.D.

1442 A.H.