

تحضير طلاء وتوصيفه من راتنج ايبوكسي /أمين حلقي اليقاتي

أنس الوادي⁽¹⁾ و رفيع جبره⁽²⁾
و غسان القاس⁽³⁾ و دياب الشيخ⁽⁴⁾

تاريخ الإيداع 2013/09/15
قبل للنشر في 2013/12/04

الملخص

تناول هذا البحث تحضير طلاء من راتنج الإيبوكسي EPON 828 وعامل التصالب الأميني (المقسي) Hardener 2512 في درجة حرارة المخبر باستعمال نسب مئوية مختلفة من عامل التصالب ودراسة التغيرات البنوية في هذا الطلاء بواسطة مطيافية الأشعة تحت الحمراء في المجال المتوسط (mid infra red spectroscopy, MID-FTIR) وتحديد درجة التصالب للطلاء. كما وُصفت أيضاً المكونات والطلاء باستعمال عدد من طرائق القياس المختلفة ولا سيما دراسة تغيرات القساوة ومقاومة الالتصاق وخواص الشد بدلالة مكونات الطلاء والزمن. ومن أجل توصيف المقاومة الكيميائية لطلاء الإيبوكسي، عُرِضت عينات متعددة منه لعدد من المؤثرات الكيميائية خلال مُدد زمنية مختلفة. تبين أن درجة التصالب والقساوة لطلاء الإيبوكسي المدروس تزداد بازدياد نسبة المقسي الأميني، فعند النسبة 43% للمقسي الأميني تصل درجة التصالب في الطلاء خلال خمسة أيام إلى 95%، كما تسجل القساوة أعلى درجة لها عند تلك النسبة. فيما يتعلق بمقاومة الالتصاق ومقاومة الشد، لوحظت القيم العليا لهذه الخواص عندما تكون نسبة المقسي الأميني قريبة من النسبة (33%). بالنسبة إلى المقاومة الكيميائية، لم يلاحظ وجود نسبة مئوية واحدة متميزة تكسب الطلاء مقاومة كيميائية جيدة تجاه المواد الكيميائية كلها التي اختبرت. بينت النتائج أن كل نسبة مئوية تظهر مقاومة كيميائية متميزة تجاه مادة كيميائية محددة. تبين مجمل نتائج هذا العمل أن طلاء الإيبوكسي المدروس يتمتع بهامش مناسب من تغيرات المكونات والخواص الفيزيائية والميكانيكية والكيميائية الناجمة عنها.

الكلمات المفتاحية: ايبوكسي، درجة التصالب، طلاء.

(1) ماجستير في الفيزياء، (2)،(3)،(4) باحث، قسم الفيزياء التطبيقية، المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا، دمشق، سورية.

Preparation and Characterization of Epoxy Resin / Cycloaliphatic Amine Coating

A.Alwadi⁽¹⁾, R. Jabra⁽²⁾,
G. Alkass⁽³⁾ and D. Alchik⁽⁴⁾

Received 15/09/2013

Accepted 04/12/2013

ABSTRACT

In this research project, the EPON 828 /Hardener 2512 epoxy resin coating has been prepared at the ambient laboratory temperature with different epoxy/hardener ratio. The study of the structural changes in this coating and the determination of its cross-linking degree has been carried out using infrared spectroscopy (FTIR) in the middle range.

The epoxy coating subject of this research and its components have been characterized using various measurement methods, especially the study of hardness evolution, adhesion resistance and tensile properties in terms of time and coating composition. The chemical resistance of the epoxy coating has been characterized by examining the effects of exposing different coating samples to a number of corrosive chemicals during different time periods.

Results show that the cross-linking degree and hardness of the epoxy coating both increase with the ratio of amine hardener. When the hardener ratio is of 43% the cross-linking degree of the coating reaches 95% within five days and the hardness achieves the highest degree at that ratio.

With regards to adhesion resistance and tensile strength, highest values were observed when the ratio of amine hardener was close to the ratio (33%).

Regarding chemical resistance, there was no one distinct ratio providing the coating with good chemical resistance against all corrosive tested chemicals.

The results showed that each epoxy/hardener ratio exhibited good chemical resistance toward one of the corrosive chemicals.

The overall results confirmed that the studied epoxy coating allows an appropriate margin of components percentage variation and consequently a wide margin of physical, mechanical and chemical properties.

Keywords: Epoxy, Cross- linking degree, Coating.

⁽¹⁾ MSC., in Physics ^{(2),(3),(4)} Departement of Applied Physics, Higher Institute of Applied Science and Technology, Damascus, Syria.

المقدمة

راتنجات الإيبوكسي (Epoxy resins).

ترجع أهمية راتنجات الإيبوكسي إلى خواصها الميكانيكية والكيميائية والكهربائية العالية ومقاومتها الجيدة للحرارة واستقرارية أبعادها والتصاقها القوي على عدد من المواد. ويؤدي اجتماع هذه الخصائص والأداء الجيد لبوليميرات الإيبوكسي إلى تعدد استخداماتها وتنوع تطبيقاتها في المجالات الآتية [1][2][3]:

- الطلاءات والدهانات (coatings & paints)،
- اللواصق (adhesives)،
- القولية والتعليب (molding & packaging)،
- المواد المركبة (composites).

أهمية الدهانات والطلاءات ودهانات الإيبوكسي:

تتنمي دهانات الإيبوكسي إلى عائلة الطلاءات (coatings) الكبرى. والطلاء هو ببساطة مادة قادرة على تشكيل غشاء يحمي الركيزة تجاه العوامل الضارة في المحيط ويحسن المظهر. وإذ تختلف الطلاءات في الإنتاج والتطبيقات والوظيفة، يشتمل سوقها ثلاث فئات رئيسية: طلاءات الزينة أو العمارة والطلاءات الصناعية والطلاءات الخاصة. وتتعدد أنواع الطلاءات ضمن كل فئة وفق خواصها وأغراضها وتقاناتها وطرائق تطبيقها.

وتشير التقديرات العالمية إلى أن العائدات الإجمالية للدهانات والطلاءات قد بلغت عام 2009 قيمة 92-90 مليار دولار أمريكي من أجل حجم إنتاج إجمالي يقارب 27-25 مليار لتر [4][5].

الإنتاج العالمي لراتنج الإيبوكسي:

بلغ الطلب على راتنج الإيبوكسي عام 2010 نحو 1.6 مليون طن [6]. وفي عام 2011، بلغ الإنتاج الإجمالي للإيبوكسي نحو 2,24 مليون طن يعتمد 95% -80 منها على Bisphenol A ويُسوق نحو 90% منها في آسيا وأوروبا وأمريكا، حيث تنتج الصين بمفردها نحو 37.1% من إجمالي الإنتاج [7].

مبدأ تصالب راتنج الإيبوكسي (principle of cross-linking of epoxy resins):

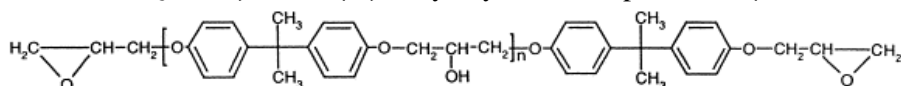
يحدث تصالب الإيبوكسي عبر تفاعل عامل تصالب مع حلقة زمرة الإيبوكسي إذ ترتبط ذرة هيدروجين فعالة مع زمرة الإيبوكسي من خلال انفتاح حلقة الإيبوكسي الثلاثية وتحولها إلى زمرة هيدروكسيل [8][9][10][11]. وخلال عملية تصالب راتنج الإيبوكسي،

تتحول الجزيئات الصغيرة لبوليمير الإيبوكسي إلى جزيئات ضخمة متصالبة ثلاثية الأبعاد. وقد درست آلية تصالب الإيبوكسي وحركيتها بشكل واسع في المراجع العلمية.

مواد البحث وطرقه

المواد:

راتنج الإيبوكسي (EPON 828- Shell) الذي يُطلق عليه ثنائي غليسيديل إيتير بيسفينول- A (DiGlycidyl Ether Bisphenol - A) (DGEBA) والمعروف بالصيغة:



مقسي أميني طراز (Hardener 2512- Shell) هو عبارة عن مركب أميني حلقي أليفاتي متعدد الأمين (cycloaliphatic polyamine) لونه مائل إلى الأصفر يستخدم كعامل تقسية في درجة الحرارة العادية، حمض خل (Merck, p.a, CH₃COOH)، بلاماء حمض الخل ((CH₃CO)₂-Merck, p.a)، فتالات هيدروجين البوتاسيوم (HClO₄- Merck, p.a)، حمض فوق الكلور (HOCC6H₄COOK- Merck, p.a) اسيتونتريل (Merck, p.a, CH₃CN)، ميثيلين كلوريد (CH₂Cl₂-Merck, p.a)، رباعي إيثيل أمونيوم بروميد (NEt₄Br- Merck, p.a)، 0.1N هيدروكسيد البوتاسيوم في الإيثانول (Merck, p.a)، 0.1 N حمض كلور الماء (Merck, p.a)، تولوين (Scharlau, p.a)، محلول 20% من حمض الأزوت (HNO₃-Merck, p.a)، محلول 50% من حمض كلور الماء (HCl-Merck, p.a)، محلول 50% من ماءات الصوديوم (NaOH- Merck, p.a)، محلول 95% من الإيثانول (Scharlau- Merck, p.a)، محلول 5% من هيبوكلوريد الكالسيوم، محلول 10% من الماء الأوكسجين (H₂O₂- Merck, p.a)، نتر سريع.

الطرائق:

1 - تحديد قيمة الأمين (amin value-AV) للمقسي الأميني [12]:

تعرف قيمة الأمين للمقسي بأنها عدد الميليغرامات من هيدروكسيد البوتاسيوم (KOH) المكافئة لوحد غرام من مادة المقسي وتقدر بـ mg KOH/g. hardener. يوزن 0.5 g من المقسي الأميني الحلقي الأليفاتي Hardener 2512 المدروس في بيشر سعة 200 ml ويضاف إليها 60 ml من حمض الخل الثلجي و40 ml من الأسيتونتريل وتخلط جيداً وفق المواصفة (DOTD TR 519-92). يغمر الإلكترود الزجاجي المرافق في البيشر تحت التحريك المغناطيسي وتجري المعايرة بواسطة حمض HClO₄ 0.1N باستخدام جهاز المعايرة الكمونية (Potentiometer 702 SM صنع شركة Metrohm) الذي يحدد نقطة نهاية المعايرة (EP) من منحنى المعايرة. يحسب معامل الأمين AV من العلاقة:

$$AV = \frac{A \times 56.1 \times N}{C}$$

إذ إنَّ

A: حجم 0.1N HClO₄ المستهلك للوصول إلى نقطة المعايرة،

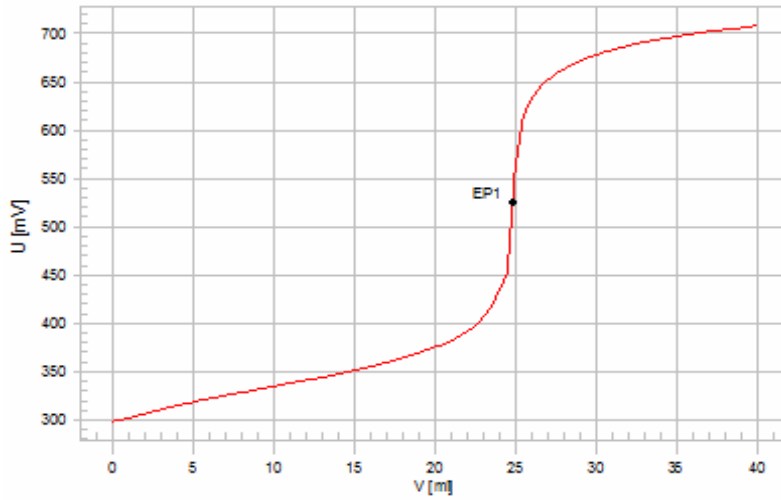
N: نظامية HClO₄،

C: وزن العينة (g)،

56.1: الوزن الجزيئي لهيدروكسيد البوتاسيوم.

2- تحديد الوزن المكافئ للإيبوكسي (EEW) (epoxide equivalent weight, EEW) [13]:

يعرف الوزن المكافئ للإيبوكسي (Epoxy Equivalent Weight EEW) بأنه وزن الراتنج الذي يحتوي على زمرة إيبوكسي واحدة، وتفيد معرفة قيمة EEW في حساب كمية المقسي اللازم لحدوث التصالب في البوليمير من أجل خصائص محددة. يوزن 1g من راتنج الإيبوكسي EPON 828 المدروس في بيشر سعة 200 ml ويضاف إليها 10 ml من كلوريد الميثيلين (methylene chloride) و 10 ml من رباعي إيثيل أمونيوم البروميد tetraethylammonium bromide 2.5% في حمض الخل الثلجي وفق المواصفة (DOTD TR 518-93). يغمر الإلكترود الزجاجي المرافق في البيشر، وتجرى المعايرة بواسطة حمض 0.1N HClO₄ باستخدام جهاز المعايرة الكمونية (Metrohm Potentiometer 702 SM) صنع شركة (Metrohm) الذي يحدد نقطة نهاية المعايرة (EP) من منحنى المعايرة كما في الشكل (1):



الشكل (1) نقطة نهاية المعايرة (EP) لتحديد الوزن المكافئ للإيبوكسي.

يحسب EEW من العلاقة:

$$EEW = \left(\frac{A \times 1000}{B \times N} \right)$$

إذ إن:

A: وزن العينة، B: الحجم المستهلك من $HClO_4$ ، N: نظامية $HClO_4$.

3- تحديد محتوى الكلور في راتنج الإيبوكسي [14]:

تتأثر خواص راتنج الإيبوكسي بمحتوى الكلور الذي يعدُّ دلالة على مستوى نقاوة الراتنج. يوزن 6-8 g من عينة الراتنج EPON 828 المدروس في أرنينة سعة 150 ml ويضاف إليها بواسطة الماصة 50 ml من هيدروكسيد البوتاسيوم الكحولي 0,1N (يحضر بإذابة 5.61 g من هيدروكسيد البوتاسيوم في لتر من الميثانول) ثم 15 ml تولوين. يخلط المزيج بواسطة الخلاط المغناطيسي حتى ذوبان الراتنج ثم يضاف إليه بضع قطع من منظم الغليان. توصل الأرنينة بالمكثف المرتد وتسخن بهدوء نحو 15 دقيقة. تبرد العينة إلى درجة حرارة الغرفة ثم يضاف إليها بضع قطرات من مشعر الفينول فتاليين وتعابير بواسطة محلول HCl-0.1N مع التحريك المستمر حتى بداية زوال اللون الزهري. يقدر محتوى الكلور من العلاقة:

$$\text{Chlorine content \%} = \frac{(B - A) \times N \times 3.55}{wt.}$$

إذ إن:

A: حجم حمض HCl 0.1N لمعايرة العينة،

B: حجم حمض HCl 0.1N الحمض المستهلك لمعايرة الشاهد،

N: نظامية حمض HCl، wt.: وزن عينة الراتنج.

3.55: ثابت يرتبط بالوزن المكافئ للكلور.

4- تحديد لزوجة راتنج الإيبوكسي والمقسي الأميني الحلقي الأليفاتي [15].

حُدِّت لزوجة راتنج الإيبوكسي EPON 828 والمقسي الأميني Hardener 2512 المدروس عند الدرجة 25°C باستخدام مقياس اللزوجة الدوراني Brookfield viscometer 2325 كما يأتي:

بُملأ وعاء الجهاز بالمادة (1 لتر تقريباً) ثم تضبط درجة حرارة الوعاء بواسطة المُحم عند 25°C. يوازن الوضع الأفقي للجهاز بشكل جيد، ثم يغمر رأس القياس في المادة حتى المستوى المشار إليه وتحدد سرعة دوران الرأس بـ 20RPM وفق المواصفة (ASTM D 2196-99). يشغل الجهاز حتى ثبات المؤشر وتؤخذ القراءة وتحسب اللزوجة مقدرة بالسنتي بواز (centipoises) من العلاقة الآتية:

$$h = f \times S$$

إذ إن:

η : لزوجة المادة مقدره بالـ cP

f : ثابت رأس القياس وسرعة الدوران. تؤخذ من الجدول المرفق بالجهاز،

S : القيمة المقروءة على المؤشر.

5- تحديد كثافة راتنج الإيبوكسي والمقسي الأمينى الحلقي الأليفاتي [16].

حُدِّدَت كثافة راتنج الإيبوكسي EPON 828 والمقسي الأمينى Hardener 2512 المدروس باستخدام جهاز مقياس الكثافة densimeter-pycnometer 1800 عند الدرجة 20°C . يوزن الوعاء الإسطواني لجهاز قياس الكثافة الفارغ التنظيف والجاف بواسطة الميزان الحساس. يُملأ الوعاء الإسطواني بالمادة حتى تتدفق بضع نقاط من ثقب غطاء الوعاء وفق المواصفة (ASTM D 1475-98). يمسح الوعاء جيداً ويوزن وتحسب كثافة المادة من المعادلة الآتية:

$$\text{كثافة المادة} = (\text{وزن العينة} / \text{حجم المادة})$$

إذ إن:

وزن العينة = (وزن الوعاء الاسطواني المملوء) - (وزن الوعاء الاسطواني الفارغ)،
حجم المادة = 100 ml.

6- طيف IR لراتنج الإيبوكسي EPON 828 والمقسي الأمينى Hardener 2512:

استُخدم في هذا البحث جهاز الأشعة تحت الحمراء طراز (FTIR -8400S) في المجال المتوسط للأشعة تحت الحمراء ($4000-400\text{cm}^{-1}$ MID-IR) وقدرة التفريق 4cm^{-1} وعدد مرات مسح قدرها 20 لتسجيل طيف راتنج الإيبوكسي EPON 828 والمقسي الأمينى Hardener 2512.

مُزجت مكونات طلاء الإيبوكسي وفق النسب المئوية المبينة في الجدول (1):

الجدول (1) النسب المئوية لطلاء الإيبوكسي EPON 828/المقسي Hardener 2512.

EPON 828 weight (g)	2	2	2	2	2	2	2
Hardener 2512 weight (g)	0	0.50	0.54	0.75	1.00	1.25	1.50
Wt % Hardener 2512 in coating	0	20	21	27	33	38	43

يوزن كل من راتنج الإيبوكسي EPON 828 والمقسي الأمينى الحلقي الأليفاتي Hardener 2512 في بوتقة بلاستيكية مناسبة ويخلط جيداً بواسطة ملعقة خشبية. توضع الكمية المناسبة من المزيج على قرصين من يوديد السيزيوم (CsI) المنظف بالكلوروفورم الجاف في حمام الأمواج فوق الصوتية (ultrasonic bath) والمجفف مدة ساعتين عند

الدرجة 100°C بحيث يكون بينهما فاصل (spacer) محدّد لسماكة قدرها 20µm، ويثبت القرصان على حامل خاص. يسجل طيف IR خلال مدد زمنية محددة (كل ربع ساعة في بداية عملية التصالب وكل ست ساعات في نهاية عملية التصالب). تحفظ العينة بين القياسات في حجرة تحت الخلاء لحمايتها من الرطوبة. يعدّ طيف IR لراتنج الإيبوكسي EPON 828 النقي (غير الممزوج مع المقسي الأمين الحلقي الأليفاتي Hardener 2512) مكافئاً لطيف الطلاء في الزمن 0 أي يُقارنُ تغيير شدة الامتصاص للطلاء بدلالة الزمن بطيف الطلاء في الزمن 0.

7- دراسة درجة التصالب لطلاء الإيبوكسي EPON 828/المقسي Hardener 2512:

يرتبط تصالب طلاء الإيبوكسي EPON 828/المقسي الأمين Hardener 2512 بحدوث عملية تصالب طلاء الإيبوكسي (cross linking) التي تتعلق بالمقسي ودرجة الحرارة والزمن. أجريت الاختبارات جميعها المتعلقة بتطور التصالب عند درجة حرارة المخبر؛ وذلك عن طريق مراقبة تغير مساحة عصابة الامتصاص عند 915 cm⁻¹ العائدة لزمرة اليبوكسي وعصابة الامتصاص عند 1182 cm⁻¹ العائدة لزمرة C-O_{stretch} باستخدام برنامج IRsolution, Shimadzu الملحق بجهاز الأشعة تحت الحمراء. توصف العصبان الإيبوكسي EPON 828 في طلاء المدروس بدلالة النسب المئوية المحددة لمكوناته والزمن خلال مدة خمس عشرة يوماً. يمكن تقدير درجة التصالب أو عامل تحول الإيبوكسي (Epoxy conversion, α_{IR}) لطلاء الإيبوكسي بتطبيق المعادلة الآتية [8][17]:

$$\alpha_{IR} = 1 - \frac{[(A_{915,t})(A_{1182,0})]}{[(A_{915,0})(A_{1182,t})]} \quad (1)$$

إذ إن:

A_{1182,0}: قيمة مساحة الامتصاص عند الزمن 0 ساعة،

A_{1182,t}: قيمة مساحة الامتصاص بعد t ساعة،

A_{915,0}: قيمة مساحة الامتصاص عند الزمن 0 ساعة،

A_{915,t}: قيمة مساحة الامتصاص بعد t ساعة.

8- التوصيف الفيزيائي والكيميائي والميكانيكي للطلاء EPON828/Hardener2512:

اختبار القساوة:

جرى اختبار القساوة لطلاء راتنج الإيبوكسي EPON 828/مقسي أمين Hardener 2512 عند درجة حرارة الغرفة حيث تنظف صفائح من الألمنيوم بمادة النتر السريع، ثم توزن وتمزج عينات الأيبوكسي وفق النسب المذكورة في الجدول (1). تسحب العينات، باستخدام جهاز سحب الطبقات الرقيقة MODEL 3530، على صفائح الألمنيوم للحصول

على طبقات رقيقة من عينات الايبوكسي سماكتها (60-90-120) ميكرونًا. تترك هذه الطبقات مدة خمسة أيام في درجة حرارة المخبر حتى تتصلب تماما. تجري معايرة جهاز قياس القساوة Pendulum hardness tester صنع شركة Sheen باستخدام صفيحة زجاجية عيارية مرفقة مع الجهاز. تستبدل الصفيحة الزجاجية بأي صفيحة اختبار أخرى ويجري القياس وفق المواصفة (ASTM D 4366 - 95). تعطى نتيجة القياس كما يأتي:

$$\frac{\text{عدد النوسات في حالة صفيحة العينة}}{\text{عدد النوسات في حالة الصفيحة الزجاجية}} = \text{القساوة}$$

اختبار قوة الالتصاق:



الشكل (2) قاعدة دمية جهاز اختبار مقاومة الالتصاق.

جرى اختبار قوة الالتصاق في درجة حرارة الغرفة بواسطة جهاز (Adhesion tester, Model AT-M) صنع شركة Defelko، إذ تنظف صفائح من الفولاذ الإنشائي ويُجف سطحها بورق سمباج مائي قياس 120 وتخدش حافات دمية الجهاز من ثمانية أطراف متناظرة وتقسّم قاعدتها قطرياً كما في الشكل (2).

تُلصق الدمية المدعمة على سطح الفولاذ بواسطة عينة الايبوكسي المختبرة وتترك لتجف مدة خمسة أيام. وعند الاختبار، تعرض الدمية إلى قوة شد عمودية متزايدة بواسطة مقبض معدني عياري إلى أن يحصل فصل الدمية عن سطح صفيحة الفولاذ الإنشائي وتسجل قراءة الجهاز بوحدة PSI - المواصفة (ASTM D 4541 - 95).

اختبار المقاومة الكيميائية:

اختبر تأثير بعض المواد الكيميائية في طلاء راتنج الإيبوكسي في درجة حرارة المخبر إذ تنظف صفائح من الزجاج أبعادها $6.5 \times 6.5 \times 0.5$ cm³ باستخدام مذيب نتر سريع. يُحضر الطلاء كما ذكر سابقاً وتسحب عيناته على الصفائح الزجاجية على شكل طبقات رقيقة سماكتها 60 ميكرونًا باستخدام جهاز سحب الطبقات MODEL 3530. تترك مدة خمسة أيام، وبعد ذلك تغمر بالمواد الكيميائية المبينة في الجدول (2) إذ تستمر عملية الغمر مدة تراوح من 28-30 يوماً [19][20].

الجدول (2) المواد الكيميائية المستخدمة في اختبار المقاومة الكيميائية.

النسبة المئوية [19][20]	المادة الكيميائية
20% vol.	حمض الآزوت HNO ₃
50% vol.	حمض كلور الماء HCl
50% wt.	ماءات الصوديوم NaOH
95% vol.	الكحول الإيثيلي C ₂ H ₅ OH
5% wt.	هيبو كلوريد الكالسيوم [Ca(OCl) ₂]
10% vol.	هيدروجين بيروكسيد H ₂ O ₂

اختبار الشد:

تحضر عينات اختبار الشد وفق الأبعاد (30×4×2) mm³، وذلك بمزج النسب الاستيكيومترية لطلاء الإيبوكسي EPON828/المقسي الأمين Hardener 2512 المدروس المبينة في الجدول (1) وتجرى عملية التفريغ للتخلص من فقاعات الهواء وصب المزيج في القالب. تشكل 5 قطع لكل نسبة استيكيومترية، وتترك في القالب مدة 5 أيام ثم تنزع من القالب وتكون جاهزة لإجراء اختبار الشد وفق المواصفة (ASTM D 638 – 01).

يجرى اختبار الشد بواسطة جهاز الاختبارات الميكانيكية العام DY 34 بوضع العينة بين الفكين حيث تضبط سرعة الرأس عند (2mm/min)، ويتم الحصول على النتائج بواسطة البرنامج المرتبط بالجهاز.

يسمح اختبار الشد بالحصول على المواصفات الميكانيكية الآتية:

- إجهاد الشد:

$$s = F/S$$

إذ إن:

σ: إجهاد الشد (MPa)، F: قوة الشد (N)، S: مساحة مقطع العينة (m²).

- معامل المرونة (يونغ):

$$E = \frac{\Delta s}{\Delta e}$$

إذ إن:

E: معامل يونغ (MPa)،

Δσ: فرق إجهاد الشد (MPa) بين نقطتين في المجال الخطي المرن،
Δε: فرق التشوه النسبي (الانفعال) بين نقطتين في المجال الخطي المرن.

• الاستطالة عند الكسر:

$$e = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100$$

إذ إن:

ε: التشوه النسبي (الانفعال)، ΔL: الاستطالة (mm)، L₀: طول العينة الأولي (mm).

النتائج والمناقشة

نتائج توصيف كل من راتنج الإيبوكسي والمقسي الأميني الحلقي الأليفاتي:

يبين الجدولان (3-4) مقارنة لمواصفات راتنج الإيبوكسي EPON 828 والمقسي الأميني الحلقي الأليفاتي Hardener 2512 المحددة في المخبر والشركة المصنعة:

الجدول (3) مقارنة مواصفات الإيبوكسي EPON 828 المخبرية وعند الشركة المصنعة.

Technical specifications of EPON828			
Parameter	laboratory	Supplier	Test method
Viscosity at 25°C, cp	13466	11000-14000	ASTM D 2196 – 99
Epoxy equivalent weight, EEW	185 ± 0.1275	184-194	DOTO TR 518 -93
Chlorine content (%)	0.05±0.001	0.1 max	Reference[16]
Density 20°C (kg/l)	1.16	1.15-1.18	ASTM D 1475 – 98

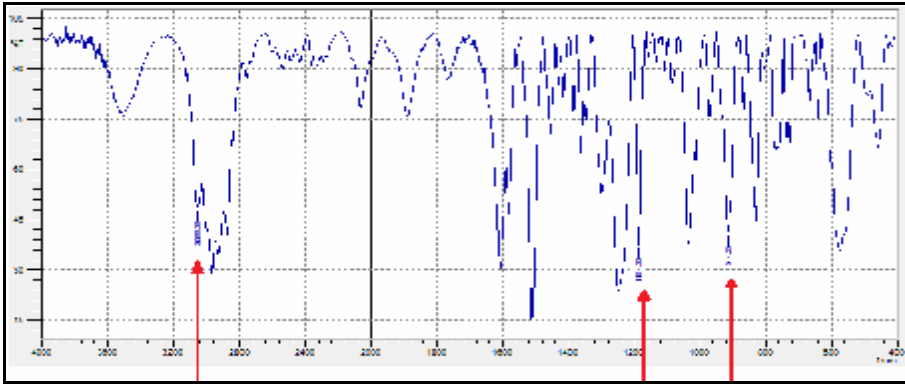
الجدول (4) مقارنة مواصفات المقسي Hardener 2512 المخبرية وعند الشركة المصنعة.

Technical specifications of Hardener 2512			
Parameter	laboratory	Supplier	Test method
Viscosity at 25°C, cp	300	200-300	ASTM D 2196 – 99
Amine value, AV, (mgKOH/g)	307±0.08	300-325	DOTO TR 519-92
Density 20°C (kg/l)	1.02	0.98-1.05	ASTM D 1475 – 98

تشير النتائج المبيّنة في الجدولين (4 و 5) السابقين إلى توافق تام بين النتائج المخبرية والمعطيات الواردة في النشرات الفنية للشركات المنتجة، ويشير محتوى الكلور إلى مستوى نقاوة عالية للراتنج [1] [14].

توصيف راتنج EPON 828 والمقسي Hardener 2512 بواسطة FTIR:

يبين الشكل (3) طيف IR لراتنج الإيبوكسي EPON 828:



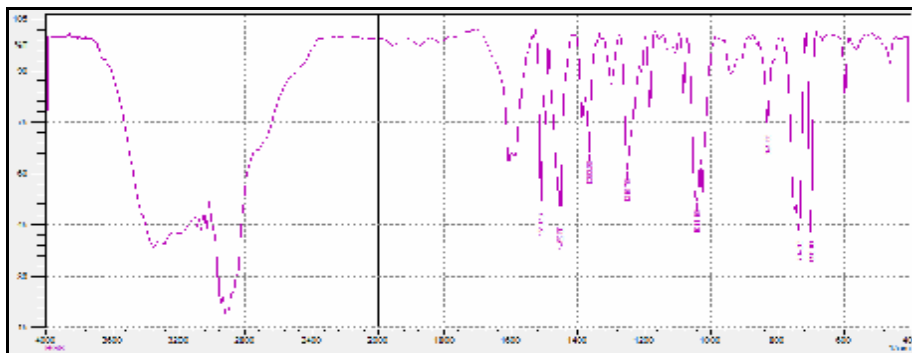
الشكل (3) طيف MID-IR لراتنج الإيبوكسي EPON828.

يتضمن هذا الطيف الامتصاصات الأساسية التالية التي ترتبط مباشرة بوجود زمرة الإيبوكسي في الراتنج EPON 828 [8][17][18][21][22][23]:

- عصابة الامتصاص عند العدد الموجي 915 cm^{-1} العائدة إلى حلقة الإيبوكسي $\text{CH}_2\text{-O-CH}$ epoxy bend
- الامتصاص عند العدد الموجي 1182 cm^{-1} العائد إلى زمرة -C-C-O-C- str
- الامتصاص عند العدد الموجي 3055 cm^{-1} العائد إلى حلقة الإيبوكسي $\text{-CH-(O-CH}_2\text{)}$ epoxy str

كما يبين الشكل (4) طيف FTIR للمقسي الأميني الحلقي الأليفاتي Hardener 2512 الذي يتضمن الامتصاصات الأساسية التالية التي ترتبط مباشرة بالمقسي Hardener 2512 [8]:

- عصابة الامتصاص عند العدد الموجي $3340\text{-}3170 \text{ cm}^{-1}$ العائدة للزمرة -NH_2 , -NH str في المركبات الأمينية.
- عصابة الامتصاص عند العدد الموجي $1510, 1495 \text{ cm}^{-1}$ العائدة للزمرة -NH bend, -NH_2 .
- عصابة الامتصاص عند العدد الموجي $1109, 1046 \text{ cm}^{-1}$ العائدة إلى الرابطة -C-N str.



الشكل (4) طيف MID-IR للمقسي الأمين الحلقي الأليفاتي Hardener 2512.

يبين الجدول (5) ترددات قمم الامتصاص في راتنج الإيبوكسي EPON 828 والمقسي الأمين Hardener 2512 المدروس في المجال المتوسط للأشعة تحت الحمراء [8][21].

الجدول (5) امتصاصات الإيبوكسي EPON 828 والمقسي Hardener 2512

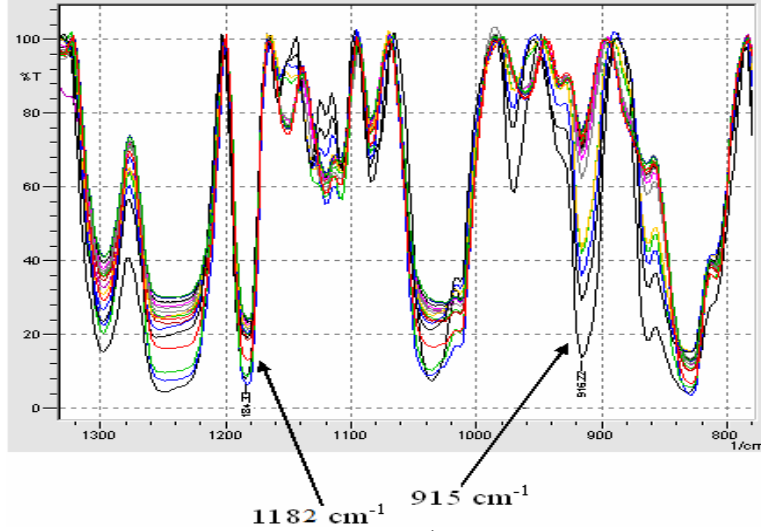
Functional group	EPON 828 , cm ⁻¹	Hardener 2512, cm ⁻¹
-C-H, -N-H bend	574, 638	595, 573
Ar =C-H, C-H,	830, 773	735, 698
Ar 1,4 substit. ring and C-O-C (oxirane)	831	829
CH ₂ -O-CH epoxy, bend	915	-
-C-O-C- str	1036	1025
-O-C-C str	1132	1081
-C-N- str	-	1109, 1046
-C-C-O-C- str	1247, 1182	1181
-CH ₂ - , -CH ₃ - bend	1455, 1362	1458, 1374
-NH ₂ , -NH bend	-	1510, 1495
Ar -C=C-H str	1607, 1580, 1510	1605, 1580, 1510
-CH ₂ - , -CH ₃ - sym str	2872	2870
-CH ₂ - , -CH ₃ - assym str	2925, 2967	2918, 2950
-CH-(O-CH ₂) epoxy, str	3056	-
-NH ₂ , -NH str	-	3340-3200

ولما كانت معظم قمم الامتصاص المبينة أعلاه متباينة بوضوح وقابلة للتفريق في طلاء الإيبوكسي - المقسي، اعتمد على بعضها في دراسة درجة التصالب لطلاء راتنج الإيبوكسي.

دراسة درجة التصالب لطلاء الإيبوكسي EPON 828/المقسي Hardener 2512:

1- تقدير درجة التصالب أو عامل تحول الإيبوكسي (α_{IR} , Epoxy conversion).

يبين الشكل (5) تغير مساحة قمتي العصبيتين 1182 cm^{-1} و 915 cm^{-1} لطلاء راتنج الإيبوكسي EPON 828/المقسي الأمين Hardener 2512 عند النسبة 2:1 مدة خمسة عشر يوما:

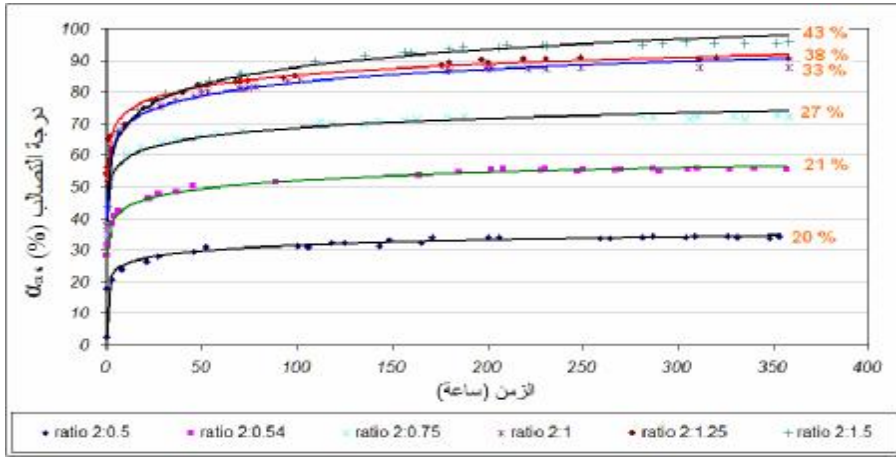


الشكل (5) تغير مساحة قمتي العصبيتين 1182 cm^{-1} و 915 cm^{-1} لطلاء راتنج الإيبوكسي EPON 828/المقسي الأمين Hardener 2512 عند النسبة 2:1 مدة 15 يوما.

يلاحظ أن تقدم عملية التصالب لطلاء الإيبوكسي تترافق مع:

- تناقص واضح في مساحة عصابة الامتصاص عند طول الموجة 915 cm^{-1} بسبب حدوث انفتاح في حلقة الإيبوكسي [8][11][17][21][22].
- استقرار نسبي في مساحة عصابة الامتصاص عند طول الموجة 1182 cm^{-1} العائدة إلى زمرة C-O stretch في الأيبوكسي (قمة مرجعية) [8][17][21].

حُدثت درجة التصالب أو عامل تحول الإيبوكسي (α_{IR}) للطلاء Hardener 2512/EPON 828 عند النسب المئوية المبينة في الجدول (1) بالنسبة إلى الزمن وفي درجة حرارة المخبر كما يبين الشكل (6).



الشكل (6) درجة التصلب α_{IR} بدلالة الزمن ونسبة المقسي لطلاء الإيبوكسي EPON 828/Hardener 2512.

يتضمن الجدول (6) النسب المئوية للإيبوكسي EPON 828 والمقسي الأمينى Hardener 2512 في طلاء الإيبوكسي فضلاً عن درجة التصلب α_{IR} المحددة تجريبياً والمحسوبة بعد 350 ساعة (15 يوماً) من المعادلة (1).

الجدول (6) درجة التصلب α_{IR} المحسوبة للطلاء EPON 828/ Hardener 2512 بدلالة نسبة المقسي الأمينى بعد 350 ساعة من المزج.

EPON 828: Hardener 2512	% Hardener 2512	EEW : AV (mMol:mMol)	α_{IR}
2 : 0.50	20 %	10.8 : 2.75	34%
2 : 0.54	21 %	10.8 : 2.97	56%
2 : 0.75	27 %	10.8 : 4.13	72%
2 : 1.00	33 %	10.8 : 5.5	88%
2 : 1.25	38 %	10.8 : 6.87	91%
2 : 1.50	43 %	10.8 : 8.25	95%

تشير النتائج السابقة المتعلقة بدراسة درجة التصلب لطلاء الإيبوكسي EPON 828/المقسي الأمينى Hardener 2512 إلى ما يأتي:

- تزداد درجة التصلب α_{IR} ، (الشكل 6)، مع ازدياد النسبة المئوية للمقسي الأمينى Hardener 2512 في طلاء الإيبوكسي ضمن المجال (20-43%)،
- عندما تصل النسبة المئوية للمقسي الأمينى Hardener 2512 في طلاء الإيبوكسي إلى 2:1.5 (43%)، فإن درجة تصالب α_{IR} الطلاء تصل حتى 95% في نهاية زمن المراقبة، الجدول (6)،

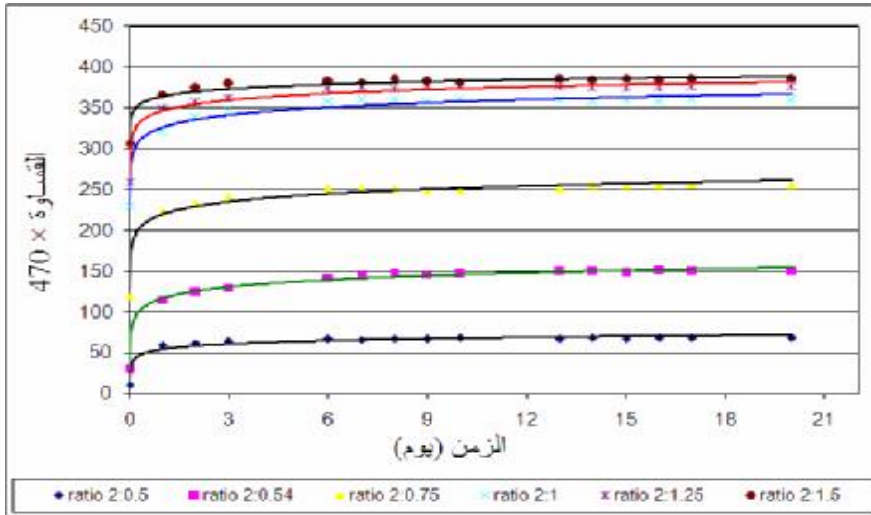
- يكون معدل تغير سرعة التصالب في طلاء الإيبوكسي أعلى ما يمكن خلال الساعات الأولى (10-15 ساعة) من بدء عملية تصالبه، ويصبح هذا المعدل ثابتاً تقريباً بعد ذلك، الشكل (6)،
- يعدُّ شكل المنحنى التجريبي الذي حصلنا عليه لتغير درجة التصالب بدلالة الزمن شكلاً نموذجياً يتوافق مع المراجع المعروفة في هذا المجال، ويمثل من جهة أخرى شكل تغير معظم خواص أنظمة الإيبوكسي مع الزمن، الشكل (6)،
- تتوقف درجة التصالب الأعظمية للطلاء على النسبة المئوية للمقسى الأميني Hardener 2512 إذ تكون، بين النسب المدروسة، الأقل عند النسبة 2:0.50 (20%) والأعلى عند النسبة 2:1.50 (43%)، (الجدول 6).

تتوافق هذه النتائج مع مثيلاتها في المنشورات المماثلة ولاسيما ما توصل إليه كل من Nikolic وزملائه [8]؛ و Escola وزملائه [9]؛ و Cedeno وزملائه [17]؛ و Ladaniuc وزملائه [22]؛ و Aziz [24]؛ و Zlatkovic وزملائه [23] و Costa وزملائه [26].

التوصيف الفيزيائي والكيميائي والميكانيكي للطلاء EPON 828 /Hardener 2512

1- القساوة:

يبين الشكل (7) نتائج تغير القساوة مع الزمن في درجة حرارة المخبر من أجل سماكة ثابتة قدرها 60 ميكرونا للطلاء EPON 828/Hardener 2512 ومن أجل نسب المزج المبينه في الجدول (1).



الشكل (7) تغير القساوة مع الزمن لنسب متعددة للطلاء EPON 828/Hardener 2512 عند سماكة 60 ميكرونا.

تظهر القيمة %43 لنسبة المقسي الأمينى Hardener 2512 في طلاء الإيبوكسي أعلى قيمة للقساوة. ويعزى ذلك إلى أن تفاعل الأمين يحسن عملية التصالب والحصول على درجة تصالب أعلى مما يؤدي إلى تشكيل شبكة ثلاثية الأبعاد تكون فيها بنية الطلاء قاسية ومقاومة للخدش [3][24][25] كما هو واضح في الشكل (7). بينما عندما تكون نسبة المقسي الأمينى Hardener 2512 في طلاء الإيبوكسي 20%، تظهر القساوة أقل قيمة، ويعزى ذلك إلى فتح حلقة الإيبوكسي بواسطة مجموعة الهيدروكسيل مما يؤدي إلى تشكيل مجموعة الأثير $(R-CH_2-O-CH_2-)$ ، وتشكل بنية هشّة وسهلة الاختراق [3][24][25] كما هو واضح في الشكل (7).

تشير دراسة النتائج المتعلقة باختبار القساوة للطلاء راتنج الإيبوكسي EPON828/ المقسي الأمينى Hardener 2512 المدروس إلى ما يأتي:

- تزداد القساوة بازدياد النسبة المئوية للمقسي الأمينى Hardener 2512 (43%-20) في طلاء الإيبوكسي، أي بازدياد درجة التصالب α_{IR} (الشكل 7)،
 - عندما تصل النسبة المئوية للمقسي الأمينى Hardener 2512 في طلاء الإيبوكسي إلى 2:1.5 (43%)، تصل القساوة إلى أعلى قيمة في نهاية زمن المراقبة، (الشكل 7)،
 - يكون معدل تغير القساوة في طلاء الإيبوكسي أعلى ما يمكن خلال الأيام الأولى من بدء عملية تصالب الطلاء وبعد ذلك، يصبح المعدل ثابتاً تقريباً، (الشكل 7).
- تتوافق هذه النتائج مع ما توصل إليه كل من Aziz [24]؛ و Zhang وزملائه [25]؛ و Zlatkovic وزملائه [18]؛ و Zlatkovic وزملائه [23].

2- مقاومة الالتصاق:

يمكن تقسيم حالات فشل/إخفاق (فك) الالتصاق إلى 3 حالات رئيسية:

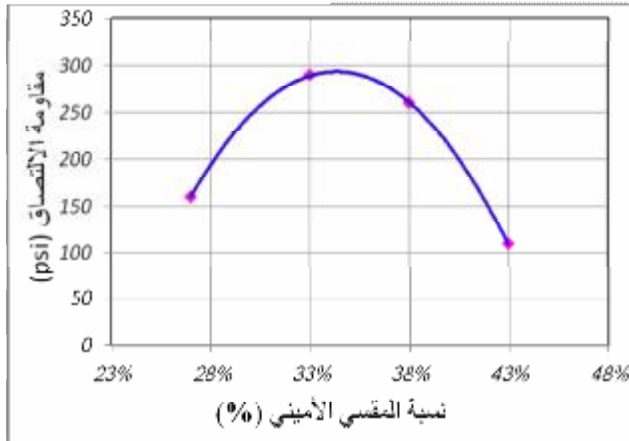
- الإخفاق دموية الاختبار - إيبوكسي: إخفاق على السطح الفاصل دموية الاختبار - إيبوكسي،
- الإخفاق صفيحة الاختبار - إيبوكسي: إخفاق على السطح الفاصل صفيحة الاختبار - إيبوكسي،
- الإخفاق إيبوكسي صرف أي ضمن طبقة الإيبوكسي: مقاومة الالتصاق أعلى من مقاومة الإيبوكسي،

يتضمن الجدول (7) نتائج اختبار مقاومة الالتصاق لطلاء راتنج الإيبوكسي EPON828/ المقسي الأمينى Hardener 2512 وحالات الإخفاق:

الجدول (7) نتائج اختبار مقاومة الالتصاق لطلاء راتنج الإيبوكسي.

حالة الإخفاق	قوة الالتصاق , psi	نسبة المقسي الأميني الحلقي الأليفاتي (Hardener 2515) %
ضمن الأيبوكسي	400	20 %
ضمن الأيبوكسي	500	21 %
صفحة- ايبوكسي	160	27 %
صفحة- ايبوكسي	290	33 %
صفحة- ايبوكسي	260	38 %
صفحة- ايبوكسي	110	43 %

يبين الشكل (8) نتائج اختبار مقاومة الالتصاق بدلالة نسبة المقسي الأميني Hardener2512 للطلاء EPON 828/Hardener 2512 بدرجة حرارة المخبر.

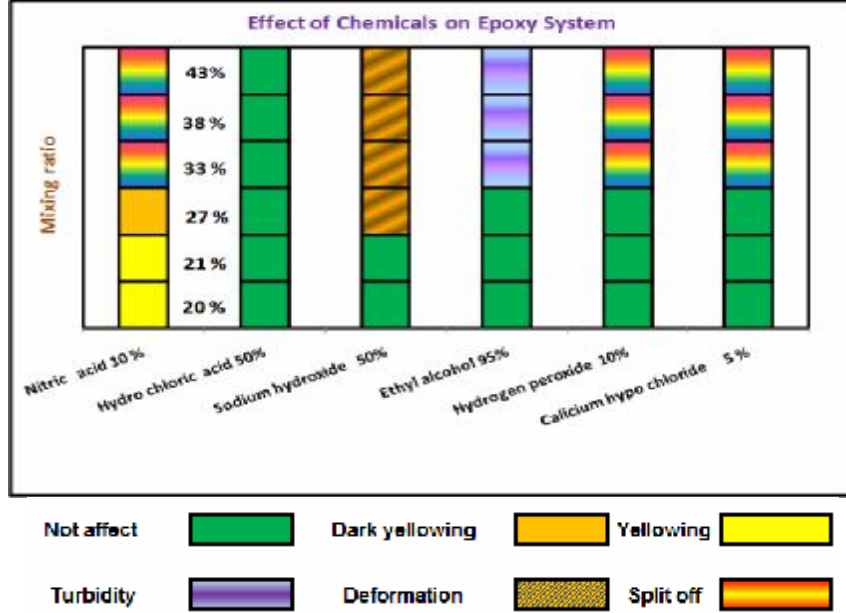


الشكل (8) نتائج اختبار مقاومة الالتصاق صفحة-ايبوكسي بدلالة نسب المقسي الأميني Hardener 2512 للطلاء EPON 828/Hardener 2512 بدرجة حرارة المخبر.

لوحظ من نتائج اختبار مقاومة الالتصاق أن النسبة 2:1 (نسبة المقسي 33%) تعطي أعلى قيمة لمقاومة الالتصاق (290 psi) على السطح الفاصل صفحة- ايبوكسي، وقد لوحظ أن نسب المزج (2:0.5-2:0.54) الموافقة لنسب المقسي (20%-21%) على التوالي قد أعطت أعلى قيمة لمقاومة الالتصاق ضمن الأيبوكسي اللاصق، أي إن مقاومة الالتصاق أعلى من المقاومة الذاتية لمادة الأيبوكسي (انقسام المادة اللاصقة إلى قسمين: قسم على صفحة الحديد وقسم على الدمية)، (الجدول 7).

3- المقاومة الكيميائية:

يبين الشكل (9) نتائج اختبار تأثير بعض المواد الكيميائية المبينة في الجدول (2) في عينات طلاء راتنج الإيبوكسي EPON828/مقسي أميني Hardener 2512 من أجل نسب مختلفة من المقسي وسماكة ثابتة 60 ميكروناً وفي درجة حرارة المخبر. وتجدر الإشارة إلى أن الاختبارات الكيميائية جميعها قُيِّمت بالعين المجردة.



Test conditions : Samples are immersed in chemicals for 28 days @ RT

الشكل (9) نتائج اختبار تأثير بعض المواد الكيميائية.

من أجل نسبة مقسي 20% و 21%، تبين أن المواد الكيميائية المختبرة لا تؤثر في طلاء الإيبوكسي عدا مادة حمض الأزوت إذ يلاحظ اصفرار وانفصال جزئي ثم انفصال كلي للمادة اللاصقة بعد 36 يوماً. أما من أجل نسبة مقسي 27%، فتبين أن المواد الكيميائية المختبرة بدأت تؤثر بأشكال مختلفة في طلاء الإيبوكسي (اصفرار وانفصال للمادة اللاصقة مع حمض الأزوت؛ انفصال جزئي بقعي مع الماء الأوكسجيني؛ تشوه عند الأطراف مع ماءات الصوديوم).

ومن أجل نسبة مقسي 33%، تبين أن المواد الكيميائية المختبرة استمرت بالتأثير بشكل ضئيل وبأشكال مختلفة في طلاء الإيبوكسي (اصفرار وانفصال للمادة اللاصقة مع حمض الأزوت؛ انفصال العينة مع الماء الأوكسجيني؛ وبداية انفصال في حالة هيبو كلوريد

الكالسيوم ؛ تشوه عند الأطراف مع ماءات الصوديوم). أمّا نسبة مقسي 38%، فيبدو أن المواد الكيميائية المختبرة بدأت تؤثر بأشكال مختلفة في طلاء الإيبوكسي (اصفرار وانفصال للمادة اللاصقة مع حمض الأزوت؛ تشوه وانفصال مع الماء الأوكسجيني؛ تشوه وانفصال في حالة هيبو كلوريد الكالسيوم، وكذلك الأمر من أجل نسبة مقسي 43%.

تشير نتائج اختبار المقاومة الكيميائية لطلاء راتنج الإيبوكسي EPON828/ المقسي الأمين Hardener 2512 المدروس إلى ما يأتي:

- لايقاوم طلاء الايبوكسي EPON828/ Hardener2512 حمض الأزوت من أجل تركيز 10% مدة تزيد على 10 أيام، ويزداد تأثيره بازدياد نسبة المقسي في الطلاء،
- يقاوم طلاء الايبوكسي EPON828/ Hardener2512 حمض كلور الماء عند تركيز 50% مدة شهر تقريباً إذ يحدث بعدها انفصال اللاصق دون تشوهه،
- يقاوم طلاء الايبوكسي EPON828/ Hardener2512 محلول ماءات الصوديوم عند تركيز 50% wt. بشكل ممتاز من أجل نسب المقسي جميعها،
- يقاوم طلاء الايبوكسي EPON828/Hardener2512 الإيتانول عند تركيز 95% بشكل جيد من أجل نسب المقسي جميعها،
- يقاوم طلاء الايبوكسي EPON828/ Hardener2512 الهيدروجين بيروكسيد عند تركيز 10% من أجل نسب المقسي جميعها مدة شهر تقريباً يحدث بعدها تشوه اللاصق وانفصاله من أجل النسب (33%، 38%، 43%)،
- يقاوم طلاء الايبوكسي EPON828/ Hardener2512 هيبو كلوريد الكالسيوم عند تركيز 5% wt. من أجل نسب المقسي جميعها مدة شهر واحد، ويحدث بعدها تشوه اللاصق وانفصاله من أجل النسب (33%، 38%، 43%)،

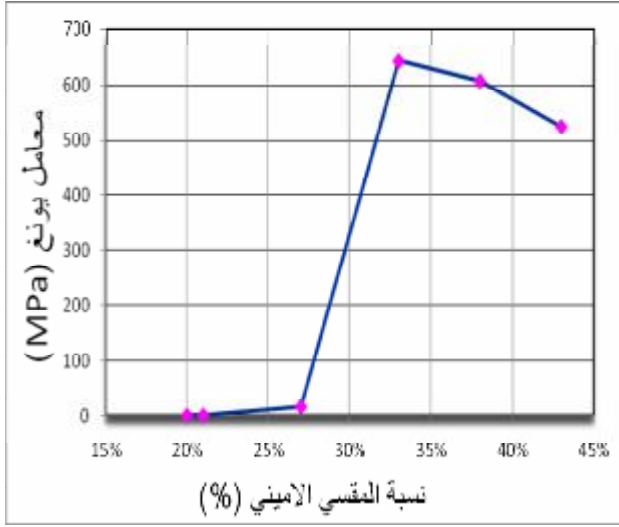
4- الشد:

يبين الجدول (8) نتائج قياس معامل يونغ لطلاء راتنج الإيبوكسي EPON828/ المقسي الأمين Hardener 2512.

الجدول (8) نتائج قياس معامل يونغ - شد للطلاء EPON 828/Hardener 2512.

معامل يونغ (MPa) $\pm \sigma$ (Young's modulus)	نسبة المقسي الأمين الحلقي الأليفاتي (Hardener 2515), wt %
0.12 \pm 0.01	20%
0.21 \pm 0.07	21%
15.77 \pm 3.91	27%
643.68 \pm 39.37	33%
608.16 \pm 35.72	38%
525.5 \pm 25.29	43%

يبين الشكل (10) نتائج قياس معامل يونغ بدلالة تغير نسبة المقسي الأميني Hardener 2512 للطلاء EPON 828/Hardener 2512.



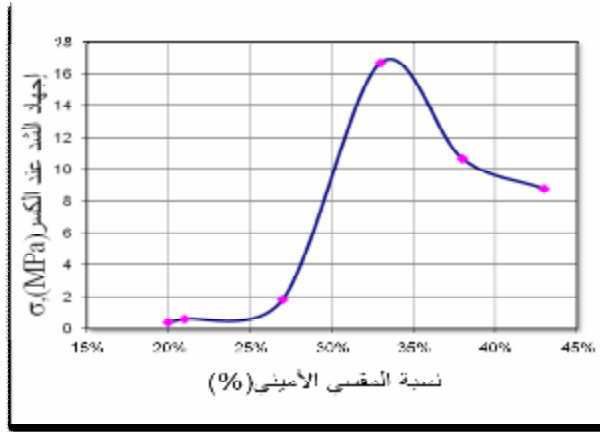
الشكل (10) نتائج قياس معامل يونغ بدلالة تغير نسبة المقسي الأميني Hardener 2512 للطلاء EPON 828/Hardener 2512.

يبين الجدول (9) نتائج قياس إجهاد الشد عند الكسر لطلاء راتنج الإيبوكسي EPON828 / المقسي الأميني Hardener 2512.

الجدول (9) نتائج قياس إجهاد الشد عند الكسر للطلاء EPON 828/Hardener 2512.

إجهاد الشد عند الكسر (MPa) $\pm \sigma$	نسبة المقسي الأميني الحلقي الأليفاتي (Hardener 2515)، wt %
0.37 \pm 0.08	20%
0.58 \pm 0.18	21%
1.81 \pm 0.46	27%
16.69 \pm 3.18	33%
10.68 \pm 2.53	38%
8.78 \pm 2.31	43%

يبين الشكل (11) نتائج قياس إجهاد الشد عند الكسر بدلالة تغير نسبة المقسي الأميني Hardener 2512 للطلاء EPON 828/Hardener 2512.



الشكل (11) نتائج قياس إجهاد الشد عند الكسر بدلالة تغير نسبة المقسي الأمينى Hardener 2512 للطلاء EPON 828/Hardener 2512

يبين الجدول (10) نتائج قياس التشوه عند الكسر لطلاء راتنج الإيبوكسي EPON828 / المقسي الأمينى Hardener 2512.

الجدول (10) نتائج قياس التشوه عند الكسر للطلاء EPON 828/Hardener 2512

التشوه عند الكسر %	نسبة المقسي الأمينى الحلقي الأليفاتي wt %, (Hardener 2515)
303.9±16.78	20%
281.8±10.84	21%
30.2±6.13	27%
2±0.017	33%
2±0.004	38%
2±0.006	43%

يزداد معامل يونغ وإجهاد الشد عند الكسر بازدياد نسبة المقسي الأمينى Hardener 2512 في طلاء الأيبوكسي حتى 33%. ويعزى ذلك إلى أن تفاعل الأمين يحسن عملية التصالب أكثر من تفاعل فتح حلقة الأيبوكسي بواسطة مجموعات الهيدروكسيل مما يؤدي إلى الحصول على درجة تصالب أعلى وإلى تشكيل شبكة ثلاثية الأبعاد تكون فيها بنية الطلاء متينة ومقاومة. وعند نسبة مقسي أمينى Hardener 2512 في طلاء الأيبوكسي قدرها 20%، يكون معامل يونغ وإجهاد الشد عند الكسر منخفضين. ويشير ذلك إلى انخفاض درجة التصالب بين راتنج الأيبوكسي والمقسي بسبب فائض زمر الأيبوكسي التي تجعل التفاعل يستمر باتجاه تفاعل فتح حلقة الأيبوكسي بواسطة مجموعات الهيدروكسيل وتشكيل مجموعات الأيتز الأقل متانة من الرابطة كربون-نتروجين الأمين. لهذا، يكون الأيبوكسي الناتج عن نسب المقسي المنخفضة لدينا لكنه

يظهر استطالة عالية جداً تصل إلى حدود 300% عند نسبة المقسي الأميني Hardener 2512 20% في طلاء الأيبوكسي.

عند نسب المقسي الأميني Hardener 2512 العالية (43%) في طلاء الأيبوكسي، يكون معامل يونغ وإجهاد الشد عند الكسر أقل منه عند النسبة 33%. ويرجع ذلك إلى وجود جزيئات غير متفاعلة من المقسي قد تتسبب في انخفاض الخواص الميكانيكية للمادة [24] كما يلاحظ في الشكلين (10 و 11).

تشير نتائج اختبار الشد لطلاء الإيبوكسي EPON828 / المقسي الأميني Hardener 2512 المدروس إلى ما يأتي:

- تعطي النسبة المئوية 33% (2:1) أعلى قيمة لمعامل يونغ وأعلى قيمة لإجهاد الشد عند الكسر، الشكلان (10-11)،
 - يزداد معامل يونغ بازدياد النسب المئوية للمقسي في طلاء EPON /Hardener 2512 828 حتى النسبة 33% وينخفض بعدها بشكل غير كبير، (الشكل 10)،
 - كلما زادت النسبة المئوية للمقسي في طلاء EPON 828/Hardener 2512، تقل الاستطالة حيث تصل أعلى قيمة لها (303.9 %) عند النسبة 20%
 - تشير نتائج التشوه عند الكسر إلى تغير سلوك طلاء الأيبوكسي من السلوك اللدن إلى السلوك القصف مع زيادة نسبة عامل التصالب.
- تتوافق هذه النتائج مع ما توصل إليه Aziz [24] الذي وجد أن معامل يونغ يزداد بازدياد نسبة الأيبوكسي/ المقسي.
- من النتائج السابقة، يلاحظ أن كل نسبة مئوية من المقسي في طلاء راتنج الإيبوكسي EPON828 / المقسي الأميني Hardener 2512 تتمتع بخصائص وسلوك معينين تتوافق مع تطبيق محدد.

الاستنتاجات

- سُخِّرت في هذا العمل مجموعة من الطرائق وتقانات القياس المعيارية التي تلبى الغرض من هذا العمل.
- أظهرت نتائج توصيف مكونات الطلاء أن هذه المكونات تتوافق مع معطيات الشركات الموردة ومع المواصفات القياسية التي يجب أن تتمتع بها،
 - إن الحصول على طلاء من الأيبوكسي ينطوي على عدد من العمليات التي يكون فيها هذا الطلاء متغيراً حتى بلوغ مرحلة الاستقرار في البنية والخواص. ولمتابعة هذه التغيرات البنيوية والسلوكية على ضوء نسب المكونات وبدلالة الزمن، كان من الضروري اختيار تقانة قياس تسمح بمتابعة هذه التغيرات. وتمثلت هذه التقانة بمطيافية الأشعة تحت الحمراء (FTIR). أُقيم من خلال هذا العمل الدليل على أن مطيافية الأشعة تحت الحمراء (FTIR) تشكل طريقة قياس كيفية وكمية مكنات من متابعة

التغيرات البنيوية في طلاء الايبوكسي المدروس وقياس درجة تصالب هذا الطلاء بدلالة الزمن. وتعدُّ هذه السمة البنيوية من أبرز السمات التي تتحكم بمعظم خصائص طلاء الايبوكسي ومواصفاته وأدائه،

- تترافق التغيرات البنيوية في طلاء الايبوكسي بتغيرات ظاهرية في الخواص الفيزيائية والكيميائية والميكانيكية. بيّنت دراسة تغيرات قساوة طلاء الايبوكسي أن القساوة تزداد مع زيادة درجة التصالب ومع زيادة نسبة المقسي حتى الوصول إلى عتبة تستقر عندها مع الزمن،
 - فيما يتعلق بمقاومة الالتصاق لطلاء الايبوكسي، تبين أن هذه المقاومة تتأثر بشكل كبير بنسبة المقسي، لكن تأثير هذه النسبة يرجح أن يحصل بطريقة غير مباشرة عبر التأثير في الخواص الميكانيكية الذاتية للايبوكسي نفسه. فإذا انخفضت الخواص الميكانيكية للايبوكسي بفعل تأثير نسبة عامل التقسية أو أي عامل آخر، تبدو عندئذٍ مقاومة الالتصاق عالية نسبياً، الأمر الذي يترجم عبر إخفاق الالتصاق ضمن الايبوكسي وليس على السطوح الفاصلة ايبوكسي - دمية أو ايبوكسي - صفيحة،
 - أظهرت الاختبارات الكيميائية أن المقاومة الكيميائية لهذا الطلاء تتأثر بدرجة التصالب المتعلقة بنسبة المقسي وبالمؤثر الكيميائي، وأنه لا يوجد على وجه العموم ايبوكسي واحد يقاوم المؤثرات الكيميائية جميعها مجتمعة أو منفردة، لكنه من الممكن ضمن حدود معينة التأثير في مقاومة الايبوكسي الكيميائية وتحسينها نوعاً ما تجاه بعض المؤثرات والشروط المحيطة.
 - بيّنت النتائج أن الخواص الميكانيكية للطلاء المدروس تتشابه كميّاً مع الأنظمة المماثلة، وأن هذه الخواص تتأثر بوضوح بنسبة المقسي إلى درجة تغير سلوك النظام من السلوك شبه القصف إلى السلوك اللدن.
- على المستوى العام، يمكن ملاحظة الانسجام الإجمالي بين نتائج الدراسة البنيوية بواسطة مطيافية الأشعة تحت الحمراء (FTIR)، التي بينت أن درجة التحويل تزداد مع زيادة نسبة المقسي وزيادة الزمن، ونتائج التوصيف الفيزيائي والميكانيكي الذي بين أن القساوة ومقاومة الالتصاق ومقاومة الشد تزداد جميعها مع زيادة نسبة المقسي وزيادة الزمن. بتعبير آخر، تتوافق نتائج التغيرات البنيوية مع نتائج التغيرات الفيزيائية والميكانيكية. من جهة أخرى، تتسجم أيضاً هذه التغيرات مع سلوك المقاومة الكيميائية التي ترتبط، فضلاً عن البنية، بالمؤثرات الكيميائية والزمر الوظيفية الفعالة فيها والشروط المحيطة عموماً.
- تبين مجمل النتائج أن طلاء الايبوكسي المدروس يبلغ أفضل المواصفات البنيوية والميكانيكية من أجل نسبة مقسي 33%، وذلك بعد زمن قدره نحو 72 ساعة.
- كما تبين مجمل نتائج هذا العمل أن طلاء الايبوكسي المدروس يتمتع بهامش مناسب من تغيرات المكونات والخواص الفيزيائية والميكانيكية والكيميائية الناجمة عنها.

REFERENCES

1. B. Ellis, 1993. Chemistry and Technology of Epoxy Resins, chapt. 1, Chapman & Hall, London.
2. K. P. Unnikrishnan, 2006. Studies on The Toughening of Epoxy Resin, Cochin University of science and technology, India.
3. C.A.Harper, E.M.Petrie, 2003. Plastics Materials and Processes, John Wiley & Sons, Inc, Canada.
4. [http://www.coatingsworld.com/issues/2010-03/view_features/the-state-of-the-global-coatings-industry-2010-03-16-08-29-53/.13.12.2012.](http://www.coatingsworld.com/issues/2010-03/view_features/the-state-of-the-global-coatings-industry-2010-03-16-08-29-53/.13.12.2012)
5. The state of the global coatings industry 2009.13.12.2012
6. Epoxy resins, number one in corrosion resistance, 1st corrosion conf.- oct. 2010 25p.
7. <http://www.researchinchina.com/htmls/report/2012/6392.html> . 13.12.2012.
8. G. Nikolic, S.zlatkovic, M. Calic, S. Cakic, C. Laenjevac, Z. Ragic, 2010. Fast Fourier Transform IR Characterization of epoxy GY systems Crosslinked with Aliphatic and Cycloaliphatic EH polyamine Adducts, Sensors, 10,684-696;doi:10.3390/s100100684.
9. M. A. Escola, C. A. Moina, A. C. Gomez, G. O. Ybarra, 2005. The determination of the degree of cure in epoxy paints by infrared spectroscopy, Polymer testing 24(572-575).
10. C. Billaud, M. Vandeuren, R. Legras, V. Carlier, 2002. Quantitative analysis of epoxy resin cure reaction: A study by Near-Infrared spectroscopy, Applied spectroscopy, Vol.56, No.11
11. K.P.Unnikrishnan, 2006. Studies on The Toughening of Epoxy Resin, Cochin University of science and technology, India
12. DOTD TR 519-92. 1992. Method of Test for Determination of Amine Value of Catalyst Resins, DOTD Designation:TR 519-92.
13. DOTD TR 518-93. 1993. Method of Test for Determination of Epoxy Equivalent Weight of Epoxy Resins and Solutions, DOTD Designation:TR 518-93.
14. H. Lee, K. Neville, 1967. HandBook of Epoxy Resins, McGraw-Hill, New York.
15. ASTM D 2196-99. Standard Test Methods for Rheological Properties of Non-Newtonian Materials by Rotational (Brookfield type) Viscometer.
16. ASTM D 1475-98. Standard Test Method For Density of Liquid Coatings, Inks, and Related Products.
17. A. Cedeno, C. S. P. Sung, 2005. Fluorescence and IR characterization of epoxy cured with aliphatic amines, Polymer Science 46(9378-9384).
18. S. Zlatkovic, L. Raskovic, G. Nikolic, J. Stamenkovic, 2005. Investigation of emulsified hydrous epoxy systems, Facta universitatis, series working and living environmental protections, Vol.2, No.5, (401-407).
19. [Ferro company catalogue for COROBOND epoxy coating system www.cordobond.com/pdf/cordobond-brochure.pdf](http://www.cordobond.com/pdf/cordobond-brochure.pdf). 5.2.2012

20. www.engineeringtoolbox.com/chemical-resistance-epoxy-d_786_5.2.2012
21. L. Li, Q.Wu, S. Li, P.Wu, 2008. Study of the infrared features of an epoxy curing mechanisam, Applied spectroscopy, Vol.62, No.10.
22. M. Ladaniuc, L.Dumitrache, V.Raditoiu, A.Raditoiu, G.Hubca, 2011. Study of the synthesis of glycol modified epoxy resins in microwave field, U. P. B. Sci, Series B, Vol.73.Iss.1.
23. S. Zlatkovic, G. Nikolic, J. Stamenkovic, 2003. Odredivanje stepena umreženosti epoksi smole cikloalifatičnim poliamino I polyamidoamin umreživačima metodom FTIR spektroskopije, Hem. ind.57(11) 563-567.
24. M. E. Aziz, 2010. A study on the effect of hardener on the mechanical properties of epoxy resin, M.Sc., chemical engineering department, university of technology, Iraq.
25. J. Zhang, Y. Xu, P. Huang, 2009. Effect of cure cycle on curing process and hardness for epoxy resin, eXPRESS Polymer Letters, Vol.3, No.9, p.534–541.
26. C. Costa, V. M. A. Calado, F. W. Tavares, 2000. A study of viscoelastic response of bisphenol A drived epoxy, 2nd Mercosur congress on chemical engineering, 4th Mercosur congress on process systems engineering, Enpromer, Brazil.