



اثر لاستیک مایع CTBN و عامل پخت دی‌آمین انعطاف‌پذیر بر خواص پیش‌آغشته‌های اپوکسی - شیشه

هاجر جمشیدی¹، محمدحسین بهشتی^{2*}، رضا اکبری³

1- مربی، شیمی، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، تهران

2- استاد، مهندسی پلیمر، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، تهران

3- کارشناسی ارشد، مهندسی پلیمر، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران

*تهران، صندوق پستی 14975-112، M.Beheshty@ippi.ac.ir

اطلاعات مقاله

دریافت: 95/10/22

پذیرش: 96/1/30

کلیدواژگان:

پیش‌آغشته اپوکسی - شیشه

رزین اپوکسی

CTBN

جف‌آمین

استحکام برشی

چکیده

پیش‌آغشته‌های اپوکسی-الیاف شیشه از جمله پرکاربردترین نوع پیش‌آغشته‌ها در صنعت کامپوزیت‌اند، اما با وجود مزایای زیاد، شکنندگی ذاتی رزین اپوکسی از مشکلات عمده آن‌هاست. در پژوهش حاضر، از رزین اپوکسی چقرمه شده در تهیه پیش‌آغشته استفاده شده است. بدین منظور، اثر لاستیک مایع کوپلیمر بوتادین-آکریلونیتریل با گروه‌های انتهای کربوکسیل و اختصار CTBN و عامل پخت دی‌آمین انعطاف‌پذیر (جف‌آمین D-400) به‌طور مجزا بر خواص پیش‌آغشته‌های رزین اپوکسی برپایه دی‌گلیسیدیل اتر بیس‌فنول A و عامل پخت دی‌سیان دی‌آمید (Dicy) تقویت شده با الیاف شیشه مطالعه شده است. پس از تهیه آمیزه رزین و پیش‌آغشته‌سازی آن با الیاف شیشه، اثر CTBN و جف‌آمین بر خواص پیش‌آغشته شیشه-اپوکسی مانند جریان‌پذیری، استحکام برشی پیش‌آغشته و استحکام برشی بین‌لایه‌ای مطالعه شد. از این‌رو، درصد مواد فرار، درصد رزین و میزان پیش‌پخت در پیش‌آغشته‌ها ارزیابی شد. نتایج نشان داد، در تمام نمونه‌های حاوی لاستیک مایع CTBN و عامل پخت جف‌آمین تقریباً مقادیر درصد رزین، درصد مواد فرار و میزان پیش‌پخت با یکدیگر برابر بود و مقدار جریان‌پذیری با افزودن مقادیر مختلف لاستیک مایع و عامل پخت جف‌آمین تغییر چندانی نکرد. مقدار استحکام برشی با افزودن لاستیک مایع تا 20phr تغییر چندانی نداشت. اما، افزودن عامل پخت جف‌آمین به مقدار 20٪ سبب افزایش 8٪ استحکام برشی شد و افزودن بیشتر آن تا 40٪ اما اثر قابل توجهی بر استحکام برشی نداشت. افزودن لاستیک مایع تا 5phr سبب افزایش استحکام برشی بین‌لایه‌ای به مقدار 7.7٪ شد، ولی در تمام نمونه‌های حاوی جف‌آمین استحکام برشی بین‌لایه‌ای از 4.6 MPa برای سامانه اپوکسی حاوی 100٪ عامل پخت دی‌سیان دی‌آمید به مقدار 2.0 MPa برای سامانه حاوی 60٪ عامل پخت جف‌آمین کاهش و سپس تا مقدار 2.6 MPa برای سامانه اپوکسی حاوی 100٪ عامل پخت جف‌آمین افزایش یافت.

Effect of CTBN liquid rubber and flexible diamine curing agent on epoxy/glass prepregs properties

Hajar Jamshidi, Mohammad Hosain Beheshty*, Reza Akbari

Iran Polymer and Petrochemical Institute, Tehran, Iran

*P.O. B. 14975-112, Tehran, Iran, M.Beheshty@ippi.ac.ir

Keywords

Epoxy/Glass prepreg
Epoxy resin
CTBN
Jeffamine
Shear strength

Abstract

Glass/epoxy prepregs are widely used in composite industry. Although they have significant advantages, the brittleness nature of its epoxy matrix produces some difficulties. In this paper, the toughened epoxy resin was used in the preparation of prepregs. the effect of liquid carboxyl-terminated butadiene-acrylonitrile rubber (CTBN) and a flexible diamine (Jeffamine D-400) curing agent on epoxy prepregs based on diglycidyl ether of bisphenol-A (DGEBA) resin and dicyandiamide (Dicy) reinforced with glass fiber were studied. For this purpose, after preparing the resin formulation and its impregnation with glass fiber or preparing the prepreg samples, the effect of CTBN and Jeffamine on epoxy/glass prepregs properties like resin flow, lap shear strength (LSS) and interlaminar shear strength (ILSS) were studied. Volatile content, resin content and pre-curing of prepared prepregs are characterized. Results show that in all samples the amount of resin content, volatile content and pre-curing were nearly the same and adding different amounts of CTBN or Jeffamine do not changed the resin flow. By adding 20 phr of liquid rubber, LSS does not changed but, adding the Jeffamine up to 20% increased the LSS by 8% and adding Jeffamine up to 40% does not changed this property. By adding the CTBN by 5 phr, the ILSS increased by 7.7% and in all Jeffamine samples the ILSS varied from 4.6 MPa for 100% Dicy to 2.0 MPa for sample containing 60% of Jeffamine and 2.6 MPa for 100% of Jeffamine content.

Please cite this article using:

Jamshidi, H. Beheshty, M. H. and Akbari, R., "Effect of CTBN liquid rubber and flexible diamine curing agent on epoxy/glass prepregs properties", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 1, pp. 25-32, 2018.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

1- مقدمه

پیش‌آغشته‌ها محصولاتی حدواسط و یک تقویت‌کننده آغشته به رزین هستند که به راحتی قالب‌گیری می‌شوند. این مواد به شکل پارچه‌های بافته شده، پارچه نمدی، دسته الیاف نتابیده و کاغذهای آغشته به رزین تولید می‌شوند. در پیش‌آغشته‌ها افزون بر رزین و تقویت‌کننده از سخت‌کننده، شتاب‌دهنده، آغازگر یا عوامل شبکه‌ای‌کننده، نرم‌کننده، حلال و رنگ نیز استفاده می‌شود. تقویت‌کننده‌های مصرفی محدوده گسترده‌ای شامل الیاف شیشه، کوارتز، کربن، آرامید، بور، پنبه نسوز، سیلیکا، نایلون، کاغذ و پارچه کتان دارند. نام پیش‌آغشته به کاغذهای پیش‌آغشته شده، تقویت‌کننده‌های آغشته شده با رزین‌های گرم‌انرم و ترکیبات قالب‌گیری ورقه‌ای نیز گفته می‌شود. برای تولید هر یک از این مواد به دستگاه‌های ویژه‌ای نیاز است، اما فناوری تولید آن‌ها شبیه یکدیگر است و از نظر فرایند تولید جزء پیش‌آغشته‌ها هستند [1-3].

خواص پیش‌آغشته به نوع آمیزه و تقویت‌کننده آن یا همان الیاف و نحوه آرایش الیاف بستگی دارد. از رزین‌های اصلی مصرفی در تهیه پیش‌آغشته‌ها می‌توان به رزین‌های پلی‌استر، اپوکسی، فنولی، سیلیکون، ملامین، پلی‌ایمید و پلی‌پورتان اشاره کرد. از پلیمرهای گرم‌انرم نیز به علت استحکام ضربه‌ای بیشتر و مقاومت محیطی بهتر نیز استفاده می‌شود. انتخاب نوع رزین و تقویت‌کننده به شرایط کاربری و خواص مدنظر از پیش‌آغشته وابسته است [4]. خواص مکانیکی پیش‌آغشته به نوع، مقدار و جهت‌یابی تقویت‌کننده و همچنین خواص شیمیایی، الکتریکی و گرمایی آن به نوع رزین و چگونگی آمیزه‌سازی پیش‌آغشته با سایر مواد افزودنی وابسته است. امروزه، به فرایند پیش‌آغشته‌سازی نه فقط به‌عنوان علم بلکه به‌عنوان هنر می‌نگرند. با انتخاب سامانه رزین فرمول‌بندی شده مناسب و کنترل مقدار تبدیل رزین و جریان‌یابی آن و مقدار مواد فرار باقی‌مانده در پیش‌آغشته می‌توان به پیش‌آغشته‌ای با خواص بهینه دست یافت [5,6]. پیش‌آغشته‌ها در ساخت چندلایه‌های عایق الکتریکی، مواد پایه تولید صفحه‌های مدار چاپی، ساخت قطعه‌ها به روش رشته‌پیچی برای تولید مخازن تحت فشار و محفظه موتور موشک‌ها و ساخت فداشونده‌ها برای تولید گلوله‌اندازها، سکوی پرتاب موشک و کاربردهای فضایی به‌کار گرفته می‌شوند. با استفاده از پیش‌آغشته‌ها، تولید کامپوزیت‌های بسیار دقیق و کنترل شده امکان‌پذیر است. از این‌رو، استفاده از پیش‌آغشته‌های شیشه-اپوکسی در هواپیماها، وسایل ورزشی و صنایع دریایی در دهه‌های اخیر به‌طور شایان توجهی افزایش یافته است [7-9].

رزین‌های اپوکسی به‌عنوان زمینه در پیش‌آغشته‌های اپوکسی-شیشه با کارآمدی‌های برجسته مانند چقرمگی، صلبیت، دمای کارایی زیاد، مقاومت شیمیایی، خواص چسبندگی و واکنش‌پذیری با عوامل پخت بسیار متنوع شناخته شده‌اند. این رزین‌ها ساختار بسیار شبکه‌ای با سفتی، دمای انتقال شیشه‌ای و مقاومت شیمیایی نسبتاً زیاد تشکیل می‌دهند. اما، چقرمگی ذاتی شبکه‌های اپوکسی کم و در نتیجه شکننده‌اند. به دلیل خاصیت شکنندگی که اپوکسی پس از پخت نشان می‌دهد، برای دستیابی به پیش‌آغشته‌ای مناسب باید پیش از استفاده از اپوکسی آن را چقرمه کرد [10-15].

رهیافت‌های مختلفی برای بهبود چقرمگی رزین‌های اپوکسی به‌کار گرفته شده است [16-23]. یکی از پرکاربردترین راهکارها برای بهبود چقرمگی شکست و چسبندگی بین‌لایه‌ای رزین‌های اپوکسی استفاده از لاستیک مایع مانند کاپلیمر بوتادین‌آکریلونیتریل با گروه‌های انتهایی کربوکسیل (liquid carboxyl-terminated butadiene-acrylonitrile rubber, CTBN) به‌عنوان اصلاح‌کننده است. این مواد در اپوکسی انحلال-

پذیرند و پس از عملیات پخت به دو فاز تبدیل می‌شوند، به‌طوری که لاستیک به شکل ذرات ریز درون اپوکسی پراکنده می‌شود. این حالت دوفازی شدن باعث افزایش چقرمگی اپوکسی می‌شود [23,24].

همچنین، می‌توان چقرمگی رزین‌های اپوکسی را با استفاده از عوامل پخت انعطاف‌پذیر بهبود بخشید. جف‌آمین، دی‌آمین پلی‌اتری انعطاف‌پذیر است که به‌عنوان سخت‌کننده (عامل پخت) برای تهیه رزین‌های اپوکسی چقرمه استفاده می‌شود. ساختار خطی جف‌آمین با واکنش‌پذیری زیاد و گرانبوی کم می‌تواند به‌طور مؤثری چقرمگی رزین اپوکسی را افزایش دهد [25-29].

مطالعات کمی برای استفاده از اپوکسی چقرمه شده در پیش‌آغشته انجام شده است. در پژوهشی، اثر لاستیک آکریلونیتریل بوتادین (NBR) با 32٪ آکریلونیتریل بر خواص پیش‌آغشته اپوکسی-شیشه بررسی شده است. پیش‌آغشته‌ها با مقادیر 3 و 5٪ وزنی NBR تهیه شدند. نتایج نشان داد، افزودن لاستیک NBR موجب افزایش چسبناکی (tack) پیش‌آغشته اپوکسی می‌شود. این موضوع به افزایش گرانبوی رزین و در پی آن برهم‌کنش‌های بین‌سطحی بیشتر و در نتیجه افزایش استحکام اتصال چسبندگی در لایه‌های پیش‌آغشته نسبت داده شد. استحکام برشی بین‌لایه‌ای نیز با افزودن لاستیک NBR به دلیل کاهش گروه‌های هیدروکسیل در پیش‌آغشته‌ها و چگالی شبکه‌ای شدن رزین اپوکسی پخت شده نهایی کاهش یافت [30].

در مطالعات قبلی، اثر لاستیک مایع CTBN [31] و عامل پخت دی‌آمین انعطاف‌پذیر (جف‌آمین) [32] به‌طور مجزا بر چقرمه‌کردن و نیز رفتار پخت، خواص مکانیکی و شکل‌شناسی رزین اپوکسی گزارش شده است. از این‌رو در مقاله حاضر، اثر لاستیک مایع CTBN و جف‌آمین D-400 بر خواص پیش‌آغشته‌های تقویت شده آن‌ها با الیاف شیشه پس از بررسی درصد مواد فرار، درصد رزین و درصد پیش‌سرفت پخت بر مقدار جریان‌پذیری پیش‌آغشته‌ها، استحکام برشی و استحکام برشی بین‌لایه‌ای پیش‌آغشته مطالعه شده است.

2- تجربی**2-1 مواد**

در پژوهش حاضر، از رزین اپوکسی برپایه دی‌گلیسیدیل اتر بیس فنول A با نام تجاری Epikote 828 محصول شرکت Momentive آمریکا استفاده شد. عوامل پخت دی‌سیان دی‌آمین یا دایسی (dicyandiamide, Dicy) و دی‌آمین مایع انعطاف‌پذیر جف‌آمین D-400 (Jeffamine D-400) از شرکت هانتزمن و شتاب‌دهنده مونورون از شرکت سیگما-آلدريج خریداری شد. از لاستیک مایع کاپلیمر بوتادین‌آکریلونیتریل با گروه‌های انتهایی کربوکسیل و اختصار CTBN از شرکت Zibo Qilong چین استفاده شد. تقویت‌کننده به‌کار رفته برای تهیه پیش‌آغشته پارچه الیاف شیشه E-glass 8H بافت ساتین با وزن واحد سطح 300g/m^2 تولید کشور بلاروس بود. در جدول‌های 1 و 2 به ترتیب برخی از خواص رزین اپوکسی مصرفی و لاستیک مایع CTBN آمده است. در شکل 1 نیز ساختار شیمیایی رزین اپوکسی، لاستیک مایع CTBN، عوامل پخت دایسی و جف‌آمین و شتاب‌دهنده مونورون نشان داده شده است.

2-2 دستگاه‌ها و روش‌ها

در این پژوهش، دو مجموعه آمیزه رزین پیش‌آغشته حاوی لاستیک مایع CTBN و عامل پخت جف‌آمین تهیه شدند. روش تهیه و فرمول‌بندی هر مجموعه و آزمون‌های انجام شده روی آن‌ها، در ادامه توضیح داده شده است.

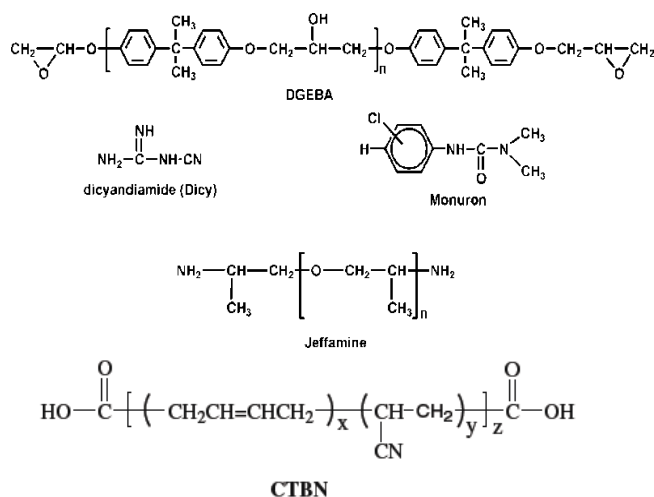


Fig. 1 Chemical structures of DGEBA epoxy resin, Dicy, Monuron, Jeffamine and CTBN

شکل 1 ساختار شیمیایی رزین اپوکسی بر پایه DGEBA، شتاب‌دهنده مونورون، عوامل پخت جف‌آمین و دایسی و لاستیک مایع CTBN

نمونه A به مدت 15 min درون گرم‌خانه با جریان هوای داغ قرار گرفت که دمای آن از پیش روی دمای پخت پیش‌آغشته (135°C) تنظیم شده و به این دما رسیده بود. پس از آن، نمونه از گرم‌خانه خارج شده و به سرعت وزن شد تا وزن GA1 به دست آید. نمونه B به مدت 10 min درون استون قرار داده شد تا مواد انحلال‌پذیر در استون (رزین) آن خارج شود. سپس، به مدت 10 min درون گرم‌خانه با دمای 135°C قرار گرفت و سپس وزن شد تا وزن GB1 به دست آید. پس از آن، این نمونه در کوره با دمای 500°C به مدت 30 min قرار داده شد تا رزین پخت شده آن کاملاً بسوزد و از بین برود. در نهایت، با توزین نمونه باقی‌مانده GB2 به دست آید. بدین ترتیب، درصد مواد فرار (معادله (1))، درصد رزین (معادله (2))، و مقدار پیش‌پخت یا درصد مرحله B (معادله (3))، پیش‌آغشته محاسبه شد:

$$\%V = \frac{G_A - G_{A1}}{G_A} \times 100 \quad (1)$$

$$\%R = \frac{G_B(1-V) - G_{B2}}{G_B(1-V)} \times 100 \quad (2)$$

$$\%C = \frac{G_{B1} - G_{B2}}{G_B(1-V) - G_{B2}} \times 100 \quad (3)$$

2-2-4 آزمون تعیین درصد جریان‌پذیری

درصد جریان‌پذیری پیش‌آغشته بر اساس استاندارد ASTM D3531 معین شد. در این آزمون دو لایه پیش‌آغشته با ابعاد 50×50 mm² روی هم قرار داده شده و وزن شد (W₁). این مجموعه میان دو لایه پارچه تفلون و دو صفحه فلزی زیر پرس گرمایی هیدرولیک قرار گرفت که از پیش، دمای آن روی دمای پخت پیش‌آغشته تنظیم شده و به این دما رسیده بود. فشار اعمال شده 750kPa، دمای پخت پیش‌آغشته اپوکسی-الیاف شیشه 135°C و مدت زمان اعمال بار 15 min بود. پس از این مدت، نمونه از زیر پرس خارج شده و پس از جداکردن رزین‌های خارج شده از نمونه، مجدداً وزن شد (W₂). تغییرات وزن برحسب درصد وزنی نسبت به وزن نمونه اولیه مطابق معادله (4) به عنوان جریان‌پذیری پیش‌آغشته گزارش شد:

$$\%flow = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 \quad (4)$$

جدول 1 برخی از خواص رزین اپوکسی Epikot 828

Table 1 Some properties of Epikot 828 epoxy resin

مقدار	خواص
184-190	وزن هم‌ارز اپوکسی (g/eq)
5260-5420	گروه اپوکسی (mmol/kg)
12-14	گرانروی در 25°C (Pa.s)
1.16	چگالی در 25°C

جدول 2 برخی از خواص لاستیک مایع CTBN

Table 2 Some properties of CTBN liquid rubber

مقدار	خواص
24±2	گروه کربونیل (%)
1400>	وزن مولکولی (g/mol)
0.4>	گروه کربوکسیل (mmol/g)
60<	گرانروی در 70°C (Pa.s)
0.05<	آب (%)

2-2-1 تهیه پیش‌آغشته‌های حاوی لاستیک مایع CTBN

برای تهیه پیش‌آغشته‌ها به منظور بررسی اثر لاستیک CTBN، ابتدا مقادیر مشخص از رزین اپوکسی، لاستیک مایع CTBN، عامل پخت دایسی و شتاب‌دهنده مونورون بر اساس جدول 3 به‌طور کامل با یکدیگر مخلوط شدند تا آمیزه‌ای یکنواخت حاصل شود. اطلاعات کامل درباره روش آماده‌سازی نمونه‌ها در مطالعه قبلی [31] قابل دست‌یابی است. سپس، مقدار مشخصی از الیاف شیشه بریده شده و با 6 آمیزه رزین تهیه شده با ابزار ویژه‌ای به‌طور یکنواخت آغشته شدند. تلاش شد تا هر 6 پیش‌آغشته به‌گونه‌ای تهیه شوند که مقدار رزین آن‌ها تا حد ممکن ثابت و حدود 45٪ وزنی باشد. درنهایت، الیاف آغشته شده تا زمان استفاده، میان دو فیلم پلی‌اتیلن در یخچال نگهداری شدند.

2-2-2 تهیه پیش‌آغشته‌های حاوی عامل پخت جف‌آمین

برای تهیه پیش‌آغشته‌های حاوی عامل پخت جف‌آمین ابتدا مقادیر مشخص از رزین اپوکسی، عوامل پخت دایسی و جف‌آمین و شتاب‌دهنده مونورون بر اساس جدول 4 به‌طور کامل با یکدیگر مخلوط شدند تا آمیزه‌ای یکنواخت حاصل شود. اطلاعات درباره روش آماده‌سازی این نمونه‌ها نیز در مطالعه قبلی [32] آورده شده است. سپس مشابه روش پیش‌گفته، 8 پیش‌آغشته حاوی مقادیر مختلف عامل پخت جف‌آمین تهیه شدند. همان‌طور که جدول 4 نشان می‌دهد، مقادیر جف‌آمین نسبت به سامانه پخت از صفر، 20، 40، 60، 80 تا 100٪ متغیر بوده جف‌آمین عامل پخت است، با تغییر مقدار آن، مقادیر عامل پخت دایسی نیز تغییر یافت به‌گونه‌ای که تمام آمیزه‌ها نسبت استوکیومتری لازم عامل پخت را داشته باشند. در این بخش نیز تلاش شد تا هر 8 پیش‌آغشته به‌گونه‌ای تهیه شوند که مقدار رزین آن‌ها تا حد ممکن ثابت و حدود 45٪ وزنی باشد. در نهایت، الیاف آغشته شده تا زمان استفاده، میان دو فیلم پلی‌اتیلن در یخچال نگهداری شدند.

2-2-3 آزمون تعیین مقادیر مواد فرار، درصد رزین و درصد مرحله B

درصد مواد فرار پیش‌آغشته‌ها بر اساس استاندارد ASTM D3530 و درصد رزین و درصد مرحله B یا میزان پیش‌پخت پیش‌آغشته‌ها بر اساس استاندارد ASTM D3529 اندازه‌گیری شد. در این آزمون، دو نمونه از یک تک‌لایه پیش‌آغشته با ابعاد 50×50 mm² (نمونه A و نمونه B) با ترازوی رقمی با دقت 0.0001g وزن شدند (G_A و G_B).

زائده‌های آن زدوده شد. در ادامه، نمونه‌ها به کمک دستگاه آزمون ساخت شرکت سنتم ایران (STM-150) با سرعت جابه‌جایی 2mm/min و فاصله دو تکیه‌گاه 16mm در حالت خمش سه‌نقطه‌ای آزمون شدند. پس از انجام آزمون، استحکام برشی بین‌لایه‌ای (ILSS) از معادله (5) معین شد:

$$ILSS = 0.75 \times \frac{P}{W \times t} \quad (5)$$

در این معادله، P بیشترین نیروی وارد شده (N)، W عرض نمونه (mm) و t ضخامت نمونه (mm) است.

3- نتایج و بحث

3-1 مقدار مرحله B، درصد فراریت، درصد رزین و درصد جریان‌پذیری

پخت رزین‌های گرماسخت شامل سه مرحله A، B و C است. در مرحله A، رزین به بازار عرضه و هنگام استفاده به تقویت‌کننده اضافه می‌شود. سپس، در اثر گرما و ایجاد تعدادی پیوندهای عرضی به مرحله B می‌رسد. این مرحله را پیشرفت پخت رزین و گاهی پیش‌پخت گویند. مقدار پیشرفت یا پیش‌پخت رزین بسیار مهم است. مرحله C، مرحله نهایی است که در آن رزین به‌طور کامل شبکه‌ای شده و در نتیجه انحلال‌ناپذیر و ذوب‌نشدنی است [1]. برای بررسی خواص پیش‌آغشته تهیه شده از نمونه‌های اپوکسی اصلاح شده، آزمون تعیین مقادیر درصد مرحله B، درصد فراریت، درصد رزین و درصد جریان‌پذیری انجام شد. از میان این موارد هدف اصلی، تعیین درصد جریان‌پذیری است. برای اینکه مقادیر درصد جریان‌پذیری نمونه‌ها با یکدیگر قابل مقایسه باشند، باید مقدار درصد رزین، میزان مرحله B، مقدار مواد فرار و نوع الیاف در همه این نمونه‌ها برابر باشد. به همین دلیل افزون بر تعیین درصد جریان‌پذیری، موارد دیگر نیز بررسی شد. شایان ذکر است، برای تهیه پیش‌آغشته‌ها هیچ نوع گرمایی هنگام آغشته‌سازی داده نشد و مواد به‌طور مستقیم پس از اختلاط کامل با الیاف آغشته شده‌اند. معمولاً در تهیه پیش‌آغشته‌ها بسته به مقدار چسبناکی و جریان‌یابی یا روندگی (flow) لازم رزین پیش‌آغشته هنگام قالب‌گیری، میزان پیش‌پخت کنترل می‌شود. معمولاً با افزایش میزان پیش‌پخت، مقدار چسبناکی پیش‌آغشته ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد [30]. اما، مقدار جریان‌یابی رزین پیش‌آغشته با افزایش میزان پیش‌پخت کاهش می‌یابد. از آنجا که در این پژوهش هدف بررسی اثر چقرمه‌شدن رزین در اثر افزودن لاستیک مایع CTBN و عامل پخت انعطاف‌پذیر جفا‌آمین است، تلاش شد تا پیش‌پختی هنگام تهیه پیش‌آغشته حتی‌المقدور انجام نشود.

تغییرات تمام چهار خاصیت پیش‌آغشته‌های اصلاح شده (درصد مواد فرار، درصد رزین، میزان پیش‌پخت (conversion) و درصد جریان‌پذیری) برحسب مقدار لاستیک مایع و عامل پخت جفا‌آمین به ترتیب در شکل‌های 2 و 3 نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل‌ها مشخص است، در تمام نمونه‌ها تقریباً مقادیر درصد رزین، درصد مواد فرار و درصد مرحله B با یکدیگر برابر بوده به همین دلیل درصد جریان‌پذیری نمونه‌ها قابل مقایسه و بررسی است. مقدار مواد فرار (رطوبت موجود در مواد) در حد ناچیز و قابل قبول حدود 0.2٪، میزان پیش‌پخت حدود 3٪ و مقدار رزین حدود 45 ± 3 درصد بوده است. معمولاً هنگام اختلاط و آغشته‌سازی، مقدار کمی از واکنش‌های پخت انجام می‌شود و حدود 3٪ اجتناب‌ناپذیر است. اگر، از تجهیزات دقیق‌تری استفاده شود، مقدار رزین را باید بتوان در محدوده باریک‌تری کنترل کرد. اما به سبب تجهیزاتی که در این پژوهش استفاده شد، این تغییرات زیاد (3٪) بود. ولی قابل پذیرش است. یادآور می‌شود، هر یک از

جدول 3 فرمول‌بندی آمیزه رزین پیش‌آغشته‌های حاوی لاستیک مایع CTBN
Table 3 Formulation for resin compund of prepregs containing CTBN liquid rubber

کد نمونه	رزین اپوکسی (phr)	CTBN (phr)	Dicy (phr)	مونورون (phr)
1	100	0	7	2.5
2	100	5	7	2.5
3	100	10	7	2.5
4	100	15	7	2.5
5	100	20	7	2.5
6	100	25	7	2.5

جدول 4 فرمول‌بندی آمیزه رزین پیش‌آغشته‌های حاوی عامل پخت جفا‌آمین
Table 4 Formulation for resin compund of prepregs containing Jeffamine curing agent

کد نمونه	رزین اپوکسی (phr)	Jeffamine (%)	Dicy (phr)	مونورون (phr)
1	100	100	0	0
2	100	100	0	2.5
3	100	80	1.4	2.5
4	100	60	2.8	2.5
5	100	50	3.5	2.5
6	100	40	4.2	2.5
7	100	20	5.6	2.5
8	100	0	7	2.5

2-2-5 آزمون استحکام برشی پیش‌آغشته

این آزمون براساس استاندارد ASTM D1002 انجام می‌شود. برای بررسی استحکام برشی (lap shear strength) پیش‌آغشته، نخست صفحه‌هایی با ابعاد حدود $100 \times 25 \text{ mm}^2$ و ضخامت 2 mm از ورق‌های آلومینیم تهیه شد. برای آماده‌سازی سطح ورق‌ها و زدودن آلودگی‌های سطحی آن‌ها، ابتدا سطح صفحه‌ها با کاغذ سنباده زیر و پس از آن با آب، مایع دستشویی و استون شست‌وشو شد. سپس، از پیش‌آغشته مدنظر لایه‌ای با ابعاد $25 \times 20 \text{ mm}^2$ برش داده شد و روی لبه سطح آماده‌سازی شده چسبانده و ورق آلومینیمی آماده‌سازی شده دیگری روی آن قرار گرفت. طول هم‌پوشانی لبه‌ها 13 mm در نظر گرفته شد. سپس، نمونه‌ها در پرس گرمایی قرار داده شده و زیر فشار 30 bar در دمای 135°C به مدت 60 min پخت شدند. آزمون به شیوه کششی با دستگاه کشش ساخت شرکت سنتم ایران (STM-150) با سرعت کشش 1.3 mm/min انجام شد و بیشینه نیروی لازم برای فروشکستن نمونه‌ها ثبت شد. از تقسیم این نیرو به مساحت سطح چسب خورده ($13 \times 25 \text{ mm}^2$) استحکام برشی محاسبه شد.

2-2-6 آزمون استحکام برشی بین‌لایه‌ای

این آزمون براساس استاندارد ASTM D2344 انجام می‌شود. برای تعیین استحکام برشی بین‌لایه‌ای (interlaminar shear strength, ILSS) شش لایه از پیش‌آغشته با اندازه تقریبی $100 \times 50 \text{ mm}^2$ روی یکدیگر قرار داده شده و زیر فشار 30 bar و دمای 135°C به مدت 1h در قالبی به ضخامت 2mm پخت شدند. پس از پخت، به کمک تیغه دوار برشی با لبه الماسه، نمونه‌هایی با اندازه $20 \times 10 \text{ mm}^2$ بریده و با ورق سمباده شماره 1200

2-3 استحکام برشی پیش‌آغشته‌ها

برای بررسی مقدار استحکام برشی پیش‌آغشته‌ها این آزمون انجام شد. تغییرات استحکام برشی پیش‌آغشته‌های اصلاح شده برحسب مقدار لاستیک مایع و عامل پخت جف‌آمین به ترتیب در شکل‌های 4 و 5 آمده است. همان‌طور که در شکل 4 مشاهده می‌شود، با افزایش غلظت لاستیک مایع از صفر تا 25 phr مقدار استحکام برشی پیش‌آغشته از 17.1 MPa به 7.4 MPa (یعنی تقریباً 57٪) کاهش می‌یابد، اگرچه این کاهش تا 20 phr لاستیک مایع حداکثر 25٪ است. به عبارت دیگر تا 20 phr، افت چندان زیادی مشاهده نمی‌شود. کاهش مقدار استحکام برشی پیش‌آغشته می‌تواند به دلیل کاهش چگالی شبکه‌ای شدن سامانه یا کاهش گروه‌های عاملی فعالی باشد که می‌توانند با سطح آلومینیم پیوندهای هیدروژنی تشکیل دهند. شایان ذکر است، با افزایش غلظت لاستیک مایع، به دلیل آنکه این مواد با حلقه‌های اپوکسی وارد واکنش می‌شوند، مقدار حلقه‌ها کاهش یافته و در نتیجه مقدار چگالی شبکه‌ای شدن نیز کاهش می‌یابد [31].

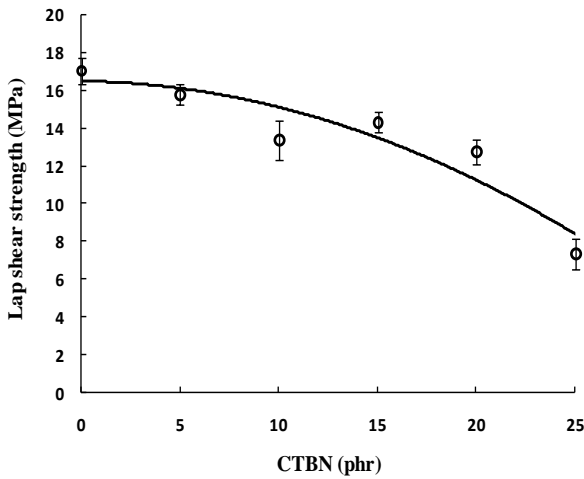


Fig. 4 Variation of lap shear strength of prepregs versus CTBN content

شکل 4 تغییرات استحکام برشی پیش‌آغشته‌ها برحسب مقدار CTBN

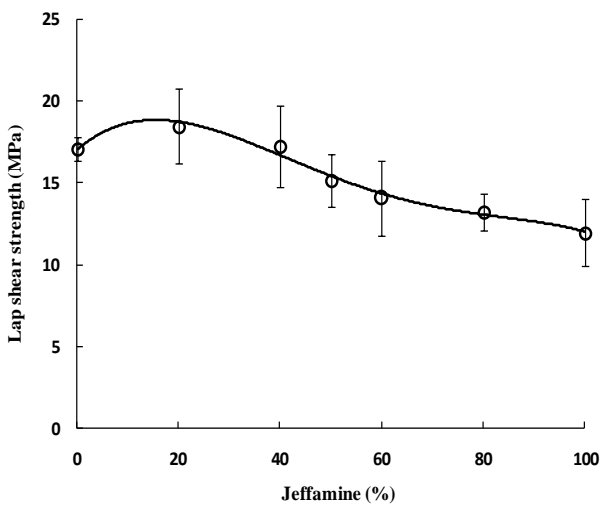


Fig. 5 Variation of lap shear strength of prepregs versus Jeffamine content

شکل 5 تغییرات استحکام برشی پیش‌آغشته‌ها برحسب مقدار جف‌آمین

این آزمون‌ها سه مرتبه تکرار شده و اعداد گزارش شده متوسط سه مرتبه اندازه‌گیری است، ولی پراکندگی نتایج بسیار کم بود (حدود 0.2٪) به گونه ای که ارائه آن در شکل‌ها به صورت میله خط (error bar) امکان پذیر نبود.

شکل‌های 2 و 3 نشان می‌دهد، با افزایش مقدار لاستیک مایع CTBN یا افزایش مقدار عامل پخت انعطاف‌پذیر جف‌آمین تغییرات معناداری در مقدار جریان‌پذیری رزین پیش‌آغشته مشاهده نمی‌شود و کاهش یا افزایش مختصر مشاهده شده ناشی از تغییرات رزین پیش‌آغشته و مقدار پیش‌پخت آن‌هاست. به‌طور کلی می‌توان بیان کرد، مقدار جریان‌پذیری پیش‌آغشته با افزایش مقدار لاستیک مایع یا افزایش عامل انعطاف‌پذیر پخت جف‌آمین تغییر چندانی نکرده است. به عبارت دیگر، افزودن لاستیک مایع به سامانه اپوکسی یا افزایش عامل انعطاف‌پذیر پخت جف‌آمین اثری بر مقدار جریان‌پذیری آن ندارد.

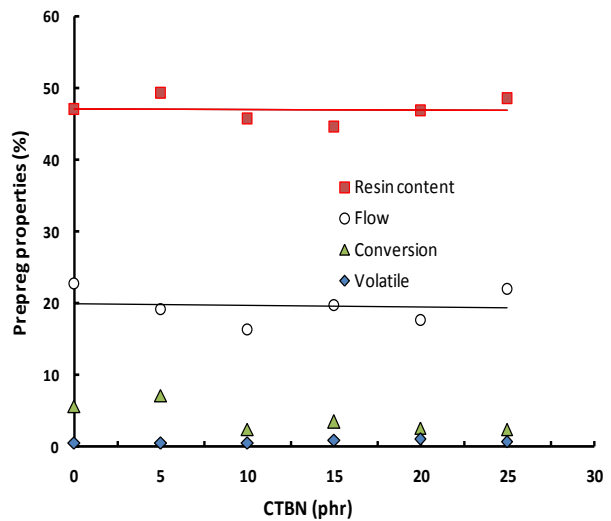


Fig. 2 Variation of properties of modified epoxy prepregs versus CTBN content

شکل 2 تغییرات خواص پیش‌آغشته‌های اپوکسی اصلاح شده برحسب مقدار CTBN

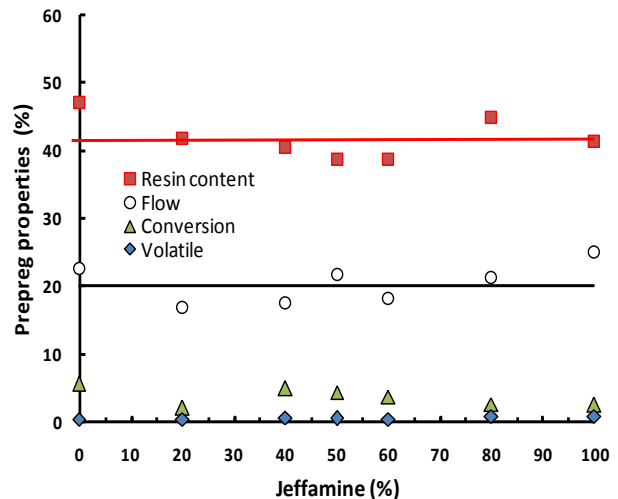


Fig. 3 Variation of properties of modified epoxy prepregs versus Jeffamine content

شکل 3 تغییرات خواص پیش‌آغشته‌های اپوکسی اصلاح شده برحسب مقدار جف‌آمین

یکدیگر متصل نشوند و در نتیجه زمانی که این آزمون روی آن‌ها انجام شود، نمونه‌ها سریع‌تر دچار شکست شوند.

برای توجیه اینکه چرا در مقدار 5 phr از لاستیک مایع مقدار استحکام برشی بین‌لایه‌ای افتی نکرده و حتی مختصر افزایشی نیز مشاهده می‌شود، می‌توان به کم‌بودن مقدار لاستیک مایع اشاره کرد. به عبارت دیگر، زمانی که مقدار 5 phr لاستیک مایع به سامانه اپوکسی اضافه می‌شود، مقدار چگالی اتصالات عرضی تغییری نکرده و در نتیجه مقدار استحکام برشی بین‌لایه‌ای به جهت برهم کنش‌های بیشتر مولکولی مختصری افزایش یافته است، ولی زمانی که از مقدار لاستیک مایع 10 phr یا بیشتر استفاده شده، مقدار چگالی اتصالات عرضی کاهش زیادی یافته و باعث کاهش مقدار استحکام برشی بین‌لایه‌ای شده است.

همچنین در شکل 7 مشاهده می‌شود، مقدار استحکام برشی بین‌لایه‌ای از 4.6 MPa برای سامانه اپوکسی حاوی 100% عامل پخت دایسی به 2 MPa برای سامانه اپوکسی حاوی 60% از عامل پخت جف‌آمین کاهش و سپس تا مقدار 2.6 MPa برای سامانه اپوکسی حاوی 100% عامل پخت جف‌آمین افزایش می‌یابد. نتایج نشان می‌دهد، وجود عامل پخت جف‌آمین در سامانه اپوکسی، حتی به مقدار کم، باعث کاهش استحکام برشی بین‌لایه‌ای شده است. دلیل این رفتار را می‌توان به مقدار و طول پیوندهای عرضی نسبت داد. به عبارت دیگر وجود عامل پخت جف‌آمین در سامانه اپوکسی باعث می‌شود، اتصالات به‌وجود آمده بین لایه‌های کامپوزیت استحکام مناسبی نداشته باشد و در نتیجه استحکام برشی بین‌لایه‌ای نمونه‌ها کاهش یابد. به کمک آزمون استحکام برشی بین‌لایه‌ای اثر وجود شتاب‌دهنده مونورون بر سامانه اپوکسی- جف‌آمین بررسی شد (آمیزه‌های 1 و 2 جدول 4). براساس این آزمون، با افزودن مونورون به سامانه، مقدار استحکام برشی بین‌لایه‌ای از 2.3 MPa به 2.6 MPa افزایش یافت. برای توجیه این رفتار می‌توان به تعداد اتصالات ایجاد شده بین لایه‌های کامپوزیتی اشاره کرد. با افزودن شتاب‌دهنده به سامانه اپوکسی- جف‌آمین، تعداد پیوندهای عرضی افزایش یافته و در نتیجه اتصالات بین‌لایه‌ای زیاد می‌شود [32]. این افزایش باعث افزایش مقدار استحکام برشی بین‌لایه‌ای نیز می‌شود.

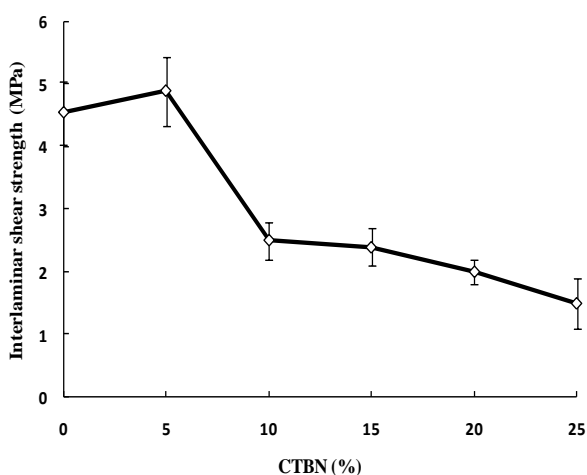


Fig. 6 Variation of interlaminar shear strength of prepregs versus CTBN content

شکل 6 تغییرات استحکام برشی بین‌لایه‌ای پیش‌آغشته‌ها برحسب مقدار CTBN

کاهش مقدار چگالی اتصالات عرضی، چسبندگی پس از پخت رزین را به فلز آلومینیم کم می‌کند و نتیجه آن کاهش مقدار استحکام برشی پیش‌آغشته است. به‌طور کلی می‌توان بیان کرد، افزایش لاستیک مایع به سامانه اپوکسی، به دلیل کاهش چگالی شبکه‌ای شدن و کاهش میزان گروه‌های عاملی، مقدار استحکام برشی را کاهش می‌دهد. اثر عامل پخت جف‌آمین بر استحکام برشی در شکل 5 نشان داده شده است، مشاهده می‌شود که استحکام برشی نمونه‌ها با افزودن 20% عامل پخت جف‌آمین حدود 8% افزایش می‌یابد (از 17.1 MPa به 18.5 MPa رسیده است). افزودن جف‌آمین در 40% نیز، اگرچه شبکه اپوکسی به مقدار قابل توجهی انعطاف‌پذیرتر و چقرمه‌تر [32] شده اثر خاصی بر استحکام برشی نداشته است.

نمونه پخت شده با 100% عامل پخت جف‌آمین استحکام برشی 12±2 MPa نشان داده است، یعنی استحکام برشی حدود 30% کمتر از نمونه پخت شده با 100% عامل پخت دایسی است. دلیل این نوع رفتار می‌تواند به علت طول بلند عامل پخت جف‌آمین و وجود گروه عاملی اتری درون ساختار آن باشد. این عوامل ممکن است، چسبندگی سامانه اپوکسی روی آلومینیم را کاهش دهد و در نتیجه باعث کاهش استحکام برشی نمونه شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت، با استفاده از 20% عامل پخت جف‌آمین هم سامانه اپوکسی چقرمه‌تر می‌شود و هم استحکام برشی افزایش می‌یابد و اگر به مقدار چقرمگی بیشتری نیاز باشد، می‌توان تا 40% از عامل پخت جف‌آمین، بدون اینکه کاهشی در استحکام برشی ایجاد شود استفاده کرد. به کمک آزمون استحکام برشی پیش‌آغشته‌ها، اثر وجود شتاب‌دهنده بر سامانه اپوکسی- جف‌آمین نیز بررسی شد (آمیزه‌های 1 و 2 جدول 4). براساس این آزمون با افزودن شتاب‌دهنده مونورون به سامانه، استحکام برشی پیش‌آغشته‌ها از 9.9 MPa به 12 MPa افزایش یافت. دلیل این افزایش را می‌توان به چگالی اتصالات عرضی نسبت داد [32,31]. با افزودن شتاب‌دهنده به سامانه اپوکسی- جف‌آمین، مقدار چگالی اتصالات عرضی افزایش یافته و در نتیجه تعداد اتصالات به آلومینیم زیاد می‌شود. افزایش تعداد این اتصالات باعث می‌شود، استحکام برشی نمونه افزایش یابد.

3-3 استحکام برشی بین‌لایه‌ای

برای بررسی برهم کنش‌های بین‌لایه‌ای و اینکه در یک چندلایه‌ای، لایه‌ها به چه میزان به یکدیگر متصل شده‌اند، از آزمون استحکام برشی بین‌لایه‌ای استفاده می‌شود. در حقیقت در این آزمون چسبندگی رزین به خود در حضور الیاف اندازه گرفته می‌شود و مقاومت کامپوزیت را در مقابل جداسدن لایه‌ها از هم (delamination) نشان می‌دهد. در شکل‌های 6 و 7 تغییرات استحکام برشی بین‌لایه‌ای پیش‌آغشته‌های اپوکسی- شیشه به ترتیب برحسب مقدار لاستیک مایع CTBN و عامل پخت جف‌آمین نشان داده شده است. با توجه به شکل 6، مقدار استحکام برشی بین‌لایه‌ای این کامپوزیت‌ها در مقدار 5 phr از لاستیک مایع حدود 7.7% افزایش می‌یابد. اما، افزایش بیشتر لاستیک مایع CTBN سبب کاهش شدید آن شده است. مشابه توجیهی که برای استحکام برشی پیش‌آغشته‌ها بیان شد، می‌توان دلیل کاهش مقدار استحکام برشی بین‌لایه‌ای را به کاهش چگالی اتصالات عرضی نسبت داد. با کاهش چگالی اتصالات عرضی، واضح است که نه تنها اتصالات عرضی درون یک لایه کاهش می‌یابد، بلکه اتصالات عرضی بین لایه‌ها نیز کم می‌شود. این کاهش در اتصالات عرضی بین‌لایه‌ای باعث می‌شود، لایه‌ها محکم و قوی به

جف‌آمین ضمن ازدیاد چگالی اتصالات عرضی، اتصالات بین‌لایه‌ای و در نتیجه استحکام برشی بین‌لایه‌ای افزایش یافت.

5- مراجع

- [1] Beheshty, M.H. and Heydari, A., "Science and Technology of Prepregs", Iranian Polymer Journal Science Technology, Vol. 4, pp. 34-47, 1991. (In Persian)
- [2] Fan, J. Zheng, Y. Xie, Y. Sun, Y. Luan, Y. Jiang, W. Wang, C. Liu, S. and Liu, X., "Effect of Solvent Evaporation Technique on the Characteristics of Curing Agent Microcapsules and the Curing Process", Composites Science and Technology, Vol. 138, pp. 80-90, 2017.
- [3] Rajaei, M. Beheshty, M.H. and Hayaty, M., "Preparation and Processing Characterization of Glass/Phenolic Prepregs", Polymer and Polymer Composite, Vol. 19, No. 9, pp. 717-724, 2011.
- [4] Lubin, G., "Handbook of Fiberglass and Advanced Plastics Composites", Hinton, N.Y.R.E. Krieger, 1997.
- [5] Mazumdar, S.K., "Composites Manufacturing: Materials, Products and Process Engineering", CRC, Chapt. 2, 2001.
- [6] Park H., "Dielectric Cure Determination of a Thermosetting Epoxy Composite Prepreg", Journal of Applied Polymer Science, Vol. 134, No. 15, 2017
- [7] Philips, L.N., "Design with Advanced Composites Materials", Springer-Verlag, New York, Chapt. 7, 1989.
- [8] Chawla, K.K., "Composites Materials, Science and Engineering", Springer-Verlag, New York, Chapt. 5, 1987.
- [9] Shaghghi, S. Beheshty, M.H. and Rahimi, H., "Preparation and Rheological Characterization of Phenolic/Glass Prepregs", Iranian Polymer Journal, Vol. 20, No.12, pp. 969-977, 2011.
- [10] Lee, H. and Neville, K., "Handbook of Epoxy Resins", McGraw Hill, New York, Chapt. 5, 1967.
- [11] Parameswaranpillai, J. Hameed, N. Pionteck, J. and Woo, E.M., "Handbook of Epoxy Blends", Springer, 1-26, 2015.
- [12] May, C.A., "Epoxy Resins Chemistry and Technology", Marcel Dekker, New York, 2nd ed., Chapt. 5, 1988.
- [13] Hamerton, I., "Recent Developments in Epoxy Resins", Rapra Review Reports, Shawbury, Vol. 8, 1996.
- [14] Jin, F.L. Li, X. and Park, S.J., "Synthesis and Application of Epoxy Resins: A Review", Journal of Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 29, No. 25, pp.1-11, 2015.
- [15] Ellis B., "Chemistry and Technology of Epoxy Resins", Chapman and Hall, London, 1993.
- [16] Marouf, B.T. Mai, Y.W. Bagheri, R. and Pearson, R.A., "Toughening of Epoxy Nanocomposites: Nano and Hybrid Effects", Polymer Reviews, Vol. 56, No.1, pp. 70-112, 2016.
- [17] Mahnam, N. Beheshty, M.H. Barmar, M. and Shervin, M., "Modification of Dicyandiamide-Cured Epoxy Resin with Different Molecular Weight of Polyethylene Glycol and Its Effect on Epoxy/Glass Prepreg Characteristic", High Performance Polymer, Vol. 25, No. 6, pp. 705-713, 2013.
- [18] Sprenger, S., "Epoxy Resins Modified with Elastomers and Surface-Modified Silica Nanoparticles", Polymer, Vol. 54, No.18, pp. 4790-4797, 2013.
- [19] Domun, N. Hadavinia, H. Zhang, T. Sainsbury, T. Liaghat, G.H. and Vahid S., "Improving the Fracture Toughness and the Strength of Epoxy Using Nanomaterials: A Review of the Current Status", Nanoscale, Vol. 7, No. 23, pp. 10294-10329, 2015.
- [20] Li, S. Lin, Q. and Cuia, C., "The Effect of Core-Shell Particles on the Mechanical Performance of Epoxy Resins Modified with Hyperbranched Polymers", Journal of Materials Research, Vol. 31, No. 10, pp.1393-1402, 2016.
- [21] Li, S. Lin, Q. Zhu, H. Hou, H. Li, Y. Wu, Q. and Cui, C., "Improved Mechanical Properties of Epoxy-Based Composites with Hyperbranched Polymer Grafting Glass-Fiber", Polymers for Advanced Technologies, Vol. 27, pp. 898-904, 2016.
- [22] Rahman, M.M. Hosur, M. Zainuddin, S. Jajam, K.C. Tippur, H.V. and Jeelani, S., "Mechanical Characterization of Epoxy Composites Modified with Reactive Polyol Diluents and Randomly-Oriented Amino-Functionalized MWCNTs", Polymer Testing, Vol. 31, No. 8, pp. 1083-1093, 2012.

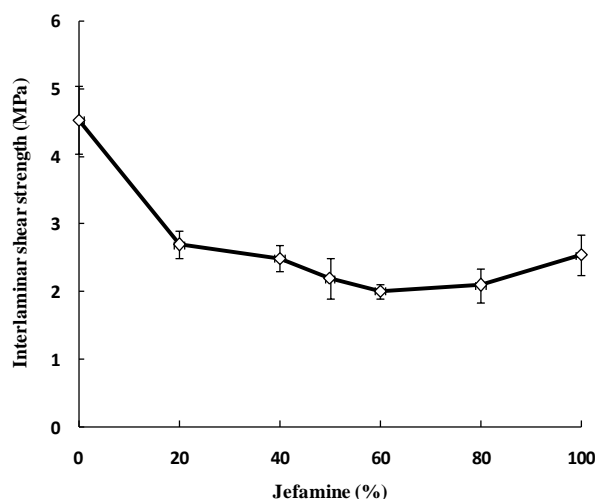


Fig. 7 Variation of interlaminar shear strength of prepregs versus Jeffamine content

شکل 7 تغییرات استحکام برشی بین‌لایه‌ای پیش‌آغشته‌ها برحسب مقدار جف‌آمین

4- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، اثر لاستیک مایع CTBN و عامل پخت جف‌آمین D-400 به‌طور مجزا بر خواص پیش‌آغشته‌های رزین اپوکسی بر پایه دی‌گلیسیدیل اتر بیس فنول A تقویت شده با الیاف شیشه مطالعه شده است. از این‌رو، پس از تهیه پیش‌آغشته‌های شیشه-اپوکسی اثر CTBN و جف‌آمین بر خواص آن‌ها مانند جریان‌پذیری، استحکام برشی پیش‌آغشته و استحکام برشی بین‌لایه‌ای مطالعه شد. با بررسی خواص پیش‌آغشته تهیه شده از نمونه‌های اپوکسی اصلاح شده، مشخص شد، در تمام نمونه‌ها تقریباً مقادیر درصد رزین، درصد مواد فرار و میزان پیش‌پخت با یکدیگر برابر بود و افزودن لاستیک مایع و عامل پخت جف‌آمین با وجود چقرمه‌کردن ماتریس اپوکسی اثری بر جریان‌پذیری پیش‌آغشته نداشت. با افزایش غلظت لاستیک مایع تا 20 phr استحکام برشی پیش‌آغشته‌ها تغییر چندانی نداشت، ولی افزایش بیشتر لاستیک مایع سبب کاهش استحکام شده که این رفتار به کاهش چگالی شبکه‌ای شدن سامانه اپوکسی نسبت داده می‌شود. همچنین، استحکام برشی پیش‌آغشته‌ها با افزودن 20٪ از عامل پخت جف‌آمین به مقدار 8٪ افزایش یافت و افزایش بیشتر آن تا 40٪ اثری بر استحکام برشی نداشت، ولی افزایش بیشتر آن سبب کاهش استحکام به مقدار 30٪ شد. به عبارتی با استفاده از عامل پخت جف‌آمین به مقدار 20٪ هم می‌توان سامانه اپوکسی را چقرمه‌تر کرد و هم استحکام برشی را افزایش داد و اگر به مقدار چقرمگی بیشتری نیاز بود، می‌توان تا 40٪ از عامل پخت جف‌آمین استفاده کرد، بدون اینکه کاهشی در استحکام برشی ایجاد شود. این رفتار می‌تواند به علت طول بلند عامل پخت جف‌آمین و وجود گروه عاملی اتری درون ساختار آن باشد که به کاهش چسبندگی سامانه اپوکسی روی آلومینیم و در نتیجه کاهش استحکام برشی پیش‌آغشته‌ها منجر می‌شود.

مقدار استحکام برشی بین‌لایه‌ای پیش‌آغشته‌ها با افزودن 5 phr از لاستیک مایع به مقدار 7.7٪ افزایش و افزایش بیشتر آن سبب کاهش شدید آن شد. این نتیجه نیز به کاهش چگالی شبکه‌ای شدن سامانه اپوکسی با افزایش مقدار لاستیک نسبت داده شد که موجب کاهش اتصالات عرضی بین‌لایه‌ای می‌شود. همچنین نتایج نشان داد، وجود عامل پخت جف‌آمین در سامانه اپوکسی حتی به مقدار کم موجب کاهش استحکام برشی بین‌لایه‌ای پیش‌آغشته‌ها شده است. با افزودن شتاب‌دهنده مونورون به سامانه اپوکسی-

- [23] Sahoo, N.G. Rana, S. Cho, J.W. Chan, S.H. and Li, L., "Polymer Nanocomposites Based on Functionalized Carbon Nanotubes", *Progress in Polymer Science*, Vol. 35, No.7, pp. 837-867, 2010.
- [24] Park, J.S. Park, S.S. and Lee, S., "Thermal and Mechanical Properties of Carbon Fiber Reinforced Epoxy Composites Modified with CTBN and Hydroxyl Terminated Polyester", *Macromolecular Symposia*, Vol. 249-250, No. 1, pp. 568-572, 2007.
- [25] Thomas, R. Yumei, D. Yuelong, H. Le, Y. Moldenaers, P. Weimin, Y. Czigany, T. and Thomas, S., "Miscibility, Morphology, Thermal, and Mechanical Properties of a DGEBA Based Epoxy Resin Toughened with a Liquid Rubber", *Polymer*, Vol. 49, No. 1, pp. 278-294, 2008.
- [26] Yang, G. Fu, S.Y. and Yang, J.P., "Preparation and Mechanical Properties of Modified Epoxy Resins with Flexible Diamines", *Polymer*, Vol. 48, No. 1, pp. 302-310, 2007.
- [27] Kar, S. and Banthia, A.K., "Synthesis and Evaluation of Liquid Amine Terminated Polybutadiene Rubber and Its Role in Epoxy Toughening", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 96, No.6, pp. 2446-2453, 2005.
- [28] Shi, L.F. Li, G., Sui, G. and Yang, X.P., "Preparation and Mechanical Properties of Epoxy Resin Reinforced with Jeffamine-grafted Carbon Nanotubes", *Advanced Materials Research*, Vol. 79-82, pp. 553-556, 2009.
- [29] Shan, L. Verghese, K. N. E. Robertson, C. G. and Reifsnider, K. L., "Effect of Network Structure of Epoxy DGEBA Poly(oxypropylene) Diamines on Tensile Behavior", *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, Vol. 37, No.19, pp. 2815-2819, 1999.
- [30] Abuali Galledari, N. Beheshty, M. H. and Barmar, M., "Effect of NBR on Epoxy/Glass Prepregs Properties", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 123, No. 3, pp. 1597-1603, 2012.
- [31] Akbari R., Beheshty M.H., and Shervin M., "Toughening of Dicyandiamide-Cured DGEBA-Based Epoxy Resins by CTBN Liquid Rubber", *Iranian Polymer Journal*, Vol. 22, No. 5, pp. 313-324, 2013.
- [32] Jamshidi, H. Akbari, R. and Beheshty, M. H., "Toughening of Dicyandiamide-Cured DGEBA-Based Epoxy Resins Using Flexible Diamine", *Iranian Polymer Journal*, Vol. 24, No. 5, pp. 399-410, 2015.