

Polymerization
Quarterly, 2014
Volume 4, Number 2
Pages 72-82
ISSN: 2252-0449

Effect of Processing Parameters on the Properties of Solvent and Hot-melt Prepreg Manufacturing Methods

Hamidreza Khalafi, Mehrzad Mortezaei*

Faculty of Materials & Manufacturing Processes, Malek-e-Ashtar University of
Technology P.O.Box:15875-1774, Tehran, Iran

Received: 18 November 2013, Accepted: 25 February 2014

Abstract

Prepreg is a pre-engineered laminating material manufactured by impregnating a fiber-reinforcement with a thermosetting or thermoplastic resin. Prepregs are widely used in the aerospace industry. The properties of prepregs are characterized in terms of their volatile content, resin content, the degree of pre-cure, void content, tack and flow ability. The two main methods used for producing thermosetting prepregs are hot-melt and solvent impregnations. In solvent-based prepreg processing, the most important processing parameters are temperature and pressure in impregnation bath, prepreg producing line speed and fabric tension. In hot-melt prepreg processing, prepreg properties depend on melt temperature, impregnation rollers pressure, temperature, and the speed of rotation. Usually, the goal is to obtain a prepreg with lowest void and the highest tack. Tack increase with increasing line speed and fabric tension, and decreasing impregnation temperature and pressure. In contrast, void content is decreased with decreasing the line speed and fabric tension, and increasing the impregnation temperature and pressure.

Key Words

composite,
prepreg,
prepreg manufacturing methods,
prepreg production machine,
degree of pre-cure

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: mhrmorteza@gmail.com

اثر پارامترهای فرآورش بر خواص پیش‌آغشته‌های تولید شده به دو روش حلالی و مذاب داغ

حمیدرضا خلفی، مهرزاد مرتضایی*

تهران، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع مواد و فرایندهای ساخت، گروه کامپوزیت‌های پلیمری،

صندوق پستی ۱۷۷۴-۱۵۸۷۵

دریافت: ۱۳۹۲/۸/۲۷، پذیرش: ۱۳۹۲/۱۲/۶

پیش‌آغشته‌ها مواد پیش‌مهندسی شده‌ای هستند که با آغشته‌سازی الیاف تقویت‌کننده با رزین‌های گرمانرم یا گرماسخت تشکیل شده‌اند. از پیش‌آغشته‌ها به طور گسترده‌ای در صنایع هوافضا استفاده می‌شود. خواص پیش‌آغشته‌ها با پارامترهایی همچون مقدار مواد فرار و رزین، درجه پیش‌پخت، مقدار حفره یا فضای خالی، چسبناکی و قابلیت جریان‌پذیری ارزیابی می‌شوند. دو روش غالب برای تولید پیش‌آغشته‌های گرماسخت، روش مذاب داغ و روش حلالی است. در فرایند تولید پیش‌آغشته به روش حلالی پارامترهای فرایندی مانند دما و فشار حمام آغشته‌سازی، سرعت خط تولید پیش‌آغشته و مقدار نیروی کشش از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. در فرایند تولید پیش‌آغشته به روش مذاب داغ، خواص پیش‌آغشته به دمای مذاب و همچنین دما، فشار و سرعت چرخش غلتک‌های آغشته‌ساز بستگی دارد. معمولاً هدف، دستیابی به پیش‌آغشته‌ای با کمترین مقدار فضای خالی و بیشترین مقدار چسبناکی است. چسبناکی با افزایش سرعت خط تولید و مقدار نیروی کشش و کاهش دما و فشار آغشته‌سازی افزایش می‌یابد. در مقابل، مقدار فضای خالی با کاهش سرعت خط تولید و مقدار نیروی کشش و افزایش دما و فشار آغشته‌سازی کاهش می‌یابد.

بسیار ش

فصلنامه علمی-ترویجی

سال چهارم، شماره ۲،

صفحه ۸۲-۷۲، ۱۳۹۳

ISSN: 2252-0449

چکیده



حمیدرضا خلفی



مهرزاد مرتضایی

واژگان کلیدی

کامپوزیت،

پیش‌آغشته،

روش‌های ساخت پیش‌آغشته،

دستگاه پیش‌آغشته‌ساز،

درجه پیش‌پخت

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار:

mhrmorteza@gmail.com

مقدمه

واژه پیش‌آغشته، از مفهوم مواد پیش‌آغشته شده گرفته شده است. پیش‌آغشته محصول واسطه‌ای شامل یک ماده تقویت‌کننده و یک ماده پلیمری است که به طور جزئی پخت شده است. پیش‌آغشته‌ها آماده شکل‌گیری و تبدیل به محصول نهایی هستند. مواد پیش‌آغشته اولین بار در سال ۱۹۴۷ به روش آزمایشگاهی تهیه شدند و در سال ۱۹۴۸ به مرحله استفاده تجاری رسیدند. از جمله موارد مصرف پیش‌آغشته‌ها می‌توان به ساخت محفظه موتور موشک‌ها، فداشونده‌ها، چندلایه‌های عایق الکتریکی و مواد پایه برای تولید صفحات مدار چاپی اشاره کرد. از پیش‌آغشته‌های پارچه‌ای یا تک‌جهتی برای ساخت قطعات کامپوزیتی بزرگ در صنایع هوافضا استفاده وسیعی می‌شود.

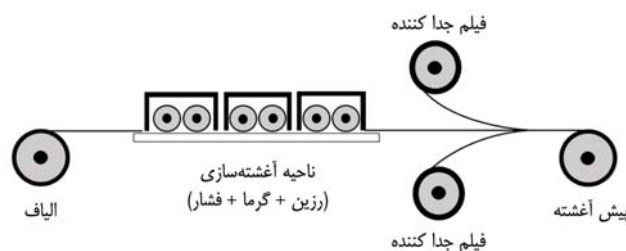
از جمله مزایای استفاده از پیش‌آغشته‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ۱- تمیزی و سهولت استفاده از پیش‌آغشته‌ها،
 - ۲- اتلاف و دورریز کمتر مواد،
 - ۳- یکنواخت بودن کیفیت محصول،
 - ۴- امکان کنترل مناسب فرایند پخت،
 - ۵- امکان دستیابی به خواص فیزیکی و مکانیکی بهینه و
 - ۶- کاهش تعداد مواد خام و در نتیجه سهولت انبارداری.
- از جمله محدودیت‌های استفاده از پیش‌آغشته‌ها می‌توان به قیمت زیاد و عمر نگهداری کوتاه آنها اشاره کرد [۱-۴].

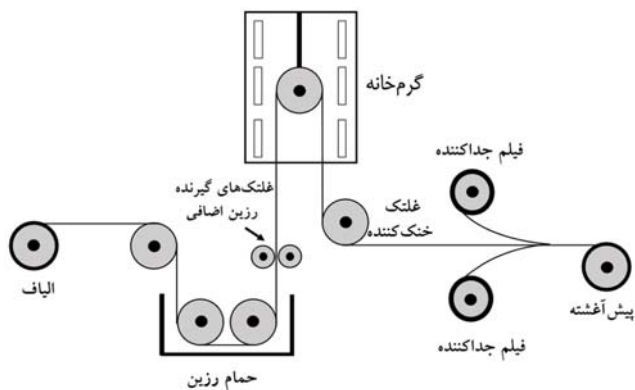
برای تولید پیش‌آغشته با کیفیت خوب و یکنواخت باید از دستگاه پیش‌آغشته‌ساز استفاده شود. دو روش غالب برای تولید پیش‌آغشته‌ها وجود دارد:

- روش مذاب داغ و
- روش حلالی.

در روش مذاب داغ (شکل ۱) یک یا چند فیلم از رزین فرمول‌بندی شده با استفاده از گرما و فشار روی الیاف آغشته‌سازی می‌شود. دو لایه فیلم جداکننده (برای جلوگیری از چسبیدن پارچه به یکدیگر)



شکل ۱- نمایی از دستگاه پیش‌آغشته‌سازی مذاب.



شکل ۲- نمایی از دستگاه پیش‌آغشته‌سازی حلالی.

در دو طرف آن قرار می‌گیرد. سپس، پیش‌آغشته روی غلتک جمع و انبار می‌شود.

در روش حلالی (شکل ۲)، الیاف به کمک غلتک‌ها به درون حمام رزین هدایت شده و در این مرحله پیش‌اشباع می‌شوند. سپس با استفاده از دو غلتک، رزین اضافی آن گرفته می‌شود تا به درصد معینی از رزین برسد و اشباع‌سازی در پارچه به خوبی انجام گیرد. پس از آن، پارچه اشباع شده از رزین وارد ستون گرما یا به اصطلاح گرم‌خانه می‌شود. در این مرحله، ابتدا حلال از سامانه خارج می‌شود. سپس، پخت جزئی انجام می‌گیرد. پس از خارج شدن پیش‌آغشته از گرم‌خانه دو لایه فیلم جداکننده در دو طرف آن قرار می‌گیرند و پس از آن پیش‌آغشته روی غلتک جمع و انبار می‌شود [۵،۶].

فرایند تولید پیش‌آغشته با دستگاه پیش‌آغشته‌ساز متغیرهای گوناگونی دارد که هر یک می‌توانند بر خواص پیش‌آغشته اثرگذار باشند. در این مقاله، ابتدا خواص مورد سنجش پیش‌آغشته‌ها بیان شده و در ادامه اثر متغیرهای فرایندی بر خواص پیش‌آغشته‌ها بررسی می‌شود.

خواص مورد سنجش پیش‌آغشته‌ها

کیفیت پیش‌آغشته‌ها با خواص چسبناکی، جریان‌پذیری، درصد مواد فرار، درصد رزین، ضخامت، مقدار حفره یا فضای خالی و درصد پیش‌پخت سنجش می‌شود. با توجه به استفاده از پیش‌آغشته در ساخت قطعات کامپوزیتی، در برخی موارد می‌توان به جای بررسی خواص پیش‌آغشته تولیدی، کیفیت کامپوزیت تولید شده از پیش‌آغشته را با انجام آزمون‌های گوناگون از جمله آزمون کشش ارزیابی کرد.

چسبناکی

یکی از خواص مهم پیش‌آغشته‌ها خواص چسبناکی (tacking) آنهاست. چسبناکی عبارت از قابلیت یک پیش‌آغشته برای چسبیدن به خود یا به سطوح دیگر است. چسبناکی نباید خیلی کم باشد، زیرا مقدار ناکافی آن سبب می‌شود تا پیش‌آغشته در حین شکل‌دهی حرکت کند و سر بخورد. از طرفی این مقدار اگر بسیار زیاد باشد، جدا کردن لایه‌های پیش‌آغشته از روی یکدیگر بسیار سخت خواهد بود [۷].

روش‌ها و فنون مختلفی برای اندازه‌گیری چسبناکی پیش‌آغشته‌ها ارائه شده است که اغلب با عبارت توصیفی مثل زیاد، متوسط و کم برای تشریح چسبناکی استفاده می‌شود. بعضی از تولیدکنندگان کامپوزیت از دستگاه Monsanto tack testerTM برای به دست آوردن شاخص نسبی چسبناکی پیش‌آغشته استفاده می‌کنند. آزمایش پوست‌کندن چرخ‌شناور با استفاده از استاندارد ASTM D 3167 نیز یکی دیگر از روش‌های اندازه‌گیری چسبناکی است. سفریز و همکاران نیز یک روش کمی برای اندازه‌گیری چسبناکی ارائه دادند. بر اساس این روش چسبناکی پیش‌آغشته با محاسبه عامل چقرمگی و انرژی فشردگی بر اساس یک آزمون فشار-کشش اندازه‌گرفته می‌شود. عامل چقرمگی بیانگر انرژی لازم برای جدا کردن لایه‌های پیش‌آغشته است، در حالی که انرژی فشردگی مقدار انرژی لازم برای فشردگی چند لایه‌های پیش‌آغشته را تا حد مشخصی از فشار را نشان می‌دهد [۸-۱۲].

پژوهشگران زیادی روی چسبناکی کار کردند و نتایج قابل توجهی به دست آوردند. یک نتیجه باارزش که توسط شرکت بوئینگ به دست آمد، این است که نوع الیاف نیز بر چسبناکی پیش‌آغشته اثر می‌گذارد. در این پژوهش مقدار چسبناکی سامانه‌های کربن و شیشه روی نمونه‌های صنعتی که دارای ماتریس مشترک بودند، به‌طور کیفی به دست آمد. چسبناکی برای مواد کربن خوب بود، ولی برای مواد شیشه کم بود. همچنین مشخص شد، چسبناکی مواد کربن پس از گذشت ۳۰ روز همچنان حفظ می‌شود [۸].

جریان‌پذیری

روندگی یا جریان‌پذیری پیش‌آغشته در هنگام قالب‌گیری، از ویژگی‌های مهم یک پیش‌آغشته است. هرچه درصد پیش‌پخت پیش‌آغشته بیشتر شود، روندگی آن کاهش می‌یابد. برای اندازه‌گیری جریان‌پذیری پیش‌آغشته‌ها براساس استاندارد ASTM D 3530 دو لایه از پیش‌آغشته با ابعاد $50 \times 50 \text{ mm}^2$ روی هم چسبانده می‌شود.

پس از توزین، پیش‌آغشته بین دو صفحه فلزی و در پرس گرمایی هیدرولیک که از پیش‌دمای آن روی دمای پخت پیش‌آغشته تنظیم شده، قرار می‌گیرد. فشار اعمالی به وسیله پرس 700 kPa و مدت‌زمان آن معادل زمان ژل شدن پیش‌آغشته است. در ادامه، نمونه از پرس خارج شده و پس از جداکردن رزین‌های اضافی از لبه، نمونه دوباره توزین می‌شود. تغییرات وزن نسبت به وزن اولیه به عنوان درصد جریان‌پذیری پیش‌آغشته (RF) گزارش می‌شود [۱،۱۳]:

$$RF\% = \frac{F_2 - F_1}{F_2} \times 100 \quad (1)$$

در معادله (۱)، F_2 وزن اولیه نمونه و F_1 وزن نمونه پس از خارج شدن از پرس است.

درصد مواد فرار

باوجود سعی در خروج حلال استفاده شده در روش حلالی تولید پیش‌آغشته، به‌طور معمول مقداری مواد فرار در ساختار پیش‌آغشته باقی می‌ماند. بر اساس استاندارد ASTM D 3530 یک نمونه از تک‌لایه پیش‌آغشته به ابعاد $50 \times 50 \text{ mm}^2$ توزین می‌شود. سپس، نمونه به مدت ۱۵ دقیقه در یک گرم‌خانه با جریان هوای داغ که دمای آن از پیش‌روی دمای پخت پیش‌آغشته تنظیم شده قرار می‌گیرد. پس از این مدت، نمونه از گرم‌خانه خارج و در دسیکاتور قرار می‌گیرد تا به دمای محیط برسد و سریعاً توزین می‌شود. درصد تغییر وزن نمونه به عنوان درصد وزنی مواد فرار (V%) گزارش می‌شود [۱۳]:

$$V\% = \frac{W_2 - W_1}{W_2} \times 100 \quad (2)$$

در معادله (۲)، W_2 وزن نمونه پیش از قراردادن در گرم‌خانه و W_1 وزن نمونه پس از خارج شدن از آن است.

درصد رزین

برای اندازه‌گیری درصد رزین در پیش‌آغشته‌ها بر اساس استاندارد ASTM D 3529، یک نمونه از یک تک‌لایه پیش‌آغشته به ابعاد $50 \times 50 \text{ mm}^2$ توزین می‌شود. سپس، این نمونه در کوره در دمای 600°C به مدت ۳۰ دقیقه قرار داده شده و در نهایت دوباره توزین می‌شود. درصد تغییر وزن نمونه به عنوان درصد رزین پیش‌آغشته (RC) گزارش می‌شود [۱۳]:

با استفاده از استاندارد ASTM D 3529 (مشابه محاسبه درصد رزین) نیز می‌توان درصد پیش‌پخت را معین کرد، اما نتیجه به دست آمده از روش اول بیشتر مورد اطمینان است. در پیش‌آغشته‌های تجاری درصد پخت معمولاً بین ۲۰ تا ۳۵ درصد است.

اثر پارامترهای فرایندی بر کیفیت پیش‌آغشته تولیدی به روش حلالی

مقدار کشش الیاف

در تولید پیش‌آغشته معمولاً از کشش برای رسیدن به محصولی جذاب‌تر و همچنین تولید سریع‌تر استفاده می‌شود. شکل ۳ نشان می‌دهد، الیاف ضمن کشش استوانه‌ای شکل می‌شوند. این نوع آرایش، باعث رسیدن به حداکثر فشردگی الیاف (آرایش شش‌گوشه) می‌شود. این فشردگی باعث به وجود آمدن ساختاری سفت و محکم می‌شود. با وجود این ساختار، رزین قابلیت جریان یافتن به بیرون پیش‌آغشته را ندارد. فرایند کشش الیاف، باعث افزایش ضخامت و چسبناکی پیش‌آغشته می‌شود. از طرفی، مقدار حفره‌های موجود در پیش‌آغشته را افزایش می‌دهد [۱۶].

درجه آغشته‌سازی الیاف به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$D_{im} = \frac{A}{A_{total}} \quad (5)$$

در این معادله، D_{im} درجه آغشته‌سازی، A مساحت قسمت‌های آغشته شده پارچه و A_{total} مساحت کل پارچه است [۲۰-۱۷].

در جدول ۱ اثر مقدار نیروی کشش الیاف بر درجه آغشته‌سازی آمده است [۱۷]. گاهی به جای اعمال نیروی کشش پیوسته در طول فرایند، نیروی کشش پیش از فرایند آغشته‌سازی اعمال می‌شود. اعمال نیروی کشش پیش از حمام آغشته‌سازی اثر بسیار کمی بر درجه آغشته‌سازی دارد [۲۱].

جدول ۱- درجه آغشته‌سازی تابعی از مقدار کشش الیاف [۱۷].

درجه آغشته‌سازی	نیروی کشش (N)	ردیف
۰/۷۵	۳۷	۱
۰/۸۷	۴۵	۲
۰/۸۸	۵۶	۳
۰/۹۱	۹۸	۴

$$RC\% = \frac{W_2(1-V) - W_1}{W_2(1-V)} \times 100 \quad (3)$$

در معادله (۳)، W_2 وزن اولیه نمونه، W_1 وزن نمونه پس از خارج شدن از کوره و V درصد مواد فرار پیش‌آغشته است.

ضخامت

یک نمونه مربع‌شکل از یک تک‌لایه پیش‌آغشته به ابعاد $5/1 \times 5/1$ mm² میان دو صفحه موازی از جنس فولاد قرار داده می‌شود. دو صفحه به آرامی به یکدیگر نزدیک شده و همزمان مقدار تغییر مکان و نیرو ثبت می‌شود. ضخامت پیش‌آغشته هنگامی که نیرو به ۲/۷ N برسد، اندازه‌گیری می‌شود [۱۳].

مقدار حفره یا فضای خالی

وجود حفره در ساختار پیش‌آغشته باعث کاهش خواص فیزیکی و مکانیکی کامپوزیت تولید شده می‌شود. برای تعیین مقدار فضای خالی، ابتدا ضخامت پیش‌آغشته به روش تجربی اندازه‌گیری می‌شود. سپس با استفاده از چگالی الیاف، چگالی رزین و مقدار رزین پیش‌آغشته، ضخامت ایده‌آل پیش‌آغشته به دست می‌آید. فضای خالی در پیش‌آغشته از اختلاف ضخامت تجربی و نظری به دست می‌آید.

درصد پیش‌پخت

فرایند پخت یک واکنش گرم‌زا است و گرمای تولید شده در حین فرایند با درجه پخت در ارتباط است. برای تعیین درجه پخت، مطابق معادله (۴)، نسبت گرمای واکنش تا هر زمان به کل گرمای واکنش را به عنوان درجه پخت پیش‌آغشته در نظر می‌گیرند [۱۴، ۱۵]:

$$\alpha = \frac{\Delta H_p}{\Delta H_{total}} \quad (4)$$

که در این معادله، α درجه پخت، ΔH_p گرمای آزاد شده تا هر زمان و ΔH_{total} کل گرمای واکنش است.

ساختار الیاف



شکل ۳- نمایی از ساختار پارچه بدون اعمال کشش و با اعمال کشش [۱۶].

گرانروی رزین را کاهش داد، دیگر نیازی به استفاده از حلال نیست. به عبارت دیگر، تمام اجزا و فرایند دستگاه پیش‌آغشته‌ساز حلالی حفظ شود و تنها حلال از ساختار رزین حذف شود. با حذف حلال از فرمول‌بندی رزین، درصد مواد فرار به قدری کاهش می‌یابد که می‌توان از اثر آن صرف‌نظر کرد.

سرعت خط تولید پیش‌آغشته

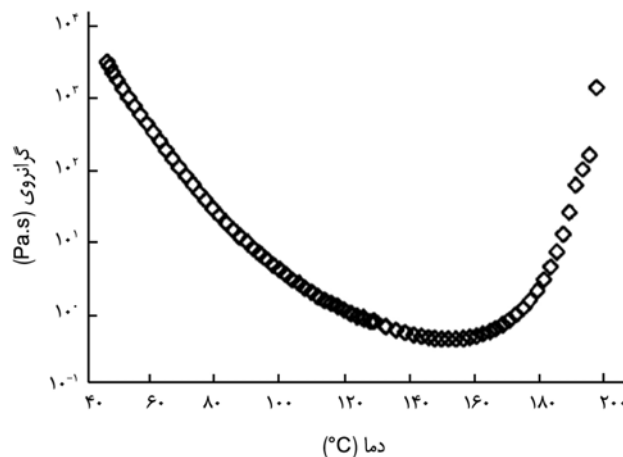
سرعت خط تولید پیش‌آغشته نیز از پارامترهای موثر بر ساخت پیش‌آغشته‌هاست. هرچه مقدار سرعت خط کمتر باشد، زمان اقامت الیاف در حمام رزین افزایش یافته و در نتیجه آغشته‌سازی بهتر انجام می‌شود. همچنین، کم بودن این سرعت باعث نفوذ بهتر رزین در بافت الیاف می‌شود و مقدار حفره‌های موجود در پیش‌آغشته نهایی را کاهش می‌دهد. ضخامت پیش‌آغشته نیز متأثر از سرعت خط تولید است. به طوری که با افزایش سرعت خط، ضخامت پیش‌آغشته افزایش می‌یابد. از دلایل این افزایش ضخامت، زمان اقامت کمتر رزین و الیاف تحت فشار غلتک‌های آغشته‌ساز و غلتک‌های گیرنده رزین اضافی است. جدول ۲ تغییرات ضخامت و مقدار حفره‌ها را در پیش‌آغشته را در شرایط مختلف فرایندی نشان می‌دهد [۱۳، ۲۴].

دمای گرم‌خانه

دمای گرم‌خانه در کنار پارامترهای معین کننده زمان اقامت پیش‌آغشته در حمام (طول گرم‌خانه و سرعت خط تولید)، درصد پخت پیش‌آغشته را تنظیم می‌کند. در کنار درصد پخت پیش‌آغشته، سرعت پخت نیز دارای اهمیت است.

اگرچه درصد پخت پیش‌آغشته یک پارامتر خروجی در فرایند تولید پیش‌آغشته به شمار می‌رود، اما می‌توان آن را یک پارامتر واسطه‌ای بین پارامترهای موثر و خواص نهایی پیش‌آغشته دانست. با افزایش درصد پخت، درصد جریان‌پذیری پیش‌آغشته جدول ۲- اثر تغییر سرعت خط تولید بر ضخامت و درصد حفره پیش‌آغشته اپوکسی-کربن در دما و مقدار کشش یکسان [۱۳].

شماره نمونه	سرعت خط تولید پیش‌آغشته (m/min)	ضخامت (mm)	درصد حفره یا فضای خالی
۱	۳	۰/۱۴۵	۹/۶
۲	۵	۰/۱۴۷	۱۱/۵
۳	۷	۰/۱۵۲	۱۵/۴



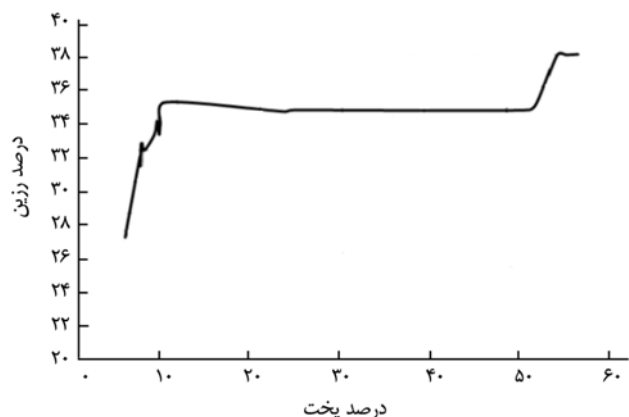
شکل ۴- تغییرات گرانروی رزین اپوکسی با دما تا پخت رزین (سرعت گرمادهی ۲°C/min) [۱۶].

دمای حمام آغشته‌سازی

مهم‌ترین اثر دمای حمام آغشته‌سازی روی گرانروی مصرفی است. شکل ۴ تغییرات گرانروی رزین اپوکسی با دما را نشان می‌دهد. با توجه به محدوده دمایی فرایند مورد نظر در حمام آغشته‌سازی (عدم شروع پخت رزین در حمام آغشته‌سازی) می‌توان گفت همواره با افزایش دمای حمام، کاهش گرانروی مشاهده می‌شود [۱۶].

زیاد یا کم بودن دمای حمام یا به عبارت دیگر کم یا زیاد بودن مقدار گرانروی رزین در این مرحله معایب و مزایایی را به دنبال خواهد داشت. اگر دمای حمام آغشته‌سازی زیاد و در نتیجه گرانروی رزین کم باشد، زاویه تماس رزین با سطح الیاف کوچک خواهد بود و ترشوندگی مناسبی حاصل می‌شود. اما اگر دمای حمام آغشته‌سازی کم و در نتیجه گرانروی رزین زیاد باشد، آغشته‌سازی و ترشوندگی مطلوبی مشاهده نخواهد شد. باید به این نکته توجه داشت که تا حدی افزایش گرانروی باعث افزایش چسبناکی پیش‌آغشته نهایی می‌شود. در دمای کم، به دلیل ترشوندگی نامناسب سطح الیاف با رزین، به وجود آمدن حفره‌های بزرگتر در پیش‌آغشته مشاهده می‌شود. همچنین، در دمای آغشته‌سازی کمتر ضخامت پیش‌آغشته افزایش می‌یابد [۹، ۲۲، ۲۳].

استفاده از حلال در فرایند تولید پیش‌آغشته به روش حلالی باعث افزایش درصد مواد فرار در پیش‌آغشته نهایی می‌شود. خارج کردن حلال طی فرایند مشکلات زیادی به دنبال دارد. نقش حلال کاهش گرانروی رزین و در نتیجه آغشته‌سازی مطلوب‌تر است. اگر بتوان با استفاده از مواد افزودنی یا افزایش دمای حمام رزین،



شکل ۷- تغییرات درصد رزین بر حسب درصد پخت (پیش‌آغشته فنولی - شیشه) [۲۵].

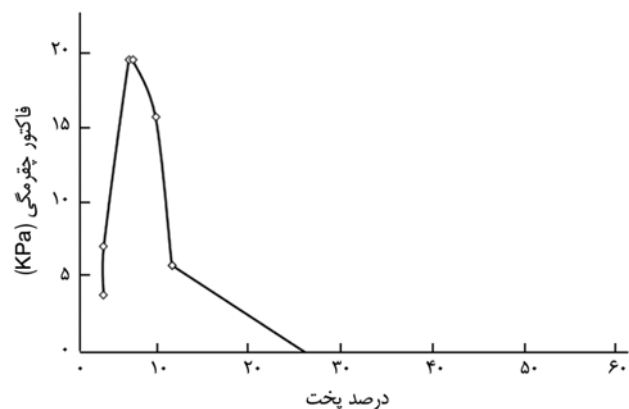
اثرگذار باشند.

- با افزایش طول حمام آغشته‌سازی، زمان اقامت الیاف در رزین افزایش می‌یابد. ممکن است در تولید پیش‌آغشته با دستگاه پیش‌آغشته‌ساز، به دلایل گوناگونی از جمله محدودیت‌های تجهیزاتی، نتوان زمان اقامت را به وسیله سرعت خط کنترل کرد.

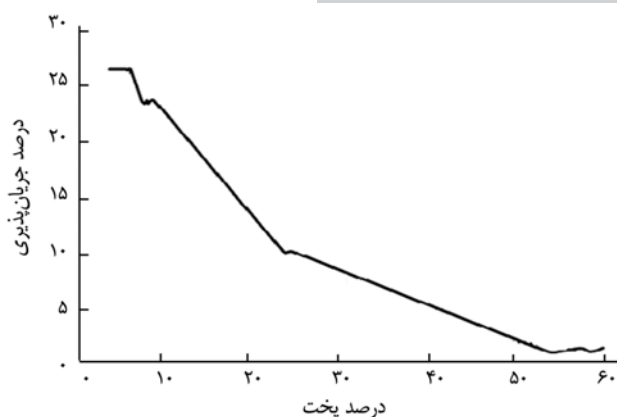
- برای افزایش درجه پیش‌پخت پیش‌آغشته، می‌توان به جای افزایش دمای گرم‌خانه یا کاهش سرعت خط تولید، طول گرم‌خانه را تغییر داد.

- اگرچه دمای غلتک‌ها در فرایند تولید پیش‌آغشته می‌تواند بر خواص پیش‌آغشته تولیدی موثر باشد، اما اثر آن نسبت به روش مذاب داغ بسیار کمتر است. زیرا، در روش حلالی پارچه از داخل حمام رزین عبور می‌کند، اما در روش مذاب داغ رزین با فشار غلتک‌ها به داخل بافت پارچه خوراند می‌شود.

- فاصله بین غلتک‌های گیرنده رزین اضافی بر مقدار درصد رزین و همچنین مقدار درصد حفره در پیش‌آغشته اثرگذار است.



شکل ۸- تغییرات عامل چقرمگی بر حسب درصد پخت (پیش‌آغشته فنولی - شیشه) [۲۶].

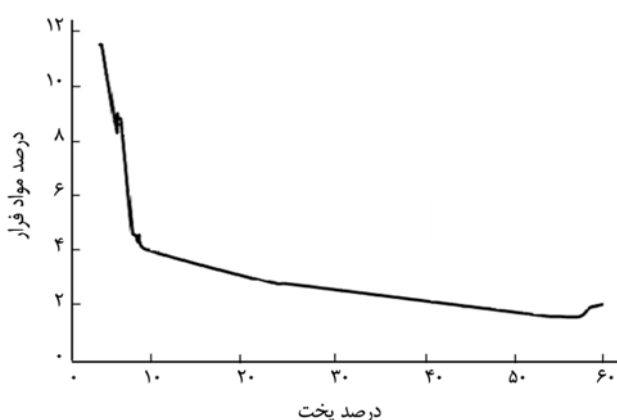


شکل ۵- تغییرات درصد جریان‌پذیری بر حسب درصد پخت (پیش‌آغشته فنولی - شیشه) [۲۶].

کاهش می‌یابد (شکل ۵). همچنین، با افزایش دمای گرم‌خانه یا کاهش سرعت خط و در نتیجه افزایش درصد پخت، خروج بیشتر مواد فرار از ساختار پیش‌آغشته مشاهده می‌شود (شکل ۶). در شکل ۷ اثر افزایش درصد پیش‌پخت بر درصد رزین پیش‌آغشته دیده می‌شود. می‌توان گفت، درصد رزین پیش‌آغشته تابع درصد پخت آن نیست. عامل چقرمگی یا همان چسبناکی پیش‌آغشته نیز با تغییر درصد پخت تغییر می‌کند (شکل ۸). با افزایش درصد پیش‌پخت، به دلیل کاهش لغزش رزین، افزایش عامل چقرمگی مشاهده می‌شود. در ادامه، افزایش درصد پخت و خشک شدن پیش‌آغشته، کاهش عامل چقرمگی را به دنبال خواهد داشت [۲۵، ۲۶].

سایر پارامترهای موثر

پارامترهای دیگری مانند طول حمام آغشته‌سازی، طول گرم‌خانه و دمای غلتک‌های آغشته‌ساز نیز می‌توانند در فرایند تولید پیش‌آغشته



شکل ۶- تغییرات درصد مواد فرار بر حسب درصد پخت (پیش‌آغشته فنولی - شیشه) [۲۶].

جدول ۳- اثر دمای رزین بر درصد رزین و عامل چقرمگی پیش‌آغشته اپوکسی - کربن [۹].

شماره نمونه	فشار آغشته‌سازی	دمای مذاب (°C)	درصد رزین	عامل چقرمگی (kPa)
۱		۱۱۵	۳۶/۵	-
۲	کم	۱۳۰	۳۸	۱۱/۷۱
۳		۱۴۵	۳۴	۵/۸۶
۴	متوسط	۱۱۵	۳۲/۵	۵/۵۸
۵		۱۳۰	۲۹	۲/۰۷
۶		۱۴۵	۳۰	۱/۰۳
۷	زیاد	۱۱۵	۲۹	۴/۸۹
۸		۱۳۰	۲۶	۰/۸۳
۹		۱۴۵	۲۲	۰/۴۱

افزایش استحکام و مدول کششی ورق‌های کامپوزیتی می‌شود. تغییرات ضخامت ورق‌های کامپوزیتی با افزایش دمای غلتک‌ها به شکل سینوسی است. بنابراین به نظر می‌رسد، دمای غلتک‌ها باید باتوجه به شرایط فرایندی و همچنین پارامترهای دیگر معین شود [۲۷].

هرچه سرعت چرخش غلتک‌ها افزایش یابد، درصد رزین و ضخامت پیش‌آغشته کاهش یافته و خواص مکانیکی کامپوزیت تولیدی نیز دچار تغییر می‌شود. همان‌طور که در جدول ۵ مشخص است، با افزایش سرعت چرخش غلتک‌ها استحکام کششی کامپوزیت تولید شده از پیش‌آغشته افزایش و مدول کششی آن کاهش می‌یابد [۲۷]. مقدار فشار وارد شده به وسیله غلتک‌های آغشته‌سازی در حین فرایند آغشته‌سازی، یکی دیگر از پارامترهای موثر به شمار می‌رود. با افزایش فشار آغشته‌سازی، مقدار تخلخل، درصد رزین، ضخامت و در نتیجه چسبناکی پیش‌آغشته کاهش می‌یابد. جدول ۶ اثر فشار آغشته‌سازی بر عامل چقرمگی و درصد رزین پیش‌آغشته را نشان می‌دهد [۲۷].

جدول ۵- خواص مکانیکی ورق کامپوزیتی تهیه شده از شیشه- پلی‌کاپرولاکتون در سرعت‌های مختلف غلتک [۲۷].

شماره نمونه	سرعت چرخش غلتک (rpm)	استحکام کششی (MPa)	مدول کششی (MPa)
۱	۷۰	۱۹/۶	۱۳۴۷
۲	۱۰۰	۲۶/۴	۱۱۶۲

اثر پارامترهای فرایندی بر کیفیت پیش‌آغشته تولیدی به روش مذاب داغ

دمای رزین

با افزایش دمای مذاب، گرانیروی آن کاهش می‌یابد و رزین به داخل بافت پارچه بهتر نفوذ می‌کند. در نتیجه، مقدار تخلخل پیش‌آغشته کاهش می‌یابد. همان‌طور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، به طور کلی کاهش گرانیروی، کاهش درصد رزین و چسبناکی را به دنبال دارد [۹].

پارامترهای فرایندی غلتک‌های آغشته‌ساز

دمای غلتک‌های آغشته‌سازی روی ضخامت پیش‌آغشته، مقدار رزین و خواص مکانیکی کامپوزیت تولیدی موثر است. همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، افزایش دمای غلتک‌ها باعث جدول ۴- خواص مکانیکی ورق کامپوزیتی تهیه شده از شیشه- پلی‌کاپرولاکتون در دماهای غلتک مختلف [۲۷].

شماره نمونه	دمای غلتک (°C)	استحکام کششی (MPa)	مدول کششی (MPa)
۱	۴۰	۱۱/۵	۱۰۴۶
۲	۵۰	۲۱/۲	۱۱۴۴
۳	۵۵	۱۹/۶	۱۳۴۷
۴	۷۰	۳۰/۸	۱۴۲۷

جدول ۶- اثر فشار آغشته‌سازی بر درصد رزین و عامل چقرمگی پیش‌آغشته اپوکسی - کربن [۹].

شماره نمونه	فشار آغشته‌سازی	درصد رزین	عامل چقرمگی (kPa)
۱	کم	۳۸	۱۱/۷۱
۲	متوسط	۲۸	۲/۰۷
۳	زیاد	۲۵	۱/۰۳

سایر پارامترهای موثر

- ابعاد غلتک‌های آغشته‌سازی نیز می‌تواند بر خواص پیش‌آغشته موثر باشد. با افزایش قطر، زمان تماس رزین با سطح پارچه افزایش می‌یابد. در مقابل، اگر وزن غلتک ثابت نگه داشته شود، فشار آغشته‌سازی کم می‌شود. در عمل، غلتک‌ها با ابعاد مشخصی ساخته شده‌اند و در هنگام استفاده از دستگاه با تغییر پارامترهایی مانند سرعت چرخش و سرعت خط تولید اثر مشابهی با تغییر قطر غلتک ایجاد می‌شود [۲۸].

- در این مقاله، صرفاً به بررسی اثر پارامترهای فرایندی (با فرض یکسان بودن جنس مواد) پرداخته شد. اما پارامترهایی همچون نوع رزین و پارچه، بافت پارچه، زاویه تماس رزین روی پارچه، گرانشی ذاتی رزین و ... می‌تواند اثر بسیار زیادی بر خواص پیش‌آغشته تولیدی داشته باشند [۲۹،۳۰].

نتیجه‌گیری

در فرایند تولید پیش‌آغشته به روش حلالی برای دست‌یابی به پیش‌آغشته با کمترین مقدار فضای خالی، باید سرعت خط تولید پیش‌آغشته در حداقل مقدار قرار گیرد. همچنین، اعمال نیروی کشش در حین عبور پارچه از داخل حمام و افزایش دمای حمام آغشته‌سازی نیز باعث کاهش مقدار فضای خالی می‌شود. در این روش با افزایش سرعت خط تولید، کاهش دمای حمام آغشته‌سازی و نیز اعمال نیروی کشش بیشتر می‌توان چسبناکی پیش‌آغشته را افزایش داد. افزایش درصد پخت، جریان‌پذیری پیش‌آغشته را کاهش می‌دهد.

در فرایند تولید پیش‌آغشته به روش حلالی، خواص مورد سنجش پیش‌آغشته‌ها خود تابع درصد رزین و مواد فرار پیش‌آغشته هستند. در این روش، با به دست آوردن دو پارامتر از میان سه پارامتر مقدار رزین، ضخامت و مقدار فضای خالی، پارامتر سوم به طور

با افزایش تعداد غلتک‌های آغشته‌سازی، نفوذ رزین به داخل بافت پارچه کامل‌تر انجام می‌گیرد و در نتیجه پیش‌آغشته تولیدی دارای تخلخل کمتر و کیفیت بهتری خواهد بود. همچنین با افزایش غلتک‌های آغشته‌سازی، مقدار رزین بیشتری با پارچه در تماس خواهد بود و در نتیجه درصد رزین و ضخامت پیش‌آغشته افزایش خواهد داشت. وقتی بافت پارچه از رزین اشباع شود، آنگاه افزایش مجدد تعداد غلتک‌های آغشته‌سازی تغییری در درصد رزین نخواهد داشت و حتی باعث می‌شود تا مقداری از رزین پارچه به وسیله غلتک گرفته شود. جدول ۷ اثر تعداد غلتک‌های آغشته‌سازی را بر درصد رزین، ضخامت و عامل چقرمگی نشان می‌دهد [۱۶].

سرعت خط تولید و مقدار نیروی کشش

اثر این دو پارامتر در روش مذاب داغ همانند روش حلالی است. هرچه مقدار سرعت خط کمتر باشد، آغشته‌سازی بهتر انجام می‌شود. همچنین، کم بودن این سرعت باعث نفوذ بهتر رزین در بافت الیاف می‌شود و مقدار حفره‌های موجود در پیش‌آغشته نهایی را کاهش می‌دهد. ضخامت پیش‌آغشته نیز با افزایش سرعت خط افزایش می‌یابد. افزایش مقدار نیروی کشش در این روش نیز باعث افزایش ضخامت و چسبناکی و در عین حال افزایش حفره در پیش‌آغشته می‌شود.

جدول ۷- اثر تعداد غلتک‌های آغشته‌سازی بر ضخامت، درصد رزین و عامل چقرمگی پیش‌آغشته اپوکسی - کربن [۱۶].

شماره نمونه	تعداد غلتک آغشته‌سازی	ضخامت (mm)	درصد رزین	عامل چقرمگی (kPa)
۱	۲	۰/۳۲۵	۳۶	۳/۲
۲	۴	۰/۳۶۵	۳۷	۲/۸
۳	۶	۰/۳۶۵	۳۶	۳/۶

این روش می‌توان با کاهش دمای رزین، کاهش فشار غلتک‌های آغشته‌ساز، افزایش سرعت خط و افزایش نیروی کشش به بیشترین مقدار چسبناکی در پیش‌آغشته دست یافت.

در پایان می‌توان گفت، باید مقادیر بهینه برای پارامترهای موثر به دست آید، به نحوی که پیش‌آغشته تولیدی خواص مکانیکی، چسبناکی و جریان‌پذیری قابل قبولی داشته باشد. مطالعات آتی باید به سمت برقراری ارتباط ریاضی بین پارامترهای موثر بر ساخت پیش‌آغشته و خواص نهایی آن سوق یابد.

مراجع

- Beheshty M.H. and Heidary A.R., Science and Technology of Prepregs, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (In Persian)*, **4**, 34-47, 1991.
- Akovali G. and Kaynak C., *Handbook of Composite Fabrication*, Rapra Technology, **2**, 2001.
- Vafayan M., Beheshty M.H., Ghoreishy M.H.R., and Abedini H., Advanced Integral Isoconversional Analysis for Evaluating and Predicting the Kinetic Parameters of the Curing Reaction of Epoxy Prepreg, *Thermochemica Acta*, **557**, 37-43, 2013.
- Mazumdar S.K., *Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering*, CRC, US, 58-59, 2000.
- Hayes B.S. and Seferis J.C., *Simulation Engineering of Polymeric Prepreg Composite Systems*, PhD Thesis, University of Washington, April 1997.
- Corporation, Hexcel, <http://www.hexcel.com/Resources/Data-Sheets/Brochure-Data-Sheets>, March 2005.
- Banks R., Mouritz A.P., John S., Coman F., and Paton R., Development of a New Structural Prepreg: Characterization of Handling, Drape and Tack Properties, *Compos. Struct.*, **66**, 169-174, 2004.
- Hayes B.S., Gilbert E.N., and Seferis J.C., Scaling Complications of Dual Temperature Cure Resin Prepreg Systems in Airplane Part Manufacture, *Compos. Part A.*, **31**, 717-725, 2000.
- Hayes B.S. and Seferis J.C., Development and Hot Melt Impregnation of a Model Controlled Flow Prepreg System, *Polym. Compos.*, **17**, 730-742, 1996.
- Putnam J.W., Hayes B.S., and Seferis J.C., Prepreg Process-structure-property Analysis and Scale-up for Manufacturing and Performance, *Adv. Mater.*, **27**, 47-57, 1996.
- Galledari N.A., Beheshty M.H., and Barmar M., Effect of NBR on Epoxy/Glass Prepregs Properties, *J. Appl. Polym. Sci.*, **123**, 1597-1603, 2012.
- Dubois O., Lecam J.B., and Beakou A., Experimental Analysis of Prepreg Tack, *Experim. Mech.*, **50**, 599-606, 2010.
- Martin J.C., Putnam J.W., and Seferis J.C., Effect of Impregnation Conditions on Prepreg Properties and Honeycomb Core Crush, *Polym. Compos.*, **18**, 90-99, 1997.
- Morancho J.M. and Salla J.M., Relaxation in Partially Cured Samples of an Epoxy Resin and the Same Resin Modified with a Carboxyl-terminated Rubber, *Polymer*, **40**, 2821-2828, 1999.
- Lubin G., *Handbook of Fiberglass and Advanced Plastics Composites*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1969.
- Hayes B.S. and Seferis J.C., The Effect of Fabric Tension and the Number of Impregnation Rollers on Woven Fabric Prepreg Quality and Cured Laminates, *Composites*, **28**, 791-799, 1997.
- Peltonen P. and Tormala P., Melt Impregnation Parameters, *Compos. Struct.*, **27**, 149-155, 1994.
- Peltonen P., Lahteenkorva K., Paakkonen E.J., Jarvela P.K. and Tormala P., The Influence of Melt Impregnation Parameters on the Degree of Impregnation of a Polypropylene/Glass Fibre Prepreg, *J. Thermoplastic Compos. Mater.*, **5**, 318-343, 1992.
- Peltonen P. and Jarvela P., Methodology for Determining the Degree of Impregnation from Continuous Glass Fibre Prepreg, *Polym. Test.*, **11**, 215-224, 1992.
- Ahmadi Z., Ghaffarian S.R., and Amiri D., Continuous Melt Impregnation Process: Materials Parameters, *Iran. Polym. J.*,

- 9, 125-130, 2000.
21. Bijsterbosch H. and Gaymans R.J., Impregnation of Glass Rovings with a Polyamide Melt. Part 1: Impregnation Bath, *Compos. Manufac.*, **4**, 85-92, 1993.
 22. Crossley R.J., Schubel P.J. and Warrior N.A., The Experimental Determination of Prepreg Tack and Dynamic Stiffness, *Compos. Part A.*, **43**, 423-434, 2012.
 23. Neema S., Salehi-Khojin A., Zhamu A., Zhong W.H., Jana S. and Gan Y.X., Wettability of Nano-epoxies to UHMWPE Fibers, *J. Coll. Interf. Sci.*, **299**, 332-341, 2006.
 24. Liu J., Hwang D.G., and Chen J.C., Development of a Theoretical Model for a Solvent-type Prepreg Manufacturing Process, *Compos. Sci. Technol.*, **51**, 359-366, 1994.
 25. Shaghaghi S., Beheshty M.H., and Rahimi H., *Preparation of Phenolic-glass Prepregs and Investigation the Effect of Phenolic Resin Type on their Properties*, MSc Thesis, Iran Polymer and Petrochemical Institute, October 2010.
 26. Shaghaghi S., Beheshty M.H., and Rahimi H., Preparation and Rheological Characterization of Phenolic/Glass Prepregs, *Iran. Polym. J.*, **20**, 969-977, 2011.
 27. Ali R., Iannace S., and Nicolais L., Effects of Processing Conditions on the Impregnation of Glass Fibre Mat in Extrusion/calendering and Film Stacking Operations, *Compos. Sci. Technol.*, **63**, 2217-2222, 2003.
 28. Middleman S., *Fundamentals of Polymer Processing*, McGraw-Hill, US, 170-187, 1977.
 29. Fu, Yu., Maguire R., Liu H. and Zhong W.H., Special Wetting Behavior of a Graphitic Nanofiber-modified Epoxy Generalized for Rough Textured Fabric Surfaces, *Polym. Sci.*, **289**, 141-148, 2011.
 30. Hameed N., Thomas S.P., Abraham R. and Thomas S., Morphology and Contact Angle Studies of poly(styrene-co-acrylonitrile) Modified Epoxy Resin Blends and their Glass Fibre reinforced Composites, *Polym. Let.*, **1**, 345-355, 2007.