

## Simulation of Pultrusion Manufacturing Process of Glass/Polyester Composites

M.M. Shokrieh\* and A.M. Aghdami

Composites Research Laboratory, Center of Excellence in Experimental Solid Mechanics and  
Dynamics, Mechanical Engineering Department, Iran University of Science and Technology,  
P.O. Box: 16846-13114, Tehran, Iran

Received 24 May 2010, accepted 11 October 2010

### ABSTRACT

**P**resent research involves the complete simulation of pultrusion manufacturing process of glass/polyester composites. For that purpose, the curing process is divided to two liquid and gel-solid phases. The physical characteristics of the resin consist of specific heat, viscosity and coefficient of heat transfer changes with variations of temperature and increasing the degree of curing process ( $\alpha$ ). In each of the two liquid and gel-solid phases, some of these parameters play an important role in the heat transfer and consequently in the simulation results. The released heat during the resin curing process is another important parameter. This parameter depends on the absolute temperature of the resin and accelerates the resin curing process. The most important parameter in simulation of the resin curing process is the degree of cure of the resin, which is used in calculation of the viscosity of the resin in this process and also helps in indicating the end of the curing process. The physical properties of fibers do not change during the curing process, while they affect the heat transfer of the resin and duration of the curing process. Therefore, instead of modeling the fibers and the resin, an equivalent material is introduced which demonstrates the behavior of fibers and the resin during the curing process.

#### Key Words:

simulation, pultrusion,  
glass/polyester composite,  
manufacturing process,  
resin

(\*)To whom correspondence should be addressed.

E-mail: shokrieh@iust.ac.ir

## شبیه سازی فرایند ساخت پولتروژن کامپوزیت شیشه - پلی استر

محمود مهرداد شکریه\*، اشکان محمود اقدمی

تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی مکانیک، آزمایشگاه پژوهشی مواد مرکب، قطب علمی مکانیک

جامدات تجربی و دینامیک، صندوق پستی ۱۳۱۱۴-۱۶۸۴۶

دریافت: ۸۹/۳/۳، پذیرش: ۸۹/۷/۱۹

### چکیده

در این پژوهش، فرایند پخت رزین به دو بخش مایع و ژل - جامد تقسیم شده است. خواص فیزیکی رزین شامل ظرفیت گرمایی ویژه، گرانشی و ضریب انتقال گرما با تغییر دما و افزایش درجه پخت رزین ( $\alpha$ ) تغییر می کنند. در هر یک از این دو فاز مایع و ژل - جامد، بعضی از این خواص فیزیکی نقش تعیین کننده ای در انتقال گرما و نتایج حاصل از شبیه سازی دارند. موضوع مهم دیگر، مقدار گرمای آزاد شده طی پخت رزین است که بستگی به دمای مطلق رزین دارد و باعث افزایش سرعت پخت رزین می شود. مقدار گرمای آزاد شده طی پخت با استفاده از DSC دینامیکی به دست آمد. در مدل سازی انجام شده تمام خواص فیزیکی و مقدار گرمای آزاد شده به عنوان تابعی از دمای مطلق رزین و درجه پخت رزین در نظر گرفته شده است. با استفاده از یک کد دینامیکی تمام این خواص در هر بازه زمانی تغییر کرده و خواص جدیدی جایگزین آنها می شود. مهم ترین عامل در شبیه سازی فرایند پخت رزین تعیین مقدار درجه پخت است که در محاسبه گرانشی رزین در حال پخت به کار می رود و تنها پارامتر تعیین کننده اتمام پخت رزین و پایان شبیه سازی است. شبیه سازی به روش اجزای محدود فرایند پولتروژن با در نظر گرفتن هزاران الیاف به قطر  $7 \mu\text{m}$  در محیط رزینی به قطر چند سانتی متر امری بسیار دشوار است. ولی، با توجه به این که الیاف طی پخت تغییری نکرده و تنها بر انتقال گرمای رزین و زمان پخت اثر می گذارند، بنابراین در این پژوهش به جای ترکیب رزین و الیاف و با توجه به نوع رزین، نوع الیاف و نسبت حجمی الیاف ماده معادل و همگنی ارائه شده که همان نتایج حاصل از ترکیب رزین و الیاف را می دهد.

### واژه های کلیدی

شبیه سازی، پولتروژن،

کامپوزیت شیشه - پلی استر،

فرایند ساخت، رزین

\* مسئول مکاتبات، پیام نگار:

## مقدمه

در تمام شبیه‌سازی‌های انجام شده خواص فیزیکی کامپوزیت از جمله ظرفیت گرمایی ویژه، ضریب انتقال گرما در ابتدای فرایند به کمک قانون اختلاط کامپوزیت‌ها محاسبه و در معادلات انتقال گرما جای‌گزین شده است. تمام محاسبات از ابتدای پخت تا انتهای آن بدون هیچ تغییری در مقدار این پارامترها انجام گرفته است. هم‌چنین، از تغییرات گرانیوی رزین که عامل بسیار اساسی در روند انتقال گرمای رزین پیش از نقطه ژل شدن است، به کل صرف نظر شده است.

در پژوهش حاضر، با استفاده روش دینامیکی و گذرا تمام خواص فیزیکی رزین از جمله ظرفیت گرمایی ویژه، گرانیوی و ضریب انتقال گرما با تغییر دما و افزایش درجه پخت رزین متغیر در نظر گرفته شده‌اند. زمانی که درجه پخت رزین ( $\alpha$ ) به عدد یک برسد، ماده کامپوزیت به حالت جامد رسیده و فرایند پخت به اتمام می‌رسد. با این روش می‌توان در هر مقطع از قالب مقدار و نحوه توزیع درجه پخت و دمای رزین را به دست آورد. با استفاده از مدل ارائه شده در این پژوهش می‌توان به ازای هر سطح مقطع، نوع رزین، نوع الیاف و درصد حجمی آن، قالبی بهینه با طول، دما و سرعت کشش مناسب به دست آورد.

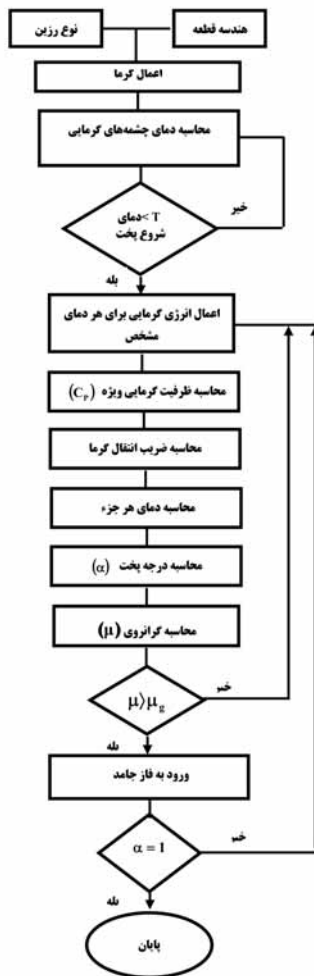
## مدل‌سازی

به دلیل متغیر بودن خواص فیزیکی رزین طی پخت، برای شبیه‌سازی کامل فرایند پخت باید معادلات حاکم را در حالت دینامیک و متغیر با زمان حل کرد. به این معنی که کل زمان فرایند را باید به چند مرحله زمانی تقسیم کرد (برای مثال  $0.5/s$ ). در ابتدای هر مرحله زمانی، خواص فیزیکی رزین (گرانیوی، ظرفیت گرمایی ویژه و ضریب انتقال گرما) با توجه به مرحله زمانی پیشین تغییر می‌کند. به عبارت دیگر، پس از هر مرحله زمانی خواص فیزیکی، دما و درجه پخت رزین در هر جزء مشخص شده و همه این اطلاعات به عنوان داده‌های ورودی برای همان جزء در مرحله زمانی بعدی به کار می‌روند. در این پژوهش، کل فرایند به دو فاز اصلی فاز مایع و فاز ژل - جامد تقسیم شده است. در هر یک از این دو فاز تنها برخی از خواص فیزیکی رزین در معادلات انتقال گرما مؤثرند. به عنوان مثال، در فاز مایع اثر گرانیوی رزین خیلی بیشتر از اثر ظرفیت گرمایی ویژه و ضریب انتقال گرماست و در فاز ژل و جامد ضریب انتقال گرما اصلی‌ترین عامل در انتقال گرمای رزین است. بنابراین، پیدا کردن نقطه‌ای که در آن رزین از فاز مایع به فاز جامد (نقطه ژل) تبدیل می‌شود، اهمیت فوق‌العاده‌ای دارد. نقطه ژل نقطه‌ای است که در آن گرانیوی به شدت و با سرعت بسیار زیادی افزایش می‌یابد [۱۶]. نحوه پیدا کردن نقطه ژل در بخش بعدی توضیح داده می‌شود. در این روش هر یک از اجزا که به نقطه ژل می‌رسند، وارد فاز جامد شده و

روش پولتروژن یکی از روش‌های ارزان و در عین حال ساده برای تولید محصولات کامپوزیتی با سطح مقطع یکسان است. آگاهی کامل از فرایند پخت و تغییرات رزین در درون قالب امکان طراحی بهینه پارامترهای مهم فرایند مانند دمای قالب و طول آن و سرعت کشش مواد از داخل قالب را به طراحان ارائه می‌دهد. Han و همکاران [۱] و Batch و Macosko [۲] جزو اولین کسانی بودند که مطالعات نظری روی فرایند پولتروژن انجام دادند. Sumerak و Martin [۳] پس از مطالعه عوامل فرایند پولتروژن دریافتند، در حالت پایدار دو عامل دما و فشار قالب عوامل اصلی در کنترل فرایند هستند. Sumerak [۴] در کار بعدی خود با انجام آزمایش‌های تجربی روی تغییرات فشار درون قالب پولتروژن، مطالعات پیشین خود را اثبات کرد. گورتالا [۵] با استفاده از یک مدل دوبعدی در مختصات استوانه‌ای و با در نظر گرفتن نظریه هیدرودینامیک، تغییرات فشار درون قالب پولتروژن را به ازای سطح مقطع‌های مختلف قالب محاسبه کرد. در این میان Sharma و همکاران [۶] تحلیل کلی از افزایش فشار در بخش مستقیم قالب پولتروژن در مختصات استوانه‌ای ارائه دادند. آنها با استفاده از مدل اجزای محدود مقدار افزایش فشار را محاسبه و با استفاده از قانون داری جریان رزین درون الیاف را مدل کردند. Basuki و Sortano [۷] با استفاده از یک مدل دوبعدی اجزای محدود و با به کارگیری یک مدل دینامیک منحنی‌های دما و پخت را ارائه کردند. Meyyappan [۸] با استفاده از مدل آرنیوس درجه پخت رزین را محاسبه کرد. Kamal و Sourour [۹] با در نظر گرفتن اختلاف بین سرعت گرمای ورودی و گرمای ناشی از پخت، ظرفیت گرمایی ویژه را در هر بازه زمانی به دست آوردند.

Liu و همکاران [۱۰-۱۲] در شبیه‌سازی فرایند پولتروژن با روش اجزای محدود پژوهش‌های بسیاری انجام داده‌اند. آنها با استفاده از روش اجزای محدود و با به کارگیری مدل دینامیکی همانند آن چه که در این پژوهش از آن بهره گرفته شده، فرایند پخت تیر I شکل را بررسی کرده‌اند. ذکر این نکته ضروری است که تغییرات گرانیوی رزین طی پخت در کار ایشان لحاظ نشده است.

Hendra [۱۳] برای پیدا کردن پارامترهای سینتیکی فرایند پخت، از DSC دینامیکی استفاده کرد و اثر الیاف شیشه و کائولینیت را بر روند پخت مطالعه کرد. در مقالات Chachad [۱۴، ۱۵] نیم‌رخ‌های دما و پخت برای قطعات I شکل، ناودانی، S شکل و مربعی توخالی با ضخامت‌ها و سرعت‌های کشش مختلف استخراج شده است و مشاهده شد با افزایش سرعت کشش درجه پخت در مقاطع مختلف قطعه کاهش می‌یابد.



شکل ۱ - نمودار جریان شبیه سازی پخت رزین.

معادلات انتقال گرما در فاز جامد به آنها اعمال می شوند. این روند تا جایی ادامه پیدا می کند که درجه پخت کل قطعه به عدد یک برسد، در این نقطه الگوریتم حل متوقف می شود. به کمک این روش حل می توان بهینه ترین دما، هندسه قالب و مدت زمان کافی برای پخت رزین را در فرایندهای مختلف تولید کامپوزیت ها مثل پولتروژن به دست آورد. لازم به ذکر است، مدل ارایه شده در این پژوهش محدود به فرایند پولتروژن نیست و قابلیت به کارگیری در مدل سازی فرایند پخت رزین در سایر فرایندهای ساخت کامپوزیت های پلیمری را نیز دارد.

سطح مقطع پروفیل در نظر گرفته شده در این شبیه سازی عبارت است از یک دایره دویبعی به قطر ۳۰ mm و کل زمان فرایند پخت برابر با ۶ mm است. دیواره قالب در سه مرحله گرم می شود، ۲ min اول در دمای ۱۰۰°C، ۲ min در دمای ۱۱۵°C و ۲ min آخر در دمای ۱۱۰°C. در این شبیه سازی از رزین پلی استر SRI7440 با عامل پخت متیل اتیل کتون پروکسید (MEKP) و از الیاف شیشه E-glass استفاده شده است.

### مدل دینامیک

#### محاسبه گرمای آزاد شده حین پخت و درجه پخت ( $\alpha$ )

پخت رزین واکنشی گرمزاست و به دمای مطلق رزین و درجه پخت رزین بستگی دارد که می توان با استفاده از روش هایی مانند DSC مقدار گرمای آزاد شده را به دست آورد. DSC به دو روش هم دما و دینامیک انجام می شود. در DSC هم دما رزین در دمای ثابتی باقی می ماند تا جایی که پخت رزین به اتمام برسد. در این حالت، معادله حاکم بر گرمای حاصل از پخت برابر خواهد بود با [۱۷]:

$$H = \int_0^t (dQ/dt) dt \quad (1)$$

که در آن  $t$  زمان لازم برای اتمام فرایند پخت است.

در حالت دینامیک، رزین با شیب گرمایی مشخصی (۱۰ K/min) گرم می شود که در این حالت گرمای حاصل برابر با کل گرمای ناشی از فرایند پخت است [۱۷]:

$$H_R = \int_0^{t_f} (dQ/dt) dt \quad (2)$$

به عبارت دیگر، در پخت هم دما افزون بر انرژی گرمایی که حین پخت آزاد می شود، مقداری از انرژی گرمایی ( $Q_R$ ) داخل رزین باقی می ماند. برای آزاد کردن این انرژی، رزین پخته شده دوباره در دمای ثابت مانند ۲۰۰°C قرار داده می شود [۱۷].

در این حالت کل انرژی گرمایی برابر خواهد بود با [۱۷]:

$$H_R = H + Q_R \quad (3)$$

برای محاسبه درجه پخت می توان از معادله (۴) استفاده کرد [۱۷]:

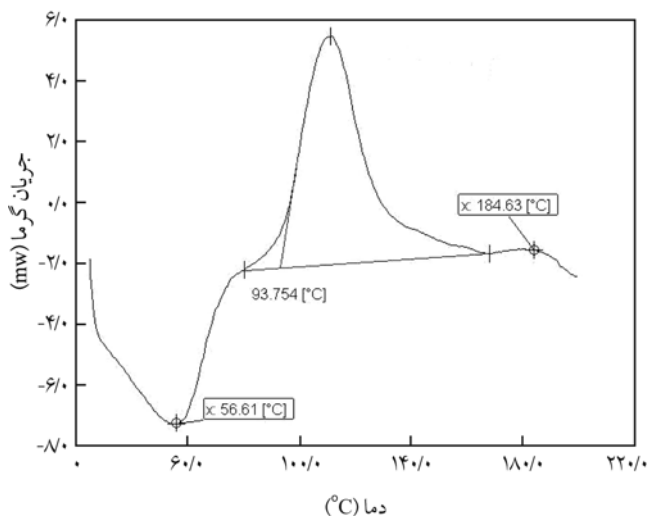
$$\alpha = H/H_R \quad (4)$$

و سرعت پخت هم برابر خواهد بود با [۱۷]:

$$d\alpha/dt = (dQ/dt)/H_R \quad (5)$$

راه دیگر پیدا کردن درجه پخت، محاسبه آن به کمک منحنی DSC دینامیک است. اگر منحنی DSC رزین بر حسب دمای مطلق رزین در دسترس باشد، می توان  $\alpha$  را در هر دمای دلخواه به دست آورد. در این حالت معادلات (۱) و (۲) به ترتیب زیر تغییر خواهند کرد [۱۷]:

$$H = \int_0^T (dQ/dt) dT \quad (6)$$



شکل ۲- منحنی DSC آزمایش شده در این پژوهش برای رزین پلی‌استر SRI 7440 با ۲٪ MEKP.

با انتگرال‌گیری از معادله (۹) و با استفاده از معادلات (۶) تا (۸) درجه پخت ( $\alpha$ ) به دست می‌آید:

$$\alpha = \left( \begin{array}{l} 3.59 \exp\left(-\left(\frac{T-421.2}{23.58}\right)^2\right) \\ -2.452 \exp\left(-\left(\frac{T-420.2}{16.86}\right)^2\right) + 0.0004372 \exp\left(-\left(\frac{T-416.9}{1.258}\right)^2\right) \\ -0.308 \exp\left(-\left(\frac{T-405.6}{11.97}\right)^2\right) - 0.4062 \exp\left(-\left(\frac{T-433.7}{11.64}\right)^2\right) \end{array} \right) \quad (10)$$

#### محاسبه گرانروی

در فرایند پخت رزین سه منطقه مایع، ژل و جامد با افزایش دما و با شکل گرفتن فرایند پخت به ترتیب اتفاق می‌افتند. بنابراین، در شبیه‌سازی پخت رزین این سه ناحیه را باید لحاظ کرد. ولی، با پذیرش کمی خطا می‌توان ناحیه ژل و جامد را یکی در نظر گرفت. مشخصه خوب نقطه ژل افزایش ناگهانی گرانروی است. وقتی گرانروی به بی‌نهایت میل کند، نقطه ژل حاصل شده است. ولی، از نظر عملی اندازه‌گیری گرانروی بی‌نهایت امکان‌پذیر نیست. بنا به یک معادله قراردادی و تجربی نقطه ژل موقعی حاصل می‌شود که  $\eta_r$  در معادله (۱) برابر با ۳۱۰ یا ۴۱۰ باشد [۱۶]:

$$\eta_r = \eta/\eta_0 \quad (11)$$

که در آن،  $\eta_0$  گرانروی و  $\eta$  به ترتیب گرانروی اولیه و ثانویه است. در

$$H_R = \int_0^{T_f} (dQ/dt) dT \quad (7)$$

$$\alpha = H/H_R \quad (8)$$

در این جا سؤال اساسی این است که در فرایند پولتروژن باید از کدام الگوی پخت استفاده کرد. در فرایند پولتروژن نمی‌توان محاسبات را بر حسب زمان حل کرد، زیرا تغییر هندسه قطعه و نوع رزین زمان پخت را تغییر می‌دهد. اگر از پخت هم دما استفاده شود، باید به ازای هر هندسه و هر نوع رزین مجموعه‌ای از آزمایش‌های DSC در دماهای مختلف انجام شود. ولی، اگر محاسبات بر حسب دمای مطلق رزین انجام شود، تنها می‌توان با استفاده از یک منحنی DSC دینامیک مقدار توان گرمایی رزین را در دمای مشخص به دست آورد ( $dQ/dt=P$ ) و نیز می‌توان درجه پخت را از معادله (۸) به دست آورد.

دلیل دیگر ارجحیت داشتن الگوی پخت دینامیک به پخت هم دما در فرایند پولتروژن این است که پخت در فرایند پولتروژن بیشتر شبیه پخت دینامیک است. زیرا، دمای رزین بجز در نواحی نزدیک قالب با یک شیب تقریباً ثابت افزایش می‌یابد. در این حالت می‌توان نواحی نزدیک قالب را به دلیل این که دمای ثابتی در طول قالب تجربه می‌کنند، با روش هم دما و نواحی داخلی را با روش دینامیک حل کرد. ولی، با توجه به این که نواحی نزدیک قالب درصد بسیار کمی از کل قطعه را شامل می‌شوند، می‌توان از آنها صرف نظر کرد و کل فرایند را با پخت دینامیک شبیه‌سازی کرد.

رزینی که در این شبیه‌سازی از آن استفاده شد، رزین پلی‌استر SRI 7440 بود که به وسیله یکی از شرکت‌های تولید پروفیل‌های پولتروژن داخل کشور استفاده می‌شود. از متیل اتیل کتون پروکسید (MEKP) به عنوان عامل پخت استفاده شد که طبق درصد ترکیب مورد نیاز برای فرایند پولتروژن مقدار ۲٪ از تسریع‌کننده به رزین پلی‌استر اضافه شد. منحنی DSC رزین در شکل ۲ آمده است.

$$W = 1.041 \exp\left(-\left(\frac{T-404.5}{23.45}\right)^2\right) - 1.401 \exp\left(-\left(\frac{T-390.5}{9.509}\right)^2\right) \\ - 2.166 \exp\left(-\left(\frac{T-190.5}{514.8}\right)^2\right) + 0.4547 \exp\left(-\left(\frac{T-376}{4.227}\right)^2\right) \\ + 7.811 \exp\left(-\left(\frac{T-385.3}{12.49}\right)^2\right) + 2.073 \exp\left(-\left(\frac{T-374.3}{3.473}\right)^2\right) \quad (9)$$

گرمایی ویژه استفاده شده است. شکل ۴ نشانگر تغییرات ظرفیت گرمایی ویژه ( $C_p$ ) در مخلوط پلی‌استر و استیرین در سرعت‌های گرمایی مختلف ۱۰، ۵ و  $2/5^\circ\text{C}/\text{min}$  است.

### شبیه‌سازی فرایند پولاتروژن

در این بخش شبیه‌سازی کل فرایند پولاتروژن یعنی رزین به همراه الیاف ارایه می‌شود. شبیه‌سازی مستقیم فرایند پولاتروژن عملاً ناممکن است، زیرا معرفی تک تک الیاف به قطر  $7\ \mu\text{m}$  در یک محیط رزینی به قطر  $3\ \text{cm}$  به نرم‌افزار غیرممکن است و حتی در صورت عملی شدن نرم‌افزار از حل چنین مسئله‌ای عاجز خواهد بود. بنابراین، برای حل چنین مسئله‌ای باید از دیدگاه ماکرو به مسئله نگاه کرد. به این معنی که ابتدا با در نظر گرفتن یک رشته از الیاف و رزین دور آن (با در نظر گرفتن نسبت حجمی الیاف) و قرار دادن شرایط مرزی مناسب مسئله حل می‌شود و منحنی‌های توزیع دما و درجه پخت در نقاط مختلف قطعه حاصل می‌شود. از طرف دیگر، می‌توان ماده همگنی به جای ترکیب رزین و الیاف به گونه‌ای به دست آورد که همان نتایج مرحله پیش حاصل شود. به عبارت دیگر، به جای حل یک مسئله دو فازی جامد - مایع (رزین و الیاف) که حل آن برای یک نرم‌افزار اجزای محدود خیلی زمان‌بر و تا حدودی سخت است، از یک ماده همگن برای حل استفاده می‌شود، به طوری که همان نتایج حاصل شود.

### پیدا کردن ماده معادل برای شبیه‌سازی فرایند پولاتروژن

در این حالت، مدل از دو بخش جامد یعنی الیاف و مایع یعنی رزین تشکیل می‌شود. بر اساس محاسبات به عمل آمده به وسیله روش اجزای محدود منحنی‌های توزیع دما و درجه پخت در نقاط مختلف قطعه به

عمل نقطه‌ای که  $\eta_r$  برابر با  $10^3$  یا  $10^4$  باشد، تفاوت چندانی با هم ندارند و از گرانیوی بی‌نهایت زیاد دور نیستند. یکی از مدل‌های معتبر برای پخت رزین پلی‌استر، مدلی است که توسط Hou [۹] ارایه شده و از معادله مشهور ویلیام - لندل - فری (WLF) [۱۸] گرفته شده است:

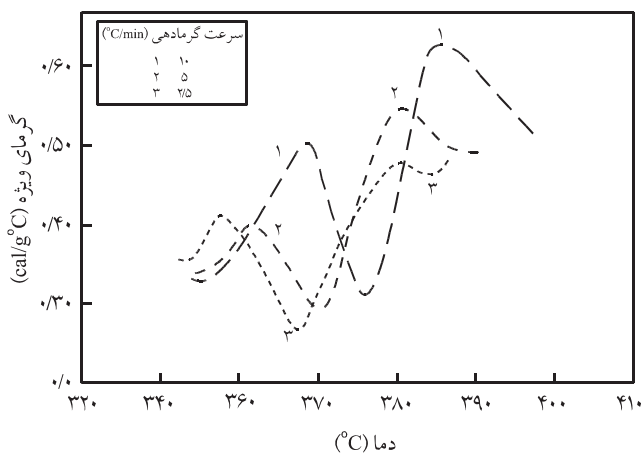
$$\log \eta(T, \alpha) = -(6.06 + 4.78\alpha) + \frac{51.6(22.11 + 29.92\alpha)}{T - 143.3 - 33.06\alpha - 281.4\alpha^2} \quad (12)$$

با جای‌گذاری معادله (۱۰) در معادله (۱۲) تغییرات گرانیوی با دما در پخت رزین‌های گرماسخت به دست می‌آید. شکل ۶ نشانگر تغییرات گرانیوی با دمای مطلق رزین است.

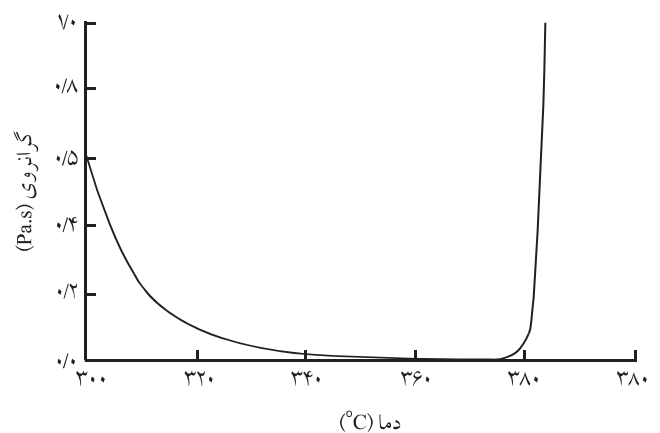
با توجه به شکل منحنی دیده می‌شود، گرانیوی رزین ابتدا از دمای محیط که حدود  $60^\circ\text{C}$  است، با افزایش دما مثل هر سیال دیگری کاهش می‌یابد تا این که دما به حدود  $80^\circ\text{C}$  می‌رسد. از دمای  $80^\circ\text{C}$  پخت رزین شروع می‌شود، پدیده پخت و افزایش دما اثر متقابل روی گرانیوی رزین دارند. با افزایش درجه پخت گرانیوی افزایش می‌یابد و از طرف دیگر افزایش دما باعث کاهش گرانیوی می‌شود. این دو پدیده اثر یکدیگر را تا دمای  $90^\circ\text{C}$  خنثی می‌کنند تا جایی که گرانیوی تا دمای  $90^\circ\text{C}$  ثابت می‌ماند. از دمای  $90^\circ\text{C}$  به بعد پخت رزین به شدت افزایش یافته تا جایی که گرانیوی چنان افزایش می‌یابد که افزایش دما نیز اثری روی کاهش گرانیوی نمی‌گذارد. طوری که در دمای  $113^\circ\text{C}$  مقدار  $\eta_r$  برابر با  $10^3$  می‌شود. این عدد دمای ژل شدن برای پلی‌استر SRI 7440 با عامل پخت MEKP است. از این نقطه به بعد شبیه‌سازی وارد مرحله ژل و جامد می‌شود.

### محاسبه ظرفیت گرمایی ویژه

در این پژوهش از داده‌های Kamal و Sorour [۹] برای محاسبه ظرفیت



شکل ۴ - تغییرات ظرفیت گرمایی ویژه حین پخت [۹].



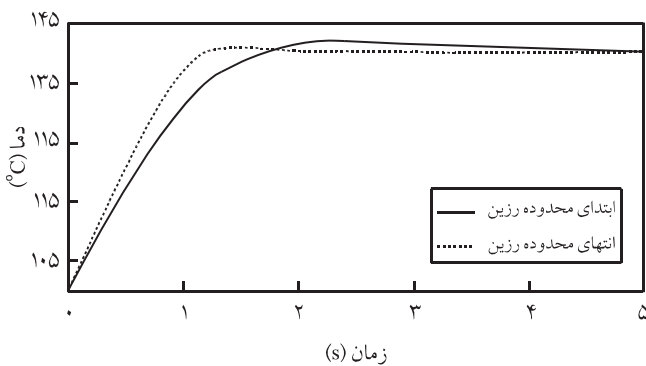
شکل ۳ - تغییرات گرانیوی بر حسب دمای مطلق.



خواهد بود، از یک ماده همگن و همسان گرد برای حل استفاده می‌شود، به طوری که همان نتایج حاصل شود. برای پیدا کردن ماده معادل از خواص رزین و الیاف استفاده شد. برای مثال در فاز مایع، ظرفیت گرمایی ویژه و ضریب انتقال گرما ماده معادل با استفاده از قانون اختلاط محاسبه شده است و گرانیوی ماده معادل با افزودن ضریب تصحیح به گرانیوی رزین خالص به دست آمد. باید توجه داشت، اثر گرانیوی رزین بر توزیع گرما در قطعه نهایی خیلی بیشتر از اثر ظرفیت گرمایی ویژه و ضریب انتقال گرماست. در فاز جامد هم ضریب انتقال گرمای ماده معادل با افزودن ضریب تصحیحی به ضریب انتقال گرمای رزین به دست آمد.

نکته قابل توجه لحاظ شده در این معادل سازی این است، همان طور که ذکر شد به جای ترکیب رزین و الیاف سعی شده است تا ماده معادل به گونه‌ای پیدا شود که بتوان از آن در شبیه‌سازی فرایند پولتروژن استفاده کرد. ولی، پیدا کردن یک ماده همگن به جای یک ماده دوجزئی به گونه‌ای که رفتار آن در تمام مقاطع خود دقیقاً با ماده دوجزئی یکسان باشد، امری بسیار دشوار است. به طور مثال منحنی دما هنگام عبور از ناحیه رزین به ناحیه الیاف جهشی ناگهانی به سمت پایین خواهد داشت (شکل ۷). زیرا ضریب انتقال گرمای الیاف از رزین کمتر است. ولی، از آن جا که فقط رزین حین فرایند از حالت مایع دگرگون شده و تغییر خواص می‌دهد و الیاف فقط گرم و سرد می‌شوند. بنابراین، نیازی به پیدا کردن دمای دقیق الیاف وجود ندارد. بنابراین، ماده معادل طوری انتخاب شده است که صرفاً رفتار آن در محدوده مشخص شده معادل رفتار رزین اطراف الیاف باشد و نیازی به پاسخ‌های مشابه در محدوده درون الیاف وجود ندارد. به عبارت دیگر، با توجه به شکل ۷ خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} T_1 &= T_1' \\ T_2 &= T_2' \end{aligned} \quad (13)$$



(ب)

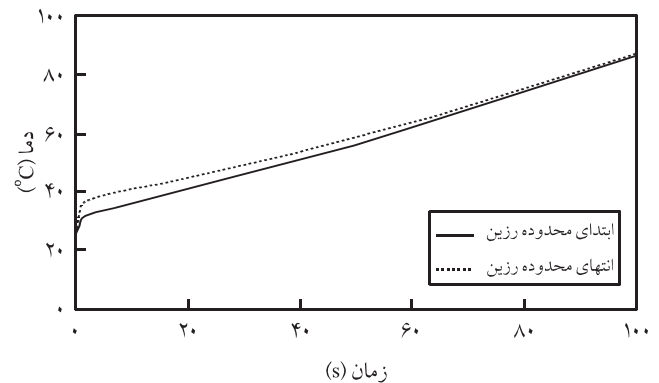


شکل ۵- هندسه قطعه نشان دهنده تک رشته، رزین و چشمه‌های گرمایی.

دست می‌آید (شکل ۶).

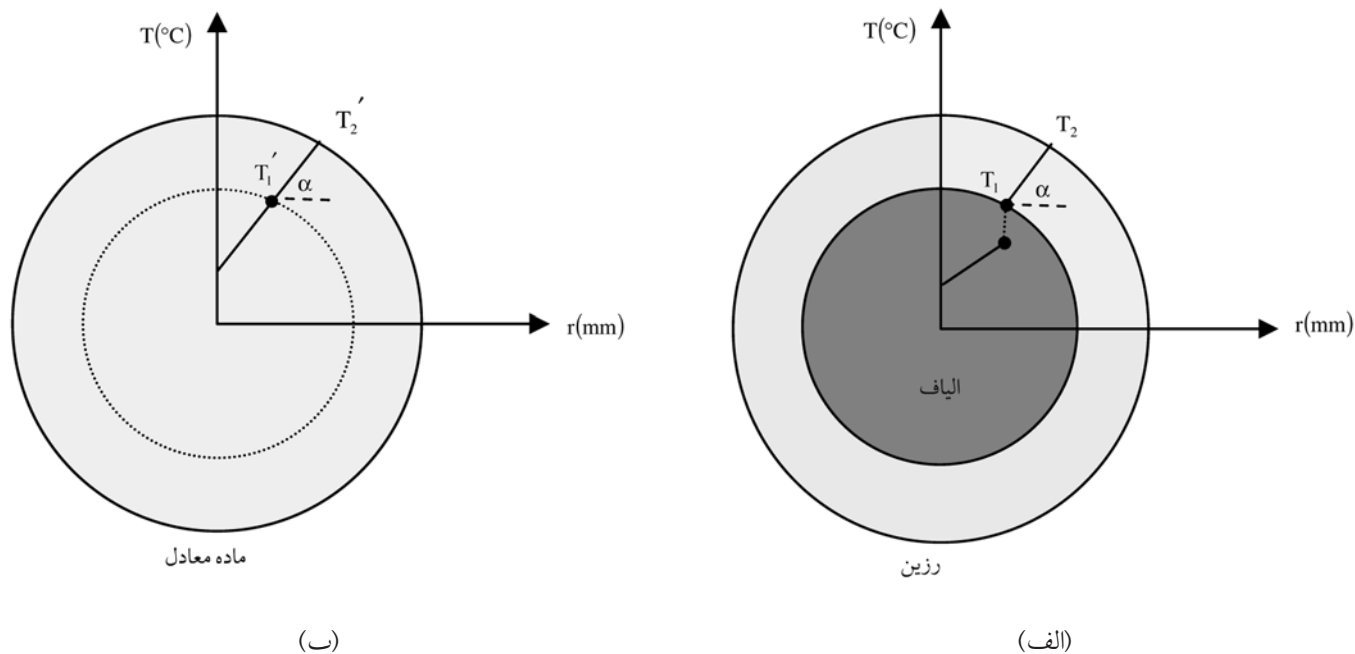
عملیات پخت در دو فاز مایع و جامد انجام می‌گیرد. در فاز مایع دیواره قالب به مدت ۱۵۰s در دمای ۱۰۰°C نگه داشته می‌شود تا این که رزین در دمای حدود ۱۱۳°C به نقطه ژل شدن می‌رسد. پس از این نقطه شبیه‌سازی وارد فاز جامد شده و دمای قالب به ۱۴۰°C افزایش می‌یابد و پس از حدود ۵s کل قطعه به دمای ۱۴°C می‌رسد و الگوریتم حل متوقف می‌شود. شکل ۶ نشانگر توزیع گرما یک رشته الیاف و رزین اطراف آن را نشان می‌دهد.

در این جا نیاز است که ماده همگنی به جای ترکیب رزین و الیاف به گونه‌ای به دست آورد که همان نتایج مرحله پیش حاصل شود. به عبارت دیگر، به جای حل یک مسئله دو فازی جامد - مایع (رزین و الیاف) که حل آن برای یک نرم افزار جزء محدود زمان بر و سخت



(الف)

شکل ۶- نتایج دمایی یک تک رشته و رزین اطراف آن در: (الف) فاز مایع و (ب) فاز جامد.



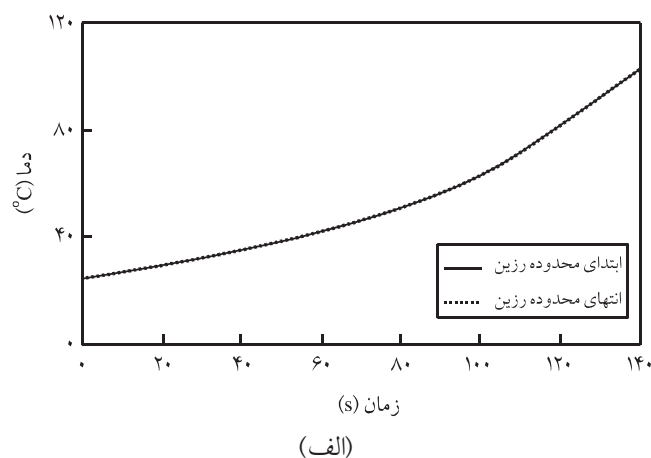
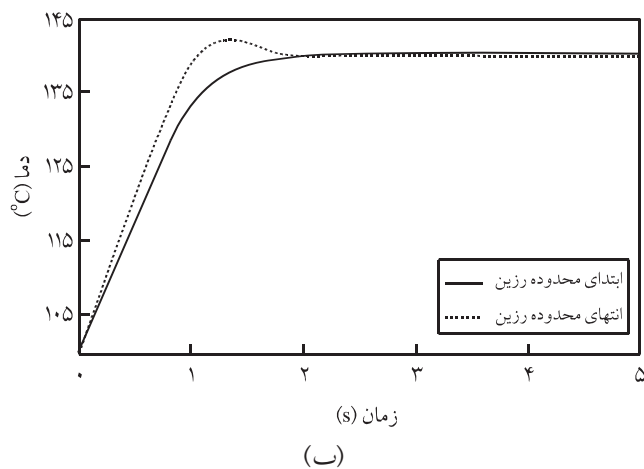
شکل ۷ - محدوده‌ای برای ماده معادل که نتایج حاصل از آن باید با نتایج رزین اطراف الیاف یکسان باشد.

استفاده می‌شود. قالب عبارت از لوله‌ای به قطر داخلی ۳۰ mm و قطر خارجی ۴۰ mm است و کامپوزیت نیز از الیاف شیشه و رزین پلی‌استر SRI 7440 با نسبت حجمی الیاف ۷۰ درصد ساخته شده است. طول قالب ۸۵/۹ cm و سرعت کشش الیاف ۱۴ cm/min طوری که کل فرایند پولتروژن ۶ min به طول می‌انجامد. نواحی دمایی به ترتیب ۱۲۰s اول در دمای ۱۰۰°C، ۱۲۰s دوم در دمای ۱۱۵°C و ۱۲۰s آخر در دمای ۱۱۰°C و توان گرمای اعمالی به قالب ۳۰ kW است. نتایج دمایی و درجه پخت پروفیل دایره‌ای در شکل‌های ۹ و ۱۰ آمده است.

نتایج بهترین ماده معادلی که با شرایط فوق به دست آمد، در شکل ۱۳ ارائه شده است.

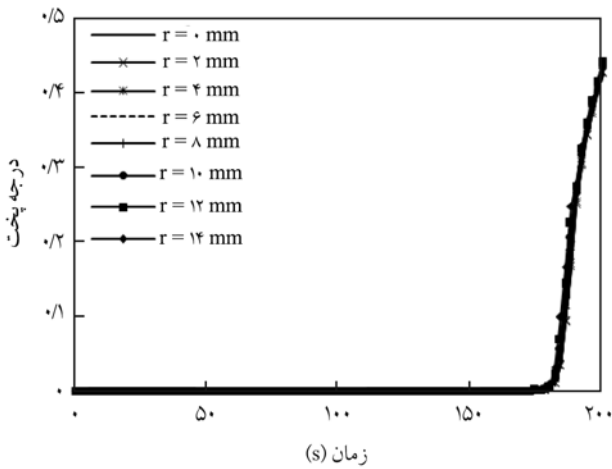
## نتایج و بحث

قالب پولتروژن استفاده شده در این پژوهش، توسط شرکت آسیا کامپوزیت برای پولتروژن مقاطع مختلف از جمله میل‌گرد ۳۰ mm

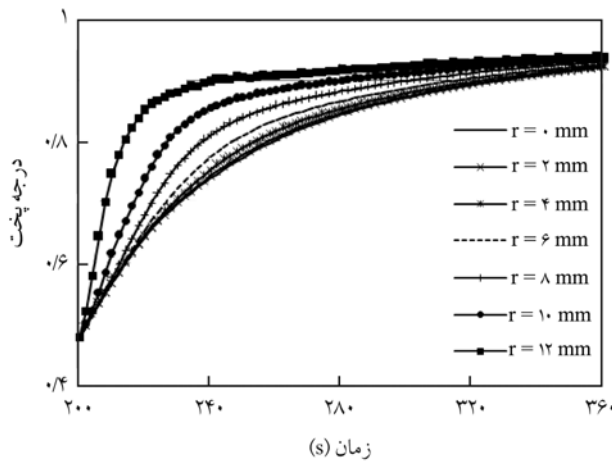


شکل ۸ - نتایج دمایی ماده معادل در محدوده رزین در: (الف) فاز مایع و (ب) فاز جامد.





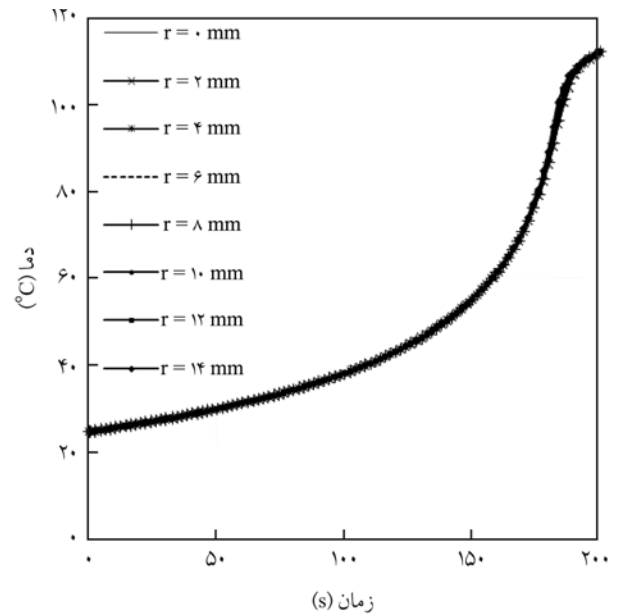
(الف)



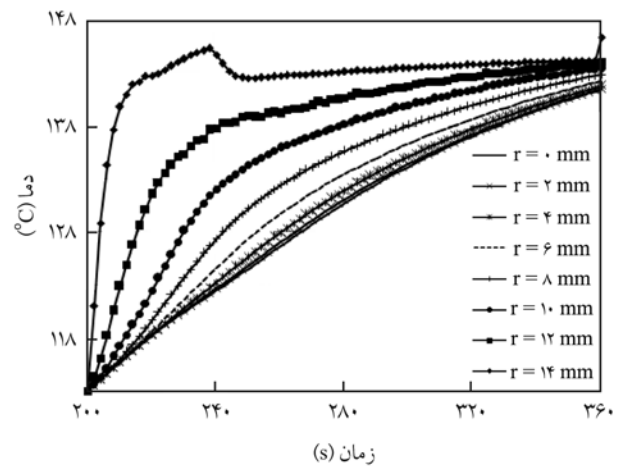
(ب)

شکل ۱۰ - نتایج درجه پخت پولتروژن قطعه دایره‌ای شکل به قطر ۳۰ cm در شعاع‌های مختلف: (الف) فاز مایع و (ب) فاز جامد.

پس از ۲۰۰s از زمان شروع فرایند یعنی ۴۰s مانده به انتهای ناحیه دوم قالب اتفاق می‌افتد. از این نقطه به بعد، حل مسئله وارد فاز جامد می‌شود. در این فاز تغییرات ظرفیت گرمایی ویژه و ضریب انتقال گرمایی رزین عامل در معادلات انتقال گرما تعیین کننده است. پخت کامل رزین در حالت نظری زمانی اتفاق می‌افتد که درجه پخت به عدد یک برسد. ولی، در عمل رسیدن به عدد یک و رسیدن رزین به انتهای منحنی DSC در چنین زمان کوتاهی (۶ min) امکان پذیر نیست. بنابراین، در این شبیه‌سازی رسیدن به درجه پخت ۰/۹ به عنوان پخت کامل رزین در نظر گرفته شده است. در چنین شرایطی پروفیل دایره‌ای مورد بررسی پس از ۳۲۰s به پخت کامل می‌رسد.



(الف)



(ب)

شکل ۹ - نتایج دمایی پولتروژن قطعه دایره‌ای شکل به قطر ۳۰ cm در شعاع‌های مختلف: (الف) فاز مایع و (ب) فاز جامد.

به دلیل این که گرانروی رزین تقریباً در طول حل مسئله در فاز مایع زیاد است، دمای بخش‌های مختلف قطعه با هم افزایش می‌یابد و تمام منحنی‌های دما روی هم قرار می‌گیرند. زیرا، هنگام استفاده از مایعی با گرانروی کم به جای رزین گرادیان‌های شدید دمایی در طول ضخامت قطعه مشاهده می‌شود. با افزایش تدریجی گرانروی اختلاف دمای نقاط مختلف قطعه کمتر می‌شود و منحنی‌های دما روی هم قرار می‌گیرند. در انتهای فاز مایع حداکثر پخت رزین ۴۳٪ ( $\alpha = 0/43$ ) است. ژل شدن

شود. در پخت رزین، کلیه خواص فیزیکی آن از جمله ظرفیت گرمایی ویژه، گرانشی و ضریب انتقال گرما با تغییر دما و افزایش درجه پخت تغییر می‌کنند. بنابراین کد اجزای محدود باید به طور دینامیک در هر مرحله زمانی خواص جدیدی را برای هر جزء تعریف کند. در روش ارائه شده در این پژوهش، پخت رزین به دو مرحله تقسیم شد. در مرحله اول، پیش از ژل شدن، جایی که گرانشی رزین و ظرفیت گرمایی ویژه از پارامترهای اصلی در عملیات پخت به شمار می‌آیند، پخت ادامه می‌یابد تا جایی که رزین به نقطه ژل شدن می‌رسد. پس از این نقطه، پخت ماده وارد فاز جامد می‌شود، فازی که ضریب انتقال گرما رزین عامل اصلی در انتقال گرما در رزین به شمار می‌آید. این عملیات تا جایی ادامه پیدا می‌کند که درجه پخت به مقدار واحد برسد. برای شبیه‌سازی فرایند پولتروژن نیز به جای تعریف الیاف درون رزین و حل مسئله به شکل دوفازی مایع - جامد که حل آن بسیار دشوار است، از یک ماده همگن استفاده شد که خواص فیزیکی آن ترکیبی از خواص فیزیکی رزین و الیاف است. نتایج به دست آمده حاکی از قابلیت‌های بسیار خوب مدل ارائه شده در این پژوهش است.

تنها نقطه‌ای که در این پژوهش دمای آن به طور تجربی اندازه‌گیری شده است، سطح پروفیل پولتروژنی بلافاصله پس از خروج از قالب بود. دمای سطح قطعه پس از خروج از قالب  $130^{\circ}\text{C}$  بود که با در نظر گرفتن دمای پیش‌بینی شده  $143^{\circ}\text{C}$  (شکل ۹-ب) تطابق خوبی بین نتایج مشاهده می‌شود. استخراج نتایج کامل تجربی منوط به کار گذاشتن حسگرهای دما در بخش‌های مختلف قطعه است. با استفاده از این کد جزء محدود می‌توان با در دست داشتن هندسه قطعه، نوع رزین والیاف و نسبت حجمی الیاف، قالبی با طول و دمای بهینه طراحی کرد و با انتخاب سرعت کشش مناسب، پروفیل کامپوزیتی کاملاً پخته شده را در انتهای قالب به دست آورد. زیرا، اغلب قالب‌های پولتروژن کنونی بر اساس تجربه سازنده تولید می‌شود و معمولاً برای اطمینان از پخت صد در صد رزین، طول و دمای قالب بیشتر از آن چه که مورد نیاز است، در نظر گرفته می‌شود.

## نتیجه‌گیری

برای شبیه‌سازی فرایند پولتروژن، ابتدا باید پخت رزین خالص بررسی

## مراجع

- Han C., Lee D.S., and Chin H.B., Development of a Mathematical Model for the Pultrusion Process, *Polym. Eng. Sci.*, **26**, 393-404, 1986.
- Batch G.L. and Macosko C.W., Integrated Cure Characterization and Analysis for Pultrusion Processors, *43rd Annual Conference*, Composites Institute, The Society of Plastics Industry, Session 2A, 1-6, 1988.
- Sumerak J.E. and Martin J.D., Pultrusion Process Variables and their Effect upon Manufacturing Capability, *39th Annual Conference*, Reinforced Plastics-Composites Institute, The Society of the Plastics Industry, Session 1B, 1-7, 1984.
- Sumerak J.E., Understanding Pultrusion Process Variables, *Modern Plast.*, 58-63, March 1985.
- Yun M.S. and Lee W.I., Analysis of Pulling Force during Pultrusion Process of Phenolic Foam Composites, *Compos. Sci. Technol.*, **68**, 140-146, 2008.
- Sharma D., McCarty T.A., Roux J.A., and Vaughan J.G., Investigation of Dynamic Pressure Behavior during the Pultrusion of Composites, *J. Compos. Mater.*, **32**, 929-250, 1998.
- Surtano B.R., Ye L., and Mai Y.W., Simulation of Temperature and Curing Profiles in Pultruded Composite Rods, *J. Compos. Mater.*, **58**, 191-197, 1998.
- Meyyappan V., Roux J.A., and Vaughan J.G., Temperature and Cure in Pultruded Composite Using Multi-Step Reaction Model for Resin, *J. Reinforc. Plast. Compos.*, **15**, 295-321, 1996.
- Kamal M.R. and Sourour S., Kinetics and Thermal Characterization of Thermoset Cure, *Polym. Eng. Sci.*, **13**, 59-64, 1973.
- Liu X.L., Numerical Modeling on Pultrusion of Composite I Beam, *Composite, Part A*, **32**, 663-681, 2001.
- Liu X.L. and Hillier W., Heat Transfer and Cure Analysis for the Pultrusion of a Fibreglass-vinyl Ester I Beam, *Compos. Struct.*, **47**, 581-588, 1999.
- Liu X.L., Crouch I.G., and Lam Y.C., Simulation of Heat Transfer and Cure in Pultrusion with a General-purpose Finite Element Package, *Compos. Sci. Technol.*, **60**, 857-864, 2000.
- Hendra N.G. and Manas-Zloczower I., Kinetic Studies of a Composite Thermoset Cure Reaction-Application in Pultrusion Simulations, *Polym. Eng. Sci.*, 29, 1989.

14. Chachad Y.R., Roux J.A., and Vaughan J.G., Thermal Model for Three-Dimensional Irregular Shaped Pultruded Fiberglass Composites, *J. Compos. Mater.*, **30**, 692-721, 1996.
15. Chachad Y.R., Roux J.A., and Vaughan J.G., Manufacturing Model for Three-dimensional Irregular Pultruded Graphite/Epoxy Composites, *Composite, Part A*, **27**, 201-210, 1996.
16. Lee D.S. and Han C.D., A Chemorheological Model for the Cure of Unsaturated Polyester Resin, *Polym. Eng. Sci.*, **27**, 955-963, 1987.
17. Lee W.I., Loos A.C., and Springer G.S., Heat of Reaction, Degree of Cure, and Viscosity of Hercules 3501-6 Resin, *J. Compos. Mater.*, **16**, 510-520, 1982.
18. Ferry J.D., *Viscoelastic Properties of Polymers*, Wiley, Chichester, 1980.