شبیه‌سازی عددی فرایند ناپایای یک بعدی و غیرهم دمای آر تی ام

محمد رضا شاه نظری
استادیار
دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

عباس عباسی
دانشیار
دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

یک مدل فیزیکی و الگوریتم حلّ عددی آن برای شبیه‌سازی فرایند غیرهم دمای آر تی ام[1] ارائه شده است. در مدل حاضر جریان سیّال در مادّهٔ متخلخل تحت رژیم دارسی و رابطهٔ بین سرعت متوسط سیّال در هر مقطع و سرعت جریان آزاد، به صورت ساده بر حسب تخلخل فرض شده است. معادلات حاکم با لحاظ کردن "پخش حرارتی" به صورت عددی حل شده‌اند و نتایج بصورت ارائه پروفیل دما در نقاط مختلف ارائه شده‌اند. ضمن تعیین سطح آزاد سیّال در دو نوع فیبر مورد بررسی، نتایج بار داده‌های تجربی در دسترس مقایسه وصحت کارکرد مدل و نتایج آن بررسی شده است. نتایج حاضر نشان می‌دهند که برای ایجاد شرایط بهینه تولید مواد مرکب، درنظر گرفتن "پخش حرارتی" از اهمیت به سزایی برخوردار است.

کلمات کلیدی

مواد مرکب، انتقال حرارت، محیط متخلخل، آر تی ام

One- dimensional Transient Numerical Simulation of Non-Isothermal RTM Process

M.R. Shahnazari
Assistant Professor
Mechanical Engineering Department,
K. N. Toossi University of Technology

A. Abbassi
Associate Professor
Mechanical Engineering Department,
Amirkabir University of Technology

Abstract

In this paper, based on a physical model the resin transfer molding (RTM) of a non-isothermal process has been simulated. It is assumed that the flow in porous medium is under the Darcian regime. Also, the relationship between flow mean velocities in each section has been considered in terms of porosity. The governing equations including heat dispersion term are solved numerically. To verify the model,. the temperature profiles for two types of fibers have been chosen, and are compared with experimental results of other researchers. The results showed that, to optimize the better quality of productions of composite materials, the importance of heat dispersion term can not be neglected.

Keywords

Composite materials, Heat transfer, Porous Media, Resin Transfer Molding

مقدمه

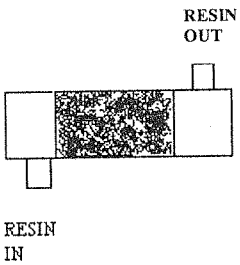
فرایند آر تی ام یکی از مهم ترین روش های مورد علاقه جهت تولید مواد مرکب با کیفیت ممتاز است. از سوی دیگر با توجه به هزینه‌های بالای تجهیزات این فرایند، مطالعهٔ آن بسیار مورد علاقهٔ محققین قرار گرفته است. برای کاهش هزینهٔ تولید مهمترین مسئله، کاهش حتی الامکان زمان مورد نیاز جهت طراحی قالب و زمان انجام فرایند است. مدل سازی عددی، یک روش متعارف جهت تحلیل جزئیّات فرایند آر تی ام به منظور برآورد فشار تزریق مورد نیاز و پیدا کردن بهترین شرایط است. در این فرایند فضای خالی فیبر متخلخل قرار داده شده در یک قالب بسته با تزریق رزین به درون قالب پر می شود. در مرحلهٔ بعد، ضمن فرایند پخت[۲] ویسکوزیته رزین افزایش و تا مرحلهٔ انجماد کامل ادامه می‌یابد. برای تسهیل در فرایند پخت، قالب بصورت پیش گرم است. درفرایند غیر همدمای آر تی ام هدایت و جابجایی حرارتی نقش مهمی ایفا می کنند. بررسی انتقال حرارت در یک محیط متخلخل با ساختار محیط مرتبط خواهد بود. یک روش متداول مدل سازی فرایند انتقال حرارت، تمرکز بریک حجم واحد محیط متخلخل و پیدا کردن خواص حرارتی متوسّط حجمی آن است. انحراف بین جابجایی حرارتی کلّی میکروسکوپی با جابجایی حرارتی متوسط حجمی معمولا پخش حرارتی[۳] نامیده می‌شود. بروشکه و ادوانی[۱]، لیو [۲] در بررسی فرایند غیر هم دمای آر تی ام از پخش حرارتی صرفنظر کردند. تاکر و دزنبرگر [۳] نشان دادند که پخش حرارتی در فرایند آر تی ام مهم است. در این مقاله دو فاز (رزین و فیبر) به صورت یک محیط پیوسته در نظر گرفته شده است. تعادل حرارتی موضعی بین دو فاز مایع و جامد فرض شده است و انتقال جرم بین دو فاز مدّ نظر نخواهد بود. شبیه‌سازی فرایند برای دو مرحله تزریق رزین در محیط پیش گرم و انتقال حرارت از دیواره به رزین تا شروع فرایند پخت صورت گرفته است. جهت تعیین تاثیر پخش حرارتی تانسور پخش حرارتی K_D در معادله انرژی نیز لحاظ شده است.

۱ـ تئوری

برای مدلسازی فرایند، ابعاد مناسب مطابق با نمونه‌های تجربی در نظر گرفته شده است. شکل (۱) یک طرح ساده از فرایند را ارائه می‌کند. میزان تخلخل متوسّط (ε_f) به عنوان نسبت موضعی، حجم اشغال شده بوسیله سیّال و حجم کل تعریف می‌شود.

$$\varepsilon_f = V_f / V \qquad (۱)$$

بردار متوسط سرعت $\langle V_f \rangle$ سرعت متوسط دارسی نامیده می‌شود. این تعریف مستقیماً نرخ گذر سیّال از هر مقطع را بدست می‌دهد و باسرعت متوسط فاز سیال $\langle V_f \rangle^f$ که بیانگر متوسط سرعت فاز سیال و نشانگر سرعت جبهه آزاد سیال در طی فرایند پرشدن است، به وسیله معادلهٔ زیر مرتبط است.



شکل(۱): طرح شماتیک از فرایند آر تی ام با قالب مستطیل شکل.

$$\varepsilon_f \langle V_f \rangle^f = \langle V_f \rangle \qquad (۲)$$

در مقالهٔ حاضر جریان، به صورت یک بعدی در نظرگرفته شده است در نتیجه می‌توان انتقال حرارت را دوبعدی درنظرگرفت. انتقال حرارت به صورت جابجایی در مسیر جریان (x) و هدایت حرارتی که در هر دو جهت جریان (x) و راستای عمود بر جریان (y) صورت می‌گیرد. زیرنویس f ,s بترتیب معرف فازسیال (رزین) و فاز جامد (فیبر) خواهد بود معادله جریان در جهت x معادله دارسی است.

$$\langle V_f \rangle = -\frac{1}{\mu} K_x \nabla \langle P_f \rangle^f \qquad (۳)$$

دیگر مدل ها که تأثیر اینرسی را در برداشته باشند مانند مدل فرشهیمر[۴] را می‌توان در نظر گرفت. در اینجا باتوجه به محدودهٔ درنظر گرفته شده برای سرعت، از معادلهٔ دارسی استفاده شده است.

دما دارای نقش اساسی در فرایند آر تی ام است. هر چند بیان معادلهٔ انرژی برای دو فاز به صورت مجزا ممکن است، دقّت محاسبات را افزایش دهد ولی به دو دلیل اساسی در اینجا از معادلهٔ انرژی یک فاز استفاده شده است. نخست آنکه امکان اندازه‌گیری دمای دو فاز به صورت تجربی امکان‌پذیر نیست و دیگر اینکه زمان مشخّصه جهت انتقال حرارت بین دو فاز در مقایسه بازمان مشخصه فرایند کوچکترخواهد بود.[۴]. بعلاوه بمنظور افزایش دقت ترم پراکنش حرارتی مدّ نظر قرار گرفته است.

$$\langle T_f \rangle^f = \langle T_s \rangle^s = \langle T \rangle \qquad (۴)$$

برای حصول یک معادله انرژی، معادلهٔ متوسّط گیری شده انرژی در دو فاز با یکدیگر جمع می‌شوند.

$$((\varepsilon\rho c)_f + (\varepsilon\rho c)_s)\frac{\partial < T >}{\partial t} + (\rho c)_f < V_f > \nabla < T >= \nabla.((k_e + K_D).\nabla < T >) \qquad (۵)$$

که c بیانگر ظرفیّت گرمایی K_e تانسور نفوذ حرارتی مولکولی و K_D تانسور پخش حرارتی مکانیکی است که بصورت زیر بیان می‌شوند:

$$K_e = \Sigma_{i=s,f}(\varepsilon_i I + \frac{1}{V}\int_{si} n b_i ds) \qquad (۶)$$

$$K_D = \Sigma_{i=s,f} -\frac{(C_p)_i}{V}\int_{\gamma i}(u_i - < u >) b_i dV \qquad (۷)$$

که در آن b بردار بیانگر انحراف بین دمای میکروسکوپی و دمای متوسط حجمی محلی است و بصورت زیر بیان می‌شود.

$$T_i = < T > + b_i.\nabla < T > \qquad (۸)$$

شرایط مرزی برای دیوار ورودی سیّال از نوع شرایط مرزی دیریکله هستند و به صورت زیر بیان می‌شوند:

$T>=T_{wall}$ on the top and bottom of mould (۹)

$<T>=T^{inflow}$ at inflow (۱۰)

سرعت جبهه آزاد سیال برابر است با

$$U_{front} = < u_f >^f = \frac{< u >_x}{\varepsilon_f} e_x \qquad (11)$$

۲ـ داده‌های تجربی

ابعاد مدل با در نظر گرفتن شرایط عملی در جهت y,x به ترتیب ۸۰ و ۲ سانتیمتر در نظر گرفته شده است [۵]. جدول (۱) خواص حرارتی دو ماده در نظر گرفته شده به عنوان فیبر ارائه می‌کند. برای برآورد K_e مدل های مختلف در جدول (۲) ارائه شده است. در اینجا از مدل چنگ[۳] استفاده شده است.

جدول (۱): خواص حرارتی مواد [۶]

نوع فیبر	دانسیته kg/m^3	ظرفیت حرارتی $J/kg^\circ C$	هدایت حرارتی W/m °C	dp m
فیبر کربنی	۱۱۸۰	۷۱۲	۷۰۸	۸×۱۰^{-۶}
فیبر E-Glass	۲۵۶۰	۶۷۰	۴۱۷	$۱/۴\times۱۰^{-۴}$

جدول (۲): مقایسه روشهای مختلف محاسبه K_e

مدل	فرمول	K_e (W/mK)	K_e/K_f
آرایش موازی	$K_e = K_f\varepsilon_f + K_s\varepsilon_s$	3.59	13.01
آرایش سری	$K_e = \frac{K_f K_s}{K_f\varepsilon_s + K_s\varepsilon_f}$	0.47	1.71
متوسط هندسی	$K_e = (K_f)^{\varepsilon_f}(K_s)^{\varepsilon_s}$	1.71	4.24
مدل چنگ[۳]	$\frac{K_e}{K_f} = \frac{(2-\varepsilon_f)K_s/K_f + 1}{2-\varepsilon_f + K_s/K_f}$	0.39	1.40

همچنین ویسکوزیته سیّال از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\mu = A_\mu \exp\left(E_\mu / RT\right) \qquad (12)$$

۳ـ الگوریتم حلّ عددی

معادله (۵) رابصورت زیرمی توان بازنویسی کرد [۷] .

$$(\rho C_p)_s \varepsilon_s + (\rho C_p)\varepsilon_f)\frac{\partial < T >}{\partial t} + (\rho c_p)_f < u >_x \frac{\partial T}{\partial x} = [K_{xx}\frac{\partial^2 < T >}{\partial x^2} + K_{yy}\frac{\partial^2 < T >}{\partial y^2}] \qquad (13)$$

که در آن:

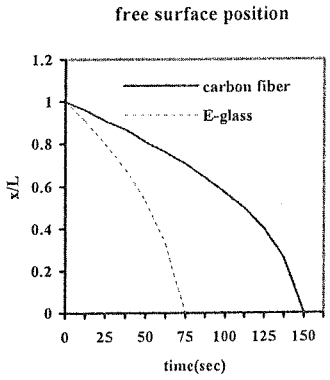
$$K_{xx} = K_{exx} + K_{Dxx} - < u >_x C_{hcx}$$
$$K_{yy} = K_{eyy} + K_{Dyy} \qquad (14)$$

یک روش اختلاف محدود کاملاً ضمنی برای حل معادله (۱۳) به کار رفته است. کلیه ترم های $\partial < T > / \partial x$ در

معادله انرژی و شرایط مرزی بصورت upwind و ترمهای درجهٔ دوی $\frac{\partial^2 < T >}{\partial x^2}$ و $\frac{\partial^2 < T >}{\partial y^2}$ به صورت مرکزی گسترده شده‌اند. فرض شده است سرعت سیّال در عبور از ضخامت فیبر یکنواخت است و در نتیجه یک پروفیل لخته‌ای[5] برای سرعت منظور شده است[۸]. برای حلّ معادلات از روش تکرار با فاکتور آسودگی متغیراستفاده شده است. برای تعیین دقّت محاسبات، حلّ عددی برای شرایط پایا با حلّ تحلیلی مقایسه شده است [۹].

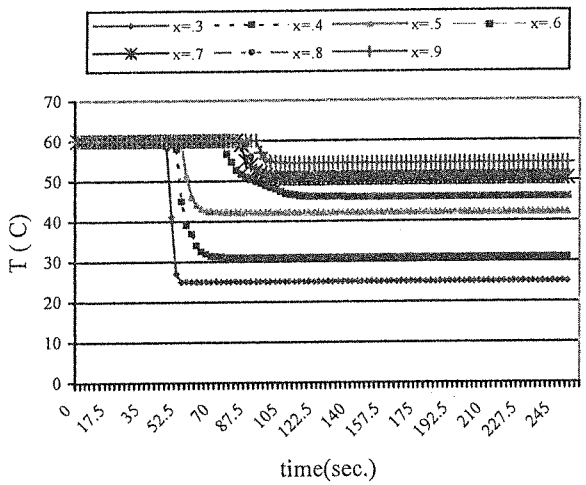
٤ـ نتایج عددی

محاسبات برای دو نوع فیبر ارائه شده در جدول (۱) انجام گرفت. شکل (۲) موقعیّت سطح آزاد را برای هر دونوع فیبر در مقایسه با یکدیگر نشان می‌دهد. شکل (۳) مقادیر دما را در نقاط مختلف فیبر کربنی برحسب زمان را نشان می‌دهد.



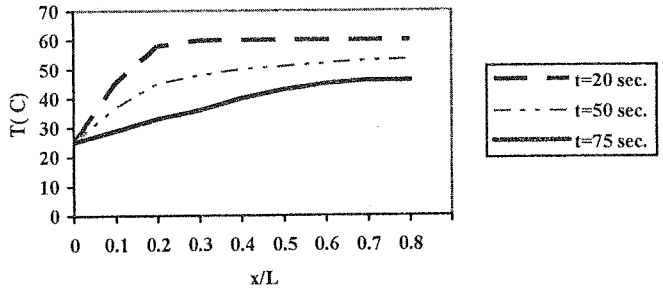
شکل(۲): تغییرات سطح آزاد در فرایند آر تی ام.

شکل (۴) نتایج محاسبات را برای شرایط پایا در مقایسه با مقادیر تجربی مرجع [۶] نشان می دهد. مقادیر مختلف K_{yy} در مقایسه با K_e جهت تطابق نتایج عددی باتجربی محاسبه شده‌اند. در نهایت شکل (۵) دمای محاسبه شده را برای فیبری گلاس در مقایسه با نتایج تجربی مرجع [۶] ارائه می‌کند.



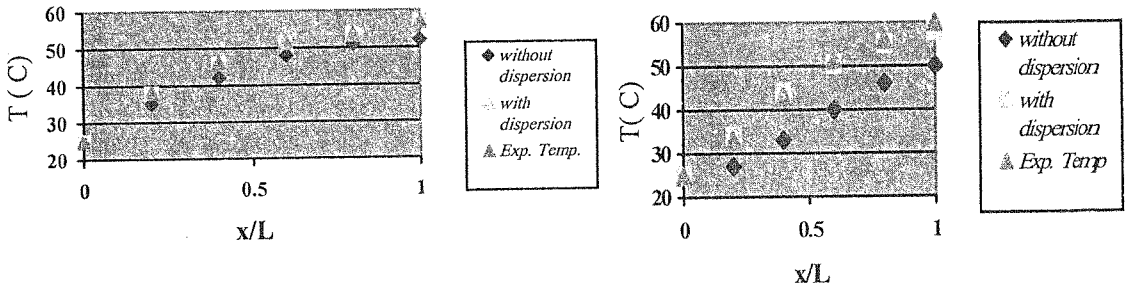
E-Glass fiber

شکل (۳): تغییرات دما در نقاط مختلف فیبر کربنی در فرآیند آر تی ام.

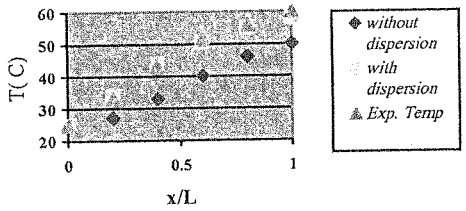


شکل (٤): پروفیل دما در نقاط مختلف فیبردرفرایند آر تی ام در شرایط پایا.

$Ke=1.39K_f$, $Kyy=1.8K_f$, $Pe=.104$



$Ke=1.39K_f$, $Kyy=2.66K_f$, $Pe=1.48$



شکل (٥): دمای محاسبه شده در نقاط مختلف فیبرهای ای گلاس در فرایند آر تی ام.

٥ـ بحث و نتیجه گیری

در این مقاله شبیه‌سازی عددی فرایند غیرهم دمای آر تی ام انجام گرفت. محاسبات بر مبنای حلّ معادلهٔ انرژی همراه با ملاحظهٔ پخش حرارتی صورت گرفت. چنانچه از شکل (٢) مشخّص است، زمان فرایند در فیبرکربنی حدود دو برابر زمان فرایند در فیبر ای گلاس خواهد بود و این امر ناشی از بیشتر بودن درصد تخلخل در فیبرای گلاس در مقایسه با فیبر کربنی است. این افزایش تخلخل از یکسو باعث کاهش زمان فرایند می شود، از سوی دیگر با مقایسهٔ شکل های (٣) و (٥) نشانگر کاهش اختلاف دما در جهت طول قالب است. به بیان دیگر تأثیر پیش گرمایش قالب در استفاده از فیبر کربنی یا مادهٔ متخلخل با تخلخل کمتر در مقایسه با فیبر ای گلاس افزایش می‌یابد. بررسی شکل (۴) نشان می‌دهد که افزایش عدد پکلت، نیازبه لحاظ کردن پخش حرارتی را افزایش می دهد به گونه ای که از درجه بزرگی 10^5 در نظر نگرفتن ترم حاصل

از پخش حرارتی باعث انحراف اساسی نتایج حاصل از مدلسازی نسبت به نتایج تجربی خواهد شد. با توجه به محدوده مناسب عدد پکلت، در نظر گرفتن پخش حرارتی در تحلیل فرایند آر تی ام ضروری است. به دلیل این که ضخامت قالب بسیار کوچکتر از طول آن می باشد ترم K_{Dyy} تأثیر بسیاری بر معادله انرژی دارد. در مدل ارائه شده معادله حاکم بر جریان، رژیم دارسی درنظر گرفته شده است. هرچند در شرایط منظور شده برای افت فشار و سرعت این مدل از دقت کافی برخوردار است ولی تعمیم مدل برای یافتن شرایط بهینهٔ تولید نیازمند، وارد کردن ترم انحراف از دارسی و برآورد سطح آزاد جریان است. ضمناً ارائهٔ تأثیر افزایش عدد پکلت بر میزان پراکنش حرارتی و چگونگی میان برآورد آن دراین مقاله بررسی شده است. همچنین بهبود تأثیر پیش گرمایش قالب برای فیبر با تخلخل کمتر بصورت کمی نشان داده شده است. توافق خوب نتایج با آزمایش های تجربی مؤیّد دقت مدل وارزیابی آن است.

فهرست علائم

b : تابع برداری جهت ارتباط مقادیرانحراف و متوسط

C_p: ظرفیت حرارتی (kJ/kgK)

d_p :قطر مشخصه ذره (m)

e: بردار یکه

h: ضخامت قالب (m) :

I: تانسور همانی

K: ضریب هدایت حرارتی

L :طول مشخصه فیبر (m)

P_e: عدد پکلت

t: زمان (s)

T : دما (K)

U : سرعت (m/s)

x,y,z: مختصات کارتزین

علائم یونانی

α: ضریب پخش حرارتی (m^2/s)

ε: درصد تخلخل

ρ: دانسیته (kg/m^3)

زیرنویسها

f: فاز سیال

s: فاز جامد

زیرنویس‌ها

1-Resin Transfer Molding
2-Curing
3-Heat Dispersion
4-Forschheimer
5-Slug flow

مراجع

[1] M.V. Bruschke, and S.G. Advani, "A Numerical Approach to Model Non-Isothermal, Viscous Flow with Free Surface through Fibrous Media" Int. J. Numer. Methods Fluids, vol. 19, PP.575-603, 1994.

[2] B. Liu, and S.G Advani, "Operator Splitting Scheme for 3D Temperature Solution Based on 2D Flow Approximations" Computational Mechanics, vol. 38, pp. 74-82, 1995.

[3] C. Tucker and R.Dessenberger. "Flow and Rheology in polymer composities manufacturing", Chap. 8 Governing equations for flow and heat transfer in stationary fiber beds, pp. 257-323, Elsevier, 1994.

[4] O.Mal,. A. Couniut and F. Depert. "Non- Iso Thermal Simulation of the Resin Transfer Molding Process". Composites part A, vol. 29, pp 180-198, 1998.

[5] O.Mal, "Modeling and Numerical Simulations of Reaction Injection Molding processes, PhD thesis, 1999.

[6] J. Castro and C. Macosko, "Studies of Mold Filling and Curing in the Reaction Injection Molding Process", AIChe, J., vol. 28, pp. 250-258, 1982.

[7] O.Magoote, C.Jeggy, "Numerical Modeling of Moving Interfaces in 3 D", 5th Int. ESAFORM conf. On material forming, Kuakow, 2002.

[8] Hsiao, K.T, Loudorn, H. and Advani, S. G., "Experimental Investigation of Heat Dispersion Due to Impregnation of Viscous Fluids in Heated Fibrous Porous During Composites Processing", Journal of Heat Transfer, Vol. 123, PP. 178-186, 2001.

[9] Kaviany, M., "Principle of Heat Transfer in Porous Media", Springer-Verlag, New York, 1991.