

## بررسی عوامل مؤثر بر میزان ماندگاری سرما در ژلهای نگهدارنده سرما

### Evaluation of Effective Parameters on Cold Duration in Cryoaccumulator Gels

محمدتقی خراسانی\*، بهروز سادات نیا، حمید میرزاده

تهران، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، پژوهشکده علوم، صندوق پستی ۱۴۹۶۵/۱۱۵

دریافت: ۸۱/۷/۸، پذیرش: ۸۱/۹/۲۰

#### چکیده

ژلهای نگهدارنده سرما می‌توانند سرما را برای مدتی طولانی در خود نگه دارند. از این ژلهای در پزشکی و همچنین در انتقال مواد زیستی استفاده می‌شود. در این مقاله، روش ساخت دو نوع از این ژلهای نگهدارنده سرما، که اصطلاحاً ژل نرم و ژل سخت نامیده می‌شوند، ارائه می‌گردد. برای ساخت ژلهای مزبور از پلی‌آکریل‌آمید تهیه شده به روش پلیمرشدن رسوبی در استون، به عنوان پلیمر تشکیل‌دهنده ژل استفاده شد. برای بررسی میزان ماندگاری سرما در ژلهای ساخته شده، تغییرات دمای این ژلهای با زمان اندازه‌گیری شد. آزمایشهای انجام شده نشان می‌دهد که میزان ماندگاری سرما در ژلهای سخت خیلی بیشتر از ژلهای نرم است. به عبارت دقیقتر، زمان مؤثر متوسط یک ژل نرم، در حدود ۳ ساعت است، در حالی که این زمان برای یک ژل سخت تقریباً ۱۰ ساعت است. همچنین، اثر تغییر چگالی پیوندهای عرضی پلی‌آکریل‌آمید روی میزان ماندگاری سرما در ژلهای نرم بررسی و مشاهده شد که با تغییر این پارامتر می‌توان زمان مؤثر این ژلهای را به میزان زیادی افزایش داد.

(مجله علوم و تکنولوژی پلیمر، سال پانزدهم، شماره ۶، صفحه ۳۹۴-۳۸۹، ۱۳۸۱)

#### واژه‌های کلیدی

ژل نگهدارنده سرمای نرم،  
ژل نگهدارنده سرمای سخت،  
پلی‌آکریل‌آمید، پلیمر شدن رسوبی،  
چگالی پیوندهای عرضی

#### مقدمه

فراورده‌های ژنتیکی و داروها نیز از سرما استفاده می‌شود [۱].

تاریخچه استفاده از سرما در پزشکی به بیش از صد سال می‌رسد، اما در سالهای اخیر به دلیل گسترش روشهایی مانند جراحی با سرما (cryosurgery)، سرما درمانی (cryotherapy) و تولید دماهای

امروزه از سرما و گرما در بسیاری از زمینه‌های پزشکی برای درمان بیماریهای مختلف استفاده می‌شود. همچنین، برای نگهداری و حمل و نقل مواد زیستی که در پزشکی مورد استفاده قرار می‌گیرند، مانند خون و فراورده‌های آن، بافتها و اندامهای مورد استفاده در پیوند اعضا، شیر مادر،

#### Key Words

soft cryoaccumulator gel,  
hard cryoaccumulator gel,  
polyacrylamide,  
precipitation polymerization,  
crosslinking density

مورد نیاز، فناوری ساخت ساده و قابلیت استفاده چند باره را نیز دارا باشند. در این زمینه، بهترین و کاملترین جایگزینهایی که پیشنهاد شده اند سیستمهای تولیدکننده سرما یا گرما بر مبنای مواد شیمیایی [۶-۷] یا سیستمهای نگهدارنده سرما یا گرما بر مبنای مواد پلیمری اند [۸، ۷، ۵، ۴]. سیستمهای تولیدکننده سرما یا گرما عموماً شامل یک نمک اند که با حل شدن در یک حلال مثل آب، تولید سرما یا گرمای فوری می کند، اما سیستمهای نگهدارنده سرما یا گرما، عموماً شامل یک ژل یا یک عامل ژل شونده است که به عنوان عایق عمل می کند و می تواند سرما یا گرما را برای مدتی طولانی در خود نگه دارد. عموماً برای استفاده از این سیستمها، آنها را در یک لفاف پلاستیکی قرار می دهند و کل مجموعه، یک بسته گرمایی (thermal pack) نامیده می شود.

بسته های گرمایی ژلی، که معمولاً شامل یک ژل یا یک عامل ژل شونده اند، یکی از مهمترین انواع بسته های گرمایی اند. برای سرد کردن این نوع بسته گرمایی، می توان آن را در یخچال یا فریزر قرار داد و برای گرم کردن آن نیز می توان آن را در آب داغ قرار داد. با اینکه ژلهای مورد استفاده در بسته های گرمایی می توانند سرما یا گرما را تا مدت زیادی در خود نگه دارند، اما برای افزایش ماندگاری این بسته ها روشهایی در مراجع پیشنهاد شده است، که عمده این روشها منحصر به استفاده از یک صفحه عایق در جداره داخلی یا خارجی لفاف بسته است [۹، ۶]. در این طرح، اثر عواملی همچون نوع مواد اولیه مصرف شده در ساخت این ژلهای و همچنین میزان چگالی پیوندهای عرضی پلیمر تشکیل دهنده ژل بر میزان ماندگاری دمای این ژلهای بررسی شده است. بدین منظور، ابتدا دو نوع ژل نگهدارنده سرما، که اصطلاحاً ژل نرم و ژل سخت نامیده می شوند، ساخته شده و با اندازه گیری تغییرات دمایی این ژلهای با زمان، میزان ماندگاری سرما در آنها بررسی شد. سپس، به منظور کاهش سرعت انتقال گرما در ژلهای نرم و افزایش میزان ماندگاری سرما این ژلهای، اثر تغییر چگالی پیوندهای عرضی پلیمر تشکیل دهنده ژل بر ماندگاری دمای این ژلهای بررسی شد.

## تجربی

### مواد

مواد مصرفی در ساخت ژلهای نگهدارنده سرما عبارتند از:

- پلی آکریل آمید به عنوان عامل ژل کننده،

- پلی اتیلن گلیکول ۴۰۰ ( $\text{HO}(\text{C}_2\text{H}_4\text{O})_n\text{H}$ ) محصول شرکت

مرکو

- آب مقطر.

پایین (cryogenic) این مسئله به صورتی جدیتر مورد توجه قرار گرفته و علوم بنیادی و کاربردی استفاده از سرما بیش از پیش در حال گسترش است [۲]. پایین آوردن دمای بدن (hypothermy)، چه به صورت عمومی و چه به شکل موضعی، موجب تحول شگرفی در علم پزشکی خصوصاً جراحی شده است. در حال حاضر، از هیپوترمی در چشم پزشکی (برای برداشتن عدسی و معالجه آب مروارید و آب سیاه)، درمان تومورها (برای درمان بافتهای سرطانی و تومورهایی که ممکن است بدخیم شوند) و همچنین در جراحی قلب، کبد، کلیه و مغز استفاده می شود [۲]. علاوه بر این، از سرما برای درمان ضایعاتی از قبیل کشیدگی عضلانی، رگ به رگ شدن، سردرد و گرفتگی های عضلانی نیز استفاده می گردد [۳]. از طرف دیگر، گرما درمانی (heat therapy) نیز فرایندی استاندارد در پزشکی برای درمان دردهایی از قبیل التهاب مفاصل (arthritis)، التهاب کیسه زلالی (bursitis)، سردرد، درد پشت و گردن، انقباضات دردناک دوران قاعدگی، فیبرومیالژیا (fibromyalgia) و دردهای عضلانی است [۳].

عموماً برای تولید سرما از وسایل طبیعی (آب، یخ یا مخلوط یخ و نمک) یا وسایل مصنوعی (یخ خشک، گازهای مایع شده و فرئون) استفاده می گردد. با استفاده از یخ می توان دمای نزدیک به  $0^\circ\text{C}$  بدست آورد. در کارهای آزمایشگاهی، معمولاً از مخلوط یخ با نمکهای مختلف برای ایجاد دماهای حدود  $40^\circ\text{C}$  - استفاده می شود. برای ایجاد دماهای پایینتر ( $200\text{K}$ ) می توان از مخلوط کربن دیوکسید جامد (یخ خشک) با الکلها یا استرها استفاده کرد.

اگرچه استفاده از سرمازایی یخ و مخلوط یخ - نمک، بسیار ساده بنظر می رسد، اما این سیستمها دارای معایبی از قبیل مشکلات خرد کردن یخ و وارد کردن آن به داخل ظرف موردنظرند. یخ خشک نیز اگرچه نسبت به یخ و مخلوط یخ - نمک دمای پایینتری تولید می کند، اما تولید کربن دیوکسید جامد نیاز به صرف مخارج زیاد و تجهیزات ویژه دارد. همچنین به دلیل تبخیر آن امکان بازیابی محصول وجود ندارد.

در گذشته برای تامین سرما یا گرمای مورد نیاز برای کارهای درمانی یا مصارف روزمره عموماً از بطریهای آب گرم و کیسه های یخ، که از مواد پلاستیکی یا لاستیکی ساخته می شدند استفاده می گردید. اما، استفاده از این وسایل معمولاً با مشکلات زیادی همراه است. از جمله معایب این وسایل می توان به وزن زیاد آنها اشاره کرد که موجب کثیف شدن و گاهاً خیس شدن لباسهای بیماران و اسباب و اثاثیه می شوند و به ویژه برای مسافرت و حمل و نقل مناسب نیستند. به دلیل بروز این گونه مشکلات، پژوهشگران همواره در تلاش بوده اند که روشهای جدیدی برای تولید و بکارگیری عوامل سرمازا یا گرمازا پیدا کنند که علاوه بر داشتن خواص

#### ساخت ژل نگهدارنده سرمای سخت

برای تهیه حدود ۱۰۰۰g ژل سخت، ۹۵۰ mL آب و ۵۰g پلی آکریل آمید در یک ظرف ۲ L با هم مخلوط شد.

#### ساخت ژل نگهدارنده سرمای نرم

برای تهیه حدود ۱۰۰۰g ژل نرم، ۷۲۰ mL آب، ۲۳۰g پلی اتیلن گلیکول و ۵۰g پلی آکریل آمید در یک ظرف ۲ L با هم مخلوط شد.

#### سرد کردن نمونه‌ها و اندازه‌گیری تغییرات دما با زمان

برای سرد کردن نمونه‌های تهیه شده، ژلهای حاصل در کیسه‌های پلاستیکی از جنس پلی اتیلن ریخته شد و در فریزر در دمای حدود  $11^{\circ}\text{C}$  قرار داده شد. پس از ۷۲ ساعت که ژلهای مزبور در فریزر نگهداری شد و دمای آنها به حدود  $11^{\circ}\text{C}$  رسید، نمونه‌ها از فریزر خارج و تغییرات دمای آنها در دمای آزمایشگاه (حدود  $25^{\circ}\text{C}$ ) به وسیله گرماسنج رقمی در فواصل زمانی مشخص اندازه‌گیری گردید.

### نتایج و بحث

برای ساخت ژلهای نگهدارنده سرما می‌توان از عوامل ژل‌کننده مختلف استفاده کرد. خواص فیزیکی بعضی از پلیمرهای مورد استفاده در ساخت ژلهای نگهدارنده سرما در جدول ۱ ارائه شده است. در این جدول، برای مقایسه خواص فیزیکی یخ نیز داده شده است. در تجزیه و تحلیل مسائل انتقال گرما، نسبت ضریب انتقال گرما به ظرفیت گرمایی، خاصیتی مهم است که نفوذپذیری گرمایی ( $\alpha$ ) نامیده می‌شود و دارای واحد  $\text{m}^2/\text{s}$  است:

$$\alpha = k / \rho C_p \quad (1)$$

برای تهیه پلی آکریل آمید به عنوان عامل ژل‌کننده از آکریل آمید ( $\text{H}_2\text{C}=\text{CHCONH}_2$ ) محصول شرکت آلدریچ،  $\text{N}^{\prime},\text{N}$ -متیلن بیس آکریل آمید  $(\text{CH}_2(\text{NHCOCH}=\text{CH}_2)_2)$  به عنوان عامل ایجاد پیوند عرضی در پلیمر شدن آکریل آمید از شرکت فلوکا،  $\alpha, \alpha^{\prime}$ -آزوبیزوبوتیرو نیتریل ( $\text{C}_8\text{H}_{12}\text{N}_4$ ) به عنوان آغازگر پلیمر شدن آکریل آمید و استون به عنوان حلال که هر دو محصول شرکت مرک اند استفاده شد.

#### دستگاهها

برای تهیه پلی آکریل آمید از یک راکتور یک لیتری (contalab) مجهز به ژاکت روغن و همزن U شکل استفاده گردید. برای تهیه ژلهای و مخلوط کردن مواد نیز از همزنی با دور زیاد استفاده شد. برای سرد کردن نمونه‌ها از فریزری با دمای حدود  $11^{\circ}\text{C}$  و برای اندازه‌گیری تغییرات دمای ژلهای با زمان نیز از گرماسنج رقمی 20 termomer ساخت شرکت Iskara استفاده شد.

#### روشها

##### تهیه پلی آکریل آمید

برای تهیه پلی آکریل آمید به صورت پودر از روش پلیمر شدن رسوبی در استون استفاده شد [۱۰]. پلیمر شدن در دمای  $60^{\circ}\text{C}$  در راکتور یک لیتری انجام گرفت. قبل از پلیمر شدن، محلول سردی از مونومر (۳۸g)، عامل ایجاد پیوند عرضی (۱/۱۴g) و آغازگر (۰/۶۰۸g) در استون (۵۵۰mL) با عبور گاز نیترژن از داخل آن، به صورت کامل اکسیژن‌زدایی شد. بدین ترتیب، پلی آکریل آمید به صورت ذرات خیلی ریز از مخلوط واکنش رسوب کرد. واکنش پس از ۴ ساعت تقریباً کامل شد. سرعت همزن در مرحله واکنش ۶۰ دور بر دقیقه بوده است. پلی آکریل آمید پودری از شیرابه بدست آمده صاف و کاملاً با استون شسته شد و در آن خلاء در دمای  $50^{\circ}\text{C}$  تا رسیدن به وزن ثابت خشک گردید.

جدول ۱- خواص فیزیکی یخ و بعضی از پلیمرهای مورد استفاده در ساخت ژلهای نگهدارنده سرما [۱۱، ۱۲].

خواص مواد	گرمای ویژه (J/kg.K)	چگالی ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	ضریب انتقال گرما (W/m.k)	نفوذپذیری گرمایی $\alpha \times 10^6 (\text{m}^2/\text{s})$
پلی وینیل الکل	۱۳۰۰	۱۳۱۰ - ۱۱۹۰	۰/۲۲۵	۰/۱۴۵ - ۰/۱۳۲
پلی آکریل آمید	۱۸۷۵	۱۳۰۰	۰/۰۹۲	۰/۰۳۷۷
پلی اتیلن اکسید	۲۰۰۰	۱۱۳۰	۰/۲	۰/۰۸۸۵
یخ	۲۰۴۰	۹۲۰	۱/۸۸	۱/۰۰

می ماند و پس از آن شروع به افزایش می کند تا به دمای محیط برسد. عموماً برای اینکه بتوان از یک ژل نگهدارنده سرما برای سرما درمانی استفاده کرد، نباید حداقل دمای آن از حدود  $(-12/3^{\circ}\text{C})$  یا  $(10^{\circ}\text{F})$  کمتر باشد [۳]. با وجود این، به منظور استفاده از این ژلهای حمل و نقل، نگهداری مواد زیستی و دیگر مصارف غیر درمانی می توان این ژلهای را تا دماهای خیلی پایینتری سرد کرد. همچنین، اگر زمان مؤثر یک ژل نگهدارنده سرما مدت زمانی که دمای این ژل زیر  $15^{\circ}\text{C}$  باقی می ماند تعریف شود، با استفاده از شکل ۱ می توان زمان مؤثر یک ژل سخت را با یک ژل نرم مقایسه کرد. در شکل ۲ زمان مؤثر تقریبی این دو ژل با هم مقایسه شده است. همان طور که از شکل ۲ مشخص است، زمان مؤثر یک ژل نرم در حدود سه ساعت است، در حالی که زمان مؤثر یک ژل سخت تقریباً ده ساعت است.

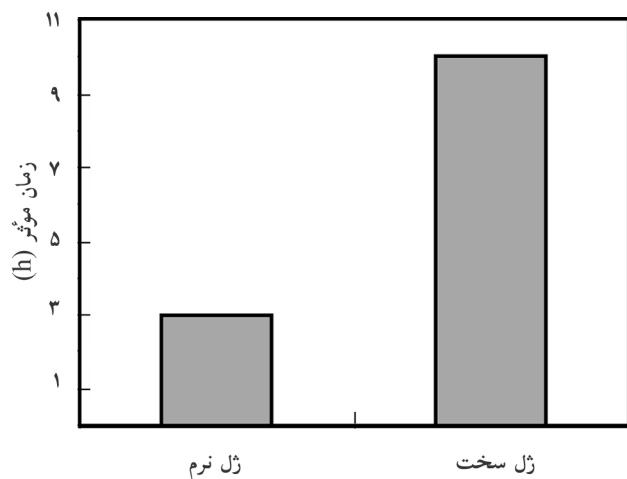
همان طور که از فرمولبندی ارائه شده برای ساخت ژلهای نرم و سخت مشخص است، در ساخت ژلهای نرم، از یک ماده پایین آورنده دمای ذوب استفاده می شود. اضافه کردن این ماده به ژلهای نرم موجب می شود که وقتی این ژل برای سرد شدن در یخچال قرار داده می شود یخ نزند و همچنان نرم و انعطاف پذیر باقی بماند، در حالی که اگر ژل سخت در یخچال قرار داده شود کاملاً یخ می زند و سفت و سخت می گردد. بیشتر بودن زمان ماندگاری سرما در ژلهای سخت نسبت به ژلهای نرم را می توان با توجه به این مطلب توجیه کرد. اگر یک ژل سخت و یک ژل نرم برای سرد شدن در یخچال قرار داده شوند، پس از خارج کردن این ژلهای از یخچال، تا رسیدن به دمای  $0^{\circ}\text{C}$ ، روند تغییرات دمایی این دو ژل تقریباً یکسان و به صورت نمایی است، اما بالاتر از این دما روند تغییرات دمای این دو ژل کاملاً متفاوت است. وقتی که دمای یک ژل سخت به

حاصلضرب چگالی ( $P$ ) و گرمای ویژه ( $C_p$ )، که عموماً ظرفیت گرمایی حجمی نامیده می شود، معیاری برای قابلیت نگهداری انرژی گرمایی یک ماده است.

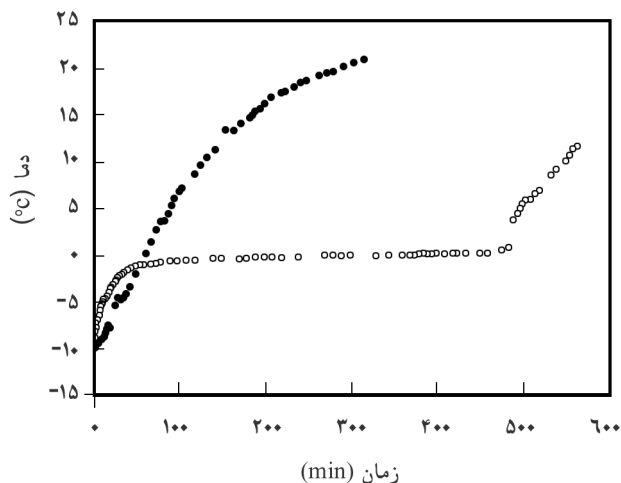
کمیت  $\alpha$  نشان دهنده قابلیت یک ماده برای انتقال انرژی گرمایی نسبت به قابلیت آن ماده برای ذخیره این انرژی است. موادی با  $\alpha$  بزرگ، بسرعت به تغییرات دمای ایجاد شده در محیط پاسخ می دهند، در حالی که موادی با  $\alpha$  کوچک خیلی کندتر به این تغییرات پاسخ می دهند و بنابراین، زمان بیشتری طول می کشد تا به شرایط تعادل جدیدی برسند. از لحاظ فیزیکی،  $\alpha$  معیاری از انتقال گرما ( $k$ ) نسبت به ذخیره انرژی ( $PC_p$ ) است [۱۲].

با توجه به تعریف ارائه شده برای کمیت  $\alpha$ ، مشخص است که ماده ای برای استفاده در ژلهای نگهدارنده سرما به عنوان عامل ژل کننده مناسبتر است که تا حد ممکن دارای  $\alpha$  کوچکتری باشد. بنابراین، با توجه به داده های جدول ۱، در بین عوامل ژل کننده یاد شده، پلی آکریل آمید مناسبترین ماده برای استفاده در ژلهای نگهدارنده سرماست. به همین دلیل، در این طرح از پلی آکریل آمید به عنوان عامل ژل کننده برای تهیه ژلهای نگهدارنده سرما استفاده گردید.

در شکل ۱ تغییرات دمای یک نمونه از ژلهای نرم و سخت تهیه شده برحسب زمان رسم شده است. همان طور که در شکل مشاهده می شود، میزان ماندگاری سرما در ژلهای سخت خیلی بیشتر از ژلهای نرم است. به عنوان مثال، دمای یک ژل نرم در مدت حدود ۳ ساعت از  $10^{\circ}\text{C}$  به  $15^{\circ}\text{C}+$  می رسد، در حالی که برای اینکه دمای یک ژل سخت از حدود  $10^{\circ}\text{C}-$  به  $10^{\circ}\text{C}+$  برسد در حدود ۹ ساعت طول می کشد. همان طور که از شکل مشخص است، دمای ژل سخت تا مدت زیادی در نزدیکی  $0^{\circ}\text{C}$  باقی



شکل ۲ - مقایسه زمان مؤثر ژلهای نرم و سخت ساخته شده.



شکل ۱ - نمودار تغییرات دمای یک نمونه از ژلهای ساخته شده با زمان: ژل نرم (●) و ژل سخت (○).



شکل ۴ - نمونه‌هایی از بسته‌های گرمایی ساخته شده در این طرح با شکلهای مختلف برای استفاده در قسمتهای مختلف بدن.

چگالی پیوندهای عرضی از روش تورم استفاده شده است [۱۳]. همان‌طور که از این شکل پیداست، با افزایش چگالی پیوندهای عرضی پلی‌آکریل آمید تا میزان مشخصی، زمان مؤثر افزایش و سپس دوباره کاهش می‌یابد. افزایش اولیه زمان مؤثر با افزایش چگالی پیوندهای عرضی پلیمر به تغییر ظرفیت گرمایی پلیمر مربوط می‌شود. یعنی با افزایش چگالی این پیوندها، مقدار ظرفیت گرمایی افزایش و در نتیجه مقدار  $\alpha$  کاهش می‌یابد که در نتیجه آن زمان مؤثر ژل افزایش پیدا می‌کند. اما، با افزایش بیشتر چگالی زمان مؤثر کاهش می‌یابد که این پدیده به نفوذ آب به داخل شبکه مربوط می‌شود، یعنی با افزایش چگالی پیوندهای عرضی، مقدار این نفوذ و در نتیجه تورم کاهش می‌یابد و زمان مؤثر سیر نزولی خواهد داشت. بنابراین، با افزایش چگالی پیوندهای عرضی پلی‌آکریل آمید به مقدار  $3 \times 10^{-4} \text{ mol/cm}^3$  می‌توان زمان مؤثر ژلهای نگهدارنده سرما را تا میزان ۴ ساعت افزایش داد.

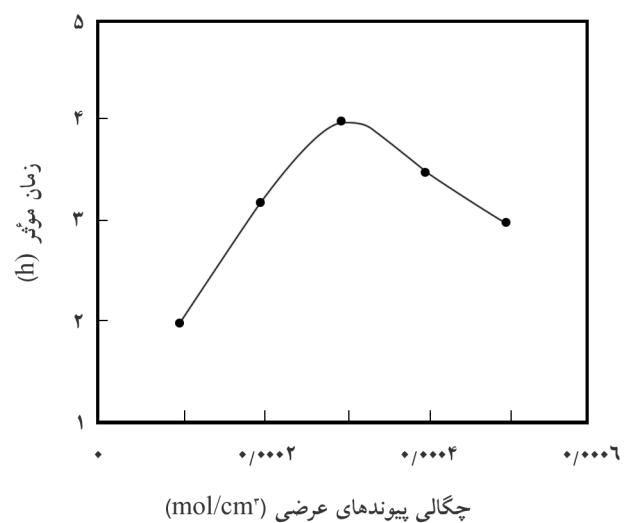
نمونه‌هایی از بسته‌های گرمایی ساخته شده در این طرح در شکل ۴ نشان داده شده است. برای ساخت این بسته‌های گرمایی از ژلهای نگهدارنده سرما تهیه شده و فیلمهای پلاستیکی از جنس پلی‌اتیلن استفاده شده است.

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش، روش ساخت دو نوع ژل نگهدارنده سرما، که اصطلاحاً

حدود  $0^\circ\text{C}$  می‌رسد، سرعت تغییرات دمای این ژل تقریباً متوقف می‌گردد و علت آن وجود یخ در این ژل است. به عبارت دیگر، به دلیل وجود یخ در این ژل، تا زمانی که این یخ ذوب نشده است، دمای این ژل نزدیک به  $0^\circ\text{C}$  باقی می‌ماند و پس از ذوب کامل یخ موجود در ژل، دوباره افزایش دمای ژل آغاز می‌گردد تا زمانی که دمای آن به دمای محیط برسد. اما، به دلیل وجود عامل پایین‌آورنده دمای ذوب در ژلهای نرم، این ژلهای هیچ‌گاه یخ نمی‌زنند و بنابراین دمای این ژل به شکل پیوسته و یکنواخت تغییر می‌کند تا به دمای محیط برسد.

حال اگر قرار باشد این ژلهای نرم برای سرما درمانی روی بدن فرد بیمار قرار گیرد، به دلیل انعطاف پذیر بودن ژلهای نرم، میزان انتقال گرما بین ژل نرم و بدن بیمار خیلی بیشتر از میزان انتقال گرما بین ژل سخت و بدن بیمار خواهد بود. علت آن است که ژلهای نرم می‌توانند شکل بدن بیمار را به خود گیرند و به صورتی کاملاً مماس به سطح پوست بیمار بچسبند. به همین دلیل، ژلهایی که در حال حاضر در بازار موجودند عموماً از نوع نرم‌اند. اما، همان‌طور که از شکلهای ۱ و ۲ مشخص است، میزان ماندگاری سرما در ژلهای نرم خیلی کمتر از ژلهای سخت است که نقصی برای ژلهای نرم محسوب می‌شود. بنابراین، با اینکه میزان ماندگاری سرما در ژلهای سخت خیلی زیاد است اما به دلیل انعطاف‌ناپذیری این نوع ژل نمی‌توان از آن برای کارهای درمانی و مصارف روزمره استفاده کرد. اما، به دلیل قابلیت خوب نگهداری سرما در ژلهای سخت، می‌توان از این ژلهای نگهداری و همچنین انتقال مواد زیستی از یک شهر یا کشور به یک شهر یا کشور دیگر استفاده کرد. شکل ۳ نمودار تغییرات زمان مؤثر ژلهای نرم را با تغییر چگالی پیوندهای عرضی پلی‌آکریل آمید نشان می‌دهد. برای اندازه‌گیری



شکل ۳ - نمودار تغییرات زمان مؤثر ژلهای نرم با تغییر چگالی پیوندهای عرضی پلیمر.

می رسد، در حالی که این زمان برای یک ژل نرم حدود ۳ ساعت است. بنابراین، میزان ماندگاری سرما در ژلهای سخت خیلی بیشتر از ژلهای نرم است. با اینکه میزان ماندگاری سرما در ژلهای نرم خیلی کمتر از ژلهای سخت است، اما با تغییر چگالی پیوندهای عرضی پلی آکریل آمید به میزان  $3 \times 10^{-4} \text{ mol/cm}^3$ ، زمان مؤثر این ژلهای به ۴ ساعت افزایش می یابد.

ژل سخت و ژل نرم نامیده می شوند، ارائه شده است. با توجه به میزان نفوذپذیری گرمایی ( $\alpha$ ) پایین پلی آکریل آمید در مقایسه با پلیمرهای مشابه، از این پلیمر که به روش پلیمرشدن رسوبی تهیه شد، به عنوان پلیمر تشکیل دهنده ژل استفاده شد.

اندازه گیری تغییرات دمای ژلهای تهیه شده با زمان نشان می دهد که دمای یک ژل سخت در مدت تقریباً ۱۰ ساعت از حدود  $10^\circ\text{C}$  به  $15^\circ\text{C}$

## مراجع

1. Lehmann J.F. and DeLateur B.J., "Therapeutic Heat"; *Therapeutic Heat and Cold*; Lehmann J.F. (Ed.), 4th ed., Williams and Wilkins, Baltimore, 1990.
2. Ibid, "Cryotherapy".
3. Douglas T.E., "Biomagnetic Hot and Cold Therapy Pack", *US Pat. 6,187,031*; February 13, 2001.
4. Kohout D.J., "Extended Life Cold Pack", *US Pat. 6,233,945*; May 22, 2001.
5. Dunshee W.K. and Chang R.W.H., "Instant Hot or Cold, Reusable Cold Pack", *US Pat. 4, 462, 224*; July 31, 1984.
6. Spencer J.J., "Device for Use as a Hot and Cold Compress", *US Pat. 3,885,403*; 1975.
7. Morse F.J., "Flexible Cooling Device and Use Thereof", *US Pat. 3, 545, 230*; 1970.
8. Gordon T.H., Walasek S. and Bernard P.S., "Reusable Soft Fabric Cold Compress", *US Pat. 4,910,978*; March 27, 1990.
9. Verakas J.P., "Chemical Thermal Pack", *US Pat. 3,874,504*; 1975.
10. Hron P., Slechtova J., Smetana K., Dvorankova B. and Lopour P., "Silicone Rubber-Hydrogel Composites as Polymeric Biomaterials", *Biomaterials*; **18**,15,1069-1073, 1997.
11. Brandrup J., Immergut E.H. and Grulke E.A.; *Polymer Handbook*; 4th ed., John Wiley & Sons, New York, 1999.
12. Incropera F.P. and DeWitt D.P.; *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*; 4th ed., John Wiley & Sons, New York, 1996.
13. Omidian H., Hashemi S.A., Askari F. and Nafisi S., "Swelling and Crosslink Density Measurements for Hydrogels", *Iran. J. Polym. Sci. Tech.*; **3**,2,115-119, 1994.