

Polymerization
Quarterly, 2020
Volume 10, Number 2
Pages 37-47
ISSN: 2252-0449

Thermoforming and Its Applications: A Review

Shayan Ghorbani¹, Aida Matochi¹, and Mohammad Hosain Beheshty^{*2}

1. Science and Technology Branch, Azad Islamic University, P.O. Box 14515-775, Tehran, Iran

2. Composite Department, Faculty of Polymer Processing, Iran Polymer and Petrochemical Institute, P.O. Box 14975-112, Tehran, Iran

Received: 3 August 2019, Accepted: 11 January 2020

Abstract

One of the most important and widely used methods in the processing of polymers is thermoforming. This method with its unique specifications has found a special place in various industries, especially in the packaging industry. In many applications, new methods of thermoforming have been developed to achieve the final product with the desired geometry. The basic principles of the thermoforming process and its various methods, the advantages and limitations of this process, recent advances in machinery and the application of thermoforming in the manufacture of automotive parts are some of the items reviewed in this article. The advantages of this widely used process are the low price of equipment, especially molds, short time of production, economic process for low-capacity production, and fabrication of parts with different dimensions and thickness. Compression processing, vacuum thermoforming, snap-back and drape thermoforming, matched die molding, plug-assisted, free shaping, two layer molding are different types of thermoforming processes. Manufacture of composite parts by using fiber or particles or nano-reinforced thermoplastics sheets are the area which still needs more research and developments.

Key Words

thermoforming,
disposables,
packaging,
processing,
plastics materials

(*) To whom correspondence should be addressed.
E-mail: m.beheshty@ippi.ac.ir

مروری بر فرایند گرماشکل دهی و کاربردهای آن

شایان قربانی^۱، آیدا متوچی^۱، محمدحسین بهشتی^{۲*}

۱- تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، صندوق پستی ۷۷۵-۱۴۵۱۵

۲- تهران، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، پژوهشکده فرایند پلیمرها، گروه کامپوزیت،

صندوق پستی ۱۱۲-۱۴۹۷۵

دریافت: ۱۳۹۸/۵/۱۲، پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۲۱

از روش های مهم و پرکاربرد در فراورش پلیمرها، گرماشکل دهی است. این روش با ویژگی های منحصر به فرد آن جایگاه ویژه ای در صنایع مختلف، به ویژه در صنعت بسته بندی، یافته است. در بسیاری از کاربردها، روش های جدید گرما شکل دهی برای دستیابی به محصول نهایی با هندسه دلخواه ابداع شده است. اصول اولیه فرایند گرماشکل دهی و روش های مختلف آن، مزایا و محدودیت های این فرایند، پیشرفت های اخیر در ماشین آلات و کاربرد این فرایند در ساخت قطعات خودرو از مواردی است که در این مقاله مرور شده است. قیمت کم تجهیزات، به ویژه قالب، زمان شروع کوتاه تولید، فرایندی اقتصادی برای تولید با ظرفیت کم و تولید قطعات با ابعاد و ضخامت های مختلف از جمله مزایای این فرایند پرکاربرد است. گرماشکل دهی های فشاری، با خلأ، خم دهی، قالب های منطبق برهم، سمبه کمکی، آزاد، بازگیرشی و ورق دولایه از انواع فرایندهای مختلف گرماشکل دهی هستند. ساخت قطعات کامپوزیتی با استفاده از پلیمرهای گرمانرم تقویت شده با الیاف یا پرکننده های تقویتی و نانوذرات به کمک فرایند گرماشکل دهی از مواردی است که هنوز نیازمند تحقیقات بیشتری است.

بسیار

فصلنامه علمی

سال دهم، شماره ۲،

صفحه ۴۷-۳۷، ۱۳۹۹

ISSN: 2252-0449

چکیده



شایان قربانی



آیدا متوچی



محمد حسین بهشتی

واژگان کلیدی

گرماشکل دهی،
ظروف یک بار مصرف،
بسته بندی،
فراورش،
مواد پلاستیکی

مقدمه

از مهم‌ترین روش‌های ساخت قطعات نازک که معمولاً مساحت گسترده دارند، گرمایش دهی است. در این روش، ورق‌های پلاستیکی به کمک قالب و اختلاف فشار هوا گرم می‌شوند تا بتوان به آن‌ها شکل داد. لازم به ذکر است که گرما آن قدر زیاد نیست که ورق‌های پلاستیکی ذوب شوند. گرمایش دهی که از روش‌های قدیمی و معمول کار با مواد پلاستیکی بوده، در دهه ۱۹۶۰ میلادی ابداع شده است و کاربردهای زیادی در صنعت بسته‌بندی دارد [۱]. در رایج‌ترین شیوه گرمایش دهی برای تولید انبوه، ورق پلاستیکی ابتدا با دستگاه اکسترودر ساخته شده و سپس از راه غلتک‌ها وارد بخش گرمادهی (کوره) می‌شود. پس از آن، ورق گرمادهی وارد بخش شکل دهی شده و صفحه‌های فشار از پایین و بالا روی ورق جفت می‌شوند. در این مرحله، با ایجاد فشار منفی از طریق کشیدن هوا (از منافذ ورق پلاستیکی) ورق گرمادهی روی قالب می‌نشیند و به شکل آن درمی‌آید. ایجاد خلأ، به‌ویژه برای قطعات دارای طول بلند و عمیق، در ایجاد ضخامت یکنواخت مهم است. در نهایت، قطعه از قالب خارج می‌شود و پس از جداسازی زائده‌ها به شکل محصول نهایی درمی‌آید. شکل ۱ مراحل مختلف این فرایند را نشان می‌دهد.

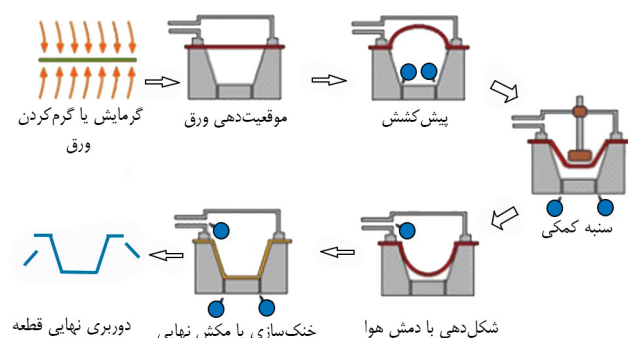
به‌طور کلی، گرمایش دهی با دو روش ابتدایی و پیشرفته انجام می‌شود. در گروه روش‌های ابتدایی و پایه‌ای قطعه گرمادهی در یک عملیات تک‌مرحله‌ای شکل داده می‌شود. اما در گروه روش‌های پیشرفته، صفحه گرمادهی شده پیش از شکل دهی تحت کشش قرار می‌گیرد. معمول‌ترین موادی که در این فرایند استفاده می‌شوند، پلی‌وینیل کلرید (PVC)، پلی‌استیرن (PS) و پلی‌پروپیلن (PP) هستند. پلی‌اتیلن و پلی‌آکریلونیتریل-بوتادی-ان-استیرن (ABS) نیز در این فرایند استفاده می‌شوند. ضایعات معمول حاصل از این فرایند در دستگاه دانه‌ساز بازیافت می‌شوند و دوباره برای ساخت ورق پلاستیکی به کار گرفته می‌شوند. چون در این فرایند از فشار هوا و خلأ استفاده می‌شود، دما و فشار کمی لازم بوده و مصرف انرژی کمتر است. باید توجه داشت، ورق استفاده شده در این فرایند پیش‌تر با دستگاه اکسترودر تولید شده است. این فرایند برای ساخت محدوده گسترده‌ای از محصولات با یک روش ساده برای سینی یا اسباب‌بازی تا بدنه یا پوشش‌های فشرده کابین خلبان استفاده می‌شود. همچنین، با روش گرمایش دهی کوچک‌ترین قطعات مانند پوشش باتری ساعت و بزرگ‌ترین قطعات مانند حوض‌های باغبانی که ابعادی حدود $3 \times 5 \text{ m}^2$ دارند، را می‌توان ساخت [۲].

مزایای فرایند گرمایش دهی

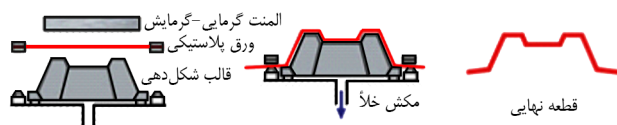
- ۱- قیمت کم تجهیزات: تجهیزات مورد نیاز در گرمایش دهی قیمت کمتری نسبت به سایر فرایندهای پلاستیک از قبیل تزریق دارند. به‌عنوان مثال، برای گرمایش دهی یک ورق، کمتر از ۱۵۰ psi فشار لازم است، در حالی که در قالب‌گیری تزریقی این مقدار به ۱۰۰۰۰ psi می‌رسد.
- ۲- قیمت کم قالب: آلومینیم فلز بسیار معمولی در تولید قالب‌های این فرایند است. فراوانی این فلز باعث قیمت کم آن می‌شود. البته قالب‌های با ظرفیت تولید کم از چوب، اپوکسی و کامپوزیت نیز ساخته می‌شود.
- ۳- زمان شروع کوتاه: قیمت کم قالب، به‌ویژه در قالب‌های چوبی و کامپوزیتی باعث تولید محصول در زمان کوتاه می‌شود. یک سازنده مدل می‌تواند قالب ساده‌ای با ظرفیت تولید کم را در زمان بسیار کوتاهی بسازد. از این رو، یک قطعه به سرعت قابل بازنگری و تولید مجدد است.
- ۴- صرفه اقتصادی برای تولید با ظرفیت کم: هرچه قیمت قالب کمتر باشد، هزینه تمام‌شده محصول کاهش می‌یابد. به‌علت قیمت کم قالب، به‌ویژه برای نمونه‌های اولیه محصول با ظرفیت تولید کم صرفه اقتصادی دارد.
- ۵- تولید قطعات با ابعاد و ضخامت مختلف: قطعات بسیار نازک مانند لیوان آب آشامیدنی یک‌بار مصرف می‌توانند تولید شوند. همچنین، قطعات بزرگ مانند محفظه‌های داخلی یخچال و فریزر نیز با این روش تولید می‌شوند [۳].

محدودیت‌های فرایند گرمایش دهی

- ۱- هزینه ورق: فرایند گرمایش دهی به‌علت تولید ورق در ابتدا، فرایند ثانویه در نظر گرفته می‌شود. هزینه‌های تولید ورق به هزینه مواد خام (ورودی) برای محصولات گرمایش دهی اضافه می‌شود.



شکل ۱- نمای کلی از فرایند گرمایش دهی [۲].



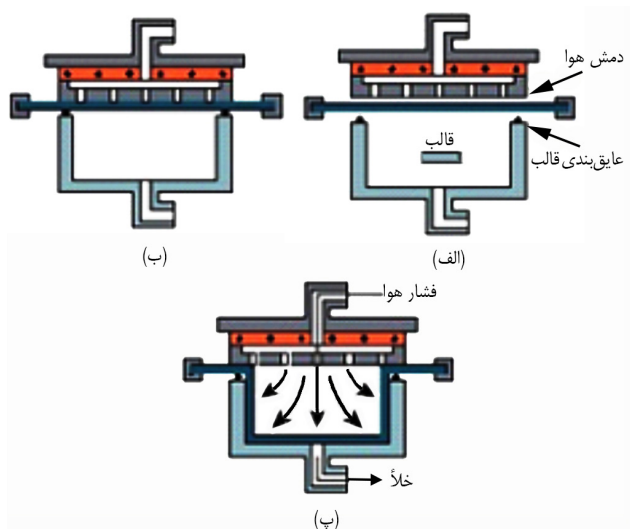
شکل ۲- نمایی از فرایند شکل دهی با خلأ [۴].

شکل دهی فشاری

در فرایند گرمایشکال دهی با فشار، ورق گرمادهی شده درون قالب با استفاده از هوای متراکم تحت فشار ۱۰۰ kPa تا ۲۰۰۰ kPa قرار می گیرد. سپس، ورق با لبه های قالب تماس پیدا می کند. فشار هوا به سمتی از ورق اعمال می شود که از قالب دور است. این فرایند باعث می شود، ورق شکل قطعه مدنظر را بگیرد (شکل ۳). اغلب، به منظور تماس بهتر ورق با قالب از خلأ اولیه استفاده می شود. گرمایشکال دهی با فشار نسبت به نوع با خلأ سرعت بیشتری دارد، چرا که ورق می تواند در دماهای کمتر شکل بگیرد. اعمال فشار هوا به جای مکش، خود باعث کنترل پذیرتر شدن فرایند می شود. زیرا در فرایند گرمایشکال دهی مکشی، حداکثر فشار رانش ماده برابر با فشار هواست. این موضوع قابل تغییر نیست، در نتیجه می توان با افزایش فشار، سرعت شکل دهی را بیشتر کرد. اما باید توجه داشت، این موضوع به مشکلاتی نظیر نایکنواخت تر شدن توزیع ضخامت یا پارگی منجر نشود [۵].

گرمایشکال دهی باخم دهی

این فرایند زمانی به کار می رود که انحنای زیاد، اما ساده مدنظر



شکل ۳- نمایی از شکل دهی فشاری: (الف) قرارگیری ورق روی قالب، (ب) عایق بندی قالب و چفت شدن ورق بر آن و (پ) دمش فشار هوا و شکل گیری قطعه نهایی [۵].

۲- هزینه مواد زائد: پس از جداسازی قطعه از ورق، تشکیل می شوند. این زائده های باقی مانده گاهی تا ۸۰٪ از وزن ورق اصلی را تشکیل می دهند. این مواد معمولاً با استفاده از روش های آسیابی و بازفرآوری احیا می شوند، که هزینه های بیشتری را به محصول می افزاید.

۳- محدودیت دمایی: گرمایشکال دهی نوعی فرایند شکل دهی است، بنابراین در طول فرایند محصول دارای حافظه است. اگر دمای قطعه به HDT آن برسد، امکان دارد که قطعه به شکل ورق بازگردد.

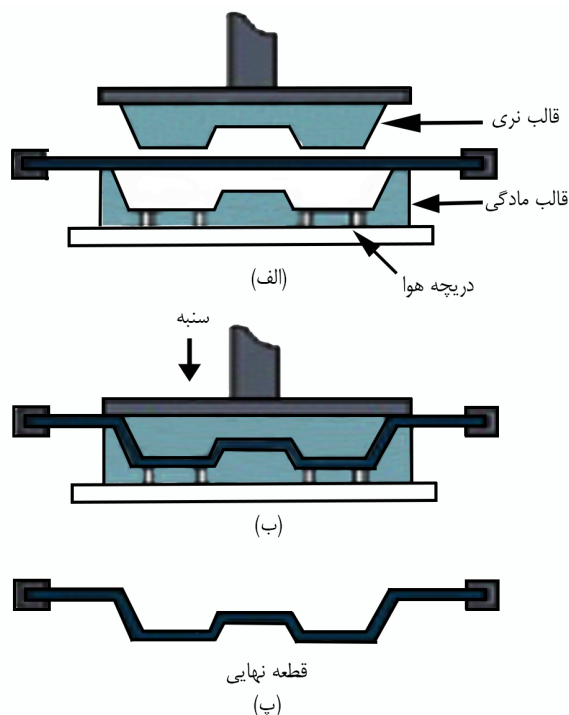
۴- برش مواد زائد: در فرایندهای پیشرفته گرمایشکال دهی این کار با کمک ربات انجام می شود که شامل هزینه های سنگین می شود. اما در نوع ابتدایی، این برش باید دستی انجام شود. زیرا هنگامی که ورق شکل نهایی می گیرد و محصول از آن خارج می شود، باید ورق باقی مانده با عملیات دستی برش داده شده و از دستگاه خارج شود تا وزن اضافه آن باعث کاهش کیفیت محصول نشود.

انواع فرایند گرمایشکال دهی

همان طور که پیش تر گفته شد، فرایند گرمایشکال دهی در کل به دو روش ابتدایی و پیشرفته انجام می شود. در گروه روش های ابتدایی و پایه ای قطعه گرمادهی در عملیات تک مرحله ای شکل داده می شود. اما در گروه روش های پیشرفته، صفحه گرمادهی شده پیش از شکل دهی تحت کشش قرار می گیرد. در اینجا ابتدا روش های ابتدایی و سپس پیشرفته شرح داده می شوند.

شکل دهی با خلأ

این روش، از معمول ترین و ارزان ترین روش های گرمایشکال دهی است. خلأ، هوای بین ورق و قالب را حذف می کند و صفحه را به سمت قالب ماده می کشاند. در واقع، خلأ از زیر صفحه و از راه کانال هایی که بدین منظور در قالب تعبیه شده، اعمال می شود و آن را به سمت قالب می کشاند (شکل ۲). در این روش، قالب به صورت مادگی است که بیشتر برای قطعات ساده با عمق کم به کار می رود. از مثال های کاربردی این روش، می توان ظروف یک بار مصرف کم عمق را نام برد. قطعه تولید شده با روش خلأ دارای کف نازک و دیواره ضخیم تر است. چرا که هنگام شکل دهی، ابتدا قسمت هایی از ماده گرم تر با دیواره قالب برخورد می کنند و سرد می شوند. سایر این نواحی تحت کرنش بزرگی قرار نمی گیرند، در نتیجه به منظور کامل شدن شکل ظرف، کف قطعه نازک تر می شود. این روش به علت آسانی انجام، پرکاربردترین روش گرمایشکال دهی است [۴].



شکل ۴- (الف) قرارگیری ورقه بین دو قالب نری و مادگی، (ب) منطبق شدن قالب‌ها بر هم و گرمادهی ورق و (پ) شکل‌گیری قطعه نهایی [۵].

خلاً مستقیم و شکل‌دهی با فشار با هم ترکیب می‌شوند. با این روش، می‌توان قطعات نهایی با توزیع خوبی از ماده به‌دست آورد و قطعه را به‌راحتی از قالب جدا کرد. ورقه گرمادهی روی یک قالب ماده محکم می‌شود. وقتی نیروی سمبه ورق را به سمت حفره قالب فشار می‌دهد، هوای زیر ورق متراکم می‌شود، اما به قالب نمی‌چسبد. در نزدیکی کف قالب سمبه متوقف می‌شود. به‌علت اینکه سمبه با اطراف قالب تماس ندارد، ورق به‌طور یکنواخت‌تری تحت کشش قرار می‌گیرد. سپس، خلاً ورق را در تماس مستقیم با قالب قرار می‌دهد و قطعه شکل می‌گیرد. در این مرحله، سمبه حذف می‌شود.

در این روش، می‌توان از فشار به جای خلاً نیز استفاده کرد. پس از اینکه سمبه ورق را به سمت قالب می‌راند، فشار از سمت سمبه باعث می‌شود که ورقه در اطراف آن موج‌دار شود و با قالب تماس پیدا کند. با این روش، امکان ایجاد کشش عمیق‌تر با دوره زمانی کوتاه‌تر و کنترل راحت‌تر ضخامت دیواره وجود دارد، اما نیازمند کنترل دقیق‌تر دما نسبت به شکل‌دهی با خلاً است. سرعت حرکت سمبه و عمق حرکت آن بر نحوه توزیع ضخامت قطعه اثر بسزایی دارد. در حقیقت، پیش‌کشش اولیه با سمبه بیشتر بر دیواره قطعه اثرگذار است و تا انتهای حرکت سمبه کف ظرف بدون تغییر ناچیز

باشد، مانند صفحه‌های تبلیغاتی که باید به‌شکل استوانه باشند. این فرایند مشابه گرمایش دهی با خلاً است، با این تفاوت که پس از مرحله گرمادهی، ورق با گیره‌ها کشیده می‌شود، روی یک قالب نر قرار می‌گیرد و خلاً برقرار می‌شود. قالب نر در مقایسه با قالب ماده ارزان‌تر بوده و ساخت آن ساده‌تر است، اما زودتر خراب می‌شود. در اینجا ضخامت یکنواخت‌تر است. قطعاتی که با این روش تولید می‌شوند، دارای چند ویژگی خاص هستند:

- واضح‌ترین جزئیات در بیرون قطعه ایجاد می‌شوند.
- قطعه تولیدشده در نواحی که ورق با بیشترین سطح قالب در تماس است با ضخامتی مشابه با ضخامت ورق اصلی (فرایند نشده) جامد می‌شود.

در حین تولید با این روش، چون ماده روی قالب کشیده می‌شود و به‌طور مستقیم در برابر جریان هوا قرار دارد، باید از دمیدن جریان‌های شدید هوا به قالب جلوگیری شود، تا به سرد شدن موضعی محصول و کج شدن آن منجر نشود.

شکل‌دهی با قالب‌های منطبق بر هم

این روش با سایر روش‌ها کمی تفاوت دارد، به‌طوری که از هیچ‌گونه فشار هوا یا مکش با قدرت زیاد مانند آنچه در سایر روش‌ها به‌کار می‌رود، استفاده نمی‌شود. ولی از دو قالب مشابه که کاملاً بر هم منطبق می‌شوند، برای شکل‌دهی استفاده می‌شود. ورق نرم‌شده بین دو قالب تحت فشار شکل داده می‌شود. وقتی نیمه‌های قالب به ورقه‌های انعطاف‌پذیر نزدیک می‌شود، با خروج هوا از منافذ قالب، قطعه نهایی شکل می‌گیرد (شکل ۴). شکل‌دهی با قالب‌های منطبق بر هم گزینه خوبی برای کاربردهای نیازمند تولید دقیق با جزئیات قالب است. بدیهی است، این روش به ساخت یک جفت قالب نری و مادگی کاملاً بر هم منطبق نیاز دارد. از این رو، هزینه قالب نسبت به سایر روش‌ها بیشتر بوده، ولی یکنواختی توزیع ضخامت در قطعه نهایی عالی است. از مزایای این روش آن است که نیازی به گرم کردن پلیمر تا دمای گرم کردن سایر روش‌ها نیست. زیرا اعمال نیروی بیشتر، به قالب بالایی ساده‌تر است. همچنین، گرم کردن بیش از حد به شکم‌دادن ورق منجر شده که هنگام بسته‌شدن قالب‌ها مشکل‌ساز می‌شود. به‌منظور جلوگیری از سرد شدن سریع ورق بهتر است که دمای اولیه قالب بیش از دمای محیط باشد. در این صورت، پس از شکل‌دهی ورق به‌منظور کاهش زمان سرد شدن محصول، می‌توان از کانال‌های آب سرد در قالب استفاده کرد.

شکل‌دهی با سمبه کمکی

در این روش تعداد زیادی از ویژگی‌های خوب شکل‌دهی با اعمال

می‌ماند. اما پس از توقف حرکت سمبه، بیشتر تغییر شکل‌ها در کف ظرف رخ می‌دهد. اینکار به توزیع یکنواخت‌تر ضخامت ماده منجر می‌شود [۵].

با استفاده از سمبه‌های کمکی می‌توان کمبود کشش عمیق را جبران کرد. سمبه کمکی برای کشش عمیق و جاهایی استفاده می‌شود که توزیع جریان مواد نیاز به اصلاح داشته باشد. چنانچه دمای سمبه کمتر از مقدار پیش‌گفته باشد، باعث ایجاد خال و لکه روی محصول می‌شود. پارامترهای دیگری از جمله حجم، زاویه و عمق حرکت سمبه نیز بر توزیع ضخامت دیواره اثرگذار است. انتخاب مقدار مناسب این پارامترها یکی از عوامل مهم طراحی است. شکل ۵ این روش را به تصویر کشیده است [۶].

شکل‌دهی آزاد

در این روش، از خلأ و فشار برای تولید قطعات بدون قالب استفاده می‌شود. این روش برای کاربردهایی که نیازمند شفافیت یا کارایی نوری هستند، مثل پنجره‌ها یا نورگیرها مناسب است. در حقیقت، به علت اینکه ورقه قالب را لمس نمی‌کند، کارایی نوری آن مشابه با ورقه اصلی است و سطح نهایی هیچ‌گونه عیبی ندارد. در این روش، ورقه گرمادیده با فشار هوا درون یک حباب دمیده شده یا به کمک خلأ درون یک حفره کشیده می‌شود. سپس حباب شکل گرفته، با فشار یا خلأ تا زمان سردشدن، نگه داشته می‌شود. در شکل‌دهی آزاد، از فشار هوایی در حدود $2/6 \text{ MPa}$ استفاده می‌شود. این فشار

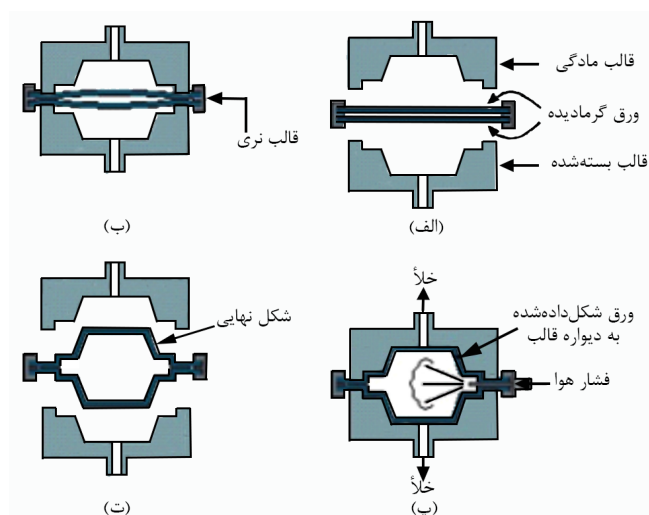
تا سردشدن نهایی پلیمر نگه‌داشته می‌شود [۶].

شکل‌دهی بازگیرشی

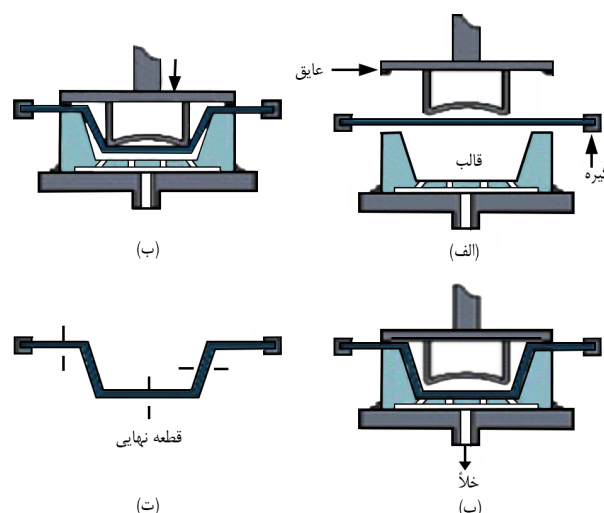
در روش شکل‌دهی بازگیرشی (snap-back) ورقه گرمادیده از پشت به قالب نر می‌چسبد. ورقه گرم‌شده به محفظه خلأ متصل و سپس خلأ اعمال می‌شود. این عمل باعث کشیده‌شدن ورقه پیش از قالب‌گیری می‌شود. پس از اینکه ورقه در خلاف جهت قالب دچار کشش می‌شود، جریان خلأ از محفظه قطع شده و ورقه در اثر خلأ اعمال‌شده از سمت قالب به قالب می‌چسبد. در این مرحله، جریان‌های خنک‌کننده فعال شده و تا زمان سردشدن کامل قطعه خلأ برقرار می‌شوند. براساس رفتار جریان، این روش اغلب برای شکل‌دهی پلیمر ABS استفاده می‌شود. از این رو، امروزه شکل‌دهی بازگیرشی به‌طور گسترده برای تولید بدنه‌های داخلی یخچال‌ها به کار می‌رود که از جنس ABS هستند [۷].

شکل‌دهی ورق دولایه

شکل‌دهی ورق‌های دوتایی اساساً برای تولید قطعاتی به کار می‌رود که نیاز به سختی و استحکام زیاد دارند. همچنین، روش مزبور برای تولید قطعات دودیواره مناسب است. در برخی کاربردها، شکل‌دهی ورق‌های دوتایی جایگزینی برای قالب‌گیری بادی به‌شمار می‌رود. این فرایند ساده در شکل ۶ نشان داده شده است. با این حال، تولید قطعات یک شکل نیازمند تجهیزات بسیار دقیق است. در این روش،



شکل ۶- (الف) قرارگیری ورق دولایه گرمادیده بین دو قالب نری و مادگی، (ب) بسته‌شدن قالب و عایق‌بندی آن، (پ) دمش فشار هوا از جهت افقی قالب و ایجاد خلأ از جهت عمودی و (ت) شکل‌گیری قطعه نهایی [۷].



شکل ۵- (الف) قرارگیری ورق بین قالب و سمبه کمکی، (ب) هدایت ورق به سمت قالب با سمبه، (پ) تماس کامل ورق با قالب و حداکثر فشار سمبه (ایجاد خلأ یا فشار از انتهای قالب) و (ت) شکل‌گیری قطعه نهایی [۶].

از آکریلونیتریل-بوتادی-ان-استیرن و پلی استیرن انبساطی استفاده می‌شود. گرمایش دهی به علت مزیت‌های زیادی از جمله مقرون به صرفه بودن هزینه قالب، امکان استفاده از گستره وسیعی از مواد برای ساخت قالب، امکان تولید قطعات چندلایه با ضخامت‌های متفاوت و چرخه سریع شکل دهی که در اختیار تولیدکنندگان قرار می‌دهد، برای ساخت بدنه و پوشش داخلی یخچال انتخاب مناسبی است. یادآور می‌شود، در این روش برای شکل دهی قطعات بزرگ، بیشتر از شکل دهی با خلأ استفاده می‌شود، اگرچه امکان دارد که ترکیبی از فشار هوا و خلأ یا به طور مستقیم فشار هوا در این روش استفاده شود.

بررسی فرایند گرمایش دهی برای تولید بدنه و پوشش داخلی یخچال

روش گرمایش دهی با سمبه کمکی یا بازگیری برای تولید قطعات عمیق با مساحت زیاد مانند بدنه یخچال کاربرد دارد. فرایند گرمایش دهی بازگیری روش گسترده‌ای برای تولید بدنه و پوشش‌های داخلی یخچال است. با این روش، افزون بر دقت ابعادی لازم برای قرار گرفتن درست قفسه‌ها و کشوها، کیفیت سطح عالی نیز باید به دست آید. بدین علت، خط تولیدهای خودکار گرمایش دهی برای ساخت ورق و شکل دهی استفاده می‌شوند (شکل ۷). این کار به دلایل مختلف انجام می‌پذیرد، اما علت اصلی آن مربوط به شکم دادن ورق است [۸]. مواد حین گرم شدن به آرامی منبسط می‌شوند که این انبساط را اصطلاحاً شکم دادن ورق گویند. شکم دادن به مشکلات زیر منجر می‌شود:

- ممکن است باعث پارگی ورق شود.
- امکان دارد ورق به قالب بچسبد.



شکل ۷- دستگاه گرمایش دهی خودکار تولید بدنه یخچال [۸].

دو ورقه پلاستیک گرم شده و به طور جداگانه در چارچوب‌هایی با گیره محکم می‌شوند. از دو قالب ماده استفاده می‌شود. ورقه‌های گرمادیده میان دو نیم قالب ماده بالایی و پایینی قرار داده می‌شوند. سپس، نیمه‌های قالب به هم نزدیک شده و یک جریان خلأ از قسمت بیرونی قالب‌ها اعمال می‌شود. به طور هم‌زمان با آن بین دو قطعه هوا وارد می‌شود تا ورقه‌ها به سمت قالب‌ها حرکت کنند و شکل آن‌ها را به خود گیرند. این عمل به خنک‌سازی آن‌ها نیز کمک می‌کند [۷].

پیشرفت‌های اخیر در ماشین آلات گرمایش دهی

در برخی کاربردها و ساخت محصولات، قالب‌های تزریق پلاستیک (یا قالب‌های دمشی) با قالب‌های گرمایش دهی رقابت می‌کنند و در نهایت باید یک فرایند از میان آن‌ها انتخاب شود. صرف نظر از عواملی مانند تبلیغات و بازاریابی، محصول تولیدی با هر فرایند، زمانی بازار موفق می‌یابد که نسبت به سایر فرایندها، محصولی مقرون به صرفه‌تر تولید کند یا اینکه محصول تولیدی آن نسبت به سایر فرایندها با کیفیت‌تر باشد. بنابراین، دو عامل کیفیت و هزینه تعیین‌کننده انتخاب روش مناسب برای تولید یک محصول در فرایندهای مشابه است. اما هنگامی که فناوری بسته‌بندی مطرح می‌شود، فرایند گرمایش دهی بی‌رقیب است. مهم‌ترین مزیت این فرایند مقرون به صرفه بودن ابزار و ماشین‌آلات آن نسبت به روش قالب‌گیری تزریقی و مشابه آن است. البته روش گرمایش دهی تنها محدود به صنایع بسته‌بندی نمی‌شود و در طیف گسترده‌ای از صنایع مختلف نظیر قایق‌سازی، رایانه، خودروسازی، تزئینات داخلی و لوازم خانگی کاربرد دارد. در ادامه به معرفی برخی از کاربردهای گرمایش دهی (به جز صنایع بسته‌بندی) و نیز در بخش بعدی دستگاه‌های جدید این فرایند پرداخته شده است.

ساخت بدنه و پوشش داخلی یخچال با استفاده از گرمایش دهی

یخچال خانگی در زمره کالاهای مصرفی بادوام طبقه‌بندی می‌شود. این کالا به دلایل مختلف، کالای ضروری برای خانواده‌ها، به‌ویژه در مناطق گرمسیر، به‌شمار می‌رود. امروزه در سرتاسر جهان به‌طور انحصاری برای ساخت بدنه یخچال‌ها و پوشش داخلی آن‌ها از پلاستیک استفاده می‌شود. استفاده از پلاستیک، افزون بر کاهش وزن و هزینه مزایای بسیار زیاد دیگری از جمله افزایش ضربه‌پذیری بدنه، عدم نشت گازهای خنک‌کن و عایق شدن بدنه را برای تولیدکنندگان به ارمغان آورده است. برای ساخت بدنه و پوشش‌های داخلی یخچال‌ها، به‌طور عمده

- نایکناختی زیاد در ضخامت ورق مشاهده شود.

به طور کلی، برای اینکه توزیع ضخامت در دیواره‌های بدنه یخچال مناسب باشد، از فشار هوا و مکش استفاده می‌شود. به منظور انعطاف پذیری بیشتر هنگام تولید، این گونه فرایندهای پیچیده طراحی می‌شود. برای ساخت بدنه‌ای بادوام و کیفیت زیاد باید دقت داشت تا فرایند مرحله به مرحله با سرعت و دقت انجام شود.

نشان داده شده است، توزیع یکنواخت ضخامت در قطعه تولیدی از مسائل مهمی است که با بهینه کردن دما می‌توان به آن دست یافت [۹]. طولانی‌ترین مرحله فرایند، گرم کردن ورق است و بیشترین خطاهای انسانی و مربوط به ماده اولیه در این مرحله رخ می‌دهد. برای تولید چنین محصولی از گرم‌کن‌های تابشی و المنت‌های گرمایی استفاده می‌شود. گرم کردن با این روش، موجب صرفه‌جویی بسیار در زمان می‌شود. تولیدکنندگان معمولاً ترجیح می‌دهند تا از این گرم‌کن‌ها استفاده کنند، زیرا می‌توانند چرخه کوتاه‌تری داشته باشند. برای این که ورق به درستی روی قالب قرار گیرد، از سامانه حمل و نقل خودکار و دقیق باید استفاده شود. زیرا عدم دقت در این مرحله باعث می‌شود تا سطح قطعه پرداخت خوبی نداشته باشد یا توزیع ضخامت در بدنه محصول یکنواخت نباشد. ورق پس از تماس با قالب باید سریعاً به طور یکنواخت کشیده شود، چرا که ممکن است تنش‌های پسماند زیادی در قسمت‌های نازک قطعه ایجاد شود. لازم به ذکر است، پوشش داخلی گرمایش یافته که بدنه یخچال را تشکیل می‌دهد، تنها بخشی از قسمت مونتاژ تولید یک یخچال خانگی است. چگالنده، کمپرسور و لوله‌کشی‌های داخل یخچال خود اجزایی هستند که به طور یک پارچه و جدا تولید و سپس روی بدنه مونتاژ می‌شوند. در کل، فاصله پوشش داخلی و بدنه را اسفنج پلی‌یورتان پر می‌کند. اگر در هنگام عملیات گرمایش دهی و تولید بدنه و پوشش داخلی یخچال کوچک‌ترین اشتباهی رخ دهد، کل کار گروه مونتاژ باید دوباره از ابتدا انجام و بررسی شود. زیرا، اشتباه رخ داده در فرایند به سرعت پس از گرمایش دهی مشخص نمی‌شود، بلکه نقص قطعه تولیدی در زمان مونتاژ معلوم می‌شود. از این رو، کنترل کیفیت قطعات گرمایش یافته اهمیت دو چندان دارد. بدین منظور در خط تولیدهای پیشرفته عملیات پس از تولید انجام می‌پذیرد. بدین صورت که بین ۳ تا ۴ روز پس از تولید قطعه و قبولی در آزمون مونتاژ آن را در انبار نگهداری می‌کنند. سپس، دوباره نواحی مختلف آن را از نظر خواص و عدم وجود نقص بازرسی می‌کنند. به عنوان مثال، ممکن است پس از گذشت ۴ روز یخچال یا فریزر تولیدی در بخش عقبی بدنه دچار شکاف و ترک شود. در این صورت، این اتفاق مشخصه نقص در بدنه یخچال

است و بازرسی و عیب‌یابی فرایند ضروری است. این نقص ممکن است چند علت داشته باشد که به عمده آن‌ها در زیر اشاره می‌شود:

- سطح تنش پسماند در مواد (بستگی به عوامل محیطی در تولید و طراحی آن دارد)،

- خواص مواد (اندازه ذرات لاستیکی، کمیت آن‌ها و مقدار پلاستیک موجود) و

- شرایط فرایند گرمایش دهی (دما، سرعت کشش و خلا).
بنابراین، وجود یک سامانه خودکار برای ساخت بدنه یخچال ضروری به نظر می‌رسد.

مواد مصرفی در تولید بدنه و پوشش داخلی یخچال

به طور کلی، پلی‌استیرن و کوپلیمرهای آن به علت برخورداری از خواصی مانند استحکام کششی زیاد، شفافیت نوری و کم بودن هزینه ساخت آن‌ها در دنیای پیشرفته امروزی کاربرد زیادی یافته‌اند. اما این پلیمر در شرایط کاربری عادی شکننده است. انواع عمومی پلی‌استیرن پس از اکستروژن شدن به فیلم به راحتی نمی‌توانند جدا شوند. بنابراین، گزینه مناسبی برای فرایند گرمایش دهی نیستند. اصلاح خواص این ماده با استفاده از لاستیک، بازارهای زیاد و غیرقابل رقابتی را برای نوع معمولی پلی‌استیرن به وجود آورده است [۱۰].

نوع تجاری پلی‌استیرن بسیار ضربه‌پذیر (HIPS) از پلیمر شدن یک لاستیک غیراشباع، که معمولاً پلی‌بوتادی‌ان است، در محلول مونومر استیرن طی یک فرایند تعلیقی به دست می‌آید. پلی‌بوتادی‌ان به علت دارا بودن پیوند دوگانه کربن-کربن، قابلیت پلیمر شدن دارد. بنابراین، اتفاقی که در ظرف واکنش می‌افتد، تشکیل یک کوپلیمر پیوندی است. نکته قابل توجه در این است که هوموپلیمرهای پلی‌استیرن و پلی‌بوتادی‌ان امتزاج‌ناپذیرند. از این رو، شاخه‌های پلی‌استیرن تا حد امکان جدایی فاز ایجاد می‌کنند و تشکیل شکل‌شناسی ماتریس قطره می‌دهند. بدین علت است که پلی‌بوتادی‌ان در سرتاسر ماتریس پلی‌استیرن به شکل ذرات گسسته پراکنده است و در عمل به فاز پلی‌استیرن گره می‌خورند. بنابراین، هنگامی که به این پلیمر ضربه‌ای وارد می‌شود، ذرات لاستیک انرژی آن را جذب می‌کنند و باعث می‌شوند تا این پلیمر از نظر ضربه‌پذیری نسبت به نوع معمولی آن بهتر باشد.

در مصارف تجاری اندازه ذرات و پراکنش آن‌ها به طور عمده با سرعت برش در طول فرایند و پس از وارونگی فاز به وسیله گرانروی نسبی فازهای پیوسته و لاستیک و همچنین کشش سطحی فازها، قابل کنترل است. در غیر این صورت، پدیده وارونگی فاز اتفاق نمی‌افتد و محصول تولیدی تقریباً به یک شبکه درهم نفوذکننده از

چندلایه ABS/PMMA باعث صرفه جویی در هزینه ها می شود. این ورق های چندلایه که در بازار با افزایش تقاضا در صنعت خودرو روبرو هستند، تا دهه ۹۰ میلادی در بخش های عمده کاروان و به طور خاص داشبورد و بخش جلویی، از پلاستیک های تقویت شده با الیاف شیشه (GRP) استفاده می شده است. هزینه تولید بخش های ساخته شده از GRP، بسیار زیاد است، زیرا ساخت آن ها نمی توانست به طور کامل خودکار باشد. همچنین، برای رعایت نکات ایمنی و سلامتی باید در محیط کار سامانه های تهویه هوا با فیلترهای بسیار کارآمد تعبیه می شد. افزون بر این چالش ها، مسئله زمان تولید نیز مطرح بود که مجموعه این عوامل باعث افزایش هزینه ها شده بود [۹].

از این رو، تقاضا برای موادی افزایش یافت که بتوان با آن ها هم به ریزه کاری های داشبورد پرداخت و هم هزینه تولید آن کمتر باشد. پس از مدتی تولیدکنندگان به ورق های چندلایه گرمانرم برای ساخت دیواره های جلویی و عقبی ماشین کاروان روی آوردند (شکل ۸). این دیواره ها قطعات گرمایشی یافته هستند. در طول این فرایند، قطعات گرمایشی یافته با یک قاب نگه داشته می شوند و با سایر مواد از جمله چسب به بدنه ماشین مهر و موم می شوند [۱۱].

گرمایشی دهی ورق های تقویت شده با الیاف، پرکننده ها و نانوذرات [۱۲] و همچنین شبکه ای کردن جزئی آن ها با تابش های الکترونی به سبب سفتی مذاب از موضوع های جذاب و کاربردی است. گرچه پژوهش هایی در این زمینه انجام شده [۱۵-۱۳]، اما همچنان نیازمند مطالعات بیشتری است. در پژوهشی [۱۶] با بررسی اثر پرکننده کلسیم کربنات بر پلی پروپیلن نشان داده شد، افزودن کلسیم کربنات تا ۲۰ wt% مقاومت در برابر خمیدگی را بهبود می بخشد و قابلیت گرمایشی دهی آن را افزایش می دهد.



شکل ۸- کاروان تولیدی با ورق های گرمانرم [۱۷].

لاستیک شبکه ای شده به همراه پلی استیرن تبدیل می شود.

آکریلونیتریل بوتادی ان استیرن (ABS) صرف نظر از روش ساخت، با تغییر ترکیب درصد اجزا به خواص متفاوت می توان دست یافت. به عنوان مثال استیرن خواص مطلوبی ندارد، اما ویژگی آن ارزانی و فرایندپذیری مطلوب است. بوتادی ان خاصیت لاستیکی دارد و به محصول خاصیت ضربه پذیری می بخشد. همچنین، با افزایش ترکیب درصد آکریلونیتریل مقاومت گرمایی و استحکام افزایش می یابند، اما فرایند آن سخت تر و محصول گران تر می شود. به طور خلاصه استحکام، سختی و سایر خواص مکانیکی این پلیمر، با تغییر این نسبت ها قابل اصلاح است. ABS با اینکه مقاومت گرمایی و شیمیایی نسبتاً کمی دارد، اما راحتی ساخت و اتصال آسان و همچنین قیمت کم آن نسبت به آمیخته های پلیمری استفاده شده، این پلیمر را به ماده بسیار مهمی در صنعت تبدیل کرده است.

ویژگی بسیار مهم دیگر این پلیمر، درصد انقباض کم آن است. تمام پلاستیک ها هنگام تبدیل از حالت مذاب به جامد جمع می شوند و با افزایش درصد بلورینگی ماده، درصد انقباض به دلیل متراکم شدن زنجیرها افزایش می یابد. ABS پلیمری بی شکل است و به دلیل شکل شناسی پیچیده (ترکیب سه ماده) درصد انقباض کمی دارد. مزیت آن هماهنگ بودن اندازه قطعه و قالب است که در قطعات پیچیده و حساس مانند بدنه یخچال بسیار مناسب به نظر می رسد. از آنجا که گرمایشی دهی ورق ها در ناحیه لاستیکی انجام می شود، بیشتر از گرمانرم های بی شکل استفاده می شود که از ناحیه گسترده لاستیکی برخوردارند.

کاربرد گرمایشی دهی در ساخت خودرو و وسایل نقلیه

امروزه برای تولید خودروهای کوچک، فرایند گرمایشی دهی به عنوان گزینه خوبی مطرح شده است. این روش برای بدنه ماشین هایی مانند کاروان یا بازسازی وسایل نقلیه و خودرو کاربرد دارد. از ورق های چندلایه ABS/PMMA نیز به طور ویژه استفاده می شود. در اینجا محصول تولیدی فرایند گرمایشی دهی برخلاف پلاستیک های تقویت شده با الیاف شیشه، می تواند اقتصادی تر و با محیط زیست سازگارتر باشد. برخی از فرایندهای تولیدی روزآمد نیستند، در بعضی موارد حتی این کار پرهزینه است.

حذف یا کاهش تجهیزات پرهزینه، سبک تر کردن ماشین، کاهش مقدار ایجاد گاز کربن دی اکسید از جمله اهداف مشخص سازندگان ماشین های تفریحی و کاروان است. با در نظر گرفتن این شرایط، استفاده از فرایند گرمایشی دهی و ورق های



شکل ۱۰- دستگاه گرماسکل دهی جدید عرضه شده [۲۰].

همان طور که پیش تر اشاره شد، گرماسکل دهی به عنوان یک روش تولید، مزایای مهمی را نسبت به روش تزریق دارد که از جمله هزینه های ابزاری کمتر و زمان تولید سریع تر است. گرماسکل دهی ورق های پلاستیکی برای قطعات چند قسمتی که نیاز به سرهم بندی دارند، گزینه مناسبی است [۱۹].

معمولاً برای ساخت تجهیزات پزشکی سه روش زیر متداول تر است: - شکل دهی با خلأ که برای نمونه سازی یا قطعاتی با ضخامت کم مانند سینی های پزشکی بسیار مناسب و کارآمد است. - شکل دهی فشاری برای قطعات پیچیده، سطوح تیز و دارای بافت توصیه می شود.

- گرماسکل دهی به روش ورق های دوتایی، قطعات پلاستیکی توخالی قوی و سبک وزن تولید می کند. این روش برای تولید جعبه های ایمنی بیمارستانی بسیار مناسب است، زیرا قطعه را یک دست تولید می کند و نیاز به سرهم بندی ندارد. از دستگاه های گرماسکل دهی که به طور اختصاصی برای کاربردهای زیاد ساخته شده در سال ۲۰۱۹ رونمایی شد. این اولین مدلی است که دارای پلاکت های متحرک بالا و پایین است. در سال ۲۰۱۷ اولین دستگاه های گرماسکل دهی تمام خودکار GN معرفی شد که در سال ۲۰۱۹ با ورود مشتریان جدید، GN ۸۰۰ (شکل ۱۰) وارد بازار شد [۲۰].

نتیجه گیری

از مهم ترین روش های ساخت قطعات با ضخامت یکسان و ابعاد بزرگ گرماسکل دهی است. با توجه به هزینه کم ساخت قالب و

قطعات گرمانرم در مقایسه با گرماسخت، مزیت های خاصی دارند که به برخی از آنها می توان اشاره کرد: - هزینه کم شکل دهی قطعات به سبب خودکاری زیاد فرایند گرماسکل دهی، - عدم نیاز به رنگ آمیزی، زیرا در حال حاضر این ورق ها را می توان با استفاده از رنگ دانه ها به رنگ دلخواه به همراه پرداخت سطح عالی درآورد. - کاهش وزن ماشین، - پایداری زیست محیطی خوب، به دلیل قابلیت بازیافت قطعات، - انعطاف پذیری زیاد و در نتیجه حساسیت کمتر به آثار بیرونی مانند برف، تگرگ و غیره و - داشتن آزادی عمل سازنده برای طراحی در فرایند گرماسکل دهی.

کاربردهای پزشکی گرماسکل دهی

سبکی، ارزانی، مقاومت شیمیایی زیاد و خواص فیزیکی-مکانیکی مناسب باعث شده است تا مواد پلیمری به طور گسترده در فناوری پزشکی به کار روند و سهم صنایع پلیمری در توسعه دنیای پزشکی در سال های اخیر افزایش یابد (شکل ۹) [۱۸]. امروزه پلیمرها در ساخت وسایل پزشکی برون تنی کاربردهای بسیاری دارند. گرماسکل دهی دستگاه ها و قطعات پزشکی راهی سریع، دقیق و مقرون به صرفه برای ساخت مواد پزشکی، روکش ها، سینی ها، محوطه ها، محفظه ها و بسته بندی هاست. پزشکان، بیمارستان ها و سایر ارائه دهندگان مراقبت های بهداشتی برای انواع مختلف دستگاه های پزشکی، ابزار و تجهیزات به قطعات گرماسکل یافته نیاز دارند. مثال هایی در این باره اسکنرهای PET، دستگاه های تابش ایکس، لیزرهای پزشکی و دستگاه های CPAP برای بیماران مبتلا به آپنه خواب یا همان وقفه تنفسی در خواب است.



شکل ۹- برخی از تجهیزات پزشکی گرماسکل دهی شده [۱۹].

بلافاصله پس از تولید ورق، عملیات شکل‌دهی آن انجام شود یا اینکه ورق‌های تولیدی سرد شده و به محل دیگری برای انجام عملیات شکل‌دهی انتقال داده شوند. گرمایشی ورق‌های تقویت‌شده با الیاف، پرکننده‌ها و نانوذرات و همچنین شبکه‌ای کردن جزئی آن‌ها با تابش الکترونی به سبب سفتی مذاب از موضوع‌های جذاب و کاربردی است. گرچه پژوهش‌هایی در این زمینه انجام شده، اما همچنان نیازمند مطالعات بیشتری است.

مراجع

- Schwarzmann P. and Illig A., *Thermoforming A Practical Guide*, Hanser, Germany, 8-10, 2001.
- Mosaddegh P. and Ghobadnam M., *Practical Guide of Thermoforming Process (Persian)*, Hamrahelme, Iran, 20-23, 2017.
- Schwarzmann P. and Illig A., *Thermoforming A Practical Guide*, Hanser, Germany, 12-15, 2001.
- <https://b2n.ir/732123>, January 2019.
- Engelmann S. and Salmangg R., *Advanced Thermoforming*, John Wiley and Sons, New York, USA, 5-8, 2012.
- Himmelblau D.M. and Riggs J.B., *Basic Principles and Calculations in Chemical Engineering*, 8th ed., Prentice Hall, USA, Chapt. 2, 1963.
- Cha J., Kim M., Park D., and Go J.S., Experimental Determination of the Viscoelastic Parameters of K-BKZ Model and the Influence of Temperature Field on the Thickness Distribution of ABS Thermoforming, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **103**, 985-995, 2019.
- plastico.com/temas/Instalacion-de-termoformado
- Yang W. and Thomas S., *Advances in Polymer Processing*, Woodhead, Cambridge, Chap. 3, 2009.
- Mosaddegh P. and Ghobadnam M., *Practical Guide of Thermoforming Process (Persian)*, Hamrahelme, Iran, 32, 2017.
- Throne J.L., *Understanding Thermoforming*, Hanser, Munich, Germany, 129-151, 2008.
- Mohan T.P., and Kanny K., Thermoforming Studies of Cornstarch-Derived Biopolymer Film Filled with Nanoclays, *J. Plast. Film Sheeting*, **32**, 163-188, 2015.
- Wittmann L.M., Wolf M., and Drummer D., Influence of an Increased Fiber Filler Content on the Elongation Behavior of Filled Films in the Thermoforming Process, *Am. J. Mech. Mater. Eng.*, **3**, 25-35, 2019.
- Manas D., Ovsik M., Mizera A., Manas M., Hylova L., Bednarik M., and Stanek M., The Effect of Irradiation on Mechanical and Thermal Properties of Selected Types of Polymers, *Polymers*, **10**, 158, 2018. doi: 10.3390/polym10020158
- Behrens B., Raatz A., Hübner S., Bonk C., Böhne F., Bruns C., and Micke-Camuz M., Automated Stamp Forming of Continuous Fiber Reinforced Thermoplastics for Complex Shell Geometries, *Procedia CIRP*, **66**, 113-118, 2017.
- Mohammadian Gazaz S., Azizi H., Karrabi M., and Ghasemi I., Investigation on Properties of CaCO₃-filled Polypropylene for Thermoforming Application, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **19**, 195-201, 2006.
- Caravan Industry, <http://www.senoplast.com.mx/en/applications/automotive-vehicle-technology/caravan-industry>, Available in 3 January 2020.
- k-online.com/vis/v1/en/exhibitors/k2019.2585339, October 2019.
- Medical Device Thermoforming, <http://www.gregstrom.com/medical-device-thermoforming>, Available in 3 January 2020.
- <http://www.gnplastics.com/news.asp?ID=12>, Available in 3 January 2020.