یازدهمین کنگره ملی سراسری
فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران
11th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran
senaconf.ir

مروری بر فیلم های بسته‌بندی حاصل از پی وی سی سخت: ویژگیها، تولید و بازار

محمد امین میری[1]

[1] گروه علوم و صنایع غذایی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زابل ma.miri@uoz.ac.ir

چکیده

پلی‌وینیل کلراید (پی وی سی) جهت ترکیب اختصاصی برای کارآیی مطلوب بسیار فوق‌العاده است. تنوع خواص فیزیکی با هزینه‌ای نسبتاً کم انگیزه‌ای برای محبوبیت آن در صنعت بسته‌بندی بوده است. از بین تمام پلی‌مرهای مورد استفاده در صنعت بسته‌بندی، پی وی سی به طور گسترده تحت عنوان تطبیق‌پذیرترین و مناسب‌ترین پلی‌مر برای آمیختن سفارشی جهت ایجاد ویژگی‌های خاص محسوب می‌شود. این ماده می‌تواند برای به دست آوردن شفافیت و درخشندگی بالا یا برای رسیدن به حداکثر ماتی درآمیخته شود و می‌تواند طیف متنوعی از مواد رنگی سفارشی را به خود بگیرد. فیلم‌ها و ورق‌های PVC دارای ترکیب مناسب برای تماس با مواد غذایی و دارویی مجاز بوده، و با مقادیر کمتر از ppb10 بقایای مونومر وینیل کلراید (VCM) در دسترس هستند. در این مقاله ویژگیها، روش های تولید و بازار ورق ها و فیلم های پی وی سی سخت مورد بررسی قرار می‌گیرد.

واژه‌های کلیدی

پی وی سی، فیلم، ویژگیها، تولید

مقدمه

رزین پی وی سی هوموپلی‌مری

رزین پی وی سی تجاری یک پودر خشک با عدم قابلیت جریان‌پذیری[1] است که با پلی‌مریزاسیون مونومر وینیل کلراید تولید می‌شود. ویژگی اساسی پی وی سی، وزن مولکولی آنست که معیاری از میانگین طول زنجیره پلی‌مر و پارامتری متناسب با ویسکوزیته رزین می‌باشد. به طور کلی، رزین‌های دارای وزن مولکولی بالاتر (ویسکوزیته بیشتر) نیازمند دماهای بالاتری برای شکل‌دهی هستند و نسبت به رزین‌های دارای متوسط وزن مولکولی کمتر، فیلم یا ورقی با دماهای کژدیسی گرمایی بالاتر، مقاومت بیشتر به ضربه و استحکام بهتر ایجاد می‌نمایند. تجهیزات شکل‌دهی برای تولید فیلم و ورق جهت صنعت بسته‌بندی، نیازمند رزین‌های پی وی سی با ویسکوزیته کم تا متوسط یعنی مقدار ویسکوزیته ۱/۷۵-۲/۱۰ می‌باشند، و این خلاف مصارف لوله اکستروژن و ساختمانی است که معمولاً از رزین‌هایی با وزن مولکولی متوسط تا بالا استفاده می‌کنند.

پایداری حرارتی

تمام رزین‌های پی وی سی در جریان شکل‌دهی در معرض تجزیه حرارتی قرار می‌گیرند و باید با یک سری پایدارکننده‌های حرارتی مناسب آمیخته شوند تا تغییر رنگ آن‌ها به حداقل برسد. این پایدارکننده‌ها در زدودن رادیکال‌های آزاد که موجب ادامه یافتن تجزیه می‌شوند و نیز کلرید هیدروژن که فرآورده اصلی تجزیه است، کمک می‌کنند. مکانیسم بسیار پیچیده تجزیه دمایی توسط یک فرآیند "بازگشایی[2]"ادامه می‌یابد که به موجب آن کلریدهای آلیلی مستعد به عنوان جایگاه واکنش برای آزاد کردن کلرید هیدروژن و تشکیل سیستم‌های پیوند دوگانه عمل می‌کنند. زمانی که تعداد پیوندهای دوگانه در طول از ۶ پیوند تجاوز نماید، توسعه رنگ آغاز می‌شود و چنانچه از طریق کاربرد کافی و مناسب پایدارکننده‌های حرارتی کنترل نشود، از یک ته‌رنگ زرد بسیار مات به رنگ کهربایی و در نهایت سیاه پیش خواهد رفت. روش‌های تجاری شکل‌دهی گهگاه ماده‌ای "سوخته" تولید می‌کند که به مراحل ابتدایی تجزیه رسیده است. شناخت این مسئله ضروری است که اینگونه تجزیه حرارتی هم وابسته به زمان و هم وابسته به دماست و اگرچه پایدارکننده‌ها سرعت تجزیه را حین شکل‌دهی کند می‌نمایند، اما مانع آن نخواهند شد. همچنین پایدارکننده‌ها به محافظت از ورق یا فیلم در ادامه شکل‌دهی(مثلاً در شکل‌دهی حرارتی) و در طول عمر خود بسته‌بندی کمک می‌کنند.

آمیختن برای ویژگی‌های خاص

از بین تمام پلی‌مرهای مورد استفاده در صنعت بسته‌بندی، پی وی سی به طور گسترده تحت عنوان تطبیق‌پذیرترین و مناسب‌ترین پلی‌مر برای آمیختن سفارشی جهت ایجاد ویژگی‌های خاص محسوب می‌شود. این ماده می‌تواند برای به دست آوردن شفافیت و درخشندگی بالا یا برای رسیدن به حداکثر ماتی درآمیخته شود و می‌تواند طیف متنوعی از مواد رنگی سفارشی را به خود بگیرد. فیلم‌ها و ورق‌های PVC دارای ترکیب مناسب برای تماس با مواد غذایی و دارویی مجاز بوده، و با مقادیر کمتر از ۱۰ ppb بقایای مونومر وینیل کلراید (VCM) در دسترس هستند. نمونه‌هایی از انواع ترکیبات که می‌توان با آمیختن سفارشی تولید نمود در جدول ۱ نشان داده شده‌اند.

---

[1] - Free flowing powder
[2] - unzippering process

جدول۱- نمونه‌هایی از آمیختن سفارشی

بالاتر بودن دمای کژدیسی حرارتی برای بسته‌بندی‌های دربرگیرنده مواد داغ
فیلم قابل استریل با اکسید اتیلن (ETO) بدون رنگ‌بردگی با آب برای ابزارهای پزشکی
مقاومت ضربه‌ای بهتر در دمای پایین برای آزمون‌های سقوطی-ضربتی روی کارتن‌های مخصوص محموله
مقاومت بهتر نسبت به UV
سازگاری بهتر به هوادیدگی در فضای آزاد
آب‌بندی بیشتر (نسبت به امواج حرارتی، فرکانس‌های رادیویی و مافوق صوت)
فرمولاسیون‌های بسط‌دهنده برای بسته‌های حبابی پر شونده با ماشین
فرمولاسیون‌های مقاوم به الکتریسیته ساکن
کارآیی بهینه در لایه‌بندی شدن با دیگر مواد (PVDC، PE و غیره)
فرمولاسیون‌هایی برای فلز پوشی تحت خلأ
بهبود قابلیت چاپ
فقدان "ترک سفید" یا سفیدی توأم با چین‌خوردگی

بعد از شناخت اینچنین ویژگی‌های مطلوبی جهت مصارف خاص بسته‌بندی، آمیزه‌گر ویسکوزیته مناسبی را برای رزین برمی‌گزیند. چنانچه فیلم نیازمند مجوز برای تماس با مواد غذایی یا دارویی باشد، سطح VCM رزین باید قبل از شکل‌دهی به حدی پایین باشد که تضمین نماید فیلم حاصل تمام اقتضائات مشتری در رابطه با بقایای VCM را برآورده می‌سازد. سپس باید یک پایدارکننده حرارتی انتخاب شود. غالباً انواع مرکاپتایدهای قلع را به خاطر کارآیی بالای آن، رنگ‌پذیری عالی و سریع، ثبات نوری خوب، و شفافیت کریستالی ممتاز در فرآورده برمی‌گزینند [۱]. برخی از این پایدارکننده‌ها (انواع اکتیل قلع) برای تماس با غذا و دارو تأییدیه دارند. گزینه‌های تأییدنشده عبارتند از پایدارکننده‌های سربی که محدود به سیستم‌های مات‌کننده (برای کاهش گذر تشعشعات) می‌باشند و ترکیبات باریم، کادمیم و روی. هرچند معدودی از سیستم‌های کلسیم/ روی با کاربری محدود در بسته‌بندی مواد غذایی وجود دارند، پایدارکننده‌های قلعی در حوزه بسته‌بندی غالب هستند. اکتیل‌های قلع سیستم‌هایی هستند که کاربردی عمده در بسته‌بندی مواد غذایی و داروها دارند [۲]. همچنین پایدارکننده‌هایی وجود دارند که مقاومت بهتری نسبت به UV را ایجاد می‌نمایند. تمام پایدارکننده‌هایی که در بالا به آن‌ها اشاره شد تنها در مقادیر بسیار اندکی در PVC سخت بارگذاری می‌شوند.

در مقابل، ضربه‌گیرها ممکن است تا ۱۵ درصد وزن فرآورده را تشکیل دهند. در نتیجه، انتخاب و بارگذاری مناسب یک ضربه‌گیر تصمیمی مهم در آمیزه‌کاری است. فیلم‌های شفاف بسته‌بندی نوعاً حاوی ضربه‌گیرهای MBS هستند و این به دلیل شفافیت بهتر، ثبات حرارتی بیشتر و کارآیی بهتر در دمای اتاق می‌باشد. ضربه‌گیرهای MBS برای فرآورده‌های مات مناسب هستند و پلی‌اتیلن کلره (CPE) و آکریلیک‌ها/ترموپلاستیک‌های آکریلیک بیشتر برای مصارف فضای باز و یا محیط‌های سرد در سیستم‌های مات‌کننده استفاده می‌شوند. سپس برای ایجاد رنگ دلخواه و سفارشی می‌توان رنگدانه‌ها را اضافه کرد و معمولاً دی‌اکسید تیتانیوم با مقادیر حدود ۱۵ درصد، به منظور تأمین سطح مطلوبی از کدری به کار برده می‌شود. پرکننده‌ها را می‌توان برای کاهش هزینه در سیستم‌های مات‌کننده، و در بسیاری موارد برای بهبود خواص فیزیکی نظیر مقاومت به ضربه، سختی (مقاومت در برابر خمش) و دمای کژدیسی حرارتی به کار برد. انواع مختلفی از روان‌کننده‌های اختصاصی و کمک‌فرآیندهایی که برای تسهیل شکل‌دهی و برای ایجاد خصوصیات مطلوبی مثل لغزش، باز شدن یا بسط یافتن، و شکل‌پذیری حرارتی بهتر جهت پردازنده یا بسته‌بندی‌کننده فیلم لازمند در غلظت‌هایی بسیار کم وجود دارند. مواد ضداحتراق،

آنتی‌اکسیدان‌ها، مواد باندکننده، مواد ضد الکتریسیته ساکن، پایدارکننده‌های فسفیتی، و تعداد زیادی افزودنی‌های دیگر را می‌توان در صورت لزوم اضافه کرد. به خاطر این امکانات عظیم در آمیزه‌کاری سفارشی و تنوع فرآورده‌های حاصل از آن، جدول ۲ را باید تنها به عنوان راهنمایی کلی در مورد ویژگی‌های معمول PVC سخت در نظر گرفت.

روش‌های تولید فیلم و ورق

اکستروژن و غلتک‌زنی روش‌های اصلی تولید PVC سخت برای صنعت بسته بندی هستند. از اکستروژن برای تولید فیلم‌های دمشی بسیار نازک و نیز ورق‌های ضخیم به ضخامت تقریبی ۱ اینچ (۲/۵۴ سانتی‌متر) که توسط روش‌های ورق‌سازی-حدیده‌کاری ساخته می‌شوند مورد استفاده قرار می‌گیرد. غلتک‌زنی نیازمند سرمایه‌گذاری بلندمدت بیشتر است، اما نرخ تولید بسیار بالاتر، کنترل بهتر ضخامت (جهت عرضی و جهت ماشین) (±۵ درصد)، کیفیت ظاهری بالاتر از جمله در شفافیت، و تطبیق‌پذیری گسترده‌تر در سازگاری با تغییرات ضخامت و پهنا را باعث می‌شود. فیلم و ورق غلتک‌زنی شده معمولاً پایداری ابعادی بهتری دارند و این موجب یکنواختی شکل‌دهی حرارتی در سراسر یک محموله معین می‌شود. PVC سخت غلتک‌زنی شده در ضخامت‌های ۲-۴۵ mil (51-1143 µm)، با سطوح براق، مات یا برجسته، یا به شکل رول و یا در ورق‌هایی تا عرض تقریبی ۶۰ اینچ (۱/۵ متر) در بازار وجود دارند. غلتک‌زنی روش اصلی شکل‌دهی و شکل‌دهی فیلم‌های PVC سخت برای بسته بندی است.

جدول۲- ویژگی‌های فیزیکی معمول در PVC سخت (شفاف)

ویژگی	روش آزمون[a]	واحدها	مقادیر
چگالی نسبی[b]	D1505		۱/۳۰-۱/۳۶
تسلیم (۱/۳۰ sp gr)	D1505	in.^{2} lb (cm^2/g)	
۷/۵ mil (۰/۱۹ mm)			۲۸۵۰ (۴۰/۵)
۱۰/۰mil (۰/۲۵mm)			۲۱۳۰ (۳۰/۳)
۱۲/۰mil (۰/۳۰mm)			۱۷۸۰ (۲۵/۳)
۱۵/۰mil (۰/۳۸mm)			۱۴۲۰ (۲۰/۲)
۲۰/۰mil (۰/۵۱mm)			۱۰۷۰ (۱۵/۲)
استحکام کششی (تسلیم)	D882	psi (MPa)	۶۵۰۰-۷۸۰۰ (۴۴/۸-۵۳/۸)
مدول کششی	D882	psi (MPa)	۲/۵-۴/۰ ×۱۰^5 (۱۷۲۳-۲۷۵۷)
ازدیاد طول (شکست یا پارگی)	D882	%	۱۸۰-۲۲۰
ضربه آیزود (۰/۲۵ اینچ یا ۶/۴ میلی‌متر)	D256	ft.lbf in (J/m)	۰/۵-۲۰/۰ (۲۶/۷-۱۰۶۸)
جلا، ۲۰°	D247		۱۲۰-۱۶۰
دمای کژدیسی حرارتی (۲۶۴ psi یا ۱/۸۲ MPa)	D648	°F (°C)	۱۵۸-۱۶۹ (۷۰-۷۶)
دمای پارگی در سرما	D1790	°F (°C)	-۴۰ تا ۱۴ (-۴۰ تا -۱۰)
WVTR (٪۹۰ rh ،۳۸ °C)	DIN53122	g (100 in.^{2} /24h) [g (m^2/day)]	

۷/۵ mil (۰/۱۹ mm)			۰/۳۰ [۴/۷]
۱۰/۰ mil (۰/۲۵ mm)			۰/۲۰ [۳/۱]
مقاومت سطحی	DIN53482	Ω	$۱۰^{۹}$-$۱۰^{۱۳}$
مقاومت ویژه	DIN40634	Ω.cm	$۱۰^{۱۳}$-$۱۰^{۱۵}$
استقامت دی‌الکتریک	DIN40634	kV/mm	۶۰-۷۰
گرمای ویژه (۲۰ °C)		kJ/(kg.K)	۰/۸
رسانایی حرارتی		W/(m.K)	۰/۱۶
انبساط حرارتی خطی		K^{-1}	۷/۰-۸/۰ ×$۱۰^{۵}$
جذب مادون قرمز[c] (۳-۱۸ µm)			شدت‌های مختلف

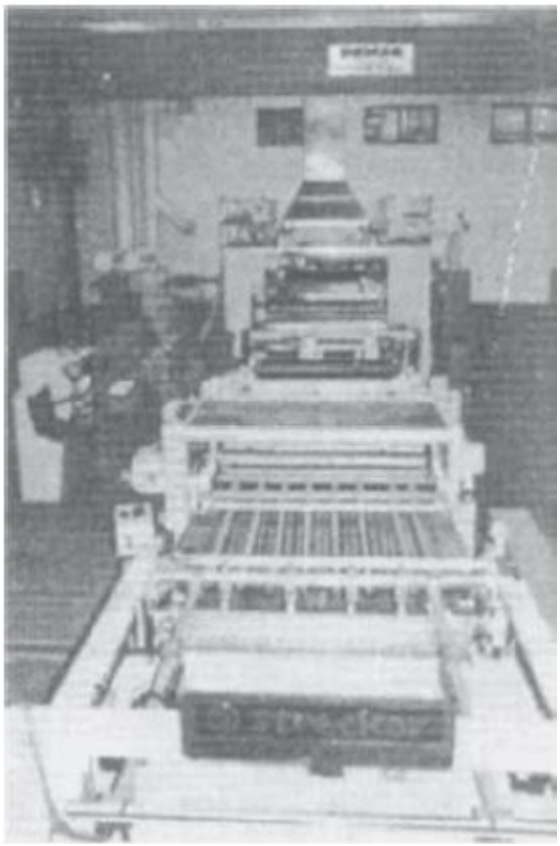
[a]Dها روش‌های آزمون ASTM و DINها روش‌های آلمانی آزمون نُرمدر صنعت می‌باشند.

[b]رابطه غیرمستقیم با اندازه ضربه‌گیر دارند. افزایش ماتی می‌تواند تا ۱/۴۰ برسد.

[c]mil ۲۰ (۵۰۸ µm) تغییر نکرده است.

غلتک‌زنی

در یک عملیات مدرن غلتک زنی PVC سخت، آمیزه‌کاری با استفاده از شاخص‌های الکترونیکی تحت کنترل کامپیوتر انجام می‌شود که مقادیر دقیقی از هر جزء را درون یک مخلوط‌کن با توان بالا که برای جذب کردن تمام مایعات به درون ذرات رزین و تأمین توزیع یکنواختی از تمام اجزای پودری طراحی شده، می‌ریزد. آمیختن معمولاً برای یک مدت زمان خاص و تا یک دمای معین انجام می‌شود. سپس آمیخته خشک-راکد و فاقد جریان‌پذیری به درون قیف تغذیه ریخته می‌شود و از آنجا به صورت مارپیچی وارد یک مخلوط‌کن مداوم نظیر یک اکسترودر یا یک مخلوط‌کن ورزدهنده می‌گردد. با رفت و برگشت مارپیچ مخلوط‌کن در حجم محدود اتاقک اختلاط، این آمیخته شروع به روان شدن یا خمیر شدن به صورت پلاستیک می‌کند. آنگاه این ماده از سیلندر اختلاط با فشار بیرون می‌آید. جریان پیوسته مزبور ممکن است به کلوچه‌های کوچکی از مواد داغ به اندازه مشت تکه‌تکه شود یا صرفاً به صورت یک طناب پیوسته باشد. سپس این ماده را می‌توان به طور مستقیم به دستگاه غلتک‌زنی منتقل کرد یا اینکه ابتدا از یک آسیاب دو غلتکی گذراند. دستگاه غلتک‌زنی یک واحد بزرگ است که معمولاً متشکل از چهار یا پنج غلتک گرم است و برای شکل‌دهی کلوچه‌های خمیری PVC به صفحاتی با عرض و ضخامت معین، طراحی شده است (شکل ۱).

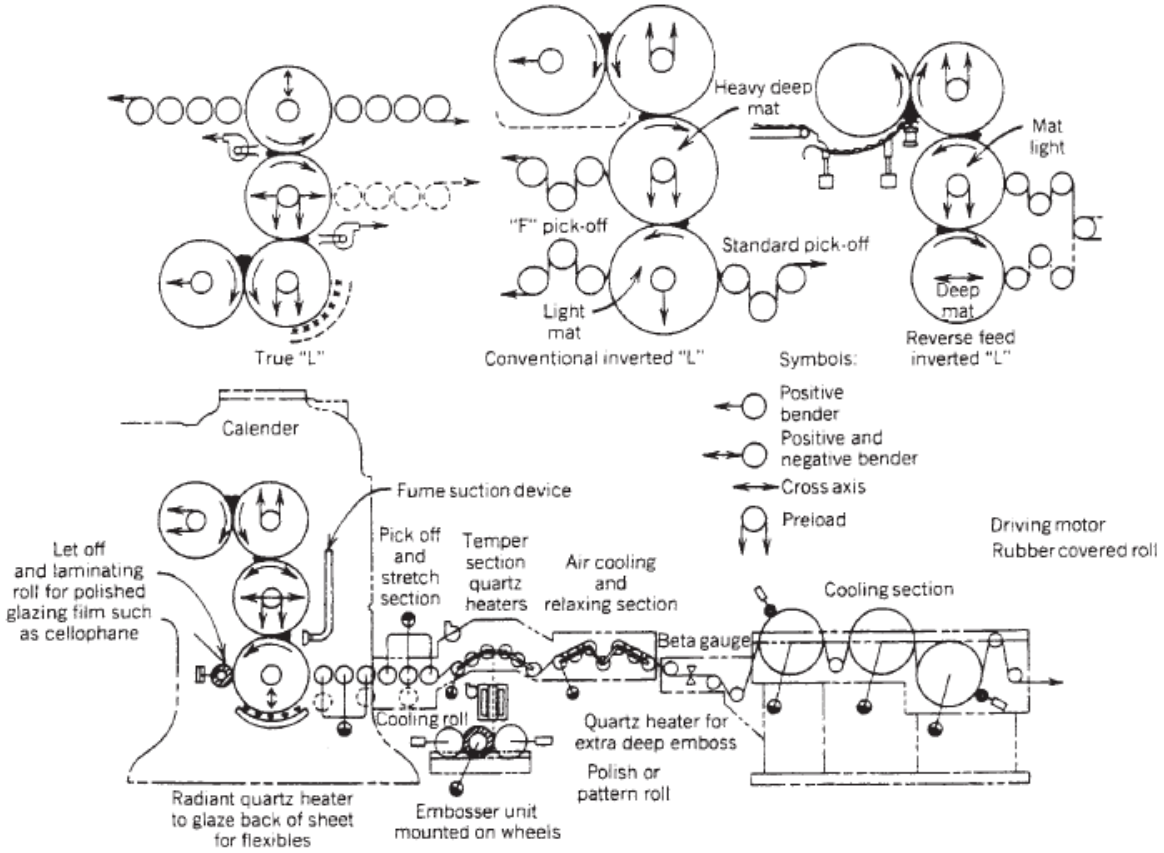


شکل۱- دستگاه غلتک‌زنی PVC

شکل ۲ آرایش‌های معمول L و L معکوس را نشان می‌دهد که به ترتیب برای تولید PVC سخت و نرم استفاده می‌شوند [۳]. غلتک‌های دستگاه غلتک‌زنی تنظیمات سرعت و دمای جداگانه و نیز قابلیت‌های خم‌کاری (رول‌بندینگ) و حرکت عرضی متفاوتی برای کنترل پروفیل در سراسر طاقه[3] دارند. بکارگیری صحیح این کنترل‌ها در کنار کنترل سرعت و کشش در سیستم انتقال قدرت، تولید ورقی بسیار تخت با حد مجاز پروفیل کمتر از ۵± درصد در عرض و پایین‌دست طاقه را ممکن می‌سازد. چنین کنترلی با پویش مستمر توسط پرتو بتا که طاقه را به طور مداوم می‌پیماید و تنظیمات دهانه گیره/منگنه (nip قسمتی از ابزار که غلتک‌ها یا گیره‌ها به هم نزدیک هستند) یا خمش نوردی (roll bending) را بررسی می‌کند، برقرار می‌شود. این پایش مداوم حین عملیات و تنظیمات دائمی پروفیل، مزیت قابل توجه غلتک‌زنی بر سایر روش‌های شکل‌دهی است. با استفاده از تکنیک‌های خاص پاشش ساینده، غلتک‌های سوم و چهارم دستگاه غلتک‌زنی ممکن است سطحی سفارشی داشته باشند تا یک فرآورده یکنواخت مات (بدون صیقل) و دو رو را ایجاد کنند. از سوی دیگر، یک یا بیش از یک ایستگاه برجسته‌کاری را می‌توان در پایین‌دست به کار گرفت تا سطحی سفارشی را در یک سو یا هر دو سوی فیلم ایجاد نماید. پس از جدا شدن از آخرین غلتک دستگاه غلتک‌زنی، مواد ضد الکتریسیته یا مواد ضد لغزنده را می‌توان روی سطح یا سطوح طاقه استفاده کرد. در نهایت، پس از بخش خنک‌کننده، طاقه در همان خط به ورق‌های نهایی برش می‌خورد یا به صورت یک رول اصلی

[3] - Web

به دور یک مغزی پیچیده می‌شود تا بعداً به صورت نوارهایی سفارشی برش بخورد. عرض متعارف نوارها با تقریب $\frac{1}{32}$ اینچ (۰/۸ میلی‌متر) روی مغزی‌های ۳ یا ۶ اینچی (۷/۶ یا ۱۵/۲ سانتی‌متری) با قطر رول ۴۰-۱۴ اینچ (۱۰۲-۳۶ سانتی‌متر) برش زده می‌شود.



شکل۲- عملیات غلتک زنی PVC

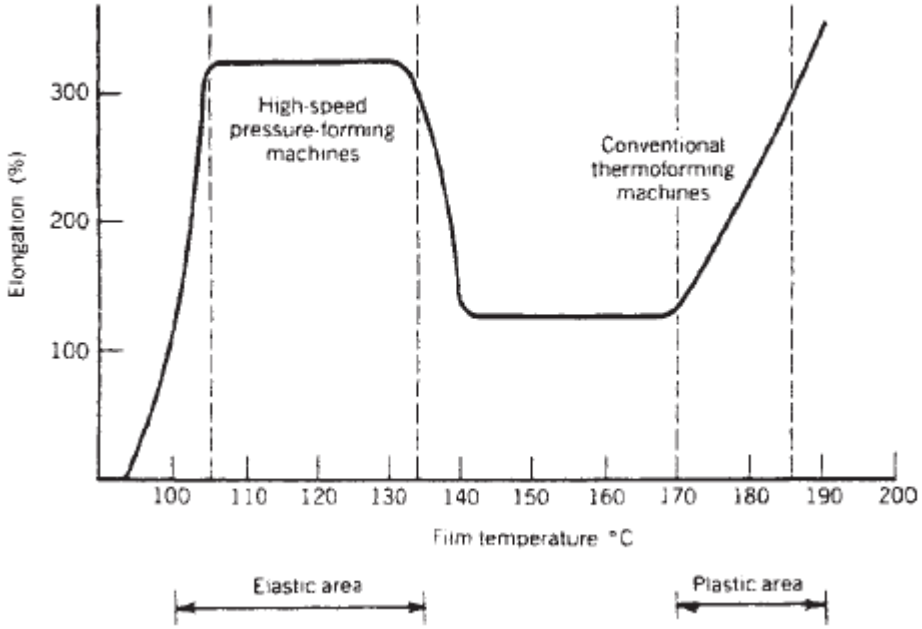
تولید بسته‌بندی با شکل‌دهی حرارتی

اغلب بسته‌بندی‌های تجاری PVC محصول شکل‌دهی حرارتی رول‌ها به بلیسترهای (بسته‌بندی‌های حبابی) سفارشی می‌باشند. در مواردی که بهبود بیشتر خواص ممانعت‌کنندگی میزان اکسیژن و رطوبت خود PVC الزامی است، مواد ممانعت‌کننده نظیر PE، PVDC یا فیلم‌های فلوروپلی‌مر در آغاز و قبل از شکل‌دهی حرارتی روی طاقه PVC روکش داده می‌شود. شرایط فرآیند شکل‌دهی حرارتی معمولاً صرفنظر از نوع روکش، توسط خود ماده PVC تحمیل می‌شود. از آنجا که PVC یک ماده بی‌شکل است، در دامنه گسترده‌ای از دماها نرم می‌شود و هیچ نقطه ذوب معینی ندارد. دو دامنه دمایی وجود دارد که PVC سخت در آن‌ها به سهولت بیشتری شکل می‌گیرد (شکل ۳). باید تأکید نمود که این دماها، دمای واقعی فیلم هستند که باید توسط ترموکوپل‌هایی که مستقیماً روی سطح فیلم قرار دارند اندازه گرفته شوند (دمای المنت‌های گرم‌کن بسیار بالاتر است).

اولین وضعیت پایا در دمای ۲۷۵-۲۲۱ °F (۱۳۵-۱۰۵ °C) مناسب‌ترین محدوده الاستیک برای اغلب ماشین‌های سریع شکل‌دهی فشاری با مکانیسم شکل دادن/پر کردن/درزبندی هستند. در این محدوده، فیلم مقاومت حرارتی کافی را برای طویل شدن یا کشش در حدود شکل قالب دارد. در فاصله بین ۲۷۵°F و۳۳۸ °F (۱۳۵ °C و ۱۷۰ °C) محدوده‌ای از طویل شدن ناکافی برای شکل‌دهی مناسب وجود دارد؛ و تلاش‌ها برای شکل‌دهی در این محدوده ممکن است منجر به سوراخ‌های دمش، پارگی‌ها و ضعیف شدن مرزبندی لبه‌ها شود. عدم توجه به این "ناکجاآباد" یکی از رایج‌ترین عوامل مشکلات شکل‌دهی حرارتی است که در این رابطه در نمایندگی‌های خدمات فنی PVC مشاهده می‌شود. طویل شدن فیلم در دمای ۳۳۸ °F (۱۷۰ °C) به سرعت افزایش می‌یابد و تا دمای حدود ۳۶۵ °F (۱۸۵ °C) شکل‌دهی به وجه عالی امکان‌پذیر است. این دامنه کارآیی بهینه برای ماشین‌های شکل‌دهی حرارتی تجاری متداول است. بالاتر از ۳۶۵ °F (۱۸۵ °C)، مواد بیش از حد شکم می‌دهند و در نتیجه صفحات مشبک، چروکیدگی، سوراخ‌ها یا یک سری نواحی نازک به وجود می‌آیند. به طور کلی، هرگاه دمای فیلم قدری بالاتر از ۳۳۸°F (۱۷۰ °C) باشد و قالب‌ها قدری خنک‌تر باشند (حدود ۶۰-۵۰ °F یا ۱۶-۱۰ °C)، و زمانی که دمای قالب سنبه‌ای حدود ۱۹۴ °C (۹۰ °F) باشد، فیلم PVC سخت بهتر با حرارت شکل می‌گیرد. در طراحی قالب باید از نسبت کشش بیش از ۱:۱ خودداری کرد و چند درجه بیشتر شدن زاویه خروج و شعاع بیشتر در کنج‌ها به ممانعت از بروز مشکلات کمک می‌کند.

جمع‌شدگی فیلم برای شکل دهی بهینه

از آنجا که انواع متفاوتی از تجهیزات در هر یک از دو محدوده شکل‌دهی مورد استفاده قرار می‌گیرند، بسیار ضروری است که تولید کننده فیلم PVC اطلاعات کاملی در مورد انقباضاتی که باید در قسمت ورودی برای هر نوع ماشین وارد شود، داشته باشد. جمع‌شدگی PVC مورد نظر برای شکل‌دهی فشاری در محدوده دماهای پایینی، باید توسط تولیدکننده در دمای ۲۸۴ °F (۱۴۰ °C) ، دمایی که تمام حافظه پلاستیک مربوط به دامنه دمایی شکل‌دهی یعنی ۲۷۵-۲۲۱ °F (۱۳۵-۱۰۵ °C) را آزاد می‌کند، کنترل شود. معمولاً بهترین نتایج با انواعی از فیلم PVC به دست می‌آید که در دمای ۲۸۴ °F (۱۴۰ °C) ۵-۲ درصد جمع‌شدگی در جهت ماشین و ۱-۰ درصد جمع‌شدگی در جهت عرضی داشته باشند. این توسعه بسیار کم در جهت عرضی برای خنثی کردن بستن چرخشی مکرر مطلوب است، که در غیر این صورت این بستن چرخشی به موازات همه خطوط جوش، از جمله انواع مورد استفاده در بسته‌بندی داروهای نسخه‌دار، رخ می‌دهد.



شکل ۳- دامنه‌های دمایی برای شکل‌دهی حرارتی PVC

در دامنه‌های دمایی بالاتر برای شکل‌دهی حرارتی معمول، جمع‌شدگی فیلم باید توسط تولیدکننده فیلم در دمای ۳۵۰ °F (۱۷۷ °C)، دمایی که تمام حافظه پلاستیک مربوط به این دامنه دمایی بالاتر شکل‌دهی را آزاد می‌سازد، کنترل شود. بهترین نتایج به طور معمول با انواع فیلم PVC دارای جمع‌شدگی ۸-۴ درصدی در جهت ماشین و جمع‌شدگی ۱- تا ۱+ درصدی در جهت عرضی در دمای ۳۵۰ °F (۱۷۷ °C) به دست می‌آید. جمع‌شدگی مفرط ممکن است باعث شود تا فیلم از زنجیره‌ها، گیره‌ها یا چارچوب خارج شود. جمع شدگی ناکافی در جهت ماشین و/یا توسعه عرضی بیش از حد ممکن است موجب نواری شدن شود. اپراتورهای ماشین‌های شکل دهی حرارتی اغلب با کاهش دماهای عملیات برای جلوگیری از شکم دادن زیاده از حد، به چنین مشکلاتی پاسخ می‌دهند، اما این کار می‌تواند موجب پیدایش سوراخ‌های دمشی و توزیع ضعیف در دیواره‌ها شود، زیرا باعث می‌شود تا فیلم از دامنه دمایی بهینه برای شکل‌دهی حرارتی خارج شود و طویل شدن به سرعت کاهش یابد. کنترل دقیق جمع‌شدگی برای شکل‌دهی حرارتی موفق در فیلم PVC سخت با همه انواع ماشین‌های شکل‌دهی اهمیتی بسزا دارد. به منظور تولید فیلم‌های دارای جمع‌شدگی مناسب برای شکل‌پذیری حرارتی بهینه در هر محدوده دمایی و با هر مدل ماشین شکل‌دهی، کنترل‌های اختصاصی فرآیند در تکنیک‌های نوین غلتک‌زنی PVC تعبیه شده‌اند.

بازار بسته‌بندی

در سال ۱۹۹۴ مصرف فیلم و ورق PVC سخت غلتک‌زنی شده در آمریکا حدود ۱۰^{۶}× ۵۲۳ پوند (۲۳۷۰۰۰ تن) بود که این ۳۰ درصد اضافی مورد استفاده برای ورق اکسترود شده را دربر نمی‌گیرد. تقریباً ۶۳ درصد از این محصولات غلتک‌زنی شده در بسته‌بندی استفاده

شد (جدول ۳). مصرف ورق و فیلم PVC سخت غلتک‌زنی شده برای بسته‌بندی در سال ۱۹۹۴ مجموعاً ۱۰۶× ۳۳۰ پوند (۱۵۰۰۰۰ تن) بود.

جدول۳- بازارهای آمریکا برای ورق‌ها و فیلم‌های غلتک‌زنی شده PVC سخت

	میزان تقاضا 10^6 پوند (10^3 تن)
بسته‌بندی (گرید FDA)	
مواد غذایی	۲۵ (۱۱/۴)
مواد دارویی	۳۰ (۱۳/۶)
ابزار و تجهیزات پزشکی	۱۰ (۴/۵)
کل بسته‌بندی (گرید FDA)	۶۵ (۲۹/۵)
بسته‌بندی (همه‌منظوره)	
شکل‌دهی حرارتی (بسته‌بندی‌های بلیستر یا حبابی، صدفی و غیره)	۲۲۵ (۱۰۲/۳)
جعبه‌ها و درپوش‌های وینیلی	۳۵ (۱۵/۹)
ورق‌های ترموفرم کنترل‌کننده الکتریسیته ساکن	۵ (۲/۳)
کل بسته‌بندی همه‌منظوره و همه‌کاره	۲۶۵ (۱۲۰/۵)
کاربردهای تخصصی و صنعتی	
چاپ و کاغذ	۹۰ (۴۰/۹)
برج تبرید و فیلم یا محیط‌های انباشت فاضلاب	۴۰ (۱۸/۲)
درخت کریسمس مصنوعی	۳۰ (۱۳/۶)
روکش‌دهی و لمینت مبلمان	۱۰ (۴/۵)
ساختمان‌سازی و کف‌سازی	۱۰ (۴/۵)
دیسک‌های فلاپی	۸ (۳/۶)
ماسک‌های مورد استفاده در لیتوگرافی	۵ (۲/۳)
کل کاربردهای تخصصی و صنعتی	۱۹۳ (۸۷/۶)
کل بسته‌بندی‌ها (۶۱/۵ درصد)	۳۳۰ (۱۵۰/۰)
کل مصارف غیر بسته‌بندی (۳۶/۵ درصد)	۱۹۳ (۸۷/۷)
کل فیلم‌ها و ورق‌های PVC سخت	۵۲۳ (۲۳۷/۷)

منبع: شرکت آمریکایی Klöckner-Pentaplast

منابع

1. A. A. Schoengood, ed., Plast. Eng. 32(3), 25 (1976).
2. M. McMurrer, ed., ‘‘Update: PVC Heat Stabilizers’’ in PlasticCompounding, Resin Publications, Cleveland, OH, 1980, pp.
83–90.
3. L. R. Samuelson, Plast. Des.Process.21(8), 14 (1981).
P. Bredereck, J. of Vinyl Technology 1(4), 218–220 (1979). Guide to Plastics, McGraw-Hill, New York, 1979, p. 27.
4. M. McMurrer, ed., Plastic Compounding 1984/85 Redbook, Vol. 7, No. 6, Resin Publication, Cleveland, OH. 1985.
5. M. McMurrer, ed., ‘‘Update—U.V. Stabilizers,’’ Plastic Compounding, Resin Publications, Cleveland, OH, 1985, pp. 40–57.
6. Thermal Stabilization of Vinyl Chloride Polymers, Technical Report 3250, Rev. 7/68, Rohm & Haas, Philadelphia, 1968.
7. L. R. Samuelson, Plastics Design and Processing 21(8), 13–15 (1981).
8. V. Struber, Theory and Practice of Vinyl Compounding, Argus Chemical Corp., New York, 1968.