

فناوری جدید در پخت نیتروژنی تایر

آزاده انجم‌شعاع

کارشناس ارشد تایر و حل مسئله در صنایع تایرسازی، کرمان

Azadeh_anjomshoa@yahoo.com

چکیده: پخت لاستیک یکی از مراحل کلیدی در فرایند تولید تایر است که بر خواص مکانیکی، دوام و کیفیت نهایی محصول تأثیر مستقیم دارد و در این فرایند، لاستیک خام از حالت ترموپلاستیک به ماده‌ای الاستومری با شبکه‌ی مولکولی پایدار تبدیل می‌شود. در روش‌های متداول، بخار آب به‌عنوان عامل انتقال حرارت درون تایر به کار می‌رود؛ اما نوسانات فشار، توزیع غیریکسان حرارت و احتمال ایجاد کندانس در بلادر، از جمله چالش‌های اساسی این روش هستند [۱ و ۲]. در سال‌های اخیر، استفاده از نیتروژن فشرده به‌عنوان سیال پخت به‌عنوان روشی نوین مطرح شده است که با حذف تقریبی بخار و کنترل دقیق دما و فشار، امکان پخت یکنواخت‌تر، افزایش عمر بلادر و کاهش مصرف انرژی را فراهم می‌کند. این مقاله به معرفی، تحلیل و ارزیابی روش جدید پخت نیتروژنی تایر می‌پردازد و ضمن مقایسه با سیستم‌های بخار سنتی و پخت نیتروژن متداول با روش نوین پخت نیتروژنی، اثرات آن بر کیفیت، استحکام، کاهش ضایعات و بهره‌وری خطوط تولید را بررسی می‌کند. [۳ و ۴].

واژه‌های کلیدی: افزایش ریت تولید، پخت نیتروژنی، حذف کندانس، فشار بالا، کنترل دما و فشار، بهبود کیفیت

مقدمه

فرایند پخت (Curing) یا ولکانیزاسیون، یکی از حساس‌ترین و مهم‌ترین مراحل در تولید تایر است که کیفیت نهایی محصول، عملکرد دینامیکی، مقاومت سایشی و دوام در شرایط عملیاتی را تعیین می‌کند. در این فرایند، لاستیک خام از حالت ترموپلاستیک به ماده‌ای الاستومری با شبکه‌ی مولکولی پایدار تبدیل می‌شود. ساختار پلیمری اولیه در طی واکنش‌های شیمیایی بین زنجیره‌های پلیمر و عامل پخت (معمولاً گوگرد)، پیوندهای عرضی ایجاد می‌کند که نتیجه‌ی آن افزایش سختی، مقاومت در برابر تغییر شکل و پایداری در برابر حرارت و سایش است [۱ و ۲]. در طول دهه‌های گذشته، روش غالب در صنعت تایرسازی برای انتقال حرارت به لاستیک درون قالب، استفاده از بخار اشباع بوده است. بخار در فشارهای بالا (معمولاً بین ۱۶ تا ۲۴ بار) به بلادر تزریق می‌شود تا حرارت لازم برای آغاز و ادامه‌ی واکنش پخت تأمین شود. باوجود سادگی و کارآمدی نسبی این روش، مشکلاتی همچون عدم یکنواختی حرارت، نوسان فشار بخار، تشکیل کندانس و خوردگی تدریجی سیستم لوله‌کشی، موجب شده‌اند که بخار نتواند پاسخگوی الزامات کیفیتی و بهره‌وری نسل جدید تایرها باشد. از سوی دیگر، در تایرهای مدرن با طراحی‌های چندلایه و ترکیب‌های متفاوت از کامپاندهای لاستیکی، نیاز به کنترل دقیق‌تر منحنی دما و فشار در طول فرایند پخت بیش‌ازپیش احساس می‌شود. پخت بیش‌ازحد (over cure) یا کمتر از حد (under cure) در بخش‌هایی از تایر می‌تواند منجر به ضعف ساختاری، ترک‌های سطحی، تغییر شکل در ناحیه‌ی کناره‌ها (Sidewall) و کاهش دوام حرارتی شود؛ بنابراین، صنعت لاستیک به سمت یافتن جایگزین‌های دقیق‌تر و کنترل‌پذیرتر برای بخار حرکت کرده است [۳ تا ۵]. در این میان، نیتروژن فشرده با فشار بالا به‌عنوان یک سیال بی‌اثر و پایدار از نظر شیمیایی، جایگزینی مطمئن برای بخار در فرایند پخت معرفی شده است. نیتروژن دارای رسانایی حرارتی مناسب، قابلیت کنترل فشار در بازه‌ی گسترده و مهم‌تر از همه، فاقد رطوبت و محصولات جانبی خورنده است. این ویژگی‌ها باعث می‌شود انتقال حرارت درون تایر به‌صورت یکنواخت‌تر انجام گیرد و هیچ اثر منفی از بخار یا چگالش در سطح داخلی ایجاد نشود. افزون‌بر این، استفاده از نیتروژن مانع از اکسیداسیون زودهنگام ترکیبات لاستیکی در طی پخت می‌شود و به افزایش کیفیت ظاهری سطح و درخشش محصول نهایی کمک می‌کند. [۶ و ۷]

در فناوری‌های جدید، سیستم پخت نیتروژنی به‌صورت چندمرحله‌ای طراحی

می‌شود. در مرحله‌ی نخست، نیتروژن یا بخار در فشار پایین یا بخار برای پیش‌گرمایش و توزیع حرارتی یکنواخت در ساختار تایر مورد استفاده قرار می‌گیرد. سپس در مرحله‌ی دوم، فشار افزایش می‌یابد تا واکنش‌های عرضی‌سازی (Cross-linking) در دمای بالا کامل شود. این امکان چندمرحله‌ای بودن، سبب می‌شود منحنی دما و فشار دقیقاً مطابق با نیاز فرمولاسیون لاستیکی تنظیم شود و از ایجاد گرادیان حرارتی شدید بین لایه‌ها جلوگیری شود.

افزون‌بر بهبود کیفیت محصول، پخت نیتروژنی از دیدگاه انرژی و هزینه نیز مزیت‌های قابل‌توجهی دارد. حذف یا کاهش نیاز به تولید بخار، کاهش تلفات حرارتی و استفاده از سیستم‌های بازیابی گرما، باعث کاهش مصرف انرژی (در روش نوین) در خطوط تولید شده است. همچنین عدم وجود رطوبت و رسوب در سیستم، موجب افزایش عمر بلادر و سیستم پاپینگ و کاهش دفعات توقف تولید برای تمیزکاری و سرویس می‌شود؛ بعلاوه در این روش نوین ۲۰-۱۵ درصد زمان پخت کاهش می‌یابد که در نتیجه ریت تولید افزایش می‌یابد. از دیدگاه زیست‌محیطی نیز، این فناوری با کاهش مصرف آب، کاهش آلاینده‌های ناشی از تخلیه بخار و کاهش صدای ناشی از شیرهای اطمینان، گامی در جهت پایداری سبز در صنایع لاستیک محسوب می‌شود.

در این مقاله، با تمرکز بر فناوری نوین پخت نیتروژنی، اصول ترمودینامیکی این فرایند، الگوهای کنترل فشار، بررسی می‌شود. همچنین نتایج تجربی حاصل از مقایسه با سیستم‌های بخار مرسوم و نیتروژن مرسوم ارائه شده تا نشان داده شود که چگونه این روش می‌تواند راهکاری پایدار، اقتصادی و دقیق برای نسل جدید تایرهای رادیال و صنعتی فراهم آورد. [۶ تا ۱۰]

بخش تجربی

نیتروژن معمولاً به‌صورت یک گاز، غیرفلز، دواتمی، بی‌اثر، بی‌رنگ، بی‌مزه و بی‌بو است که ۷۸٪ جو زمین را در بر گرفته است. خاصیت انفجاری ندارد. قابل اشتعال نیست و گاز نیتروژن به‌قدری بی‌اثر است که آن را ازت به معنی بدون زندگی، نام نهاده‌اند.

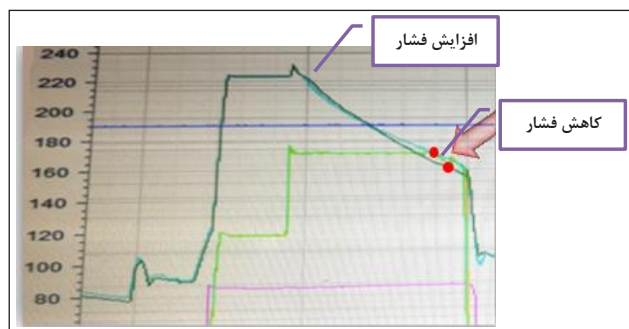
پخت نیتروژن مزایای زیادی دارد که در زیر به آن‌ها اشاره می‌شود:

- نیتروژن فشار داخلی بالاتری را تأمین می‌کند و برای سایزهای مختلف فشارهای متفاوتی قابل تنظیم است
- فشار پخت بالاتر و در نتیجه کیفیت بالاتر

شوک حرارتی و کاهش و افزایش ۱-۲ بار فشار داخل بلادر در اثر کندانس شدن بخار داخلی به دلیل بسته بودن ورودی نیتروژن و بخار شدن کندانس با باز شدن ورودی نیتروژن را نیز می‌توان به‌وضوح در شکل ۲ مشاهده کرد.

نتیجه‌ها و بحث

در این روش نوین پخت نیتروژنی با جمع‌آوری کندانس در مرحله‌ی اول و استفاده از آن به‌عنوان یک منبع انرژی دائمی در حین سیکل پخت، زمان پخت کاهش چشم‌گیر ۱۵-۲۰ درصدی داشت و افزون‌بر آن کلیه‌ی مزایای مربوط به پخت نیتروژنی را نیز دارا بود؛ که با انجام تست سیم گذاری تمامی این موارد تصدیق و صحت‌گذاری شد.



شکل ۲- کاهش و افزایش ۱-۲ بار فشار داخل بلادر

در جدول ۱ به‌خوبی می‌توان تأثیر روش نوین را در زمان پخت مشاهده کرد. همچنین در این روش دمای، سر بلت‌ها هیچ اختلافی ندارند و همچنین فاصله‌ی ایمن‌تری تا حداکثر مجاز دما دارند.

جدول ۱- مقادیر زمان پخت در روش‌های مختلف

روش پخت	پخت بخار	نیتروژنی متداول	روش نوین پخت نیتروژن
زمان پخت	۱۲:۳۰	۱۵:۰۰	۱۲:۰۰

جدول ۲- مقایسه مقادیر و اختلاف دمای سر بلت‌ها در سه روش

Part	Tmax پخت بخار	Tmax نیتروژنی مرسوم	Tmax پخت نوین نیتروژن
belt-bottom	۱۷۳٫۴	۱۷۲	۱۷۴٫۲
belt-top	۱۷۷٫۱	۱۷۰	۱۷۴٫۲

مزایای روش نوین پخت نیتروژنی نسبت به روش مرسوم عبارت‌اند از:

- ایجاد یک منبع انرژی عالی تا انتهای پخت
 - صفر شدن کامل میزان پرت بخار (بحث هزینه و مسائل زیست‌محیطی)
 - کاهش ۱۵-۲۰ درصدی زمان پخت
 - هم پختی بهتر در تایر
 - وضعیت دمایی بهتر در ناحیه سر بلت‌ها
 - دمای پایین‌تر تایر تا ده درجه در سرویس
- در مجموع پخت با روش نوین نیتروژنی را می‌توان رویکردی جدید، کارآمد و پایدار دانست که می‌تواند نسل جدیدی از تایرهای باکیفیت را برای بازارهای آینده فراهم سازد.

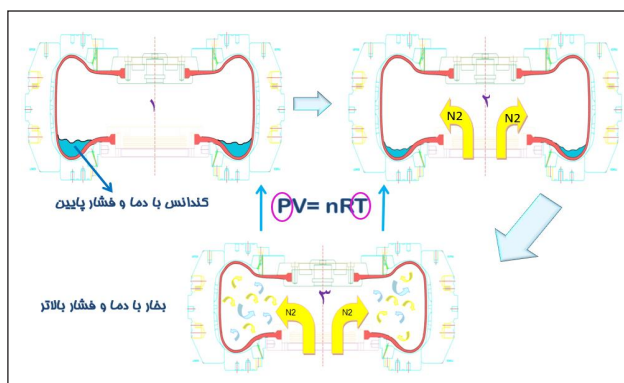
- کاهش دادن زمان پمپاژ مرحله‌ی خلا
- کاهش میزان خطوط لوله و دستگاه‌های تصفیه آب و در نتیجه کاهش زمان تعمیرات
- کیفیت محصول بالاتر
- عدم نیاز به دی‌اکسید کردن تجهیزات زیرا نیتروژن گاز بی‌اثر است و باعث اکسید شدن تجهیزات نمی‌شود.
- عدم نیاز به سیستم تهیه آب گرم و ریکاوری آب
- استفاده از نیتروژن با فشار پایین برای مرحله شپینگ و عدم نیاز به سیستم فشار پایین بخار آب برای شپینگ
- کاهش هزینه تولید
- هزینه کم تولید نیتروژن نسبت به بخار
- افزایش عمر بلادر و در نتیجه کاهش هزینه مصرف بلادر
- نشت آب داغ و بخار بسیار خطرناک و سوزاننده است ولی نیتروژن نه
- نیتروژن بی‌ضرر است و می‌تواند به‌صورت مستقیم تخلیه شود (غیرقابل اشتعال و غیر سمی)

اما باوجود همه‌ی این مزایا روش مرسوم و متداول پخت نیتروژنی معایبی نیز دارد از جمله:

- افزایش زمان پخت (حدود ۱۵ دقیقه)
 - افزایش اختلاف دمای بالا و پایین بلادر
- در این روش مرسوم در مرحله فشار پایین بخار اول پخت تلاش بر روی تخلیه‌ی مداوم کندانس است و بعد از آن نیتروژن با فشار بالا وارد می‌شود. ما به‌دنبال روشی بودیم که بتوان زمان پخت تایر را تا حد امکان کاهش داد و درعین حال کلیه‌ی مزایای پخت با نیتروژن را نیز حفظ کرد. به این منظور با انجام روش‌ها تست‌های مختلف روشی را پیدا کردیم که به این امر نائل شدیم.

دستگاه‌ها و روش:

در این روش نوین در مرحله‌ی اول پخت تمامی سعی بر این است که کندانس را در بلادر افزایش داد البته در بازه‌ی زمانی بسیار کوتاه؛ و با توجه به قانون ترمودینامیکی در شکل ۱، در مرحله ورود نیتروژن یک منبع حرارتی دائمی با دمای بالاتر در تایر ایجاد می‌شود و این امر باعث می‌شود زمان پخت تایر حدود ۲۰ درصد کاهش یابد. این مسئله از لحاظ ریت تولید بسیار حائز اهمیت است.



شکل ۱- استفاده از کندانس به‌منظور منبع حرارتی و یک منبع انرژی تا انتهای پخت

مراجع

- [1] Gent, A. N. "Engineering with Rubber: How to Design Rubber Components." Hanser Publishers, 2012
- [2] Mark, J. E., Erman, B., & Roland, C. M. (2013). "The Science and Technology of Rubber (4th ed.). Academic Press" 2013.
- [3] Heideman, G., Noordermeer, J. W. M., & Datta, R. "NVulcanization chemistry of tire compounds. Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology," 21(3), 191-214. 2005
- [4] Xu, Y., Zhang, L., & Zhao, Y. 2018. "Simulation and optimization of tire curing process using nitrogen gas. Journal of Elastomers and Plastics, 50(6), 513-529". 2018
- [5] Zhang, Z., Li, C., & Liu, Q. "Numerical analysis of nitrogen curing system for radial tires. Polymer Testing, 89, 106616." 2020
- [6] Goodyear Tire & Rubber Company. US Patent No. 9,713,652 B2 "Nitrogen-based curing system for pneumatic tires". 2017
- [7] Bridgestone Technical Center. "Advances in Nitrogen Curing Technology for Sustainable Tire Production. Bridgestone Global Technical Report". 2021
- [8] Kumho Tire Research Center. "Comparison between steam and nitrogen curing processes in PCR tire production. Rubber Industry Review, 34(2), 44-53." 2022
- [9] Chen, S., Wang, T., & Zhao, J. "Energy-efficient nitrogen curing system for modern tire manufacturing. Energy Reports, 9, 775-786." 2023
- [10] "International Organization for Standardization. ISO 2393: Rubber test mixtures — Preparation, mixing and vulcanization — Equipment and procedures. ISO." 2014