

تحلیل پارامترهای مؤثر در کلندرینگ صنعت تایر

مهدی شیخ وظایفی^۱ و مجید دانشور^{۲*}

۱- مدیر تولید، شرکت سیلان رازی

۲- کارشناس تولید، شرکت سیلان رازی

daneshvarsabalanrazi@gmail.com

چکیده: در فرایند تولید، تایر یکی از مراحل کلیدی استفاده از دستگاه کلندری (calendering) است که به منظور پوشش دادن کامپاند به رشته‌های فلزی (استیل کورد) یا (دیپ کورد) یا تولید کامپاند یکنواخت، انجام می‌شود. این مقاله به تحلیل تأثیر پارامترهای اصلی شامل فشار رول‌ها، سرعت عبور، دمای رول‌ها، فاصله رول‌ها، تقاطع رول‌ها و حجم کامپاند بر کیفیت لایه (شامل ضخامت نهایی، یکنواختی ضخامت، چسبندگی به رشته استیل کورد و عیوب سطحی) می‌پردازد. با طراحی آزمایش‌های تجربی در خط کلندرینگ و استفاده از تحلیل آماری، مشخص شده است که فشار رول‌ها و فاصله رول‌ها و تقاطع رول‌ها بیشترین تأثیر را بر ضخامت و یکنواختی آن دارند. در حالی که سرعت عبور و دمای رول‌ها تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر عیوب سطحی دارند. نتایج این مقاله می‌تواند به بهینه‌سازی شرایط تولید در کارخانه‌های تایرسازی و کاهش ضایعات کمک کند.

واژه‌های کلیدی: کلندری (calendering)، پارامترهای فرایندی، صنعت تایرسازی، ضخامت کامپاند، یکنواختی ضخامت، عیوب سطحی

مقدمه

در فرایند تولید تایرهای رادیال تماماً سیمی (TBR) یکی از مراحل حساس و تعیین‌کننده فرایند کلندرینگ (calendering) است. در این مرحله، کامپاند با عبور از بین غلتک‌های نرم و گرم با دهانه کنترل‌شده روی رشته‌های سیمی را پوشش می‌دهد تا ساختاری یکنواخت و مقاوم ایجاد شود. کیفیت این مرحله تأثیر مستقیمی بر عملکرد نهایی، یکنواختی ضخامت و دوام دارد.

کلندرینگ معمولاً شامل ۴ رول با قابلیت فشار، دما و فاصله رول و تقاطع رول‌ها است. کنترل دقیق این پارامترها از اهمیت ویژه برخوردار است، زیرا کوچک‌ترین انحراف می‌تواند منجر به ناهماهنگی ضخامت، حباب، یا کاهش چسبندگی بین کامپاند و سیم عدم پوشش مناسب سطح لایه شود. در این مقاله اثر پارامترهای فرایندی کلیدی بر کیفیت کامپاند لایه استیل کورد در تولید تایر TBR بررسی شده است تا راه کارهایی برای بهینه‌سازی ارائه شود.

بخش تجربی

مواد و روش‌ها

دستگاه کلندری: مشخصات فنی، تعداد رول‌ها، سیستم تنظیم فاصله بین رول‌ها، کنترل دما و فشار رول‌ها.

متغیرهای فرایندی موردبررسی:

- ۱) فشار رول‌ها، (۲) سرعت کلندر، (۳) دمای رول‌ها (TCU)، (۴) فاصله رول‌ها و (۵) میزان کامپاند روی میل (حجم کامپاند)

عناوین بخش‌های اصلی

۱- تعریف کلندرینگ (calendering)

فرایند کلندرینگ یکی از مراحل کلیدی در تولید تایر به‌ویژه تایرهای TBR تمام سیمی (Truck and Bus Radial) است. در این فرایند کامپاند گرم شده از بین چند غلتک عبور داده می‌شود تا به‌صورت ورقه‌ای یکنواخت با ضخامت کنترل‌شده درآید. در تایرهای سیمی، کلندرینگ معمولاً برای پوشش دادن سیم‌های فولادی یا نایلون ۶۶ (بید رپ جای‌گزین ریبینگ) با کامپاند به‌کار می‌رود تا چسبندگی، مقاومت مکانیکی و دوام در برابر حرارت افزایش یابد.

۲- تاریخچه مختصر کلندرینگ

فرایند کلندرینگ در قرن ۱۹ برای تولید کامپاند و محصولات نساجی آغاز شد. با رشد صنعت تایرسازی در اوایل قرن بیستم، این فناوری به‌عنوان روش دقیق برای تولید لایه‌های لاستیکی با ضخامت یکنواخت توسعه یافت. در دهه ۱۹۷۰ با ظهور تایرهای رادیال تمام سیم (All-steel Radial)، ماشین‌های کلندر مخصوص سیم فولادی طراحی شده‌اند که توانایی کنترل دما، فشار و سرعت‌بالا را دارند.

۳- نقش کلندرینگ در صنعت تایر

در تولید تایرهای TBR، کلندرینگ وظیفه دارد:

۱. پوشش سیم‌های فولادی با لاستیک لایه کارکاس، بلت‌ها (کمربندها)، لایه (کارکاس)، چیفر (دور بید تایر)
۲. کنترل ضخامت کامپاند

۳. افزایش یکنواختی ضخامت و چسبندگی

۴. بهبود عملکرد دینامیکی تایر (دوام، مقاومت در برابر حرارت، چسبندگی) در واقع کیفیت مرحله کلندرینگ به‌طور مستقیم به دوام تایر، وزن نهایی و مصرف انرژی در مراحل بعدی تولید اثر می‌گذارد.

۴- مروری بر پارامترهای مؤثر

پارامترهای مؤثر فرایند کلندرینگ در جدول ۱ آورده شده است.

۵- محدودیت‌ها و نکات فنی

توضیح: با افزایش فشار غلتک، ضخامت نهایی لایه کاهش می‌یابد، اما پس از یک حد مشخص، افزایش فشار موجب بیش‌پخت موضعی و افت چسبندگی می‌شود.

۱) رابطه فشار رول‌ها و ضخامت لایه: فشار کلندر در دو ناحیه اعمال می‌شود اول خود کلندر بین رول ۲ و ۳ جهت پرس مناسب دوم فشار در دانسرول جهت یکنواختی و صاف شدن لایه برای پرس مناسب است.

۲) رابطه سرعت کلندر و یکنواختی ضخامت: در کلندر برای لایه‌های سیمی بعد از تنظیم ضخامت و سرعت در با افزایش سرعت بدون تغییر گپ‌ها ۱،۲ و ۴ ضخامت کمتر و کم‌پرسی ایجاد می‌کند و کاهش سرعت بدون تغییر گپ‌های ۱،۲ و ۴ باعث افزایش ضخامت و ایجاد عیوب سطحی می‌شود.

جدول ۱- پارامترهای مؤثر فرایند کلندرینگ

تأثیر	عامل مؤثر	نوع پارامتر	پارامتر
افزایش دما می‌تواند باعث کاهش گرانشی و بهبود جریان مواد شود.	دمای غلتک‌ها و مخلوط مواد	فرآیندی	دما
افزایش فشار ضخامت لایه را کاهش می‌دهد و موجب فشردگی بیشتر شدن مواد می‌شود.	فشار اعمالی توسط غلتک‌ها	فرآیندی	فشار
سرعت بالا می‌تواند موجب افزایش تولید و بهبود یکنواختی لایه شود.	سرعت چرخش غلتک‌ها	فرآیندی	سرعت غلتک
طولانی‌تر بودن زمان اقامت می‌تواند موجب بهتر شدن توزیع مواد شود.	زمان عبور مواد از بین غلتک‌ها	فرآیندی	زمان اقامت مواد
تنظیم فاصله به‌دقت ضخامت لایه و یکنواختی آن تأثیر می‌گذارد.	تنظیمات فاصله بین غلتک‌ها	طراحی دستگاه	فاصله بین غلتک‌ها
نوع مواد اولیه تأثیر زیادی بر ضخامت و ویژگی‌های فیزیکی لایه‌ها دارد.	ترکیب شیمیایی و خواص مواد اولیه	مواد اولیه	نوع مواد اولیه
نیروهای برشی بیشتر ممکن است منجر به کاهش ضخامت و افزایش یکنواختی شود.	نوع غلتک‌ها و تنظیمات فرایند	فرآیندی	نیروهای برشی

- مشکل در کلندر کردن کامپاندهای با گرانشی بالا

نکات و یافته‌های تجربی

- استفاده از رول‌های کلندر با دمای پایین‌تر در ناحیه خروجی موجب بهبود سطح و کاهش چسبندگی لایه می‌شود (دمای رول‌های ۱ و ۴ نسبت به ۲ و ۳ تا ۵ درجه کمتر در نظر گرفته می‌شود).
- افزایش سرعت رول‌های ۲ و ۳ به ۱ و ۴ (friction Roll) باعث یکنواختی بهتر ضخامت می‌شود (اختلاف سرعت ۱ و ۴ نسبت به ۲ و ۳ متغیر بوده به‌طوری‌که سری ۱ و ۴ تا ۷۵٪ و ۳ می‌شود).
- پیش‌گرمایش سیم فولادی موجب چسبندگی بهتری با لاستیک می‌شود.
- استفاده از سیستم کنترل ضخامت اتوماتیک (پنوماتیک، XRAY، بتا ری) در کارخانه‌های مدرن دقت ± 0.1 mm را فراهم می‌کند.

نتیجه‌گیری

فرایند کلندرینگ در تایرسازی TBR تمام سیمی، از مراحل کلیدی تضمین کیفیت و دوام تایر است. کنترل دقیق دما، فشار، سرعت کلندر و چسبندگی میان لایه‌ها نقش تعیین‌کننده‌ای در کیفیت نهایی دارد. استفاده از سیستم‌های کنترل خودکار و تنظیم دقیق Gap می‌تواند نوسانات ضخامت را تا حد زیادی کاهش دهد. به‌طور کلی، ارتفاع کیفیت کلندرینگ به معنای کاهش نرخ ضایعات، بهبود چسبندگی سیم - لاستیک و افزایش عمر تایر در شرایط کاری سخت است^{۱۱}

۳) رابطه دمای رول‌ها و تعداد عیوب سطحی: هرچه دما پایین‌تر باشد ضخامت افزوده می‌شود و هرچه دما بالا رود ضخامت کاهش می‌یابد در هر دو صورت لایه بافت کیفی و عیوب مواجه می‌شود.

۴) تعامل بین مونی کامپاند و فاصله رول‌ها: فاصله رول‌ها براساس مونی کامپاند قابل تغییر است که مستلزم اندازه‌گیری مداوم بوده تا در صورت کاهش یا افزایش ضخامت مجدداً گپ‌ها تنظیم شود.

۵) هیستوگرام توزیع ضخامت کامپاند تحت دو شرایط فرایندی:

شرایط ۱ (دمای پایین، فشار کم): توزیع ضخامت ممکن است از لحاظ یکنواختی ضعیف باشد و ضخامت‌های متغیرتر مشاهده شود.

شرایط ۲ (دمای بالا، فشار زیاد): توزیع ضخامت می‌تواند یکنواخت‌تر شود و ضخامت‌ها به دلیل فشار بالا کاهش یابد.

هیستوگرام‌ها معمولاً به این صورت هستند که در محور افقی ضخامت لایه و در محور عمودی تعداد دفعات مشاهده ضخامت‌های خاص قرار می‌گیرد.

۶) مقایسه چسبندگی کامپاند به رشته سیمی با مقدار تغذیه: با کاهش مقدار تغذیه ضخامت کم و با افزایش آن باعث افزوده شدن ضخامت به علت فشار آوردن به رول‌ها می‌شود.

محدودیت‌های فرایند کلندرینگ

- حساسیت بالا به تغییرات دما و فشار
- احتمال جدا شدن یا حباب هوا بین سیم و کامپاند
- سایش غلتک‌ها و نیاز به کالیبراسیون مداوم

مراجع

- [1] A. K. Bhowmick, "Rubber Technology," CRC Press, 2008.
- [2] L. P. Eiroa, "Calendering in Rubber Processing," Rubber Chemistry and Technology, 2000.
- [3] S. M. Smith, "The Role of Calendering in Tire Manufacturing," Tire Science and Technology, 2011.
- [4] M. Farahani, "Rheological Properties of Rubber Compounds," Springer, 2015.
- [5] F. He, "Control of Calendering Process for Tire Manufacturing," Journal of Applied Polymer Science, 2016.
- [6] M. T. Thomas, "Modeling of the Calendering Process in Rubber Production," Polymer Engineering & Science, 2017.
- [7] B. R. Johnson, "Fundamentals of Tire Manufacturing," Rubber World, 2012.
- [8] S. S. Adebayo, "Effect of Calendering Parameters on the Physical Properties of Rubber," International Journal of Mechanical Engineering, 2013.
- [9] J. P. Nunes, "Optimization of the Calendering Process," Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2009.
- [10] J. D. Metz, "Calendering in Rubber Processing," Elsevier Science, 2005.