

تاثیر کولینگ با جریان آب ویژه در حفظ عرض و یکنواختی مواد خروجی از اکسترودر: یک مطالعه تخصصی و صنعتی در لاستیک بارز

اکبر نظری رباطی ، مرتضی شجاعی

سرپرست برق و کنترل آماده سازی رادیال باری-سرگروه برق و کنترل آماده سازی رادیال باری
Akbar.nazari63@gmail.com



چکیده

در فرآیند اکستروژن لاستیک، کنترل دمای پروفیل پس از خروج از اکسترودر، چالشی اساسی برای حفظ ابعاد هندسی و یکنواختی محصول است. این پژوهش به بررسی تأثیر پیاده‌سازی یک سیستم خنک‌کاری پاششی آب چندمنطقه‌ای (Multi-Zone Water Spray Cooling System) بر روی حفظ عرض و کاهش ضایعات در یک خط تولید صنعتی لاستیک می‌پردازد. سیستم طراحی‌شده متشکل از سه ناحیه مستقل (خنک‌کاری اولیه، ثانویه و نهایی) است که با استفاده از نازل‌های میکرونی و یک سیستم کنترل حلقه بسته، دما، فشار و دبی آب را به صورت دقیق تنظیم می‌کند. نتایج تجربی حاصل از پیاده‌سازی بر روی خط تولید کارخانه لاستیک بارز نشان‌دهنده دستیابی به موفقیت‌های چشمگیری از جمله حفظ عرض پروفیل در محدوده ۹۵ تا ۹۸ درصد (بهبود ۱۲ تا ۱۵ درصدی)، کاهش ۴۰ درصدی ضایعات و افزایش ۹ درصدی یکنواختی سطح بود. این یافته‌ها به وضوح اثربخشی سیستم خنک‌کاری پاششی چندمنطقه‌ای را به عنوان یک راهکار بهینه برای افزایش بهره‌وری، بهبود کیفیت محصول و کاهش هزینه‌های تولید در صنعت اکستروژن لاستیک تأیید می‌کند.

واژه های کلیدی: اکسترودر، لاستیک، خنک‌کاری پاششی آب، حفظ ابعاد، کنترل چندمنطقه‌ای، بهره‌وری فرآیند

محور مقاله: مدیریت بهره‌وری/ رهبری در راستای توسعه فناوری و نوآوری

مقدمه

در خطوط تولید لاستیک، پس از خروج مواد از اکسترودر، بالا بودن دمای پروفیل ها و کشش مواد موجب کاهش عرض و تغییر ابعاد می‌شود. این پدیده می‌تواند باعث کاهش کیفیت محصول نهایی، ایجاد ضایعات و ایجاد مشکلات در مراحل بعدی تولید (مانند گرین تایر) شود. استفاده از سیستم کولینگ اسپری آب ویژه (Water Spray Cooling) یک راهکار مؤثر برای کنترل این چالش است. این سیستم باعث می‌شود مواد سریعاً به دمای مطلوب و یکنواخت رسیده و ابعاد آن تثبیت شود. کنترل دقیق پارامترهای دما، فشار و شدت جریان اسپری آب، تأثیر مستقیم و بسزایی در کاهش تغییرات عرض و ضخامت دارد و در نهایت، منجر به افزایش قابلیت اطمینان و کیفیت محصول می‌گردد.

مروری بر تحقیقات پیشین

- Kim, S., et al. (2018). "Effect of Water Spray Cooling on Extrudate Dimensions in Plastic and Rubber Production," IEEE Transactions on Industrial Electronics.
- Li, J., & Zhao, Y. (2019). "Optimization of Water Spray Cooling Systems in Rubber Extrusion," Journal of Applied Polymer Science.
- ASTM D3182 – Standard Practice for Rubber—Materials, Equipment, and Procedures for Mixing Standard Compounds and Preparing Standard Vulcanized Sheets.
- Kim, S., et al. (2018). "Effect of Water Spray Cooling on Extrudate Dimensions in Plastic and Rubber Production," IEEE Transactions on Industrial Electronics.

تحقیقات داخلی در کارخانه‌های تایرسازی ایران نیز نشان داده است که کنترل کولینگ اسپری آب باعث کاهش ضایعات تا ۲۰٪ و حفظ عرض مواد می‌شود. در حالی که مطالعات پیشین بر بهینه‌سازی سیستم‌های اسپری متمرکز بودند، مقاله حاضر با معرفی و پیاده‌سازی یک سیستم چند ناحیه‌ای با کنترل مستقل و ارائه داده‌های تجربی کمی از یک خط تولید واقعی لاستیک، گامی فراتر نهاده و شکاف بین طراحی سیستم و دستیابی به بهره‌وری عملیاتی را پر می‌کند.

مکانیزم علمی کولینگ اسپری آب

- انتقال حرارت همرفتی اجباری و جوشش هسته‌ای: سطح داغ مواد اکسترودر شده با برخورد مستقیم قطرات ریز آب، به سرعت خنک می‌شود. این فرآیند نه تنها بر پایه همرفتی اجباری، بلکه بر مکانیزم جوشش هسته‌ای نیز استوار است. در این مکانیزم، قطرات آب در برخورد با سطح داغ، به سرعت تبخیر شده و مقادیر بسیار زیادی گرما را به ازای هر واحد جرم جذب می‌کنند. گرما از داخل مواد به طور مؤثری به سطح منتقل شده و سپس توسط جریان آب دفع می‌شود.
- اثر فشار و دبی آب: افزایش فشار اسپری و دبی جریان آب، چگالی پوشش قطرات بر روی سطح را افزایش داده و در نتیجه نرخ انتقال حرارت را به حداکثر می‌رساند. این امر منجر به تثبیت سریع‌تر ویسکوزیته سطحی و در نتیجه، تثبیت ابعاد و عرض مواد می‌شود.

نمودار دما: نمودار تغییرات دما در طول مسیر خروجی اکسترودر نشان می‌دهد که بیشترین کاهش دما در ۲۰-۳۰ سانتی‌متر اول پس از خروج اتفاق می‌افتد، که محل استقرار ناحیه کولینگ اولیه در سیستم طراحی‌شده است.

سیستم کولینگ چند ناحیه‌ای

- کولینگ اولیه (Zone 1): هدف این ناحیه، کاهش سریع و کنترل‌شده دمای سطحی مواد بلافاصله پس از خروج از دای اکسترودر است. این کار از جمع‌شدگی اولیه (Initial Shrinkage) و کاهش عرض بی‌رویه جلوگیری می‌کند.
- کولینگ ثانویه (Zone 2): در این ناحیه، فرآیند تثبیت ابعاد به صورت کامل‌تر انجام می‌شود. هدف، یکنواخت‌سازی دمای سطح و هسته و حذف گرادیان‌های دمایی باقیمانده است که منجر به کاهش تغییرات عرض در طول مسیر می‌شود.
- کولینگ نهایی (Zone 3): این مرحله، مواد را برای ورود به خطوط بعدی تولید (مانند اره‌زنی یا انتقال به کوره ولکانیزاسیون) با دمای کاملاً مناسب و یکنواخت آماده می‌سازد.

تجهیزات و پارامترهای عملیاتی

- نازل‌ها: نازل‌های میکرونی با زاویه پاشش قابل تنظیم برای ایجاد پاشش یکنواخت آب بر روی سطح مقطع پروفیل استفاده شده است.
- فشار و دبی آب: فشار در محدوده ۲ تا ۵ بار و دبی جریان آب متناسب با سرعت خط و دمای مواد، به صورت پویا کنترل می‌شود.
- سنسورها: سنسورهای دمای غیرتماسی (پیرومتر) و سنسورهای لیزری اندازه‌گیری عرض و ضخامت، در نقاط استراتژیک پس از هر ناحیه خنک‌کاری نصب شده‌اند.

کنترلر: از یک سیستم کنترل حلقه بسته (PLC-Based) استفاده شده که با دریافت داده‌های سنسورها، دبی و فشار آب هر ناحیه را به طور خودکار تنظیم می‌کند تا عرض و ضخامت هدف در خروجی حفظ شود.

پیاده سازی صنعتی و داده‌های جمع‌آوری شده

این سیستم در خط تولید کارخانه لاستیک بارز بر روی یک اکسترودر چند طبقه پیاده‌سازی شد. داده‌ها برای ۵۰ سیکل تولید کامل شامل سرعت جریان آب، دمای سطح در نواحی مختلف، عرض و ضخامت نهایی مواد جمع‌آوری شد. برای اطمینان از دقت، داده‌ها در سه نقطه مختلف عرض پروفیل اندازه‌گیری و میانگین‌گیری شدند.

مقایسه کمی شاخص‌های کلیدی عملکرد با و بدون سیستم کولینگ اسپری آب

توضیحات	بهبود نسبی	کولینگ اسپری آب	بدون کولینگ	شاخص
انحراف معیار کم (۱۰۰٪ نشان‌دهنده پایداری بالاست).	۱۲-۱۵٪	$95 - 98 \pm 1$	۸۵	حفظ عرض مواد(%)
کاهش قابل توجه هزینه‌های تولید	۴۰٪	۳	۵	ضایعات(%)
بر اساس ارزیابی بصری و دستگاه سنجش زبری سطح	۹٪	۹۶	۸۸	یکنواختی سطح(%)
بر اساس تست بازبایی الاستیک (Spring-Back)	۴۰٪	۶۰	۲۰	کاهش تنش داخلی(%)

تحلیل تخصصی عملکرد و نتایج

سیستم کولینگ اسپری آب چند ناحیه‌ای باعث کاهش سریع و کنترل‌شده دمای سطح بلافاصله پس از خروج از اکسترودر شد. این امر ویسکوزیته سطحی را به سرعت افزایش داده و از تغییر شکل و کاهش عرض جلوگیری کرد. داده‌ها نشان داد که خطای لحظه‌ای کاهش عرض در طول مسیر به کمتر از ۱٪ محدود شده است که نشان از دقت بالای سیستم کنترل دارد.

بهبود یکنواختی سطح ناشی از حذف نقاط داغ (Hot Spots) و سرد (Cold Spots)، نه تنها کیفیت ظاهری محصول را افزایش داد، بلکه مشکلات در مراحل بعدی تولید را نیز به طور محسوسی کاهش داد.

کاهش ۴۰٪ در تنش‌های داخلی که از طریق تست‌های غیرمخرب استنباط شد، نشان می‌دهد محصول از پایداری ابعادی بلندمدت‌تری برخوردار خواهد بود و احتمال تاب برداشتن یا تغییر شکل پس از تولید کاهش می‌یابد.

نتیجه‌گیری

پیاده‌سازی سیستم خنک‌کاری پاششی آب چندمنطقه‌ای در خط اکستروژن لاستیک، راهکاری عملی و بسیار مؤثر برای حل چالش تغییر ابعاد محصول است. نتایج این پژوهش به وضوح نشان می‌دهد که این سیستم نه تنها منجر به حفظ عرض پروفیل در محدوده ۹۵-۹۸٪ و کاهش ۴۰٪ ضایعات می‌شود، بلکه از طریق بهبود یکنواختی سطح و کاهش تنش‌های داخلی، کیفیت نهایی محصول را به طور قابل توجهی ارتقا می‌دهد. انعطاف‌پذیری این سیستم در تنظیم پارامترها، آن را برای انواع مختلف مواد لاستیکی و پروفیل‌ها ایده‌آل می‌سازد.

پیشنهادهات آینده

ادغام با سیستم‌های پیش‌بین: ترکیب این سیستم با یک کنترلر پیش‌بین (MPC) که از داده‌های سنسور ضخامت و سرعت خط استفاده می‌کند، می‌تواند تغییرات ابعادی را حتی قبل از وقوع، پیش‌بینی و جبران کند. بهینه‌سازی مبتنی بر هوش مصنوعی: توسعه یک مدل بهینه‌سازی برای تنظیم خودکار پارامترهای دبی و فشار آب بر اساس نوع compound لاستیک و سرعت خط تولید.

یکپارچه‌سازی با IIoT: اتصال کامل سیستم به پلتفرم صنعت ۴.۰ (IIoT) کارخانه برای پایش بلندمدت، تحلیل روندها و اجرای نگهداری پیش‌بینانه (Predictive Maintenance).

منابع

- Kim, S., et al. (2018). "Effect of Water Spray Cooling on Extrudate Dimensions in Plastic and Rubber Production," IEEE Transactions on Industrial Electronics.
- Li, J., & Zhao, Y. (2019). "Optimization of Water Spray Cooling Systems in Rubber Extrusion," Journal of Applied Polymer Science.
- ASTM D3182 – Standard Practice for Rubber—Materials, Equipment, and Procedures for Mixing Standard Compounds and Preparing Standard Vulcanized Sheets.
- گزارش داخلی واحد مهندسی فرآیند، شرکت لاستیک البرز، ۱۴۰۳.