

اختلاف گشتاور:

(MH-ML) این پارامتر نشان‌دهنده‌ی چگالی پیوندهای عرضی است. نمونه‌های ۳ و ۴ به ترتیب با مقادیر ۱۲/۰۹ و ۱۱/۶۳ dNm بالاترین چگالی پیوند عرضی را نشان می‌دهند که حتی از نمونه مرجع شماره ۱ با ۱۰/۸۴ dNm نیز بهتر است.

زمان بهینه پخت (T_{90}):

نمونه‌های ۳ و ۴ زمان پخت نسبتاً مطلوبی دارند (۱۶:۱۹ و ۱۱:۱۹). اگرچه این زمان از نمونه ۵ و ۶ طولانی‌تر است، اما افزایش چگالی پیوند عرضی این مسئله را جبران می‌کند.

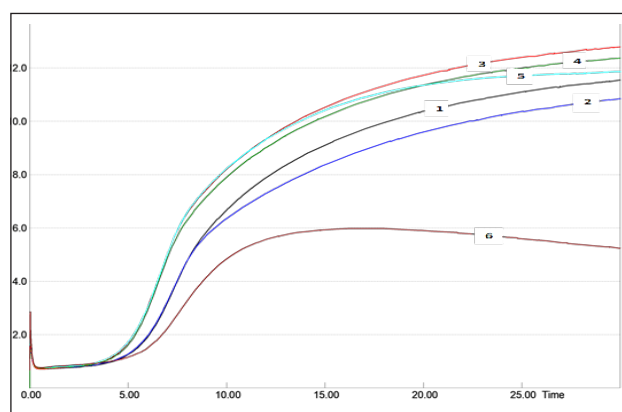
شاخص سرعت پخت (CRI):

نمونه‌های ۳ و ۴ مقادیر CRI پایینی دارند (۷/۴۲ و ۷/۵۲)، که نشان‌دهنده‌ی سرعت پخت کندتر است. باین‌حال، این مسئله در مقایسه با بهبود خواص مکانیکی، قابل چشم‌پوشی است. نمونه شماره ۲ CRI پایین‌تری دارد ولی پایداری حرارتی خوبی ندارد.

جدول ۲- نتایج تست MDR آمیزه‌ها

نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳	نمونه ۴	نمونه ۵	نمونه ۶
۰/۷۱	۰/۷۱	۰/۷۱	۰/۷۴	۰/۷۵	۰/۷۶
۱۱/۵۵	۱۰/۸۵	۱۲/۸۰	۱۲/۳۷	۱۱/۸۷	۵/۹۸
۵/۴۵	۵/۴۱	۵/۰۰	۵/۰۷	۵/۰۱	۶/۲۳
۶/۴۰	۶/۳۸	۵/۴۷	۵/۵۳	۵/۴۹	۷/۳۱
۹/۱۷	۹/۰۳	۸/۱۱	۸/۱۶	۷/۴۷	۸/۰۶
۲۰/۳۴	۲۱/۱۹	۱۹/۱۶	۱۹/۱۱	۱۶/۲۲	۱۱/۳۵
۷/۱۹	۶/۸۱	۷/۴۲	۷/۵۲	۹/۴۸	۲۴/۶
۱۰/۸۴	۱۰/۱۴	۱۲/۰۹	۱۱/۶۳	۱۱/۱۲	۵/۲۲
MH (dNm)	ML (dNm)	TS ₁ (mm:ss)	TS ₂ (mm:ss)	TS ₅₀ (mm:ss)	T ₉₀ (mm:ss)
CRI	MH-ML				

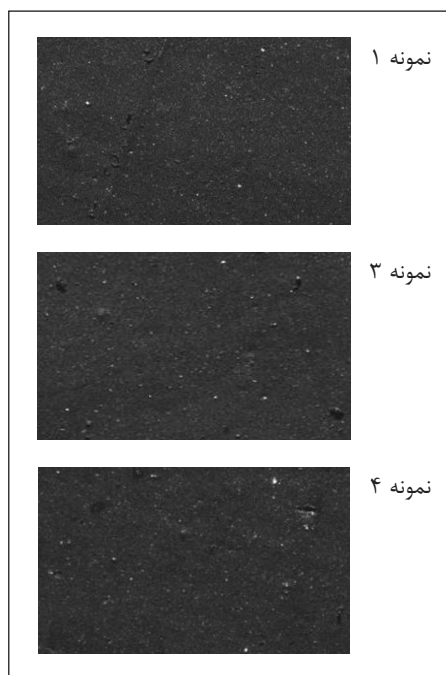
پخت آمیزه‌ها در یک پرس الکتریکی در دمای ۱۶۰ درجه‌ی سانتی‌گراد با توجه به منحنی رئومتر آمیزه‌ها انجام گرفت (شکل ۱).



شکل ۱- منحنی رئومتر نمونه‌ها

جدول ۳- نتایج خواص فیزیکی آمیزه‌ها

	عادی						ageing (70h 100°C)						تغییرات					
Physical propertise	نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳	نمونه ۴	نمونه ۵	نمونه ۶	نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳	نمونه ۴	نمونه ۵	نمونه ۶	نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳	نمونه ۴	نمونه ۵	نمونه ۶
Hardness	۶۱.۵	۶۱.۸	۶۲.۷	۶۳.۳	۶۰.۹	۴۹.۳	۶۵.۳	۶۴.۱	۶۳.۵	۶۳.۵	۶۳.۲	۵۸.۲	۳.۸	۲.۳	۰.۸	۰.۲	۲.۳	۸.۹
Tensile (Mpa)	۸.۵۵	۸.۲۶	۹.۰۷	۱۰.۱	۷.۷۱	۱.۳۹	۷.۹۸	۱۰.۲	۸.۰۹	۹.۷۴	۸.۷۷	-	-۶.۶	۲۳.۴	-۱۰.۸	-۳.۵	۱۳.۷	-
Elongation at Break (%)	۴۷.۶	۴۵.۴	۳۸.۰	۴۴.۰	۴۷.۰	-	۲۸.۶	۴۱.۵	۴۶.۸	۳۹.۸	۶۱.۶	-	-۴۰.۱	-۹.۰	۲۳.۱	-۹.۵	۳۱.۰	-
Modulus 300% (Mpa)	۶.۳	۶.۴	۷.۴	۶.۲	۵.۴	-	-	۷.۰۵	۵.۳۳	۷.۱۱	۴.۰۳	-	-	۱۰.۱	-۲۸	۱۴.۶	۲۵.۳	-
Dispersion (%)	۹۷.۵	۹۴.۷	۹۴.۶	۹۶.۵	۸۷.۸	۵۲.۷												
Density (gr/cm ³)	۱.۱۰۱	۱.۰۹۸	۱.۰۹۷	۱.۰۹۶	۱.۰۸۹	۱.۰۵۸												
Resilience (%)	۵۲.۰	۵۱.۴	۵۱.۰	۴۹.۰	۴۸.۰	۳۳.۰												
Abration (mm ³)	۱۱۸	۱۲۴	۹۵	۷۶	۱۱۰	۵۸۰												
Compression Set (%) (70h 100°C)	۵۲	۵۷	۵۲	۵۱	۷۴	۹۶	-	-	-				-	-	-			



شکل ۲- تصاویر دیسپرژن نمونه‌ها

سختی:

نمونه‌های ۳ و ۴ پس از پخت، سختی بالاتری (به ترتیب ۶۲.۷ و ۶۳.۳) نسبت به نمونه مرجع (۶۱.۵) نشان می‌دهند. استحکام کششی: نمونه ۴ بالاترین استحکام کششی را پس از پخت دارد. نمونه ۳ نیز با ۹.۰۷ MPa عملکرد قابل قبولی دارد. ازدیاد طول در نقطه پارگی و مدول ۳۰۰ نمونه ۴ اگرچه مقادیر کمتری نسبت به نمونه‌ی مرجع دارد ولی از نظر پایداری حرارتی بهترین عملکرد را دارا است. تست پراکندگی: نمونه‌های ۳ و ۴ پراکندگی خوبی دارند که نشان‌دهنده‌ی توزیع یکنواخت مواد در کامپاند است. تست سایش: نمونه‌های ۴ کمترین میزان سایش ۷۶ (mm³) را نشان می‌دهند که نشان‌دهنده‌ی مقاومت سایشی عالی است. تست ضربه: تست ضربه نمونه‌های ۳ و ۴ نشان‌دهنده‌ی بازیابی انرژی بهتر و اتلاف حرارت کمتر نسبت به نمونه‌های ۵ و ۶ است. پارامتر مانایی فشار برای کاربردهایی مانند اورینگ و قطعات لاستیکی تحت فشار، یک شاخص حیاتی و

گرفتن هر دو فاکتور "خواص مطلوب در حالت عادی" و "پایداری حرارتی برتر"، نمونه ۴ به عنوان بهترین و مطمئن ترین گزینه تأیید می شود. این نمونه ضمن کاهش مصرف اکسیدروی، کامپاندی با عملکرد بالا و پایدار در برابر حرارت تولید می کند.

با توجه به داده های جداول و شکل، دیسپرژن در نمونه های ۳ و ۴ پراکندگی یکنواخت تری را نشان می دهند که منجر به بهبود خواص مکانیکی و پخت شده است.

نتیجه گیری:

با توجه به داده های فوق، نمونه ۴ با ترکیب به عنوان بهترین نمونه انتخاب می شود، زیرا:

۱. چگالی پیوند عرضی بالا (11.63 dNm MH-ML).
۲. استحکام کششی و مدول عالی.
۳. مقاومت سایشی بسیار خوب.
۴. پراکندگی مطلوب و یکنواخت.
۵. تعادل مناسب بین سختی و انعطاف پذیری. این نمونه نه تنها مصرف اکسیدروی را کاهش می دهد، بلکه خواص مکانیکی و پخت را نیز بهبود می بخشد. بنابراین، استفاده از سامانه دوگانه MgO/ZnO با نسبت ۲:۳ به عنوان جایگزین بهینه برای نمونه مرجع فقط (ZnO) پیشنهاد می شود.

تعیین کننده است. این پارامتر نشان می دهد که لاستیک پس از برداشتن تنش فشاری، تا چه حد می تواند به شکل و ضخامت اولیه خود باز شود. هرچه درصد Compression Set کمتر باشد، نشان دهنده کیفیت بالاتر و عمر طولانی تر قطعه در سرویس است. نمونه ۴ بهترین مقاومت در برابر تغییر شکل دائمی تحت فشار و حرارت را در بین تمام نمونه ها دارد که برای اورینگ و قطعات فشاری یک امتیاز کلیدی و برنده محسوب می شود. برای ساخت اورینگ و قطعات لاستیکی، نمونه ۴ فرمولاسیونی است که هم دوست دار محیط زیست است، هم از نظر فنی برتر از نمونه مرجع عمل می کند و هم از پایداری و ماندگاری لازم در شرایط سخت کاری برخوردار است.

تحلیل پایداری حرارتی (Aging):

نمونه ۳ به دلیل خروج تغییرات مدول از محدوده تعریف شده، از کاندیداهای برتر حذف می شود. نمونه ۴ نه تنها از نظر خواص فیزیکی در حالت عالی (استحکام کششی 10.1 MPa ، سایش 76 mm^3 ، پراکندگی 96.5%) برتر است، بلکه از نظر پایداری حرارتی نیز بهترین عملکرد را دارد. این نمونه کمترین افت مقاومت کششی (فقط 3.5%) و تغییرات کاملاً قابل قبولی در ازدیاد طول و مدول را از خود نشان می دهد. نمونه های ۲ و ۵ نیز از نظر پایداری حرارتی قابل قبول هستند، اما خواص مکانیکی و پخت آن ها (مانند چگالی پیوند عرضی و مقاومت سایشی) در حالت عادی به پای نمونه ۴ نمی رسد. بنابراین، با در نظر

مراجع

- [1] Butuc G, Janssen A, van, Kees et al. Role of zinc oxide in sulfur crosslinking. In: Rubber & plastics news.
- [2] Chukwu M, Ekhatior I, Ekebafé L. Effect of zinc oxide level as activator on the mechanical properties of natural rubber composite. Nigerian Journal of Technology 2019; 38(3): 675. <https://doi.org/10.4314/njt.v38i3.19>
- [3] Heideman G. Reduced zinc oxide levels in Sulphur vulcanisation of rubber compounds: mechanistic aspects of the role of activators and multifunctional additives. Enschede University of Twente 2004; p. 197.
- [4] Fosmire G. Zinc toxicity. American Journal of Clinical Nutrition 1990; 51(2): 225-227. <https://doi.org/10.1093/ajcn/51.2.225>
- [5] Anu J, Benny G, Madhusoodanan KN. Current status of sulphur vulcanization and devulcanization chemistry: process of vulcanization 102-105
- [6] da Silva AA, da Rocha EB, Linhares FN, de Sousa AMF, Carvalho NM, Furtado CR. Replacement of ZnO by ecofriendly synthesized MgO in the NBR vulcanization. Polym Bull 2022; 79: 8535-8549.
- [7] Md Najib Alam, Vineet Kumar And Sangshin Park Article Advances in rubber compound using zno & mgo as co-cureactivator 1-17.