

بررسی تأثیر نسبت NCO/OH، غلظت و نوع کاتالیزور بر عمر کاربری سامانه پیونددهنده بر پایه پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل

محسن آذرگون^۱، عباس کبریتی^{۲*}، موسی نظری^۳

۱- کارشناس ارشد پیش‌رانه گرایش جامد ۲- دکتری مهندسی پلیمر، استادیار گروه مهندسی شیمی ۳- دانشجوی دکتری مهندسی شیمی

تهران- دانشگاه جامع امام حسین (ع)- دانشکده و پژوهشکده فنی و مهندسی- گروه مهندسی شیمی (مرکز علم و فناوری موسم)

فصلنامه علمی - پژوهشی بین‌رشته‌ای

سال دوم، شماره ۳، نسخه ۱،

پاییز ۱۳۹۷، صفحه ۶۵-۷۶

چکیده

در این پژوهش اثر مقادیر مختلف دو نوع کاتالیزور پخت رایج دی‌بوتیل‌تین‌دی‌لورات (DBT- DL) و تری‌فنیل بیسموت (TPB) و نسبت‌های مختلف NCO/OH (R) بر عمر کاربری و خواص فیزیکی سامانه پیونددهنده پلی‌بورتانی بر پایه پلی‌بوتادین خاتمه‌یافته با هیدروکسیل (HTPB) مورد بررسی قرار گرفته است. با افزایش مقدار کاتالیزور پخت برای هر دو نوع کاتالیزور، سرعت افزایش گرانیروی سامانه پیونددهنده بیش‌تر می‌شود. همچنین با افزایش مقدار R از ۰/۸ تا ۱ سرعت افزایش گرانیروی و چگالی اتصالات عرضی زیاد می‌شود. سامانه پیونددهنده برپایه ایزوفرون‌دی‌ایزوسیانات (IPDI) دو مرحله مجزای افزایش گرانیروی با دو ثابت سرعت متفاوت را نشان می‌دهد که این امر به حضور دو نوع گروه ایزوسیانات با واکنش‌پذیری‌های متفاوت در ساختار مولکولی این عامل پخت نسبت داده می‌شود. در ادامه خواص فیزیکی و تورم نمونه‌های پیونددهنده مورد بررسی قرار گرفت. بر اساس این نتایج، پیونددهنده‌ای که دارای بیش‌ترین چگالی اتصالات عرضی است، دارای کمترین میزان تورم هم است. مقدار عمر کاربری از R ۱ به ۱/۱، بر خلاف انتظار افزایش می‌یابد. در هنگام استفاده از کاتالیزور DBTDL، اثر تفاوت واکنش‌پذیری بین دو گروه ایزوسیانات IPDI به وضوح قابل تشخیص است ولی زمانی که از کاتالیزور پخت TPB استفاده می‌شود این تفاوت مشاهده نمی‌شود.

واژه‌های کلیدی

عمر کاربری
کاتالیزور پخت
مقدار R
گرانیروی
پیونددهنده

*مسئول مکاتبات:

a.kebritchi@ippi.ac.ir

۱ مقدمه

و ترانس و گروه وینیلی رزین، سرعت و زمان همزدن، اندازه ذرات بار جامد و همچنین توزیع اندازه ذرات آمونیوم پرکلرات (AP) و آلومینیم (Al)، نرخ بارپذیری جامد، نرم کننده و ... توسط محققین و پژوهشگران مورد مطالعه قرار گرفت [۷-۵]. در جدول ۱ سیر مطالعاتی و پژوهشی بررسی عوامل مؤثر بر عمر کاربری سامانه پیونددهنده و کامپوزیت پرانرژی طی چهار دهه اخیر بیان شده است.

با توجه به اهمیت کاتالیزور در سینتیک واکنش های شیمیایی از دو کاتالیزور پخت DBTDL و TPB برای افزایش سرعت واکنش های پخت مورد استفاده قرار گرفته است. درصد وزنی کاتالیزور برحسب درصد وزنی HTPB بیان می شود که دلیل آن سازوکار عملکرد کاتالیزور است. کاتالیزور با تشکیل کمپلکس بین گروه عاملی NCO عامل پخت و گروه های هیدروکسیل HTPB سطح انرژی فعال سازی مورد نیاز برای واکنش این دو گروه را کاهش داده و باعث افزایش سرعت واکنش این دو می شود، بنابراین باید برحسب درصد وزنی یکی از این دو واکنشگر مورد استفاده قرار گیرد. به طور متداول کاتالیزور مورد استفاده در پلی یورتان ها برحسب پلی ال مورد استفاده بیان می شود. انرژی فعال سازی کاتالیزورهای DBTDL و TPB به ترتیب ۳۰ و ۴۹ کیلوژول بر مول است. با توجه به انرژی فعال سازی کمتر کاتالیزور DBTDL نسبت به TPB، کاتالیزور DBTDL سرعت واکنش های پخت را به میزان بیشتری افزایش می دهد. از بین عوامل مؤثر بر عمر کاربری، نوع کاتالیزور پخت، مقدار کاتالیزور و همچنین میزان R (NCO/OH) دارای اهمیت بسیاری است.

۲ تجربی

۲-۱ مواد و تجهیزات

رزین پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل (HTPB) با متوسط وزن مولکولی 3090 g/mol ، عدد هیدروکسیل 40 mg KOH/gr و گرانیروی $5/256 \text{ Pa.S}$ در دمای 40°C و عاملیت $2/1$ ، نرم کننده دی اکتیل سبسات (DOS) با $99/46\%$ استر و اسیدیته $0/36\%$ ، عامل پخت IPDI

عمر کاربری کامپوزیت های پرانرژی یکی از مهم ترین مولفه های فرایندی تولید آنها به شمار می رود که به طور عمده تحت تأثیر عمر کاربری سامانه پیونددهنده آن است. کامپوزیت پرانرژی بر پایه پلی بوتادیان خاتمه یافته با هیدروکسیل (Hydroxyl terminat- HTPB) (Binder) شامل سامانه پیونددهنده (Aluminum) پلیمری، مواد افزودنی، پودر آلومینیم (Ammonium Per- AP) به عنوان سوخت فلزی و پودر chlorate به عنوان اکسیدکننده به طور گسترده ای در سامانه های مختلف مورد استفاده قرار می گیرند [۱]. فرایند اختلاط کامپوزیت پرانرژی در دو مرحله انجام می شود؛ که شامل مرحله پیش اختلاط تمام مواد تشکیل دهنده به جز عامل پخت در زمان مشخص و افزودن عامل پخت است. از آنجا که واکنش پخت پس از اضافه کردن عامل پخت به خمیر کامپوزیت پرانرژی آغاز می شود، زمان بهینه ای فرایند ریخته گری پس از اضافه کردن عامل پخت محدود می شود [۲]. خمیر کامپوزیت پرانرژی بر پایه HTPB باید در پایان اختلاط، گرانیروی مناسبی داشته باشد تا ریخته گری به سهولت انجام شود. به عبارت دیگر به مدت زمان پس از پایان فرایند اختلاط که کامپوزیت پرانرژی قابلیت ریخته گری دارد، عمر کاربری (Pot life) گویند. گرانیروی پایین خمیر باعث همگن شدن مواد تشکیل دهنده در کامپوزیت پرانرژی می شود. عمر کاربری طولانی برای سامانه پیونددهنده HTPB به منظور سهولت فرایند پذیری و تولید گرین (Grain) بدون نقص ضروری است. شبکه های پلی یورتانی از طریق واکنش اتصالات عرضی HTPB با ایزوسیانات تشکیل می شوند [۳]. عوامل مؤثر بر عمر کاربری کامپوزیت پرانرژی بر پایه HTPB به طور جدی از سال ۱۹۷۶ مورد مطالعه قرار گرفته است [۴]. کامپوزیت پرانرژی بر پایه HTPB باید در پایان اختلاط، گرانیروی، سیالیت و عمر کاربری قابل قبولی داشته باشد؛ لذا عوامل مؤثر بر عمر کاربری نظیر کاتالیزور پخت، دما، عامل پخت، مقادیر t_c کاتالیزور، اثر سیس

جدول ۱ بررسی عوامل مؤثر بر عمر کاربری سامانه پیونددهنده و کامپوزیت پُرانرژی طی چهار دهه اخیر

ردیف	نوع مرجع	عنوان	نویسندگان	سال انتشار	مرجع
۱	Patent	افزایش عمر کاربری کامپوزیت پُرانرژی بر پایه HTPB به وسیله فسفین اکسید	مارجوری و همکاران	۱۹۷۶	[۲]
۲	Patent	افزایش عمر کاربری کامپوزیت پُرانرژی به وسیله ترکیبات آزیریدینی	مارجوری و همکاران	۱۹۷۷	[۳]
۳	Patent	روشی برای افزایش عمر کاربری در واکنش‌های پخت	رونالد ساند و همکاران	۱۹۸۵	[۴]
۴	Article	عمر کاربری و اندازه‌گیری آن با کاهش دود کامپوزیت پُرانرژی	هاروسوکه توکی و همکاران	۱۹۹۱	[۵]
۵	Article	رئولوژی کامپوزیت پُرانرژی بر پایه HTPB: اثر سرعت و زمان اختلاط	ماتیا و همکاران	۱۹۹۳	[۶]
۶	Article	مطالعه پخت سامانه پیونددهنده کامپوزیت پُرانرژی بر پایه پلی‌یورتان	گویندان و همکاران	۱۹۹۴	[۷]
۷	Article	خواص مکانیکی الاستومرهای بر پایه HTPB-IPDI	سام اوزکار	۱۹۹۷	[۸]
۸	Article	رئولوژی کامپوزیت پُرانرژی بر پایه HTPB: توسعه و ارزیابی عمر کاربری	ماتیا و همکاران	۱۹۹۶	[۹]
۹	Article	ارزیابی معیارهای ترکیب پلیمر HTPB بر اساس افزایش گرانبوی و خواص مکانیکی خمیر	راما روا و همکاران	۲۰۰۰	[۱۰]
۱۰	Article	ارزیابی رئوسینتیکی و تشکیل شبکه پلی‌یورتان بر پایه HTPB	سکار و همکاران	۲۰۰۱	[۱]
۱۱	Article	مطالعات رئوسینتیکی روی تشکیل شبکه پلی‌یورتان بر پایه HTPB	سکار و همکاران	۲۰۰۲	[۱۱]
۱۲	Article	مطالعه DSC روی تأثیر کاتالیزورها و ایزوسیانات‌ها بر واکنش پخت HTPB	کورابینا و همکاران	۲۰۰۴	[۱۲]
۱۳	Article	تأثیر افزودنی‌ها بر خواص کامپوزیت پُرانرژی راکتی	وسنا رودیک و همکاران	۲۰۰۴	[۱۳]
۱۴	Article	تأثیر عوامل پخت بر خواص کامپوزیت پُرانرژی راکتی	وسنا رودیک و همکاران	۲۰۰۵	[۱۴]
۱۵	Article	تأثیر عوامل پخت دوگانه بر فرایندپذیری کامپوزیت پُرانرژی	جاوالکار و همکاران	۲۰۰۷	[۱۵]
۱۶	Article	رفتار رئولوژی کامپوزیت پُرانرژی بر پایه HTPB: اثر دما و عمر کاربری بر سرعت ریخته‌گری	ماهانتا و همکاران	۲۰۰۷	[۱۶]
۱۷	Article	مطالعه اثر کاتالیزور TEPB بر واکنش پخت شدن سامانه پیونددهنده HTPB	چانگ و همکاران	۲۰۱۶	[۱۷]
۱۸	Article	مطالعه تأثیر نرم‌کننده و TDI در دماهای مختلف بر کامپوزیت پُرانرژی	جاوالکار و همکاران	۲۰۰۹	[۱۸]
۱۹	Article	مسائل مربوط به افزایش عمر کاربری سامانه پیونددهنده کامپوزیت پُرانرژی بر پایه HTPB	سکار و همکاران	۲۰۱۵	[۱۹]
۲۰	Article	تجزیه و تحلیل رئوسینتیکی خمیر کامپوزیت پُرانرژی بر پایه HTPB	ماهانتا و همکاران	۲۰۱۰	[۲۰]
۲۱	Article	ارزیابی فرایند اتصالات عرضی و زمان تشکیل ژل برای سامانه HTPB-IPDI	نیکولاس داکرات و همکاران	۲۰۱۳	[۲۱]
۲۲	Article	رفتار پخت پلی‌یورتان به‌عنوان رزین و اتصال‌دهنده پلیمری مواد منفجره	سانگموک و همکاران	۲۰۱۵	[۲۲]
۲۳	Article	گرانروی پخت پیونددهنده HTPB برای نشاندن ذرات میکرو و نانو آلومینیوم	فیلیپو مچی	۲۰۱۴	[۲۳]
۲۴	Article	شبکه‌های پلی‌یورتانی بر پایه HTPB برای طراحی پیونددهنده کامپوزیت پُرانرژی	سکار و همکاران	۲۰۱۴	[۲۴]
۲۵	Article	خواص رئولوژی و پخت برای عملکرد پیشرفته پلی‌یورتان	بتریز لوسيو	۲۰۱۴	[۲۵]
۲۶	Article	تأثیر میکروساختار روی پلی‌یورتان بر پایه HTPB	دی و همکاران	۲۰۱۵	[۲۶]
۲۷	Article	تجزیه و تحلیل رئوسینتیکی پخت سامانه پیونددهنده بر پایه HTPB-DOA-MDI	چای و همکاران	۲۰۱۶	[۲۷]
۲۸	Article	بررسی عملکرد رزین بر رفتار پخت و خواص مکانیکی پلی‌یورتان بر پایه HTPB	طوسی و شهیدزاده	۲۰۱۵	[۲۸]
۲۹	Article	مروری کوتاه بر تأثیر مولفه‌های فرایندی بر عمر کاربری کامپوزیت پُرانرژی بر پایه پلی‌یوتادین دارای گروه هیدروکسیل انتهایی	محمد تقی نژاد هادی	۲۰۱۸	[۲۹]

استفاده شده است. مقدار R توسط معادله (۱) محاسبه می‌شود. در جدول (۲) مقدار اجزای مورد استفاده در نمونه‌های سامانه پیونددهنده بر پایه HTPB بیان شده است. سامانه پیونددهنده به مدت ۱۵ دقیقه مخلوط می‌شود. دمای انجام آزمایش ۵۰°C در نظر گرفته شده است. هر ۱۵ دقیقه یکبار گرانیروی، درصد گشتاور پیچشی، نوع اسپیندل و سرعت اسپیندل را یادداشت کرده و گرانیروی مطابق معادله (۲) محاسبه می‌شود.

$$R = \frac{56100 \times PI \times MI \times nI}{MWI \times MR \times OH_{nb}}$$

معادله (۱):

PI = خلوص عامل پخت

MI = درصد جرمی عامل پخت

nI = عاملیت عامل پخت

MWI = جرم مولکولی عامل پخت

MI = HTPB درصد وزنی رزین

HTPB = OH_{nb} تعداد OH رزین

برای محاسبه مقدار گرانیروی سامانه پیونددهنده در حال

با وزن مولکولی ۲۲۲/۳ g/mol و چگالی ۱/۰۶ gr/cm³، کاتالیزور پخت DBTDL با جرم مولکولی (g/mol) ۶۳۱/۵۶ و چگالی (g/ml) ۱/۰۶۶ و کاتالیزور پخت TPB با جرم مولکولی (g/mol) ۴۴۰/۲۹۸ و چگالی ۱/۵۸۵ همگی از صنعت تهیه شدند.

برای تعیین عمر کاربری سامانه پیونددهنده از دستگاه گرانیروی سنج چرخشی بروکفیلد مدل LV DV-II+P و برای اندازه‌گیری میزان سختی نمونه‌های تهیه‌شده، از دستگاه سختی سنج Shore A مدل ۱۱ ساخت شرکت SANTAM استفاده شد. استاندارد مورد استفاده برای آزمون سختی، ASTM D2240 است [۴-۵].

۲-۲ تهیه فرمول بندی‌های سامانه پیونددهنده بر پایه BPTH

در این آزمایش به ترتیب از مقادیر مختلف کاتالیزور پخت (% ۰/۰۱، % ۰/۰۰۷۵ و % ۰/۰۰۵)، رزین HTPB % ۱۳/۹۵ و DOS % ۶/۰۵ عامل پخت IPDI

جدول ۲ مقدار اجزای مورد استفاده در سامانه پیونددهنده بر پایه پلی‌بوتادی‌ان خاتمه‌یافته با هیدروکسیل (در مقدار ۷۹/۵۴٪) HTPB و % ۱۳/۹۵ (SD (Sample DBTDL) و (DOS) و ST (Sample TPB)

مقدار اجزا (%)				کد نمونه	ردیف
IPDI	TPB	DBTDL	R		
۵/۷۲	-	۰/۰۰۸	۱/۱	SD۰/۰۱-۱/۱	۱
۵/۲	-	۰/۰۰۸	۱	SD۰/۰۱-۱	۲
۴/۶۸	-	۰/۰۰۸	۰/۹	SD۰/۰۱-۰/۹	۳
۴/۲	-	۰/۰۰۸	۰/۸	SD۰/۰۱-۰/۸	۴
۵/۷۲	-	۰/۰۰۶	۱/۱	SD۰/۰۰۷۵-۱/۱	۵
۵/۲	-	۰/۰۰۶	۱	SD۰/۰۰۷۵-۱	۶
۴/۶۸	-	۰/۰۰۶	۰/۹	SD۰/۰۰۷۵-۰/۹	۷
۴/۲	-	۰/۰۰۶	۰/۸	SD۰/۰۰۷۵-۰/۸	۸
۵/۷۲	-	۰/۰۰۴	۱/۱	SD۰/۰۰۵-۱/۱	۹
۵/۲	-	۰/۰۰۴	۱	SD۰/۰۰۵-۱	۱۰
۴/۶۸	-	۰/۰۰۴	۰/۹	SD۰/۰۰۵-۰/۹	۱۱
۴/۲	-	۰/۰۰۴	۰/۸	SD۰/۰۰۵-۰/۸	۱۲
۵/۲	۰/۰۰۸	-	۱	ST۰/۰۱-۱	۱۳
۴/۶۸	۰/۰۰۸	-	۰/۹	ST۰/۰۱-۰/۹	۱۴
۵/۲	۰/۰۰۶	-	۱	ST۰/۰۰۷۵-۱	۱۵
۴/۶۸	۰/۰۰۶	-	۰/۹	ST۰/۰۰۷۵-۰/۹	۱۶

۲-۴ آزمون سختی سامانه‌های پیونددهنده بر پایه IDPI-BPTH در حضور دو کاتالیزور پخت LDTBD و BPT در مقادیر مختلف

مدت زمانی که برای پخت سامانه پیونددهنده در نظر گرفته شد ۷ روز است. با افزایش روزهای سپری شده میزان سختی سامانه‌های پیونددهنده نیز افزایش می‌یابد و پخت کامل تر می‌شود. با گذشت زمان بر مقدار اتصالات عرضی درون پیونددهنده افزوده شده و سختی سامانه پیونددهنده نیز افزایش می‌یابد. (بعد از طی ۷ روز، سختی سامانه پیونددهنده ثابت می‌شود) [۲۲].

۳ نتایج و بحث

۳-۱ بررسی عمر کاربری سامانه پیونددهنده HT- PB-IPDI با مقدار کاتالیزور (DBTDL) % ۰/۱۰ و R=۱/۰ در دمای ۵۰°C

شکل (۱) روند تغییرات Ln گرانروی نسبت به زمان را برای سامانه پیونددهنده HTPB-IPDI در دمای ۵۰°C نشان می‌دهد. گرانروی مخلوط در حال پخت شدن با گذشت زمان و تشکیل یورتان، افزایش می‌یابد. افزایش گرانروی در طول فرایند پخت به دو عامل تقسیم بستگی دارد: (۱) افزایش وزن مولکولی به دلیل رشد زنجیره‌ی پلیمری (۲) شاخه‌دار شدن زنجیره به علت حضور پیش پلیمر یا مواد افزودنی [۱]. میزان گرانروی سامانه در حال پخت در هر زمان (t) را می‌توان از طریق معادله‌ی ۵ به صورت تابع نمایش نشان داد [۱]:

$$\eta_t = \eta_0 e^{kt} \quad \text{معادله (۵)}$$

اگر از رابطه‌ی بالا لگاریتم (ln) بگیریم، معادله ۶ حاصل می‌شود [۱]:

$$\ln \eta_t = \ln \eta_0 + kt \quad \text{معادله (۶)}$$

گرانروی در زمان $t = \eta_t$

گرانروی در زمان شروع η_0

بنابراین نمودار بر اساس لگاریتم گرانروی در مقابل زمان باید به صورت خط راست رسم شود که شیب آن، ثابت سرعت (k) برای افزایش گرانروی است.

پخت از معادله (۲) استفاده می‌شود [۲۹].

معادله (۲):

$$FSR = TK * SMC * \frac{10000}{RPM}$$

FSR (full Scale Viscosity Range) = بیشینه گرانروی بر حسب

سانتی پوز cP

TK (torque) = درصد گشتاور پیچشی

SMC (spindle multiplier constant) = ضریب ثابت اسپیندل

RPM (spindle speed) = سرعت چرخش اسپیندل (دور بر دقیقه)

۲-۳ آزمون تورم برای سامانه پیونددهنده IDPI-BPTH با کاتالیزور LDTBD و BPT

آزمون تورم برای نمونه‌های سامانه پیونددهنده در حلال تولوئن و در دمای ۲۵°C، انجام شد. برای انجام آزمون تورم برای سامانه پیونددهنده HTPB-IPDI، نمونه‌ها ابتدا برش کاری و سپس توزین و اندازه‌گیری ابعاد نمونه‌ها قبل از متورم‌سازی انجام شده است و بعد از آن نمونه‌ها در حلال تولوئن قرار گرفتند [۳۰-۳۲]. نمونه‌ها پس از گذشت ۲۴ ساعت از حلال خارج و مقدار تورم تعادلی نمونه‌ها از راه وزن‌سنجی معین شد. سپس نمونه به مدت ۲ ساعت در گرم‌خانه در دمای ۱۰۰°C قرار گرفت تا حلال آن خارج شود و در مرحله بعد مجدداً نمونه خشک‌شده توزین و نتایج ثبت شد [۳۰].

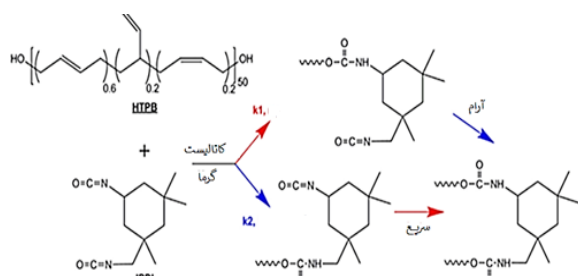
کسر حجمی و چگالی اتصالات عرضی با استفاده از نتایج آزمون تورم و معادله فلوری-رنر (Flory-Rhener) (معادله ۳ و ۴) محاسبه شده است [۳۰، ۳۱ و ۳۲].

معادله (۳):

$$v = \frac{1}{1 + \left\{ \frac{m_s - m_{ex}}{m_{ex}} \right\} \left\{ \frac{\rho_p}{\rho_s} \right\}}$$

$$\mu = \frac{-[\ln(1-v) + v + xv^2]}{V \left[v^{1/3} - \frac{v}{2} \right]} \quad \text{معادله (۴)}$$

در این معادله‌ها v کسر حجمی پلیمر، m_s وزن نمونه پس از تورم تعادلی، m_{ex} وزن نمونه خشک‌شده، ρ_p چگالی پلیمر، ρ_s چگالی حلال تولوئن، χ ضریب برهم‌کنش پلیمر حلال برابر با ۰/۳۵۵، V حجم مولی حلال (cm^3/mol) ۱۰۶/۳ و μ چگالی اتصالات عرضی است [۳۰].



شکل ۲ طرح‌واره واکنش HTPB با IPDI [۳۶].

پخت شد، این نمونه دارای خواص لاستیکی مطلوب بوده و سختی آن نیز برابر با Shore A ۱۵/۳۳ است [۲۲] و [۳۴]. طرح‌واره واکنش پخت بین HTPB و IPDI در شکل ۲ نشان داده شده است.

۳-۲ مقایسه عمر کاربری سامانه‌های پیونددهنده

بر پایه BPTH

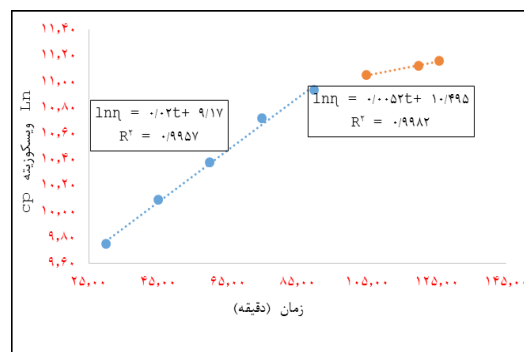
۳-۲-۱ اثر نوع کاتالیزور

شکل (۳) نمودار سامانه‌های پیونددهنده‌ای را نشان می‌دهد که مقدار R و مقدار کاتالیزور پخت آن‌ها با هم برابر است. در سامانه‌های پیونددهنده‌ای که دارای کاتالیزور پخت DBTDL هستند، افزایش گرانیروی در واحد زمان با سرعت بیشتری انجام می‌شود. همچنین تشخیص دو مرحله بودن واکنش در نمودار با سامانه پیونددهنده حاوی کاتالیزور پخت DBTDL با وضوح بیشتری قابل تشخیص است [۳۵].

۳-۲-۲ اثر مقدار R

در شکل (۴ و ۵) سامانه‌های پیونددهنده‌ای را مشاهده می‌کنید که نوع و مقدار کاتالیزور (DBTDL) پختشان، یکسان ولی مقدار R آن‌ها، متفاوت است. در شکل ۴ و ۵ مشاهده می‌کنید که با زیاد شدن مقدار R از ۰/۸ تا ۱- مقدار شیب خط (سرعت افزایش گرانیروی) افزایش می‌یابد ولی با افزایش مقدار R از ۱- تا ۱/۱ مقدار شیب خط کاهش می‌یابد.

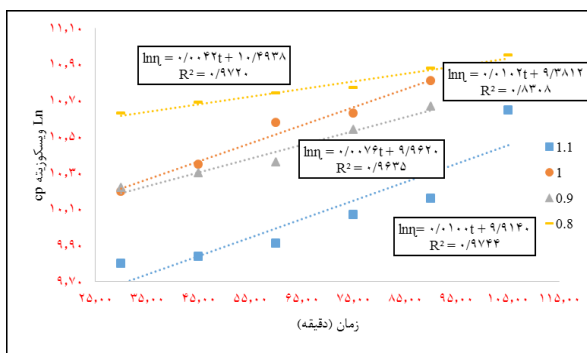
در شکل (۶) سامانه‌های پیونددهنده‌ای را مشاهده می‌کنید که مقدار کاتالیزور و نوع کاتالیزور پختشان یکسان ولی مقدار R آن‌ها متفاوت است. با توجه به نمودارهای رسم شده قابل درک است که با افزایش مقدار R در



شکل ۱ تغییرات لگاریتم طبیعی گرانیروی نسبت به زمان برای سامانه پیونددهنده با مقدار کاتالیزور (دی‌بوتیل‌تین‌دی‌لورات) ۰/۰۱% و مقدار ایزوسیانات به هیدروکسیل (R) برابر ۱/۰ و در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد

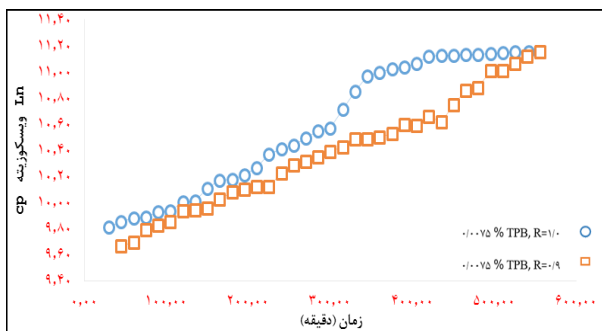
همان‌طوری که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، با افزایش زمان، گرانیروی نیز افزایش یافته است. این امر به دلیل تشکیل اتصالات عرضی و افزایش وزن مولکولی در نتیجه افزایش رشد زنجیر پلیمر به دلیل پخت سامانه پیونددهنده HTPB-IPDI است. IPDI دارای ساختار حلقوی و نامتقارن آلیفاتیک و همچنین ایزوسیانات نوع اول و نوع دوم است، همان‌طوری که در شکل (۱) مشاهده می‌ود، با افزایش زمان، گرانیروی به صورت خطی در حال افزایش است (طبق معادله ۶) [۱۲ و ۳۳].

با توجه به شکل (۱) مرحله اول واکنش از EOM (End of Mixing) تا ۹۰ دقیقه و مرحله دوم واکنش از ۱۰۵ تا ۱۲۶ دقیقه است. بنابراین نقطه جهش به دلیل انتقال واکنش از مرحله اول به مرحله دوم از ۹۰ دقیقه به ۱۰۵ دقیقه مشاهده می‌شود. با توجه به شکل (۱) مرحله اول واکنش دارای ثابت سرعت k_1 ۰/۰۲ بوده و مرحله دوم واکنش دارای ثابت سرعت k_2 ۰/۰۰۵۲ است. ثابت سرعت افزایش گرانیروی در مرحله اول، بیش از سه برابر مرحله دوم است. علت این پدیده، واکنش پذیری بالاتر گروه ایزوسیانات (گروه ایزوسیاناتی که به صورت مستقیم به حلقه آلیفاتیک متصل است) نسبت به گروه ایزوسیاناتی که به گروه متیل متصل، به دلیل نبود گروه متیل به عنوان عامل فضایی مزاحم است. این نمونه پس از ۷ روز قرار گرفتن در گرم‌خانه با دمای ۶۰°C،

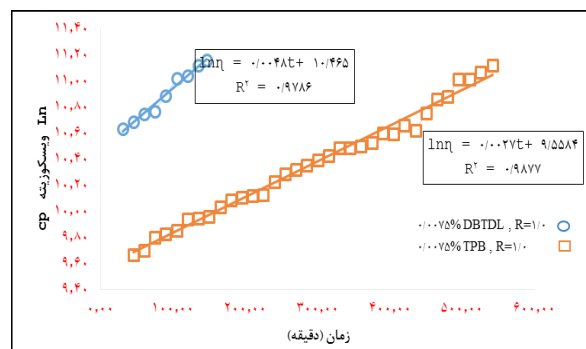


شکل ۴ منحنی‌های مرحله اول افزایش گرانی (اولین ثابت سرعت) ۴ سامانه پیونددهنده در مقدار ۰/۰۰۷۵٪ کاتالیزور دی بوتیل تین دی لورات

بیشتر از عمر کاربری در مقدار $R=1$ و همچنین مقدار عمر کاربری کمتری نسبت به $R=0.9$ دارد که این نتیجه حاصل شده برای تمامی نمونه‌های انجام شده نیز صادق می‌کند [۳۵]. با توجه به بررسی‌ها و تحقیقات انجام گرفته احتمالاً، دلیل این نتیجه حاصل شده به این شرح است: با توجه به این که IPDI و HTPB دو ماده با ماهیت‌های مختلف هستند در نتیجه امتزاج پذیری متفاوتی در هنگام ترکیب با یکدیگر دارند. وقتی میزان R بیش‌تر از مقدار ۱ می‌شود، عامل پخت IPDI به صورت توده در می‌آید که به دلیل جاذبه‌ای است که بین مولکول‌های یکسان IPDI اتفاق می‌افتد و در نتیجه سطح واکنش بین عامل پخت و رزین HTPB کاهش می‌یابد.

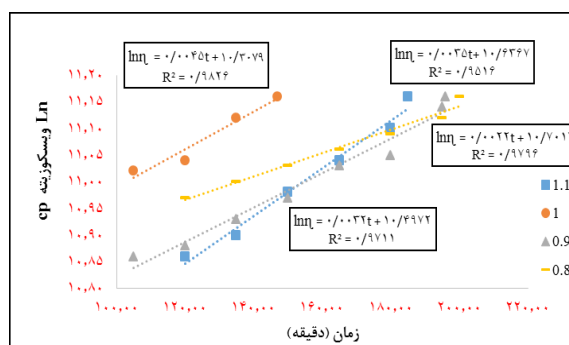


شکل ۶ مقایسه دو سامانه پیونددهنده در مقدار ۰/۰۰۷۵٪ کاتالیزور تری فنیل بیسموت

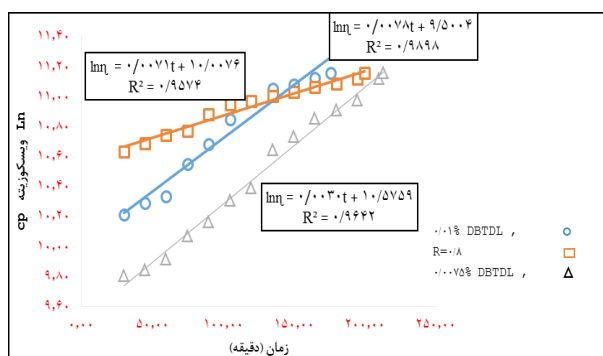


شکل ۳ مقایسه گرانی دو سامانه پیونددهنده در مقدار ایزوسیانات به هیدروکسیل برابر ۱/۰ و مقدار ۰/۰۰۷۵٪ کاتالیزور دی بوتیل تین دی لورات و تری فنیل بیسموت

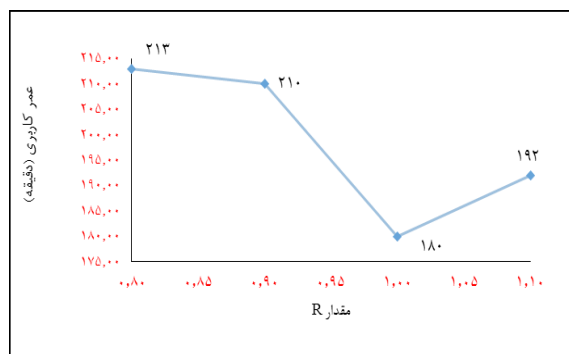
سامانه‌های پیونددهنده، گرانی در زمان کمتری نسبت به سامانه‌های دیگر افزایش و در نتیجه مقدار عمر کاربری کاهش می‌یابد [۲۲ و ۳۳]. در شکل (۷) روند تغییرات عمر کاربری با افزایش مقدار R بیان شده است [۳۵]. با افزایش مقدار R در نمونه‌های سامانه پیونددهنده برپایه HTPB روند کاهش میزان عمر کاربری مشاهده می‌شود برای مثال با افزایش R از مقدار ۰/۸ تا ۱/۰ میزان عمر کاربری کاهش می‌یابد اما نکته قابل توجه آن است که ما انتظار داشتیم که با افزایش مقدار R از ۱/۰ به ۱/۱، عمر کاربری نیز کاهش یابد ولی برعکس، افزایش در مقدار عمر کاربری را مشاهده کردیم. افزایش عمر کاربری برای $R=1/1$



شکل ۵ منحنی‌های مرحله اول افزایش گرانی (اولین مقدار ثابت سرعت) ۴ سامانه پیونددهنده در مقدار ۰/۰۰۷۵٪ کاتالیزور دی بوتیل تین دی لورات



شکل ۸ مقایسه ۳ سامانه پیونددهنده در مقدار ایزوسیانات به هیدروکسیل برابر ۰/۸ و مقدار کاتالیزورهای متفاوت

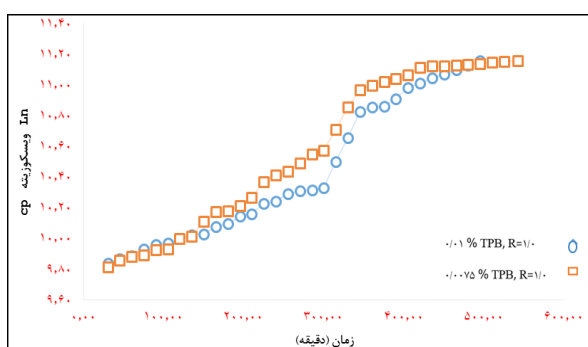


شکل ۷ نمودار تغییرات روند عمر کاربری با افزایش مقدار ایزوسیانات به هیدروکسیل

۳-۳ مقایسه سختی سامانه های پیونددهنده بر پایه BPTH

۱-۳-۳ مقایسه سختی ۴ سامانه پیونددهنده بر پایه BPTH در مقدار ۰/۱۰٪ کاتالیزور LDTBD

در شکل (۱۰) نمودار سختی سامانه های پیونددهنده با مقادیر R مختلف و مقدار کاتالیزور برابر ارائه شده است از هر نمونه بعد از طی ۴-۸ روز از قرار داشتن در گرم خانه در دمای ۶۰ °C مقدار سختی اندازه گیری شده است. نمونه های پخت نشده مقدار سختی را بین ۰-۴ و نمونه های پخت شده مقدار سختی را بالاتر از ۴ نشان می دهند. مقدار سختی نمونه ها پس از طی چند روز افزایش می یابد که نشان دهنده پخت سامانه پیونددهنده است. (یک نمونه از ۱۶ نمونه ارائه شده است).



شکل ۹ مقایسه ۲ سامانه پیونددهنده در مقدار ایزوسیانات به هیدروکسیل برابر ۱/۰ و مقادیرهای متفاوت کاتالیزور تری فنیل بیسموت

یابد. کاهش سطح واکنش باعث کاهش سرعت واکنش پخت (تشکیل یورتان) و در نتیجه باعث افزایش مقدار عمر کاربری می شود [۳۵].

۳-۲-۳ اثر نوع و مقدار کاتالیزور LDTBD و BPT

در شکل (۸) و (۹) سامانه های پیونددهنده ای ارائه شده اند که مقدار R و مقدار کاتالیزور پخت شان یکسان ولی نوع کاتالیزور آن ها با یکدیگر متفاوت است. در نمودار مشاهده می کنید که سرعت افزایش گرانی در حضور کاتالیزور DBTDL بیشتر از TPB است، در نتیجه عمر کاربری در حضور DBTDL کمتر است [۱].

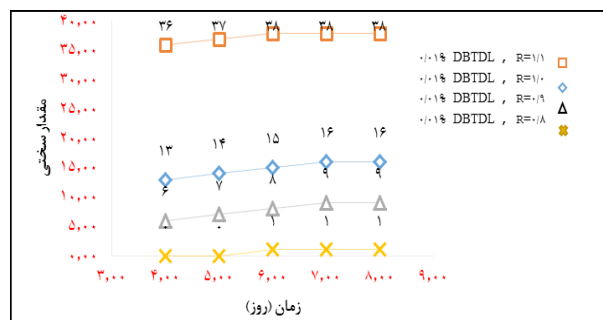
با استفاده از مقادیر وزنی بدست آمده برای سامانه پیونددهنده HTPB-IPDI با کاتالیزور DBTDL و TPB قبل و بعد از آزمون تورم، با به کارگیری فرمول ها، مولفه های حاصل از آزمون تورم برای نمونه های ذکر شده محاسبه شده اند. با افزایش مقدار R و مقدار کاتالیزور پخت؛ مقدار چگالی اتصالات عرضی در بازه زمانی مشخص، بیشتر می شود. با افزایش مقدار چگالی اتصالات عرضی، مقدار سختی و میزان پخت سامانه پیونددهنده نیز افزایش می یابد. با افزایش میزان چگالی اتصالات عرضی مقدار تورم نمونه های سامانه پیونددهنده کاهش می یابد. برای مثال، دو نمونه با مقدار R، ۱/۱ و ۰/۹ و مقدار یکسان کاتالیزور پخت، نمونه دارای مقدار R، ۱/۱ مقدار چگالی اتصالات عرضی و سختی بیشتری دارد همچنین میزان تورم آن کمتر است [۳۰-۳۲].

در جدول (۳) به صورت کامل، تمام داده‌های به دست آمده از نمونه‌های سامانه پیونددهنده بیان شده است.

۴ نتیجه‌گیری

با توجه به بررسی اثر کاتالیزور پخت و مقدار R روی عمر کاربری و خواص مکانیکی سامانه پیونددهنده، نتایج به دست آمده بدین شرح است:

۱) با اعمال تغییرات در مقدار کاتالیزور پخت، عمر کاربری هم تغییر می‌کند. با افزایش درصد میزان کاتالیزور پخت به واکنش، عمر کاربری کاهش می‌یابد و برعکس.



شکل ۱۰ مقایسه سختی ۴ سامانه پیونددهنده در مقدار ۰/۰۱% کاتالیزور دی بوتیل تین دی لورات

جدول ۳ عمر کاربری نمونه‌های سامانه پیونددهنده بر پایه پلی‌بوتادی‌ان خاتمه‌یافته با هیدروکسیل

ردیف	کد نمونه	میانگین مقدار سختی در روزهای ۴-۸ پس از افزودن عامل پخت	چگالی اتصالات عرضی (μ) عرضی (mol/m^3) 10^4	وزن مولکولی بین نقاط اتصال عرضی (M_c) ($\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$)	R	عمر کاربری (دقیقه)	نتایج قابل مشاهده (پس از ۷ روز)
۱	SD۰/۰۱-۱/۱	۳۷/۴	۲/۹	۱۱۸۲۶	۱/۱	۱۶۶	پخت
۲	SD۰/۰۱-۱	۱۴/۸	۲/۷	۱۲۱۴۵	۱/۰	۱۲۶	پخت
۳	SD۰/۰۱-۰/۹	۷/۸	-	-	۰/۹	۱۶۷	پخت
۴	SD۰/۰۱-۰/۸	۰/۶	-	-	۰/۸	۱۷۶	عدم پخت
۵	SD۰/۰۰۷۵- ^{-۱/۱}	۳۱/۸	۲/۲	۱۳۳۱۸	۱/۱	۱۸۵	پخت
۶	SD۰/۰۰۷۵-۱	۹/۸	۲/۱	۱۳۶۵۴	۱/۰	۱۴۷	پخت
۷	SD۰/۰۰۷۵- ^{-۰/۹}	۹/۴	-	-	۰/۹	۱۹۶	عدم پخت
۸	SD۰/۰۰۷۵- ^{-۰/۸}	۰/۶	-	-	۰/۸	۲۰۰	عدم پخت
۹	SD۰/۰۰۵- ^{-۱/۱}	۱۲/۴	۱/۸	۱۴۱۱۹	۱/۱	۱۹۲	پخت
۱۰	SD۰/۰۰۵-۱	۸/۴	۱/۷	۱۴۶۲۶	۱/۰	۱۸۰	پخت
۱۱	SD۰/۰۰۵- ^{-۰/۹}	۰	-	-	۰/۹	۲۱۰	عدم پخت
۱۲	SD۰/۰۰۵- ^{-۰/۸}	۰	-	-	۰/۸	۲۱۳	عدم پخت
۱۳	ST۰/۰۱-۱	۱۴/۴	۲/۳	۱۲۹۸۴	۱/۰	۴۹۵	پخت
۱۴	ST۰/۰۱-۰/۹	۱/۸	-	-	۰/۹	۵۱۵	عدم پخت
۱۵	ST۰/۰۰۷۵-۱	۱۱/۸	۱/۸	۱۴۳۱۴	۱/۰	۵۴۲	پخت
۱۶	ST۰/۰۰۷۵- ^{-۰/۹}	۰	-	-	۰/۹	۵۵۵	عدم پخت

که بعد از گذشت ۷ روز در دمای 50°C پخت شدند، مقادیر مختلفی را نشان می‌دهند. نمونه‌های سامانه پیونددهنده که بیش‌ترین مقادیر R و کاتالیزور پخت را دارند، بیش‌ترین میزان چگالی اتصالات عرضی و تشکیل شبکه یورتان و همچنین کمترین میزان تورم را نشان می‌دهند. (۵) مقادیر عمر کاربری در سامانه‌های پیونددهنده برپایه HTPB در حضور کاتالیزور پخت DBTDL کمتر از کاتالیزور پخت TPB است که دلیل آن، واکنش پذیری و فعالیت بیشتر کاتالیزور پخت DBTDL نسبت به TPB است. کاتالیزور پخت DBTDL انرژی فعال‌سازی و مرحله گذار واکنش تشکیل یورتان را بیشتر تأمین می‌کند و در نتیجه، سرعت واکنش تشکیل یورتان و عمل پخت در حضور کاتالیزور DBTDL بیشتر می‌شود و مقدار عمر کاربری آن کمتر می‌شود.

(۲) با افزایش یا کاهش مقدار کاتالیزور پخت، سرعت واکنش تغییر می‌کند و تغییرات سرعت واکنش بر تعیین زمان موثر خواهد بود.

(۳) میزان سختی نمونه‌های سامانه پیونددهنده برپایه HTPB به مقدار R و مقدار کاتالیزور پخت بستگی دارد. تغییرات سختی نمونه‌های سامانه پیونددهنده برپایه HTPB با افزایش مقدار R از $0/8$ تا $1/1$ و همپنین با افزایش مقدار کاتالیزور پخت، افزایش می‌یابد. نمونه‌های سامانه پیونددهنده‌ای که بعد از گذشت ۷ روز در دمای 50°C پخت نشد، تغییرات سختی را بین $0-4$ نشان می‌دهند. نمونه‌های سامانه پیونددهنده‌ای که بعد از گذشت این مدت زمان، پخت شدند میزان سختی بیشتر از ۴ را دارند.

(۴) چگالی اتصالات عرضی نمونه‌های سامانه پیونددهنده‌ای

مراجع

- 1- Sekkar, V. K. Ambika Devi, and K. Ninan, Rheo-kinetic Evaluation on the Formation of Urethane Networks Based on Hydroxyl-Terminated Polybutadiene. *Journal of Applied Polymer Science*. 79(10): p. 1869-1876. 2001
- 2- Cucksee, Marjorie T., and Henry C. Allen. "Extension of Pot Life of HTPB Composite Propellants by Phosphine Oxides." U.S. Patent No. 3,974,004. 10 Aug. 1976.
- 3- Cucksee, Marjorie T., and Henry C. Allen. "Pot Life Extension of Isocyanate Cured Propellants by Aziridine Compounds." U.S. Patent No. 4,019,933. 26 Apr. 1977.
- 4- Sanden, R. "Method for Extension of Pot Life in Curing Reactions." U.S. Patent No. 4,493,916. 15 Jan. 1985.
- 5- Tokui, H. and A. Iwama, Pot Life Problem and its Measure with a Reduced Smoke Propellant Production. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. 16(3): p. 105-109, 1991.
- 6- Muthaiah, R. Manjari, R., Krishnamurthy, V. N., & Gupta, B. R. Rheology of HTPB Propellant: Effect of Mixing Speed and Mixing Time. *Defence Science Journal*. 43(2): p. 167, 1993.
- 7- Govindan, G. and S. Athithan, Studies on Curing of Polyurethane Propellant Binder System. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. 19(5): p. 240-244, 1994.
- 8- Haska, S. B. Bayramli, E., Pekel, F., and Özkar, S., Mechanical Properties of HTPB-IPDI-Based Elastomers. *Journal of Applied Polymer Science*. 64(12): p. 2347-2354, 1997.
- 9- Muthiah, R. V. Krishnamurthy, and B. Gupta, Rheology of HTPB Propellant: Development of Generalized Correlation and Evaluation of Pot life. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. 21(4): p. 186-19, 1996.
- 10- Rao, M. R. Scariah, K. J., Varghese, A., Naik, P. V., Swamy, K. N., & Sastri, K. S. Evaluation of Criteria for Blending Hydroxy Terminated Polybutadiene (HTPB) Polymers Based on Viscosity Build-up and Mechanical Properties of Gumstock. *European Polymer Journal*. 36(8): p. 1645-1651, 2000.
- 11- Sekkar, V. S. Venkatachalam, and K. Ninan, Rheokinetic Studies on the Formation of Urethane Networks Based on Hydroxyl Terminated Polybutadiene. *European Polymer Journal*. (1)38: p. 169-178, 2002.
- 12- Korah Bina, C. K. Kannan, and K. Ninan, DSC Study on the Effect of Isocyanates and Catalysts on the HTPB Cure Reaction. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 78(3): p. 753-760V, 2004.
- 13- Rodić, V. and M. Petrić, The Effect of Additives on Solid Rocket Propellant Characteristics. *Scientific Technical Review*. 54(3-4): p. 9-1, 2004.
- 14- Vesna, R. and M. Petric, The Effect of Curing Agents on Solid Composite Rocket Propellant Characteristics. *Scientific-Technical Review*: p. 46-50, 2005.
- 15- Jawalkar, S. Kurva, R., Singh, P. P., and Bhattacharya, B., Influence of Bicurative on Processibility of Composite Propellant. *Defence Science Journal*. 57(5): p. 669, 2007.
- 16- Mahanta, A. I. Dharmasaktu, and P. Pattnayak, Rheological Behaviour of HTPB-Based Composite Propellant: Effect of Temperature and Pot Life on Casting Rate. *Defence Science Journal*. 57(4): p. 435, 2007.
- 17- Chang, S. J., Tang, J., Liu, X., and Yan, W., "Study on Catalysis Effect of HTPB on the Curing Reaction of HTPB Binder System." *Iop Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 137, No. 1, P. 012057. Iop Publishing, 2016.
- 18- Jawalkar, S. N., Ramesh, K., Radhakrishnan, K. K., & Bhattacharya, B. Studies on the Effect of Plasticiser and Addition of Toluene Diisocyanate at Different Temperatures in Composite Propellant Formulations. *Journal of Hazardous Materials*. 164(2): p. 549-554, 2009.
- 19- Sekkar, V. and T.S.K. Raunija, Issues Related with Pot Life Extension for Hydroxyl-Terminated Polybutadiene-Based Solid Propellant Binder System. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. 40(2): P. 267-274, 2015.
- 20- Mahanta, A.K. M. Goyal, and D.D. Pathak, Rheokinetic Analysis of Hydroxy Terminated Polybutadiene Based Solid Propellant Slurry. *Journal of Chemistry*. 7(1): P. 171-179, 2010.
- 21- Ducruet, N., Delmotte, L., Schrodj, G., Stankiewicz, F., Desgardin, N., Vallat, M. F., & Haidar, B. Evaluation of Hydroxyl Terminated Polybutadiene-Isophorone Diisocyanate Gel Formation during Crosslinking Process. *Journal of Applied Polymer Science*. 128(1): P. 436-443, 2013.
- 22- Lee, S. Choi, J. H., Hong, I. K., and Lee, J. W., Curing Behavior of Polyurethane as a Binder for Polymer-Bonded Explosives. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 21: P. 980-9, 2015.

- 23- Maggi, F. Curing Viscosity of HTPB-Based Binder Embedding Micro-and Nano-Aluminum Particles. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. 39(5): P. 755-760, 2014.
- 24- Sekkar, V. and T.S.K. Raunija, Hydroxyl-Terminated Polybutadiene-Based Polyurethane Networks as Solid Propellant Binder-State of the Art. *Journal of Propulsion and Power*. 31(1): P. 16-35, 2014.
- 25- Lucio, B. and J.L. De La Fuente, Rheological Cure Characterization of an Advanced Functional Polyurethane. *Thermochimica Acta*. 596: P. 6.13, 2014.
- 26- Dey, A., Khan, M. A. S., Athar, J., Sikder, A. K., & Chattopadhyay, S.. Effect of Microstructure on HTPB Based Polyurethane (HTPB-Pu). *Journal of Materials Science and Engineering B*. 5: P. 3-4, 2015.
- 27- Chai, T., Liu, Y. C., Ma, H., Yu, Y. W., Yuan, J. M., Wang, J. H., & Guo, J. H. Rheokinetic Analysis on the Curing Process of HTPB-Doa-Mdi Binder System. In *Iop Conference Series: Materials Science and Engineering*. Iop Publishing, 2016.
- 28- Toosi, F.S. M. Shahidzadeh, and B. Ramezanzadeh, an Investigation of the Effects of Pre-Polymer Functionality on the Curing Behavior and Mechanical Properties of HTPB-Based Polyurethane. *Journal Of Industrial and Engineering Chemistry*. 24: P. 166-173, 2015.
- ۲۹- محمد تقی نژاد هادی، کبریت چلی عباس، مروری کوتاه بر تأثیر مولفه‌های فرایندی بر عمر کاربردی کامپوزیت پراورژی بر پایه پلی‌بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل، مجله بسپارش (پذیرفته شده)، انتشار آنلاین از تاریخ ۱۳ آبان ۱۳۹۶.
- 30- Jain, S. V. Sekkar, and V. Krishnamurthy, Mechanical and Swelling Properties of HTPB-Based Copolyurethane Networks. *Journal of Applied Polymer Science*. 48(9): P. 1515-1523, 1993.
- 31- Sekkar, V., Alex, A. S., Kumar, V., & Bandyopadhyay, G. G.. Theoretical Evaluation of Crosslink Density of Chain Extended Polyurethane Networks Based on Hydroxyl Terminated Polybutadiene and Butanediol and Comparison with Experimental Data. *Journal of Energetic Materials*: P. 1-10 ,2017.
- 32- Yamazaki, K. and H. Tokui, the Cross-Linking Reaction of the Poly Butadiene Binder for Composite Propellants. *Bulletin of the Chemical Society of Japan*. 38: (12) P. 2174-2178, 1965.
- 33- Hui, M., Yu-Cun, L., Tao, C., Tuo-Ping, H., Jia-Hu, G., Yan-Wu, Y., Jun-Ming, Y., Jian-Hua, W., Ning, Q. and Liang, Z., Kinetic Studies on the Cure Reaction of Hydroxyl-Terminated Polybutadiene Based Polyurethane with Variable Catalysts by Differential Scanning Calorimetry. *E-Polymers*. 17(1): P. 89-94 ,2017.
- 34- Singh, Manohar, B. K. Kanungo, and T. K. Bansal. "Kinetic Studies on Curing of Hydroxy-Terminated Polybutadiene Prepolymer-Based Polyurethane Networks *Journal of Applied Polymer Science* 85.4: 842-846 2002.
- 35- Perrault, Guy, Roger Lavertu, and Jean-Francois Drolet. "High-Energy Explosive or Propellant Composition. U.S. Patent No. 4,289,551. 15 Sep. 1981.