

بررسی اثر عامل پخت و دمای ریخته‌گری

بر عمر کاربری سامانه بایندر بر پایه HTPB

هادی محمدتقی نژاد^۱، عباس کبریتی‌چی^{۲*}، سید محمدرضا نیازی^۳، جهانبخش ممبینی^۴

۱ و ۳ و ۴- کارشناسی ارشد، ۲- دکتری دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(تاریخ وصول: ۹۷/۱/۲۹، تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۰/۲۱)

چکیده

تأثیر پارامترهای دما و عامل پخت بر رفتار رئولوژی سامانه بایندر بر پایه پلی‌بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل (HTPB) برای تولید گرین‌های متوسط و بزرگ حائز اهمیت است. در این پژوهش، اثر دمای ریخته‌گری 40°C ، 50°C و 60°C و همچنین اثر ساختار شیمیایی عوامل پخت TDI، IPDI و HDI بر رفتار رئولوژی سامانه بایندر بر پایه پلی‌بوتادین با هیدروکسیل انتهایی مورد بررسی قرار گرفت. افزایش دمای ریخته‌گری به سبب افزایش میزان پخت، گرانیروی را افزایش می‌دهد؛ بنابراین کاهش دمای ریخته‌گری، با کنترل فرآیند پخت، عمر کاربری را افزایش می‌دهد. تغییرات لگاریتم گرانیروی نسبت به زمان برای سه سامانه بایندر بر پایه HTPB با عامل پخت TDI، IPDI و HDI در دماهای مختلف بیانگر آن است که سامانه بایندر بر پایه HTPB با عامل پخت TDI، به دلیل وجود حلقه آروماتیک بیشترین سرعت افزایش گرانیروی و سامانه بایندر بر پایه HTPB با عامل پخت IPDI به دلیل ساختار حلقوی و آلیفاتیک دارای کمترین سرعت افزایش گرانیروی بود.

واژه‌های کلیدی: دمای ریخته‌گری، عامل پخت، عمر کاربری، گرانیروی.

Investigating the Effect of Curing Agent and Casting Temperature on Pot Life of Binder System Based on HTPB

H. MohammadTaghi Nejad, A. Kebritchi*, S. M. R. Niazi, J. Mombini

Imam Hossein University

(Received: 4/18/2018, Accepted: 1/11/2019)

Abstract

The effect of temperature and curing agent on rheological behavior of binder system based on Hydroxyl terminated Polybutadiene (HTPB) has an important role in the production of medium and large-size grains. In this research, the effect of casting temperature (40°C , 50°C and 60°C) and chemical structure of curing agents (TDI, IPDI and HDI) on rheological behavior of a binder system based on HTPB are investigated. Increasing casting temperature due to curing progress, builds up the viscosity. Therefore, decreasing casting temperature by controlling curing process increases the pot life of binder system. Logarithmic variation of viscosity versus time for three binder systems based on TDI, IPDI, and HDI at different temperatures implies that binder system based on HTPB-TDI due to aromatic structure of TDI shows the fastest viscosity increasing rate. Moreover binder system based on HTPB-IPDI shows the lowest viscosity increasing rate due to aliphatic structure of IPDI.

Keywords: Casting Temperature, Curing Agent, Pot Life, Viscosity.

۱- مقدمه

مطالعات انجام شده پیشین [۲۰ و ۲۱] نشان داد که پلیمریزاسیون بین HTPB و دی‌ایزوسیانات‌هایی مانند TDI، IPDI و HDI سبب افزایش گرانی در طول واکنش پخت انجام می‌شود. اطاعات رئولوژیکی مقالات حاکی از دو مرحله‌ای بودن واکنش پخت برای TDI و IPDI، و تک مرحله‌ای بودن واکنش پخت برای HDI است. همچنین ترتیب کاهش سرعت واکنش پخت (سرعت افزایش گرانی) به صورت $IPDI > HDI > TDI$ است که با نتایج به دست آمده از آنالیز کالری متری روبشی تفاضلی (DSC) منطبق است. آن‌ها نشان دادند افزایش گرانی در دو دلیل واکنش پخت و ایجاد اتصالات عرضی در دوغاب پیشرانه است بنابراین نقش دما بر واکنش پخت برجسته است؛ با $10^{\circ}C$ افزایش دما سرعت واکنش پخت می‌تواند دو برابر هم برسد. نگهداری بایندر در دمای بالا، باعث پخت سریع، کاهش سرعت ریخته‌گری و کاهش عمر کاربری می‌شود. لوسیو و همکاران [۲۲] اثر دما را بر سرعت پخت سامانه بایندر HTPB-TDI بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد با افزایش دما از $50^{\circ}C$ به $80^{\circ}C$ سرعت واکنش پخت افزایش چشمگیری دارد، به طوری که K_1 و K_2 در دمای $80^{\circ}C$ بیش از سه برابر دمای $50^{\circ}C$ است. همچنین جیو و همکاران [۲۳] اثر دمای $35^{\circ}C$ تا $75^{\circ}C$ را بر سرعت پخت سامانه بایندر HTPB-IPDI بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد با افزایش دما سرعت واکنش پخت افزایش چشمگیری دارد، به طوری که K_1 و K_2 در دمای $75^{\circ}C$ به مراتب بالاتر از دمای $35^{\circ}C$ است.

سینتیک پخت سامانه بایندر و پیشرانه از طریق آزمون افزایش گرانی در حین واکنش پخت و تخمین ثوابت سرعت برای افزایش گرانی مطالعه می‌شود. سامانه بایندر پلیمری مربوط به پیشرانه جامد مرکب بر پایه HTPB معمولاً شامل رزین HTPB، نرم‌کننده DOS^۱ و عامل پخت ایزوسیاناتی است [۱۶، ۲۴ و ۲۵]. فرآیند اختلاط پیشرانه جامد مرکب بر پایه HTPB در دو مرحله انجام می‌شود؛ در فاز پیش اختلاط تمام مواد تشکیل دهنده به جز عامل پخت در زمان مشخص مخلوط می‌شوند. در مرحله دوم که مرحله پایانی است، عامل پخت اضافه می‌شود. از آنجا که واکنش پخت پس از اضافه کردن عامل پخت به دوغاب پیشرانه آغاز می‌شود، زمان بهینه فرآیند ریخته‌گری پس از اضافه کردن عامل پخت محدود می‌شود [۶ و ۸].

در طول فرآیند پخت دو عامل بر افزایش گرانی نقش دارند:

- ۱- افزایش وزن مولکولی در نتیجه افزایش رشد زنجیر پلیمر
- ۲- شاخه‌دار شدن به دلیل حضور گروه عاملی به دلیل تری‌ال بالا.

وجود دو ثابت سرعت متفاوت در یک واکنش، موجب جدایش و

با توجه به پژوهش‌های انجام شده روی عمر کاربری^۱ پیشرانه‌های جامد مرکب، دوغاب پیشرانه جامد مرکب بر پایه HTPB باید در پایان اختلاط گرانی مناسبی داشته باشد تا ریخته‌گری به سهولت انجام گیرد. به عبارت دیگر مدت زمان موجود برای ریخته‌گری پیشرانه پس از اضافه کردن عامل پخت را عمر کاربری گویند. عمر کاربری طولانی برای سامانه بایندر^۲ HTPB به منظور سهولت فرآیند پذیری و تولید گرین^۳ بدون نقص ضروری است [۳-۱]. عوامل مختلفی همچون دما، عامل پخت و کاتالیزور [۱، ۴، ۵، ۶]، نوع و نسبت ریزساختار رزین [۷]، نوع و مقدار نرم‌کننده [۸]، نوع و مقدار عامل پیوندی [۹]، نوع، مقدار و نسبت سوخت فلزی و اکسید کننده [۱۰-۱۲]، نسبت [۱۲] و... می‌تواند بر عمر کاربری پیشرانه جامد مرکب اثرگذار باشد. پیشینه تحقیق روی عمر کاربری سامانه بایندر و پیشرانه جامد مرکب به سال ۱۹۷۶ و ۱۹۷۷ با پژوهش مارجوری و همکاران [۱۳ و ۱۴] برمی‌گردد. آن‌ها توانستند توسط ترکیبات آزیریدینی و فسفین اکسید عمر کاربری را بهبود دهند. در سال‌های بعد گویندان و همکاران [۱۵] روی پخت سامانه بایندر پیشرانه بر پایه پلی‌یورتان مطالعاتی انجام دادند و اثر دما را بر سرعت واکنش پخت مشاهده کردند. تلاش سکار و همکارانش [۱] و [۱۶-۱۹] در سال‌های ۲۰۰۱، ۲۰۰۲، ۲۰۱۴، ۲۰۱۵ و ۲۰۱۷ برای کنترل سرعت واکنش پلیمریزاسیون و عمر کاربری سامانه بایندر و پیشرانه جامد مرکب بر پایه پلی بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل (HTPB)، از طریق به کارگیری عوامل پخت مختلف و دماهای متفاوت انجام شد. نتایج آن‌ها نشان داد عامل پخت با ساختار آروماتیکی سرعت واکنش پخت را افزایش می‌دهد، همچنین با افزایش دما عمر کاربری سامانه بایندر کاهش می‌یابد.

در مطالعه سکار، پلیمریزاسیون بین HTPB و دی‌ایزوسیانات‌هایی مانند تولوئن دی‌ایزوسیانات (TDI^۵)، ایزوفنیل دی‌ایزوسیانات (IPDI^۶) و هگزا متیلن دی‌ایزوسیانات (HDI^۷) توسط آزمون افزایش گرانی (Viscosity Build Up) در طول واکنش پخت انجام شده است. در این مطالعه پارامترهای سینتیکی تشکیل شبکه یورتان بر پایه HTPB و ترکیب دی‌ایزوسیانات‌های مختلف با استفاده از آزمون افزایش گرانی در طول واکنش پخت بررسی می‌شود. گرانی دوغاب پلیمری در حال پخت در مرحله پیش ژل شدن، به طور مستقیم بر افزایش زنجیر و شاخه‌دار شدن زنجیر تأثیرگذار است. بنابراین، افزایش گرانی ارتباط زیادی به سینتیک تشکیل شبکه در مرحله پیش ژل شدن دارد [۴ و ۶].

8- Dioctyl Sebasate

- 1- Pot Life
- 2- Hydroxyl Terminated Polybutadiene (HTPB)
- 3- Binder
- 4- Grain
- 5- Toluene-Di-Isocyanate
- 6- Isophorone-Di-Isocyanate
- 7- Hexamethylene-Di-Isocyanate

فرمولاسیون سامانه بایندر شامل سه جزء رزین پلی‌بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل (HTPB)، نرم‌کننده دی‌اکتیل سباسات (DOS) و عامل پخت است.

۲-۲- روش اندازه‌گیری افزایش گرانی

گرانی سامانه بایندر با استفاده از دستگاه ویسکومتر دیجیتالی بروکفیلد مدل LVDP-II+P ساخت کشور ایالات متحده آمریکا توسط اسپیندل‌های شماره S۶۳ و S۶۴ در دماهای ۴۰°C، ۵۰°C و ۶۰°C اندازه‌گیری شد. سپس مقادیر گرانی خوانده شده در هر سرعت با شماره اسپیندل مربوطه و درصد گشتاور در آن دما ثبت شده است. بیشینه گرانی با توجه به بالاترین درصد مقدار گشتاور خوانده شده در هر دما، ضریب اسپیندل مربوطه و سرعت چرخشی اسپیندل محاسبه شده است [۳۰].

۳- نتایج و بحث

۳-۱- اثر دما بر عمر کاربری سامانه بایندر بر پایه HTPB با عامل پخت TDI

داده‌های آزمایشگاهی در تعیین رفتار رئولوژی و عمر کاربری سامانه بایندر بر پایه HTPB با عامل پخت TDI در دماهای ۴۰°C، ۵۰°C و ۶۰°C در جدول (۱) آورده شده است. با استفاده از این اطلاعات آزمایشگاهی، نمودار شکل (۱) برای بررسی تغییرات گرانی رسم و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

شکل (۱) روند تغییرات Ln گرانی نسبت به زمان را برای سامانه بایندر بر پایه HTPB با عامل پخت TDI در دماهای ۴۰°C، ۵۰°C و ۶۰°C را نشان می‌دهد. کیفیت بالاتر نمودارهای Ln گرانی نسبت به نمودارهای گرانی در نشان دادن فرآیند افزایش گرانی و مشاهده مراحل مختلف پخت (نشان دادن نقطه شکست) منجر به استفاده از نمودار Ln گرانی به جای گرانی در رسم نمودار، در پژوهش صورت گرفته است. ضمن اینکه در مقالات نیز بیشتر از نمودار Ln گرانی استفاده شده است.

همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، با افزایش زمان گرانی در حال افزایش است. این امر به دلیل تشکیل اتصالات عرضی و افزایش وزن مولکولی در نتیجه افزایش رشد زنجیر پلیمر به دلیل پخت سامانه بایندر بر پایه HTPB با عامل پخت TDI است. TDI دارای ساختار آروماتیکی و دو ایزومری ۴،۲ و ۶،۲ با نسبت ۸۰:۲۰ است. در نتیجه انتظار می‌رود دو مرحله افزایش گرانی در نمودار مشاهده شود. در مرحله اول اغلب ایزومری ۴،۲ به دلیل واکنش‌پذیری بالاتر گروه *p-NCO* که ۴۰ درصد کل ایزوسیانات را تشکیل می‌دهد وارد واکنش می‌شوند و در مرحله دوم ایزومری *o-NCO* در ۴،۲ و ۶،۲ با واکنش‌پذیری پایین‌تر وارد واکنش می‌شوند.

شکست در نمودار می‌شود؛ در نتیجه یک واکنش می‌تواند طی دو مرحله انجام شود. جدایش در نمودار می‌تواند به دو دلیل ایجاد شود: ۱- تفاوت در واکنش‌پذیری گروه عاملی (کنترل فرآیند سینتیکی). ۲- افزایش متوسط گرانی که باعث تأخیر در سرعت واکنش با توجه به کاهش آزادی در تحرک زنجیر می‌شود (کنترل فرآیند نفوذ) [۱، ۱۶، ۲۶]. به دلیل اینکه HDI ساختار متقارنی دارد، جدایش و شکست در نمودار گرانی ایجاد نمی‌شود اما در TDI و IPDI، به دلیل ایزومری مختلف در TDI و وجود NCO اولیه و ثانویه در IPDI، در نتیجه جدایش در نمودار دیده می‌شود. در عامل پخت TDI واکنش‌پذیری *o-NCO* از *p-NCO* به دلیل ازدحام فضایی گروه متیل کمتر است. هر دو گروه ارتو و پارا به‌وسیله نقش خروج الکترون مزومریک^۱ فعال هستند. بنابراین کاهش گروه *p-NCO* در فاز اولیه واکنش پخت ممکن است بیشتر باعث غیر فعال کردن گروه *o-NCO* علاوه بر ممانعت فضایی آن شود. فرض بر این است، در ابتدا وقتی *p-NCO* واکنش می‌دهد، *o-NCO* وارد واکنش نمی‌شود اما فرضیه دقیق‌تر این است که به هر دو ایزوسیانات به‌صورت رقابتی نگاه شود. نقش واکنش آهسته‌تر روی سرعت کلی ممکن است به تفاوت ثوابت سرعت در واکنش و نسبت جمعیتی آن‌ها بستگی داشته باشد. هر چه تفاوت بین سرعت دو نوع ایزوسیانات کمتر باشد، در مرحله دوم واکنش تأثیر مناسب‌تری دارد [۱۷، ۱۸، ۲۷ و ۲۸].

یکی از اهداف این پژوهش بررسی پارامترهای سینتیکی و رئولوژیکی دوغاب پیش‌رانه با استفاده از آزمون افزایش گرانی در طول واکنش پخت است. افزایش گرانی دوغاب پیش‌رانه اگرچه در دمای بالا دارای گرانی اولیه پایینی است، ولی با افزایش زمان پخت، گرانی به سرعت افزایش می‌یابد. در پژوهش صورت گرفته روند افزایش گرانی برای واکنش پلیمریزاسیون بین HTPB و عوامل پخت ایزوسیاناتی در دماهای مختلف مطالعه و نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل رفتار رئولوژی سامانه‌های بایندر آورده شده است [۵، ۶ و ۲۹].

۲- روش تحقیق

۲-۱- مواد آزمایشگاهی

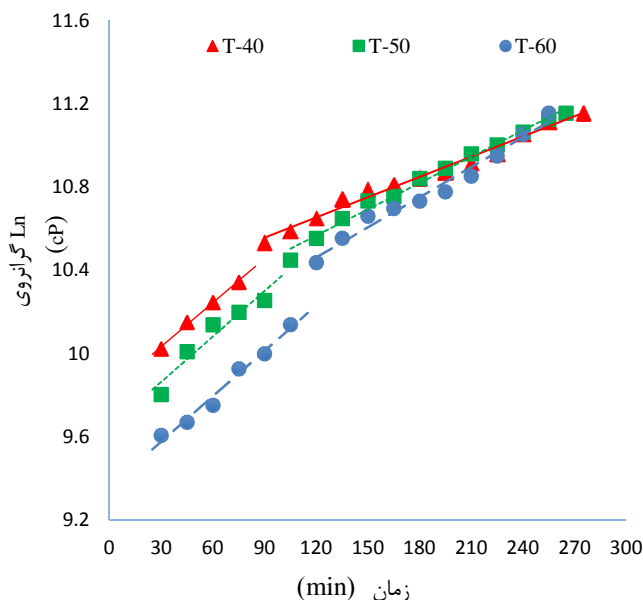
در این پژوهش از رزین پلی‌بوتادین خاتمه یافته با هیدروکسیل (HTPB) با متوسط وزن مولکولی ۳۰۹۰ g/mol، عدد هیدروکسیل ۳۸/۲ mg KOH/gr^{-۳} و گرانی ۵/۲۵۶ Pa.S در دمای ۴۰°C، از نرم‌کننده دی‌اکتیل سباسات (DOS) با ۹۹/۴۶٪ استر و اسیدیته ۰/۳۶٪ و همچنین از عوامل پخت TDI با خلوص ۹۹٪، وزن مولکولی ۱۷۴/۱۴ gr/mol و چگالی ۱/۲۱ gr/cm^۳، IPDI با وزن مولکولی ۱۶۸/۲ gr/mol و چگالی ۱/۰۶ gr/cm^۳ و HDI با وزن مولکولی ۱/۰۵ gr/cm^۳ که توسط صنعت تهیه شد، مورد استفاده قرار گرفت.

۲۴۰ دقیقه برای نمونه T-60 و تا ۱۸۰ دقیقه برای نمونه T-50 مشاهده می‌شود، اما بعد از این زمان با افزایش دما، گرانروی به دلیل فعالیت بیشتر گروه‌های ایزوسیاناتی و تشکیل اتصالات عرضی شدیدتر، افزایش بیشتری می‌یابد.

برای سه نمونه T-40، T-50، T-60 نقطه جهش به ترتیب از ۷۵ تا ۹۰، ۹۰ تا ۱۰۵ و ۱۰۵ تا ۱۲۰ دقیقه و نقطه تغییر شیب واکنش از مرحله اول به مرحله دوم به ترتیب ۹۰، ۱۰۵ و ۱۲۰ دقیقه است که این پدیده تأثیر دما بر زمان جهش را نشان می‌دهد. با هر ۱۰°C افزایش دما نقطه جهش و همچنین نقطه تغییر شیب واکنش از مرحله اول به مرحله دوم ۱۵ دقیقه صعود می‌کند؛ این امر نشان دهنده افزایش فعالیت گروه *p-NCO* در دماهای بالاتر است.

جدول ۲- اثر دما بر گرانروی رزین HTPB.

گرانروی (cP)	دما (°C)
۲۴۳۲۰	۴۰
۱۷۹۲۰	۵۰
۱۴۰۸۰	۶۰



شکل ۱- اثر دما بر تغییرات Ln گرانروی نسبت به زمان برای سامانه بایندر بر پایه HTPB با عامل پخت TDI.

با توجه به شکل (۱) در مرحله اول، ثابت سرعت افزایش گرانروی با افزایش دما برای سه نمونه T-40، T-50، T-60 تقریباً یکسان (۱۰۲ × ۰/۷۳) است اما برای مرحله دوم، ثابت سرعت هر چند کمتر از مرحله اول است اما با افزایش دما ثابت سرعت برای سه نمونه T-40، T-50 و T-60 به ترتیب $10^2 \times 0/33$ ، $10^2 \times 0/42$ و $10^2 \times 0/48$ در حال افزایش می‌یابد. ثابت سرعت افزایش گرانروی در مرحله اول برای نمونه‌های T-40، T-50، T-60 به ترتیب بیش از ۲، ۱/۷ و ۱/۵ برابر مرحله دوم

جدول ۱- تغییرات گرانروی سامانه بایندر بر پایه HTPB با عامل پخت TDI در دماهای مختلف به همراه معادله سرعت.

زمان (min)	گرانروی (cP) ۴۰°C	گرانروی (cP) ۵۰°C	گرانروی (cP) ۶۰°C
۳۰	۲۲۵۲۸	۱۸۱۰۳	۱۴۸۸۰
۴۵	۲۵۶۰۰	۲۲۲۷۲	۱۵۸۴۰
۶۰	۲۸۱۶۰	۲۵۳۴۴	۱۷۱۸۹
۷۵	۳۱۰۴۰	۲۶۸۸۰	۲۰۴۸۰
۹۰	۳۷۵۴۶	۲۸۴۸۰	۲۲۰۱۶
۱۰۵	۳۹۶۸۰	۳۴۵۶۰	۲۵۳۴۴
۱۲۰	۴۲۲۴۰	۳۸۴۰۰	۳۴۱۳۳
۱۳۵	۴۶۴۰۰	۴۲۲۴۰	۳۸۴۰۰
۱۵۰	۴۸۵۳۳	۴۵۹۸۵	۴۲۶۶۷
۱۶۵	۴۹۶۰۰	۴۶۹۳۳	۴۴۲۶۷
۱۸۰	۵۱۲۰۰	۵۱۲۰۰	۴۵۸۶۶
۱۹۵	۵۲۸۰۰	۵۳۷۶۰	۴۸۰۰۰
۲۱۰	۵۵۰۴۰	۵۷۶۰۰	۵۱۷۳۳
۲۲۵	۵۷۶۰۰	۶۰۱۶۰	۵۶۹۶۰
۲۴۰	۶۳۳۶۰	۶۴۰۰۰	۶۳۳۰۰
۲۵۵	۶۷۲۰۰	۶۸۰۰۰	۷۰۰۰۰
۲۶۵	۶۹۰۰۰	۷۰۰۰۰	--
۲۷۵	۷۰۰۰۰	--	--
معادله سرعت واکنش	مرحله ۱: $y = 0.0073x + 9.8205$ $R^2 = 0.9948$ مرحله ۲: $y = 0.0033x + 10.262$ $R^2 = 0.9832$	مرحله ۱: $y = 0.0073x + 9.8205$ $R^2 = 0.9202$ مرحله ۲: $y = 0.0042x + 10.06$ $R^2 = 0.9886$	مرحله ۱: $y = 0.0073x + 9.3577$ $R^2 = 0.9808$ مرحله ۲: $y = 0.0048x + 9.8817$ $R^2 = 0.9744$

گرانروی سامانه بایندر بر پایه HTPB با عامل پخت TDI به دلیل کم بودن واکنش پخت در زمان‌های ابتدایی واکنش و همچنین اثر کاهش دما بر افزایش گرانروی سامانه بایندر، در دمای ۴۰°C دارای مقادیر بالاتری نسبت به دمای ۵۰°C و ۶۰°C است، این امر به دلیل کاهش آزادی مولکول‌ها و زنجیرهای سامانه بایندر در دمای پایین است.

مورد فوق با توجه به جدول (۲) مربوط به تعیین گرانروی رزین HTPB در دماهای مختلف قابل استناد است. با توجه به جدول (۲) افزایش دما، گرانروی رزین HTPB کاهش یافته است. ولی با افزایش زمان و افزایش سرعت واکنش پخت، گرانروی سامانه بایندر با دمای ۴۰°C نسبت به دمای ۵۰°C و ۶۰°C آهسته‌تر افزایش می‌یابد؛ این امر اثر دما بر سرعت واکنش پخت را به خوبی نشان می‌دهد.

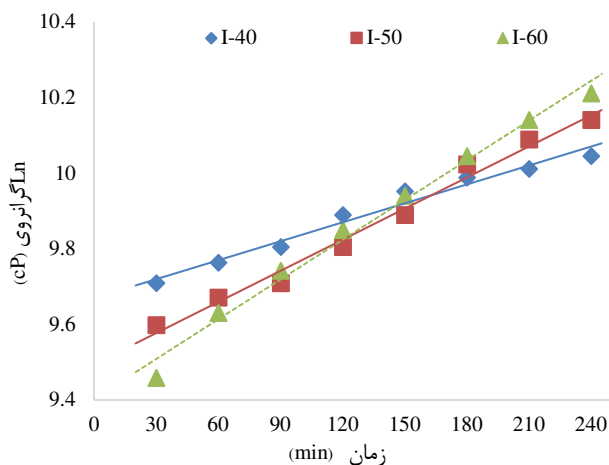
با توجه به شکل (۱) از دقایق ابتدایی واکنش تا پایان مرحله اول واکنش برای سه نمونه T-40، T-50، T-60 افزایش دما موجب کاهش گرانروی شده است. این امر به دلیل افزایش آزادی مولکول‌ها و زنجیرهای سامانه بایندر در دمای بالا است. این روند در مرحله دوم تا

عمر کاربری (cP) (۷۰۰۰۰) به مدت زمان بسیار بیشتری برای واکنش پخت نیاز دارد.

با توجه به اطلاعات فوق، کار انجام شده در این پژوهش با مقالات تقریباً قابل تطبیق است. به دلیل واکنش‌پذیری پایین IPDI، رفتاری خطی در نمودار افزایش گرانی در مقالات و کار آزمایشگاهی انجام شده مشاهده می‌شود. بنابراین ثابت سرعت واکنش یک مرحله‌ای است. در مقالات ثابت سرعت برای سامانه بایندر بر پایه HTPB با عامل پخت IPDI در دمای ۴۰°C و $t = 1$ برابر 0.19×10^2 و در پژوهش در دمای ۴۰°C و $t = 0.93$ برابر 0.17×10^2 است. همچنین در مقالات ثابت سرعت برای سامانه بایندر بر پایه HTPB با عامل پخت IPDI در دمای ۶۰°C و $t = 1$ برابر 0.47×10^2 و در کار پژوهشی در دمای ۶۰°C و $t = 0.93$ برابر 0.35×10^2 است که تقریباً قابل انطباق با یکدیگر هستند. علت تفاوت اندک در ثابت سرعت ذکر شده، تفاوت در مقادیر t است.

جدول ۳- تغییرات گرانی سامانه بایندر بر پایه HTPB با عامل پخت IPDI در دماهای مختلف به همراه معادله سرعت.

زمان (min)	گرانی (cP) ۴۰°C	گرانی (cP) ۵۰°C	گرانی (cP) ۶۰°C
۳۰	۱۶۴۵۷	۱۴۷۲۰	۱۲۸۰۰
۶۰	۱۷۳۷۱	۱۵۸۴۰	۱۵۲۰۰
۹۰	۱۸۱۰۳	۱۶۴۵۷	۱۷۰۰۵
۱۲۰	۱۹۷۱۲	۱۸۱۰۳	۱۸۹۴۴
۱۵۰	۲۰۹۹۲	۱۹۷۱۲	۲۰۷۳۶
۱۸۰	۲۱۷۶۰	۲۲۵۲۸	۲۳۰۴۰
۲۱۰	۲۲۲۷۲	۲۴۰۶۴	۲۵۳۴۴
۲۴۰	۲۳۰۴۰	۲۵۳۴۴	۲۷۲۰۰
معادله سرعت واکنش	$y = 0.0017x + 9.6693$ $R^2 = 0.9737$	$y = 0.0027x + 9.4942$ $R^2 = 0.9863$	$y = 0.0035x + 9.4033$ $R^2 = 0.9886$



شکل ۲- اثر دما بر تغییرات Ln گرانی نسبت به زمان برای سامانه بایندر بر پایه HTPB با عامل پخت IPDI.

است که علت این پدیده، واکنش‌پذیری بالاتر گروه p-NCO به دلیل نبود گروه متیل به‌عنوان عامل فضایی مزاحم است.

این امر نشان دهنده این است که تأثیر دما بر مرحله اول واکنش، به‌کارگیری جمعیت غالب P-NCO و افزایش نقطه جهش و تغییر شیب است و در مرحله دوم واکنش، به‌کارگیری سریع‌تر گروه‌های o-NCO، گروه‌های باقی‌مانده p-NCO و کاهش زمان عمر کاربری است. با توجه به ارزیابی شکل (۱)، برای سامانه بایندر بر پایه HTPB با عامل پخت TDI، به‌ازای هر ۱۰°C کاهش دما، عمر کاربری ۱۰ دقیقه افزایش نشان می‌دهد. بنابراین عمر کاربری سه نمونه T-40، T-50 و T-60 به ترتیب ۲۷۵، ۲۶۵ و ۲۵۵ است. همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود، با افزایش دما ثابت سرعت نمودار در مرحله اول تقریباً ثابت است، در حالی که با افزایش دما ثابت سرعت نمودار در مرحله دوم افزایش می‌یابد، به‌طوری‌که با هر ۱۰°C افزایش دما، ثابت سرعت بیش از ۵۰ درصد افزایش نشان می‌دهد. در نتیجه می‌توان گفت برای سامانه بایندر HTPB-TDI، دمای بهینه ۶۰°C است؛ زیرا در این دما به دلیل گرانی پایین‌تر سامانه بایندر تا ۲۴۰ دقیقه، دبی جریان در ریخته‌گری بیشتر است همچنین برای سامانه‌ها در مقیاس بزرگ‌تر که نیاز به عمر کاربری بیشتر از ۲۴۰ دقیقه دارند، دمای ۴۰°C برای ریخته‌گری به دلیل عمر کاربری بیشتر (۲۷۵ دقیقه) مناسب‌تر است.

۳-۲- اثر دما بر عمر کاربری سامانه بایندر بر پایه HTPB با عامل پخت IPDI

داده‌های آزمایشگاهی در تعیین رفتار رئولوژی و عمر کاربری سامانه بایندر بر پایه HTPB با عامل پخت IPDI در دماهای ۴۰°C، ۵۰°C و ۶۰°C در جدول (۳) آورده شده است. با استفاده از این اطلاعات آزمایشگاهی، شکل (۲) برای بررسی تغییرات گرانی رسم و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

شکل (۲) روند تغییرات Ln گرانی نسبت به زمان را برای سامانه بایندر بر پایه HTPB با عامل پخت IPDI در دماهای ۴۰°C، ۵۰°C و ۶۰°C را نشان می‌دهد. IPDI دارای ساختار حلقوی و نامتقارن و همچنین ایزوسانات نوع اول و نوع دوم است، در نتیجه انتظار بر این است دو مرحله افزایش گرانی در نمودار مشاهده شود؛ اما به دلیل واکنش‌پذیری پایین IPDI، رفتاری تقریباً خطی در نمودار افزایش گرانی مشاهده می‌شود. همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، با افزایش زمان، گرانی به‌صورت خطی در حال افزایش است.

با توجه به شکل (۲) و جدول (۳) افزایش گرانی برای نمونه I-40، بعد از مدت ۲۴۰ دقیقه از ۱۶۴۵۷ cP در دقیقه ۳۰ به ۲۳۰۴۰ cP در دقیقه ۲۴۰، افزایش گرانی برای نمونه I-50 از ۱۴۷۲۰ cP در دقیقه ۳۰ به ۲۵۳۴۴ cP در دقیقه ۲۴۰ و افزایش گرانی برای نمونه I-60 از ۱۲۸۰۰ cP در دقیقه ۳۰ به ۲۷۲۰۰ cP در دقیقه ۲۴۰ رسیده است. این امر حاکی از این است که نمونه‌های I-40، I-50 و I-60 برای رسیدن به

جدول ۵- تغییرات گرانروی سامانه بایندر بر پایه HTPB با عامل پخت HDI، در دماهای مختلف به همراه معادله سرعت.

زمان (min)	گرانروی (cP) ۴۰°C	گرانروی (cP) ۵۰°C	گرانروی (cP) ۶۰°C
۳۰	۲۰۴۸۰	۱۷۹۲۰	۱۶۴۵۷
۶۰	۲۱۷۶۰	۱۹۷۱۲	۱۸۱۰۳
۹۰	۲۳۰۴۰	۲۱۲۴۸	۲۰۴۸۰
۱۲۰	۲۴۰۶۴	۲۲۷۸۴	۲۲۷۸۴
۱۵۰	۲۵۳۴۴	۲۴۸۳۲	۲۵۰۸۸
۱۸۰	۲۶۵۶۰	۲۶۵۶۰	۲۷۲۰۰
۲۱۰	۲۷۸۴۰	۲۸۴۸۰	۲۹۴۴۰
۲۴۰	۲۹۱۲۰	۳۰۴۰۰	۳۱۶۸۰
معادله سرعت واکنش	$y = 0.0017x + 9.8876$ $R^2 = 0.9978$	$y = 0.0025x + 9.7336$ $R^2 = 0.9977$	$y = 0.0032x + 9.6319$ $R^2 = 0.9928$

شکل (۳) روند تغییرات Ln گرانروی نسبت به زمان را برای سامانه بایندر بر پایه HTPB با عامل پخت HDI در دمای ۴۰°C، ۵۰°C و ۶۰°C را نشان می‌دهد. HDI به دلیل ساختار خطی و متقارن، رفتاری خطی در نمودار افزایش گرانروی از خود نشان می‌دهد. همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود، با افزایش زمان، گرانروی به‌صورت خطی در حال افزایش است.

با توجه به شکل (۳) و جدول (۵) افزایش گرانروی برای نمونه H-40، بعد از مدت ۲۴۰ دقیقه از ۲۰۴۸۰ cP به ۳۰ دقیقه ۲۹۱۲۰ cP در دقیقه ۲۴۰، برای نمونه H-50 از ۱۷۹۲۰ cP در دقیقه ۳۰ به ۳۰۴۰۰ cP در دقیقه ۲۴۰ و برای نمونه H-60 از ۱۶۴۵۷ cP در دقیقه ۳۰ به ۳۱۶۸۰ cP در دقیقه ۲۴۰ رسیده است. این امر حاکی از این است که نمونه‌های ذکر شده برای رسیدن به عمر کاربری (۷۰۰۰۰ cP) به مدت زمان بیشتری برای واکنش پخت نیاز دارند. گرانروی سامانه بایندر بر پایه HTPB با عامل پخت HDI به دلیل کم بودن واکنش پخت در زمان‌های ابتدایی واکنش و همچنین اثر کاهش دما بر افزایش گرانروی سامانه بایندر بر پایه HTPB در دمای ۴۰°C دارای مقادیر بالاتری نسبت به دمای ۵۰°C و ۶۰°C است، این امر به دلیل کاهش آزادی مولکول‌ها و زنجیرهای سامانه بایندر بر پایه HTPB در دمای پایین است.

مورد فوق با توجه به جدول (۲) مربوط به تعیین گرانروی رزین HTPB در دماهای مختلف قابل استناد است. با توجه به جدول (۲)، با افزایش دما، گرانروی رزین HTPB کاهش یافته است. ولی با افزایش زمان و افزایش سرعت واکنش پخت، گرانروی سامانه بایندر بر پایه HTPB با دمای ۴۰°C نسبت به دمای ۵۰°C و ۶۰°C آهسته‌تر افزایش می‌یابد؛ این امر اثر دما بر سرعت واکنش پخت را به‌خوبی نشان می‌دهد. HDI به دلیل ساختار خطی و متقارن، رفتاری خطی در نمودار افزایش

جدول ۴- مقایسه اطلاعات مربوط به عمر کاربری سامانه بایندر HTPB-IPDI.

مقایسه	دما (°C)	نسبت r	تعداد مراحل واکنش	K _۱ min ^{-۱} × 10 ^۲	K _۲ min ^{-۱} × 10 ^۲	عمر کاربری (min)	مراجع
پژوهش حاضر	۴۰°C	۰/۹۳	یک مرحله‌ای	---	۰/۱۷	---	---
	۶۰°C	۰/۹۳	یک مرحله‌ای	---	۰/۳۵	---	---
مطالعه سگار و همکاران [۷،۴]	۴۰°C	۱	یک مرحله‌ای	---	۰/۱۹	>۴۸۰	---
	۶۰°C	۱	یک مرحله‌ای	---	۰/۴۷	>۴۸۰	---

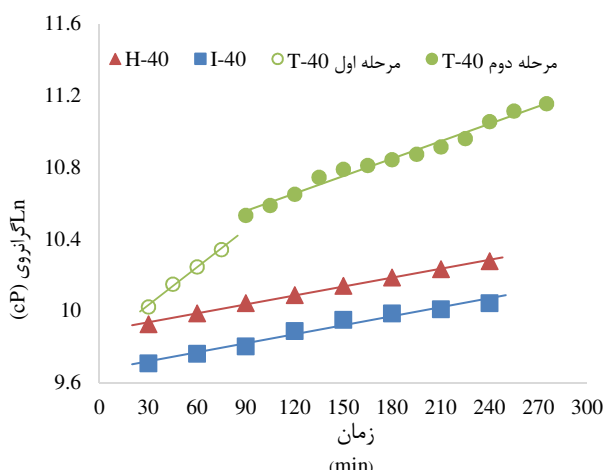
گرانروی سامانه بایندر بر پایه HTPB با عامل پخت IPDI به دلیل کم بودن واکنش پخت در زمان‌های ابتدایی واکنش و همچنین اثر کاهش دما بر افزایش گرانروی سامانه بایندر بر پایه HTPB در دمای ۴۰°C دارای مقادیر بالاتری نسبت به دمای ۵۰°C و ۶۰°C است، این امر به دلیل کاهش آزادی مولکول‌ها و زنجیرهای سامانه بایندر در دمای پایین است. مورد فوق با توجه به جدول (۲) مربوط به تعیین گرانروی رزین HTPB در دماهای مختلف قابل استناد است. با توجه به جدول (۲) با افزایش دما، گرانروی رزین HTPB کاهش یافته است. ولی با افزایش زمان و افزایش سرعت واکنش پخت، گرانروی سامانه بایندر با دمای ۴۰°C نسبت به دمای ۵۰°C و ۶۰°C آهسته‌تر افزایش می‌یابد، این امر اثر دما بر سرعت واکنش پخت را به‌خوبی نشان می‌دهد.

با توجه به شکل (۲) از دقایق ابتدایی واکنش تا دقیقه ۶۰ دمای بیشتر موجب کاهش گرانروی در سامانه بایندر شده است. این امر به دلیل افزایش آزادی مولکول‌ها و زنجیرهای سامانه بایندر در دمای بالا است؛ اما بعد از ۶۰ دقیقه مشاهده می‌شود که با افزایش دما، گرانروی به دلیل فعالیت بیشتر گروه‌های ایزوسیاناتی و تشکیل اتصالات عرضی شدیدتر، افزایش بیشتری می‌یابد. همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، با افزایش دما ثابت سرعت نمودار نیز افزایش می‌یابد، به‌طوری‌که با هر ۱۰°C افزایش دما، ثابت سرعت بیش از ۵۰ درصد افزایش نشان می‌دهد.

۳-۳- اثر دما بر عمر کاربری سامانه بایندر بر پایه HTPB با عامل پخت HDI

داده‌های آزمایشگاهی در تعیین رفتار رئولوژی و عمر کاربری سامانه بایندر بر پایه HTPB با عامل پخت HDI در دمای ۴۰°C، ۵۰°C و ۶۰°C در جدول (۵) آورده شده است. با استفاده از این اطلاعات آزمایشگاهی، شکل (۳) برای بررسی تغییرات گرانروی رسم و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

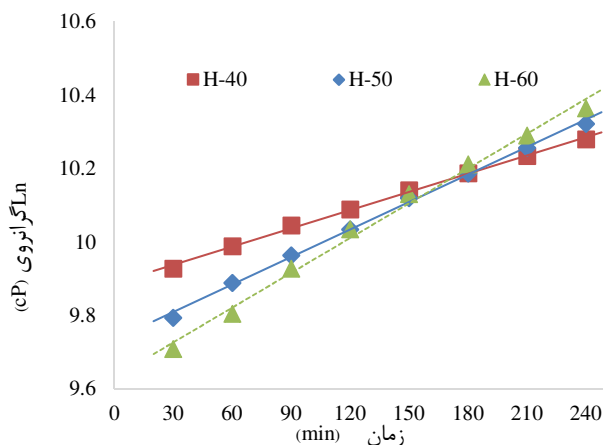
با توجه به شکل (۴) در دمای ۴۰°C برای سامانه بایندر بر پایه HTPB با عامل پخت TDI، مرحله اول واکنش از EOM تا ۷۵ دقیقه و مرحله دوم واکنش از ۹۰ تا ۲۷۵ دقیقه است. بنابراین یک نقطه جهش به دلیل انتقال واکنش از مرحله اول به مرحله دوم از ۷۵ دقیقه به ۹۰ دقیقه مشاهده می‌شود. اما برای سامانه بایندر بر پایه HTPB با عامل پخت IPDI، به دلیل واکنش‌پذیری بسیار پایین عامل پخت IPDI روند افزایش گرانی در تقریباً خطی است و جهش اتفاق نمی‌افتد، همچنین برای سامانه بایندر بر پایه HTPB با عامل پخت HDI به دلیل وجود دو ایزوسیانات یکسان جهش وجود ندارد. عمر کاربری سامانه بایندر بر پایه HTPB با عامل پخت TDI در دمای ۴۰°C، ۲۷۵ دقیقه است، اما برای IPDI و HDI بعد از ۲۴۰ دقیقه عمر کاربری مشاهده نشد بنابراین به مدت زمان بیشتری برای رسیدن به عمر کاربری احتیاج دارند.



شکل ۴- تغییرات Ln گرانی نسبت به زمان برای سامانه بایندر بر پایه HTPB با عامل پخت TDI با سامانه بایندر بر پایه HTPB با عامل پخت IPDI و HDI در دمای ۴۰°C.

با توجه به شکل (۵) در دمای ۵۰°C برای سامانه بایندر بر پایه HTPB با عامل پخت TDI، مرحله اول واکنش از EOM تا ۹۰ دقیقه و مرحله دوم واکنش از ۱۰۵ تا ۲۶۵ دقیقه است. بنابراین یک نقطه جهش به دلیل انتقال واکنش از مرحله اول به مرحله دوم از ۹۰ دقیقه به ۱۰۵ دقیقه مشاهده می‌شود. اما برای سامانه بایندر بر پایه HTPB با عامل پخت IPDI، روند افزایش گرانی در تقریباً خطی است و جهش اتفاق نمی‌افتد، همچنین برای سامانه بایندر بر پایه HTPB با عامل پخت HDI به دلیل وجود دو ایزوسیانات یکسان جهش وجود ندارد. عمر کاربری سامانه بایندر بر پایه HTPB با عامل پخت TDI در دمای ۵۰°C، ۲۶۵ دقیقه است، اما برای IPDI و HDI بعد از ۲۴۰ دقیقه عمر کاربری مشاهده نشد بنابراین به مدت زمان بیشتری برای رسیدن به عمر کاربری احتیاج دارند.

گرانی از خود نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، با افزایش زمان، گرانی به صورت خطی در حال افزایش است.



شکل ۳- اثر دما بر تغییرات Ln گرانی نسبت به زمان برای سامانه بایندر بر پایه HTPB با عامل پخت HDI.

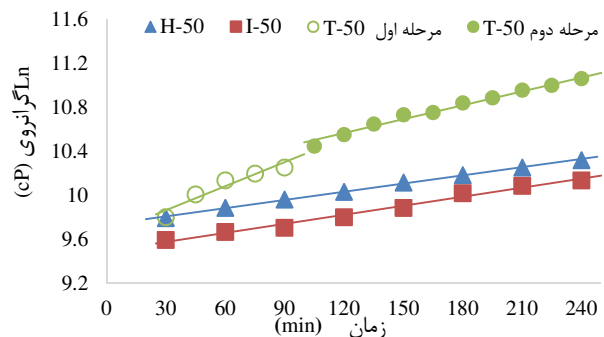
با توجه به شکل (۳) با افزایش دما ثابت سرعت افزایش گرانی برای سه نمونه H-40، H-50 و H-60 به ترتیب 0.17×10^{-2} ، 0.25×10^{-2} و 0.32×10^{-2} در حال افزایش است. با توجه به شکل (۳) از دقایق ابتدایی واکنش تا دقیقه ۱۵۰ دمای بیشتر موجب کاهش گرانی در سامانه بایندر بر پایه HTPB شده است. این امر به دلیل افزایش آزادی مولکول‌ها و زنجیرهای سامانه بایندر بر پایه HTPB در دمای بالا است، اما بعد از ۱۵۰ دقیقه مشاهده می‌شود که با افزایش دما، گرانی به دلیل فعالیت بیشتر گروه‌های ایزوسیاناتی و تشکیل اتصالات عرضی شدیدتر، افزایش بیشتری می‌یابد. بنابراین گرانی نهایی سه سامانه بایندر H-40، H-50 و H-60 بعد از ۲۴۰ دقیقه به ترتیب ۲۹۱۲۰، ۳۰۴۰۰ و ۳۱۶۸۰ است. این امر حاکی از این است که سه نمونه H-40، H-50 و H-60 در مدت ۲۴۰ دقیقه به عمر کاربری (۷۰۰۰۰ cP) نرسیدند.

۳-۴- اثر نوع عامل پخت بر عمر کاربری سامانه بایندر بر پایه HTPB

شکل‌های (۴-۶) روند تغییرات Ln گرانی نسبت به زمان را برای سامانه بایندر بر پایه HTPB با عامل پخت TDI با سامانه بایندر بر پایه HTPB با عامل پخت IPDI و HDI در سه دمای ۴۰، ۵۰ و ۶۰°C را نشان می‌دهد. همان‌طور که در نمودارهای مذکور مشاهده می‌شود، با افزایش زمان گرانی هر سه سامانه بایندر بر پایه HTPB در حال افزایش است. این امر به دلیل تشکیل اتصالات عرضی و افزایش وزن مولکولی در نتیجه افزایش رشد زنجیر پلیمر به دلیل پخت سامانه بایندر بر پایه HTPB با عوامل پخت ذکر شده است. TDI و IPDI دارای دو نوع ایزوسیانات می‌باشند. در نتیجه انتظار می‌رود دو مرحله افزایش گرانی در نمودار مشاهده شود.

۴- نتیجه‌گیری

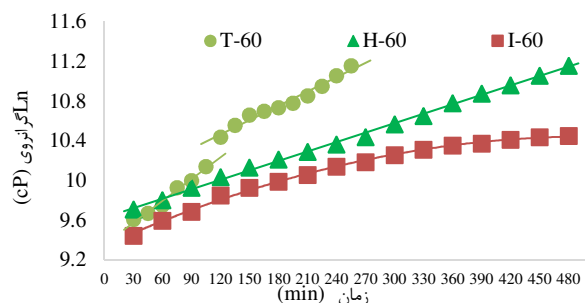
در این پژوهش، اثر دمای ریخته‌گری 40°C ، 50°C و 60°C و همچنین اثر عوامل پخت TDI، IPDI و HDI بر رفتار رئولوژی سامانه بایندر بر پایه پلی‌بوتادین با هیدروکسیل انتهایی مورد بررسی قرار گرفت. هدف از پژوهش صورت گرفته بررسی اثر عامل پخت‌های مختلف و دمای ریخته‌گری بر عمر کاربری سامانه بایندر بر پایه HTPB و انتخاب دما و عامل پخت بهینه است. گرانروی سامانه بایندر بر پایه HTPB با عوامل پخت مختلف به دلیل کم بودن واکنش پخت در زمان‌های ابتدایی واکنش و همچنین اثر کاهش دما بر افزایش گرانروی سامانه بایندر در دمای 40°C دارای مقادیر بالاتری نسبت به دمای 50°C و 60°C است، این امر به دلیل کاهش آزادی مولکول‌ها و زنجیرهای سامانه بایندر در دمای پایین است. ولی با افزایش زمان و افزایش سرعت واکنش پخت، گرانروی سامانه بایندر با دمای 40°C نسبت به دمای 50°C و 60°C آهسته‌تر افزایش می‌یابد، این امر اثر دما بر سرعت واکنش پخت را نشان می‌دهد. ثابت سرعت افزایش گرانروی در مرحله اول با افزایش دما برای سه نمونه T-50، T-40، T-60 تقریباً یکسان ($0/0073$) است اما برای مرحله دوم، ثابت سرعت هرچند کمتر از مرحله اول است اما با افزایش دما ثابت سرعت برای سه نمونه T-40، T-50، T-60 به ترتیب $0/0033$ ، $0/0042$ و $0/0048$ در حال افزایش می‌یابد. این امر نشان دهنده این است که تأثیر دما بر مرحله اول واکنش، به‌کارگیری جمعیت غالب $p\text{-NCO}$ و افزایش نقطه جهش است و در مرحله دوم واکنش، به‌کارگیری سریع‌تر گروه‌های $m\text{-NCO}$ ، گروه‌های باقی‌مانده $p\text{-NCO}$ و کاهش زمان عمر کاربری است. برای سامانه بایندر بر پایه HTPB با عامل پخت TDI، به‌ازای هر 10°C کاهش دما، عمر کاربری ۱۰ دقیقه افزایش نشان می‌دهد. بنابراین عمر کاربری سه نمونه T-40، T-50، T-60 به ترتیب ۲۷۵، ۲۶۵ و ۲۵۵ است. IPDI دارای ساختار حلقوی و نامتقارن و همچنین ایزوسانات نوع اول و نوع دوم است، در نتیجه انتظار بر این است دو مرحله افزایش گرانروی در نمودار مشاهده شود؛ اما به دلیل واکنش‌پذیری پایین IPDI، رفتاری تقریباً خطی در نمودار افزایش گرانروی مشاهده می‌شود. HDI به دلیل ساختار خطی و متقارن، رفتاری خطی در نمودار افزایش گرانروی از خود نشان می‌دهد و واکنش‌پذیری آن از IPDI بیشتر است. تغییرات Ln گرانروی نسبت به زمان را برای سه سامانه بایندر بر پایه HTPB با عوامل پخت TDI، IPDI و HDI در دمای 60°C بیانگر آن است که افزایش گرانروی برای نمونه T-60، بعد از مدت ۲۵۵ دقیقه از 14880 cP در دقیقه ۳۰ به 70000 cP در دقیقه ۲۵۵ یعنی به عمر کاربری رسیده است؛ همچنین نمونه H-60 نیز بعد از مدت ۴۸۰ دقیقه از 16457 cP در دقیقه ۳۰ به عمر کاربری (70000 cP) در دقیقه ۴۸۰ رسیده است؛ اما نمونه I-60، بعد از مدت ۴۸۰ دقیقه از 12640 cP در دقیقه ۳۰ به 34500 cP در دقیقه ۴۸۰ رسیده است؛ نتیجه نمونه I-60 حتی بعد از ۴۸۰ دقیقه به عمر کاربری نرسید. بنابراین ثابت سرعت افزایش گرانروی به‌صورت $T-60 > H-60 > I-60$ است.



شکل ۵- تغییرات Ln گرانروی نسبت به زمان برای سامانه بایندر بر پایه HTPB با عامل پخت TDI با سامانه بایندر بر پایه HTPB با عامل پخت IPDI و HDI در دمای 50°C .

سامانه بایندر بر پایه HTPB با عامل پخت IPDI و HDI بعد از ۲۴۰ دقیقه به عمر کاربری نرسید، بنابراین اندازه‌گیری گرانروی را برای سامانه بایندر بر پایه HTPB با عامل پخت HDI و IPDI تا ۴۸۰ دقیقه در دمای 60°C برای رسیدن به عمر کاربری ادامه یافت. با توجه به شکل (۶) سامانه بایندر بر پایه HTPB با عامل پخت HDI در دمای 60°C بعد از ۴۸۰ دقیقه به عمر کاربری رسید.

شکل (۶) روند تغییرات Ln گرانروی نسبت به زمان را برای سه سامانه بایندر بر پایه HTPB با عامل پخت TDI، IPDI و HDI در دمای 60°C را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۶) افزایش گرانروی برای نمونه T-60، بعد از مدت ۲۵۵ دقیقه از 14880 cP در دقیقه ۳۰ به 70000 cP در دقیقه ۲۵۵ یعنی به عمر کاربری رسیده است؛ همچنین نمونه H-60 نیز بعد از مدت ۴۸۰ دقیقه از 16457 cP در دقیقه ۳۰ به عمر کاربری (70000 cP) در دقیقه ۴۸۰ رسیده است؛ اما نمونه I-60، بعد از مدت ۴۸۰ دقیقه از 12640 cP در دقیقه ۳۰ به 34500 cP در دقیقه ۴۸۰ رسیده است؛ در نتیجه نمونه I-60 حتی بعد از ۴۸۰ دقیقه به عمر کاربری نرسید. بنابراین برای رسیدن این سامانه بایندر به عمر کاربری و پخت مناسب در تحقیقات آتی نیاز به کاتالیزور احساس می‌شود. با توجه به شکل (۶)، با توجه به واکنش‌پذیری عوامل پخت TDI، HDI و IPDI، ثابت سرعت افزایش گرانروی به‌صورت $T-60 > H-60 > I-60$ است.



شکل ۶- تغییرات Ln گرانروی نسبت به زمان برای سامانه بایندر بر پایه HTPB با عامل پخت IPDI، HDI و TDI.

مراجع

- [18] Sekkar, V.; Raunija, T. S. K. "Issues Related with Pot Life Extension for Hydroxyl-Terminated Polybutadiene-Based Solid Propellant Binder System"; *Propellants, Explos., Pyrotech.* 2015, 40, 267-274.
- [19] Sekkar, V.; Alex, A. S.; Kumar, V.; Bandyopadhyay, G. "Theoretical Evaluation of Crosslink Density of Chain Extended Polyurethane Networks Based on Hydroxyl Terminated Polybutadiene and Butanediol and Comparison with Experimental Data"; *J. Energ. Mater.* 2018, 36, 38-47.
- [۲۰] کبریت‌چی، عباس؛ محمدتقی نژاد، هادی "مروری کوتاه بر نقش پارامترهای فرآیند بر عمر کاربری پیشرانده جامد مرکب بر پایه پلی‌بوتادین با انتهای هیدروکسیل"؛ فصلنامه علمی- ترویجی بسپارش، سال ۸، شماره ۲، صفحه ۵۲-۶۲، ۱۳۹۷.
- [۲۱] کبریت‌چی، عباس؛ محمدتقی نژاد، هادی "مروری کوتاه بر نقش پارامترهای مواد بر عمر کاربری پیشرانده جامد مرکب بر پایه پلی‌بوتادین با انتهای هیدروکسیل"؛ فصلنامه علمی- ترویجی بسپارش، مقاله آماده چاپ، ۱۳۹۷.
- [22] Lucio, B.; De la Fuente, J. L. "Kinetic and Chemorheological Modelling of the Polymerization of 2,4-Toluenediisocyanate and Ferrocene Functionalized Hydroxyl Terminated Polybutadiene"; *Polym.* 2018, 140, 290-303.
- [23] Guo, J.; Chai, T.; Liu, Y.; Cui, J.; Ma, H.; Jing, S.; Zhong, L.; Qin, S.; Wang, G.; Ren, X. "Kinetic Research on the Curing Reaction of Hydroxyl-Terminated Polybutadiene Based Polyurethane Binder System via FT-IR Measurements"; *Coat.* 2018, 8, 175-184.
- [24] Rao, M.; Scariah, K.; Varghese, A.; Naik, P.; Swamy, K.; Sastri, K. "Evaluation of Criteria for Blending Hydroxy Terminated Polybutadiene (HTPB) Polymers Based on Viscosity Build-Up and Mechanical Properties of Gumstock"; *Eur. Polym. J.* 2000, 36, 1645-1651.
- [25] Mahanta, A.; Monika, G. "Analysis of Torque-Time Profile of Composite Propellant Slurry: Isothermal Cure Kinetics and Evaluation of Pot Life"; *J. Ind. Council Chem.* 2009, 26, 94-99.
- [26] Delebecq, E.; Pascault, J. P.; Boutevin, B.; Ganachaud, F. O. "On the Versatility of Urethane/Urea Bonds: Reversibility, Blocked Isocyanate, and Non-Isocyanate Polyurethane"; *Chem. Rev.* 2012, 113, 80-118.
- [27] Muthiah, R.; Krishnamurthy, V.; Gupta, B. "Rheology of HTPB Propellant: Development of Generalized Correlation and Evaluation of Pot Life"; *Propellants, Explos., Pyrotech.* 1996, 21, 186-192.
- [28] Kurva, R. "Evaluation of 4-(Dimethylsilyl) Butyl Ferrocene Grafted HTPB as a Burning Rate Modifier in Composite Propellant Formulation Using Bicurative System"; *Propellants, Explos., Pyrotech.* 2017, 18, 1-9.
- [29] Coutinho, F.; Rocha, M. "Kinetic Study of the Reactions between Hydroxylated Polybutadiene and Isocyanates in Chlorobenzene-IV. Reactions with Toluene Diisocyanate, 3-Isocyanatomethyl-3, 5,5-Trimethylcyclohexyl Isocyanate and Hexamethylene Diisocyanate"; *Eur. Polym. J.* 1991, 27, 213-216.
- [30] Brookfield "Brookfield Dial Viscometer Operating Instructions Manual No. M 14-023"; 2016.
- [1] Sekkar, V.; Raunija, T. S. K. "Hydroxyl-Terminated Polybutadiene-Based Polyurethane Networks as Solid Propellant Binder-State of the Art"; *J. Propul. Power.* 2014, 31, 16-35.
- [2] Mahanta, A. K.; Monika, G.; Devendra, D. P. "Rheokinetic Analysis of Hydroxy Terminated Polybutadiene Based Solid Propellant Slurry"; *J. Chem.* 2010, 7.1, 171-179.
- [3] 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"; *IOP Conf. Series: Mater. Sci. Eng. Hangzhou, China*, 2016, 1-8.
- [4] Korah Bina, C.; Kannan, K. G.; Ninan, K. N. "DSC Study on the Effect of Isocyanates and Catalysts on the HTPB Cure Reaction"; *J. Therm. Anal. Calorim.* 2004, 78, 753-760.
- [5] Vesna, R.; Mirjana P. "The Effect of Curing Agents on Solid Composite Rocket Propellant Characteristics"; *Sci. Tech. Rev.* 2005, 55, 46-50.
- [6] Mahanta, A. K.; Dharmasakti, I.; Pattnayak, P. K. "Rheological Behaviour of HTPB-Based Composite Propellant: Effect of Temperature and Pot Life on Casting Rate"; *Defence Sci. J.* 2007, 57, 435-442.
- [7] Zhu, X.; Fan, X.; Zhao, N.; Liu, J.; Min, X.; Wang, Z. "Comparative Study of Structures and Properties of HTPBs Synthesized via Three Different Polymerization Methods"; *Polym. Test* 2018, 68, 201-207.
- [8] Jawalkar, S. N. "Studies on The Effect of Plasticiser and Addition of Toluene Disocyanate at Different Temperatures in Composite Propellant Formulations"; *J. Hazard. Mater.* 2009, 164.2, 549-554.
- [9] Liu, X.; Sun, X.; Hong, X.; Pang, A.; Qiao, Y. "Research Progress of Bonding Agents for Nitramine Composite Solid Propellants"; *Int. J. Sci.* 2018, 6, 44-53.
- [10] Lade, R.; Wasewar, K.; Sangtyani, R.; Kumar, A.; Shende, D.; Peshwe, D. "Effect of Aluminum Nanoparticles on Rheological Behavior of HTPB-Based Composite Rocket Propellant"; *J. Energ. Mater.* 2018, 16, 1-16.
- [11] Restasari, A.; Budi, R. S.; Hartaya, K. "Pseudoplasticity of Propellant Slurry with Varied Aluminium Content for Castability Development"; *J. Physics: Conf. Series. IOP Publishing*, 2018, 1-8.
- [12] Ashish, J.; Swaroop, G.; Balasubramanian, K. "Effect of Ammonium Perchlorate Particle Size on Flow, Ballistic, and Mechanical Properties of Composite Propellant"; *Nanomaterials in Rocket Propulsion Systems*, Elsevier, 2019, 299-362
- [13] Cucksee, M. T.; Allen, H. C. "Extension of Pot life of HTPB Composite Propellants by Phosphine Oxides"; *Ed. Google Patents*, 1976.
- [14] Cucksee, M. T.; Allen, H. C. "Pot Life Extension of Isocyanate Cured Propellants by Aziridine Compounds"; *Ed. Google Patents*, 1977.
- [15] Govindan, G.; Athithan, S. "Studies on Curing of Polyurethane Propellant Binder System"; *Propellants, Explos., Pyrotech.* 1994, 19, 240-244.
- [16] Sekkar, V.; Ambika, D.; Ninan, K. "Rheo-Kinetic Evaluation on the Formation of Urethane Networks Based on Hydroxyl Terminated Polybutadiene"; *J. Appl. Polym. Sci.* 2001, 79, 1869-1876.
- [17] Sekkar, V.; Venkatachalam, S.; Ninan, K. N. "Rheokinetic Studies on the Formation of Urethane Networks Based on Hydroxyl Terminated Polybutadiene"; *Eur. Polym. J.* 2002, 38, 169-178.