

Fuzzy Control of Semibatch Poly(ethylene terephthalate) Reactor Temperature based on Linguistic Rules

Amir Karami¹, Mehdi Rafizadeh^{*}

¹ Department of Polymer Engineering and Color Technology, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran

Abstract

Research subject: It is not an easy task to get a suitable model of polymerization due to complex mechanism and kinetic of such processes. Polymerization temperature, as an intermediate variable between determining final polymer properties, is a good selection to be controlled. Fuzzy logic has ability to be applied to processes with unknown or less informed dynamics.

Research approach: In this research, control of semi batch poly(ethylene terephthalate) reactor temperature was studied. To do so, error and error variation were calculated using measured reactor temperature. Error and error variation were fuzzified using triangular membership functions. Five and three fuzzy sets were introduced to fuzzify error and error variation, respectively. Hence, fifteen rules were defined. Five fuzzy sets were defined to quantify these fifteen rules. Weight average defuzzification method was applied to calculate necessary heat to the reactor. Poly(ethylene terephthalate) was synthesized in a semi batch reactor based on a two steps method. It is possible to monitor temperature, pressure, rotation speed and mixing torque in this set up.

Main results: Produced water during esterification determines reaction advancement. In polycondensation step, mixing torque determines end of the process. Linguistic based fuzzy rules were applied to both steps. Reference temperatures were 230 oC and 260 °C, respectively. Reactor temperature was controlled with 2-1 oC precision. Control logic was applied using C#.net real time programming.

key words

Poly(ethylene terephthalate)

Fuzzy controller

Semi-batch reactor

Temperature control

Linguistic rules

*To whom correspondence should be addressed:
mehdi@aut.ac.ir

کنترل فازی دمای راکتور نیمه‌پیوسته تهیه پلی‌اتیلن ترفتالات مبتنی بر قوانین فازی زبانی

امیر گرمی^۱، مهدی رفیع‌زاده^{۱*}

۱ دانشکده مهندسی پلیمر و رنگ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

چکیده

به دلیل سازوکار و سینتیک پیچیده فرایندهای پلیمر شدن که عمدتاً به شدت غیرخطی نیز هستند، به دست آوردن مدل نسبتاً دقیق برای این فرایند امری مشکل و نیازمند صرف هزینه و زمان است. دمای پلیمر شدن به عنوان متغیر واسطه، تعیین کننده خواص نهایی پلیمر است. دما، از آنجا که امکان اندازه‌گیری آسان آن وجود دارد، یکی از بهترین گزینه‌های کنترل راکتورهای پلیمر شدن است. منطق فازی، توانایی اعمال بر روی فرایندهایی که دینامیک آن‌ها کاملاً شناخته شده نیست را دارد. در این پژوهش، به کنترل دمای راکتور نیمه‌پیوسته تولید پلی‌اتیلن ترفتالات پرداخته شده است. پس از اندازه‌گیری دما، خطا و تغییرات خطا محاسبه می‌شود. با استفاده از مجموعه‌های فازی مثلثی شکل، خطا و تغییرات خطا، فازی سازی شده است. سپس قوانین فازی برای گرمای اعمال شده به راکتور ارائه شده است. پنج مجموعه فازی برای خطا و سه مجموعه فازی برای تغییرات خطا به کار برده شده است. در نتیجه پانزده قانون مختلف به کار برده شده است. این پانزده قانون براساس پنج مجموعه فازی، مقدار گرما برای هر قانون را ارائه می‌کند. از روش میانگین وزنی برای غیرفازی سازی استفاده شده است. پلی‌اتیلن ترفتالات براساس روش دو مرحله‌ای استری شدن و پلیمر شدن تراکمی در راکتور نیمه‌پیوسته سنتز شده است. راکتور مربوطه به گونه‌ای ساخته شده که دما، فشار، سرعت چرخش و گشتاور را اندازه‌گیری می‌کند. آب تولید شده برای تعیین پیشرفت واکنش در مرحله استری شدن استفاده می‌شود. در مرحله پلیمر شدن تراکمی از تغییرات گشتاور، انتهای فرایند تعیین می‌شود. منطق کنترل فازی مبتنی بر قوانین زبانی در هر دو مرحله استری شدن و پلیمر شدن تراکمی اعمال شد. دمای مرجع در این دو مرحله به ترتیب 230°C و 260°C است که با دقت $1-2^{\circ}\text{C}$ و به صورت هموار کنترل شده‌اند. منطق کنترلی با استفاده از زبان برنامه‌نویسی C#.net به طور بی‌درنگ به راکتور اعمال شده است.

فصلنامه علمی - پژوهشی بین رشته‌ای
سال چهارم، شماره ۳، نسخه ۱
پاییز ۱۳۹۹، صفحه ۶۸-۵۷

کلمات کلیدی

پلی‌اتیلن ترفتالات

کنترل کننده فازی

راکتور نیمه‌پیوسته

کنترل دما

قوانین زبانی

*مسئول مکاتبات:

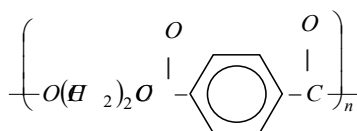
mehdi@aut.ac.ir

۱ مقدمه

تا بیش از پانصد هزار تن در سال ۱۹۸۵ و ۱/۲ میلیون تن (هفتصد هزار تن در آمریکا و پانصد هزار تن در اروپای غربی) در سال ۱۹۹۲ و سی مگا تن در سال ۲۰۰۰ میلادی افزایش یافت که از این مقدار تولید، هشت ونیم مگا تن مخصوص رزین بسته‌بندی (۹۳٪ نوع بطری و ۷٪ نوع الیاف) بود. شکل ۲ میزان جهانی تقاضای سالیانه پلی اتیلن ترفتالات در سال ۲۰۰۹ و ۲۰۲۰ میلادی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشخص است، میزان تقاضای جهانی PET روندی افزایشی را طی می‌کند [۵].

اگرچه روش‌های مختلفی برای تولید PET وجود دارد، اما مهم‌ترین روش تولید تجاری آن روش دو مرحله‌ای استری شدن مستقیم اسید ترفتالیک و اتیلن گلیکول و سپس پلیمر شدن تراکمی است [۶]. برای آنکه محصولی با خصوصیات مورد نظر تهیه شود، نیاز است

پلی‌استرها مواد پلیمری هستند که گروه استری () در ساختار زنجیره اصلی آن‌ها وجود دارد. پلی‌استرها، با توجه به ساختار، به دو گروه اشباع (گرمانرم) و غیراشباع (گرماسخت) تقسیم‌بندی می‌شوند [۱]. در دهه‌های اخیر، پلی‌استرهای گرمانرم (آروماتیکی یا آلیفاتیکی) مورد تحقیق وسیعی بوده‌اند. این تحقیقات مشتمل بر تهیه پلی‌استرهای جدید [۲]، استفاده از کاتالیزورهای مختلف در مراحل متفاوت [۳] و همچنین کاربردهای مختلف آن‌ها است [۴]. قطعاً، پلی‌اتیلن ترفتالات (Poly (ethylene terephthalate)) یا به اختصار PET معروف‌ترین و پرمصرف‌ترین پلی‌استر گرمانرم خطی است. فرمول شیمیایی PET در شکل ۱ مشاهده می‌شود. پلی‌اتیلن ترفتالات در سال ۱۹۴۱ میلادی توسط وین

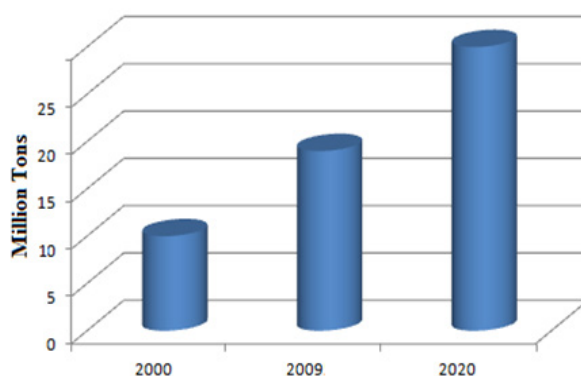


شکل ۱ فرمول شیمیایی پلی اتیلن ترفتالات

Figure 1. Polyethylene terephthalate chemical structure

که سازوکار تولید و عامل‌های مؤثر بر آن شناخته شود. به همین دلیل در مورد PET تحقیقات بسیاری گزارش شده و همپنان ادامه دارد. تومیتا (Tomita) [۷] واکنش‌های مرحله پلیمر شدن تراکمی را مطالعه کرد. او افزایش جرم مولکولی را هدف این تحقیقات قرار داده بود. ریگمن (Rieckmann) و همکاران [۸ و ۹] انتقال جرم اجزای مختلف در مخلوط واکنش‌دهنده را بررسی کردند. از آنجا که گرانیروی مخلوط با پیشرفت واکنش افزایش می‌یابد، خروج کوچک مولکولی ناشی از واکنش، به تدریج دشوار می‌شود. کیم (Kim) و همکاران [۱۰] با استفاده از الگوریتم ژنتیک روشی برای شناخت سینتیک استری شدن ارائه کردند. آن‌ها اثر دما، فشار،

فیلد (Whinfield) و دیکسون (Dickson) در انگلستان کشف شد و پس از مدتی به توانایی استعداد لیف شدن این پلیمر پی برده شد و به کمک آن صنایع نساجی پیشرفت زیادی کرد. در اوایل سال ۱۹۵۰ میلادی شرکت ICI انگلستان و شرکت دوپون (Dupont) آمریکا تولید صنعتی و تجاری این پلیمر را آغاز کردند. در سال ۱۹۸۵ میلادی، بیش از ۲۵۰ کارخانه لیف پلی‌استر در سراسر جهان فعالیت می‌کردند. در اواسط دهه ۱۹۷۰، شرکت‌های آمریکایی و انگلیسی از تولید لیف کاسته و تولید انواع دیگر PET را آغاز کردند. با گذشت زمان تولید PET در سطح جهانی، افزایش قابل توجهی یافت؛ به طوری که از تولید حدود پانصد تن در سال ۱۹۷۰



شکل ۲ میزان رشد سالیانه PET [۲]

Figure 2. PET production annual rate

قرن حاضر دانشند [۱۹]. آن‌ها پژوهش‌های کاربردی و صنعتی با کنترل‌کننده‌های فازی ممدانی، تاکاگی-سوگنو و پیش‌بین را با توابع عضویت متفاوت، مطالعه کرده و مراجع بسیاری را بررسی کردند. کومار (Kumar) و همکاران [۲۰] بر روی کنترل‌کننده PID مطالعه کردند. کنترل‌کننده PID به دلیل سادگی، هزینه کم و توانایی در کنترل سامانه‌های خطی، کاملاً شناخته شده است. اما، این کنترل‌کننده‌ها برای سامانه‌های پیچیده و غیرخطی مناسب نیستند. مشاهده شده است که رویکرد فازی در کنترل‌کننده PID عملکرد بهبودیافته‌ای دارد. سهرابی و رفیع‌زاده [۲۱] دمای چگالنده راکتور تولید پلی‌استرها را با استفاده از کنترل‌کننده‌های کلاسیک PI و PID و همچنین کنترل‌کننده فازی کنترل کردند. به طور تجربی، کنترل‌کننده فازی عملکرد بسیار خوبی نشان داد. حسن (Hosen) و همکاران [۲۲] دمای راکتور ناپیوسته پلیمر شدن استایرن را به‌عنوان پارامتر واسط کیفیت محصولات نهایی، با روش منطق فازی کنترل کردند. براساس نتایج شبیه‌سازی آن‌ها، عملکرد کنترل فازی بهتر از عملکرد کنترل شبکه عصبی مدل پیش‌بین (NN-MPC) بود. مبتنی بر مطالعات کتابخانه‌ای انجام شده، دما یکی از مهم‌ترین و در دسترس‌ترین پارامترهای فرایند پلیمر شدن است. علاوه بر اینکه دما قابل اندازه‌گیری و کنترل است، بلکه تأثیر بسزایی روی خواص پلیمر نهایی دارد. منطق کنترل فازی قابلیت کنترل مناسب دما را نیز ثابت کرده است.

در این پژوهش، دمای راکتور تولید پلی‌اتیلن ترفتالات با سامانه مبتنی بر رایانه اندازه‌گیری شد. PET با استفاده از روش دو مرحله‌ای استری شدن مستقیم اسید ترفتالیک و اتیلن گلیکول و پلیمر شدن تراکمی بیس هیدروکسی اتیل ترفتالات (BHET) تهیه شد. با استفاده توابع عضویت مثلثی و کاهش و افزایشی اقدام به فازی سازی دما شد. پایگاه داده‌هایی براساس قوانین زبانی پیشنهاد شده و با استفاده از آن پارامتر کنترلی (گرماى ورودی به راکتور) محاسبه شد. عملکرد این کنترل‌کننده فازی به طور تجربی مطالعه شده و رفتار آن بسیار خوب بود.

۲ تجربی

۲-۱ مواد

در این پژوهش، اسید ترفتالیک (TPA) و اتیلن گلیکول (EG) از مجتمع پتروشیمی شهید تندگویان تهیه شدند. تری اکسید آنتیموان، به عنوان کاتالیزور مرحله پلیمر شدن تراکمی، پلی فسفریک اسید، به عنوان پایدارکننده گرمایی مرحله پلیمر شدن تراکمی، و دی کلرو استیک اسید، به عنوان حلال گرانبوی سنج آبلود، از شرکت مرک خریداری شدند.

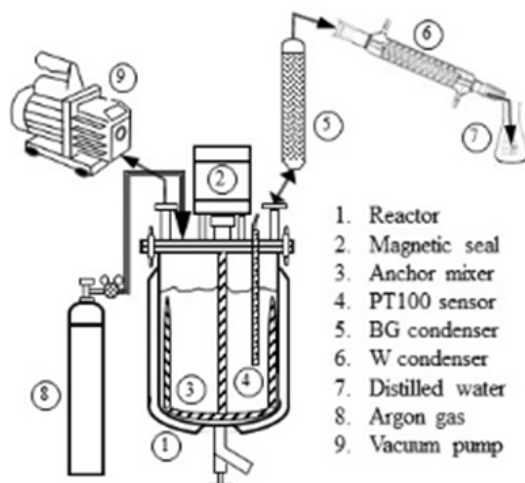
نسبت خوراک و زمان اقامت را بررسی کردند. ژو (Zhu) و همکاران [۱۱] موفق به تهیه PET آنتی‌باکتریال شده و خواص آن را مطالعه کردند. کوینجی (Koyuncu) و الوازر (Alwazeer) [۱۲] توانایی نفوذ و رها شدن آنتیموان به محتوای بطری PET را بررسی کردند. مکوزی (Mecozzi) و نیسینی (Nisini) [۱۳] از طیف‌شناسی فروسرخ (FTIR) برای شناسایی PET معمولی و نوع زیست‌تخریب پذیر استفاده کردند. این تحقیقات بیانگر اهمیت روزافزون PET است. بنابراین، نیاز به دست آوردن اطلاعات بیشتر بوده و به دلیل سازوکار پیچیده واکنش‌های پلیمر شدن همچنان تحقیقات ادامه خواهد داشت. برای رسیدن به PET با مشخصات مناسب می‌بایست پارامترهای مهم فرایندی و شرایط راکتورهای پلیمر شدن اندازه‌گیری و کنترل شوند. لذا، ارتباط مستقیم خواص نهایی پلیمر با جرم مولکولی اهمیت دوچندان دارد.

تاکنون، روش‌های مختلفی برای کنترل کمیت‌های راکتورهای پلیمر شدن به کار گرفته شده است. حسن (Hosen) و حسین (Hussain) [۱۴] مدل مخلوطی برای شبیه‌سازی راکتور ناپیوسته پلی‌استایرن ارائه کردند. نتایج تجربی نشان داد که با این روش زمان واکنش کاهش یافته و کیفیت پلیمر تغییراتی نداشت. ابراهیم (Ibrehem) و همکاران [۱۵] از کنترل‌کننده غیرمتمرکز MPC شبکه عصبی با روش برنامه‌ریزی درجه دوم متوالی (SQP) برای کنترل راکتور پلیمر شدن الفین فاز گازی استفاده کردند. آن‌ها مقایسه‌ای بین عملکرد کنترل‌کننده PID و کنترل‌کننده شبکه عصبی انجام دادند. گوجار (Ghugare) و تامبه (Tambe) [۱۶] با استفاده از حسگر نرم (Soft sensor)، کنترل‌کننده مدل پیش‌بین (MPC) برای راکتور پلیمر شدن استایرن طراحی کردند. مقایسه عملکرد کنترل‌کننده MPC با نوع PID نشانگر برتری آن است. در بین روش‌های متفاوت، منطق فازی به دلیل آنکه توانایی حذف نوفه‌ها، نیاز حداقلی به اطلاعات از راکتور، کنترل سامانه‌های به شدت خطی و غیره در دهه‌های اخیر مورد توجه زیادی واقع شده است. وانگ (Wang) و همکاران [۱۷] اقدام به تعریف نظریه مجموعه‌های تقریبی کرده و پارامتر کنترلی راکتور پلیمر شدن را محاسبه کردند. آن‌ها بر این باورند که قوانین کنترلی ساده شده آن‌ها قابلیت بی‌درنگ (Real time) خوبی دارند. لیما (Lima) و همکاران [۱۸] سامانه کنترل پیش‌بین مبتنی بر تاکاگی-سوگنو را برای فرایند پلیمر شدن ارائه دادند. مدل‌سازی فازی توانایی عالی در پیش‌بینی خروجی با استفاده از داده‌های دینامیکی ورودی دارد. عملکرد حلقه کنترلی، مستحکم بود. پرکاپ (Precup) و هلندرون (Hellendoorn) مروری بر سامانه‌های کنترل فازی (رویکردهای بدون مدل و مبتنی بر مدل) در

۲-۲ راکتور

نصب شده است. وسط درب، محل عبور شفت همزن می‌باشد. علاوه بر حسگر دما، درب راکتور محل نصب بافل، ورودی جریان گاز آرگون دو خروجی مربوط به فشارسنج، خروجی مسیر خلأ و خروجی چگالنده است. در هر کدام از مسیرهای پمپ خلأ، گاز آرگون، چگالنده و فشارسنج، شیر از نوع سوزنی (Needle valve) تعبیه شده است. این شیرها قابلیت عملکرد تا دمای 500°C و

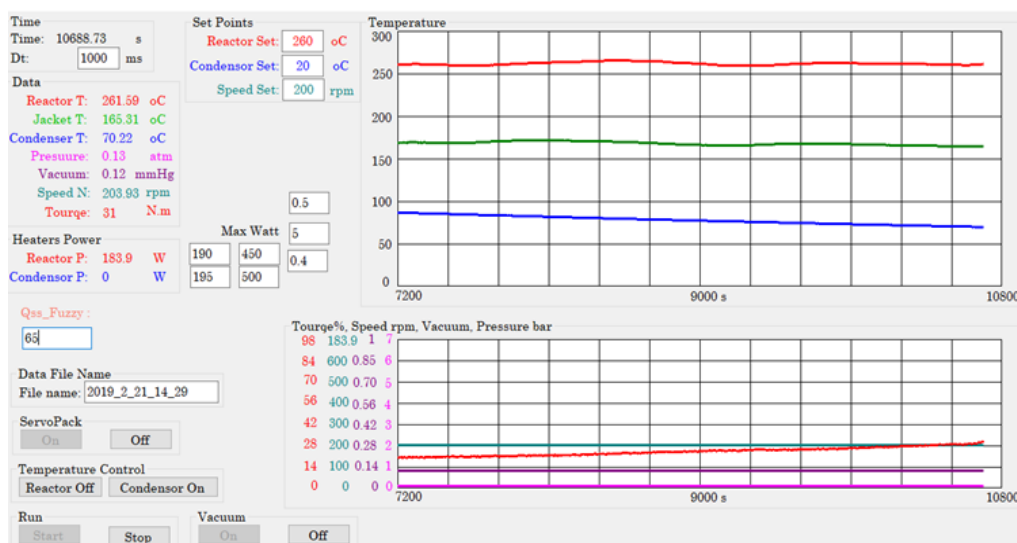
شکل ۳ طرح وارده مجموعه آزمایشگاهی استفاده شده را نشان می‌دهد. راکتور از نوع تانکی به حجم نیم لیتر و از جنس فولاد زنگ نزن (Stainless steel) ساخته شده است. همزن از نوع لنگری بوده و با استفاده از سرووموتور یاسکاوا (Yaskawa) و آب‌بند مغناطیسی چرخانده می‌شود. این سرووموتور توانایی دارد که دور



شکل ۳ طرح وارده راکتور آزمایشگاهی
Figure 3. Experimental set up

فشار ۵۰۰۰ psi را دارند. سرعت چرخش همزن تا rpm ۱۲۰۰ است. فشار لازمه راکتور توسط سیلندر گاز آرگون تأمین می‌شود. در مرحله استری شدن، آب به‌عنوان محصول جانبی به طور پیوسته از راکتور خارج شده و توسط چگالنده شیشه‌ای، مایع شده تا واکنش پیشرفت کند. آب مایع شده هر ۱۵ دقیقه جمع‌آوری و توزین می‌شود، اگر آب جمع‌آوری شده کم‌تر از ۲ گرم باشد، این مرحله خاتمه یافته است. در مرحله پلیمر شدن

را ثابت نگه داشته و گشتاور اختلاط را اندازه‌گیری کند. از گشتاور برای تعیین انتهای فرایند استفاده می‌شود. راکتور با استفاده از المنت الکتریکی گرم می‌شود. از سه حسگر دمایی PT100 برای اندازه‌گیری دمای مخلوط واکنش‌دهنده داخل راکتور، دمای ژاکت راکتور و دمای چگالنده EG بهره‌گرفته می‌شود. بخش‌های مختلف از واشر اورینگ از جنس وایتون آب‌بندی می‌شود. تمامی ورودی‌ها، حسگر و تجهیزات لازم روی درب راکتور



شکل ۴ صفحه نرم‌افزار کنترلی مجموعه راکتور
Figure 4. Computer interface of set up control software

استفاده شده است. بدین منظور ۱-۲ mg از پلیمر پودر شده و با ۱۰۰-۲۰۰ mg KBr در هاونی ساییده و سپس قرصی از آن‌ها تهیه شده و طیف FTIR از این قرص گرفته شد. گرانیروی ذاتی پلیمر، با استفاده از گرانیروی سنج آبلود نوع ۱C اندازه‌گیری شده است. سپس متوسط عددی جرم مولکولی پلیمر از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۳]:

$$[\eta] = 67 \times 10^{-4} \bar{M}_n^{0.47} \quad (1)$$

۳-۲ طراحی کنترل‌کننده فازی مبتنی بر قوانین زبانی

منطق کنترل فازی مبتنی بر قوانین زبانی براساس اطلاعات فرد خبره و تجربیات قبلی پایه‌گذاری

تراکمی، پمپ خلأ J/B-85N حداکثر تا ۱ mbar خلأ را به منظور تسهیل خروج EG (به‌عنوان محصول جانبی این مرحله) اعمال می‌کند. تمامی جمع‌آوری داده‌ها و الگوریتم‌های کنترلی توسط سامانه الکترونیکی مبتنی بر کامپیوتر انجام می‌شود. نرم‌افزاری در محیط visual C#.net نوشته شده تا داده‌ها جمع‌آوری، پردازش و ذخیره شود. شکل ۴ تصویر نرم‌افزار نوشته را نشان می‌دهد. این مجموعه در داخل دانشکده ساخته و توسعه داده شده است.

برای تهیه پلی‌اتیلن ترفتالات، اسید ترفتالیک و اتیلن گلیکول لازم، توزین شده و داخل راکتور ریخته می‌شود. جدول ۱ مقدار مواد مورد استفاده در هر سنتز را نشان می‌دهد. شرایط سنتز در جدول ۲ ارائه شده است. سرعت همزن

جدول ۱ مقدار مونومرها و مواد دیگر در هر سنتز PET
Table 1. Required material for PET synthesis

material	EG	TPA	Sb ₂ O ₃	PPA
weight, gr	148	232	0.013	0.011

جدول ۲ شرایط تهیه پلی‌اتیلن ترفتالات
Table 2. Pet preparation conditions

Catalyst = 345 ppm (of feed)		EG/TPA = 1.7 (molar ratio)
Paste mixing:		N = 250 rpm
Time = 30 min	P = 3.5 bar	T = °200C
Esterification:		N = 250 rpm
Time = less than 2 g water	P = 3.5 bar	T = °230C
Polycondensation:		N = 200 rpm
Time = increase of torque	P = vacuum	T = °260C

می‌شود. شکل ۵ ساختار منطق کنترل فازی را نشان می‌دهد. کنترل‌کننده فازی از سه قسمت تشکیل شده است. این سه قسمت شامل فازی سازی، پایگاه قوانین فازی و غیرفازی سازی می‌شود. ورودی‌های این کنترل‌کننده، خطا و تغییرات خطا بوده که در معادلات زیر تعریف شده‌اند:

$$e = T_R - T_m \quad (2)$$

$$\dot{e} = \frac{de}{dt} = -\frac{dT_m}{dt} \quad (3)$$

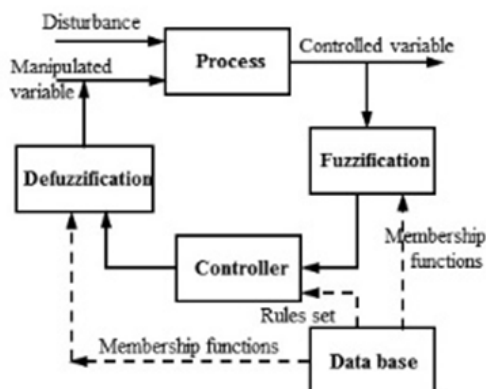
که e خطا، T_R دمای مرجع و T_m دمای اندازه‌گیری

به ۲۵۰-۲۰۰ rpm قرار داده شده و دمای مخلوط به ۲۰۰ °C رسانده شده و ۲۰-۳۰ min هم زده می‌شود. این مرحله، اختلاط خمیر نامیده می‌شود. سپس فشار به ۴/۵ bar افزایش یافته و دما به ۲۳۰ °C افزایش می‌یابد. با تولید اولین قطره آب، مرحله استری شدن آغاز می‌شود. این مرحله حدود ۱۱۰ دقیقه طول می‌کشد. سپس خلأ اعمال شده و دما به ۲۶۰ °C افزایش می‌یابد. با پیشرفت واکنش، گرانیروی مخلوط افزایش می‌یابد و نقطه افزایش شدید شیب نمودار گشتاور بر حسب زمان، تعیین‌کننده زمان اختتام مرحله پلیمر شدن تراکمی است.

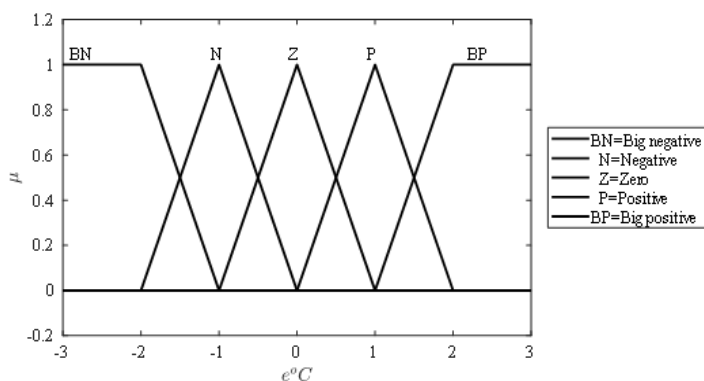
برای شناسایی پلیمر حاصله از طیف سنجی فروسرخ (FTIR) و طیف سنج مدل ۶۵۰ شرکت BOMEM (کانادا)

سازي ورودی‌های مربوطه ۱۵ قانون نوشته شده است. در جدول ۳ کدهای V, M, H, VL و VH به ترتیب به معنی اعمال گرمای خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد به المنت الکتریکی است. شکل ۸ توابع عضویت مربوط به این مجموعه‌های فازی را نشان می‌دهد. برای غیرفازی‌سازی توان خروجی از روش میانگین

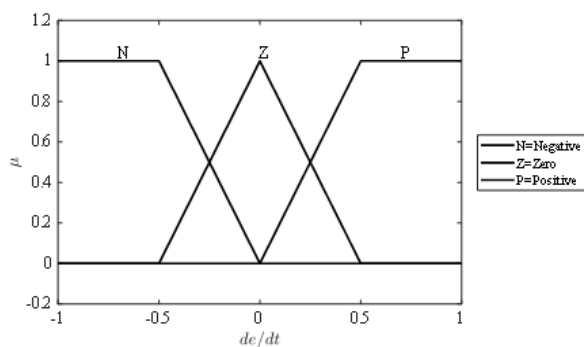
شده است. برای فازی‌سازی از پنج تابع عضویت برای خطا استفاده شده است. شکل ۶ این توابع عضویت را نشان می‌دهد. برای فازی‌سازی مشتق خطا نیز سه تابع عضویت استفاده شده که در شکل ۷ نشان داده شده است. جدول ۳ نشانگر پایگاه قوانین کنترلی استفاده شده است. با توجه به توابع عضویت تعریف شده و فازی



شکل ۵ ساختار منطق کنترل فازی
Figure 5. Fuzzy control structure



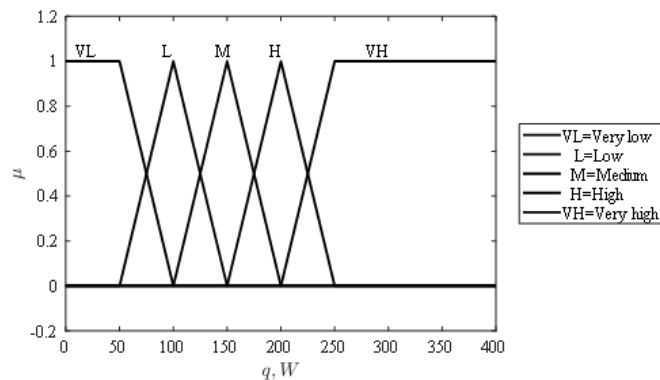
شکل ۶ توابع عضویت فازی‌سازی خطا
Figure 6. Error Fuzzification membership functions



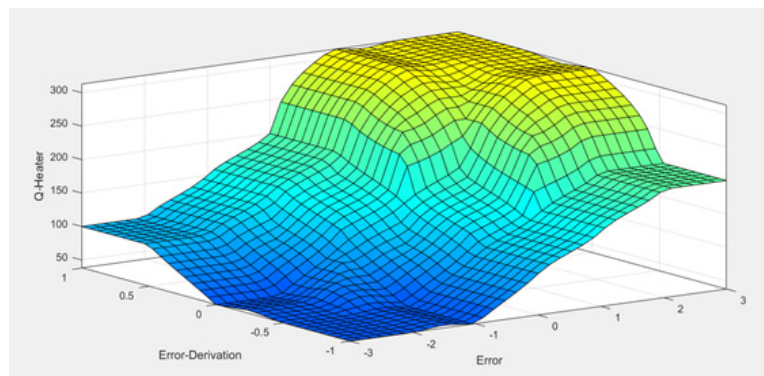
شکل ۷ توابع عضویت فازی‌سازی مشتق خطا
Figure 7. Error derivative Fuzzification membership functions

جدول ۳ قوانین کنترل کننده فازی برای دمای راکتور
Table 3. Fuzzy rules for reactor temperature control

BN	N	Z	P	BP	e/e'
VL	VL	L	M	H	N
VL	L	M	H	VH	Z
L	M	H	VH	VH	P



شکل ۸ توابع عضویت مجموعه‌های فازی گرما
Figure 8. Heat fuzzy set membership functions



شکل ۹ خروجی کنترل کننده فازی بر حسب خطا و تغییرات خطا
Figure 9. Fuzzy controller output vs. error and its derivative

وزنی استفاده شده تا ترکیب استنتاج قوانین فازی انجام شود:

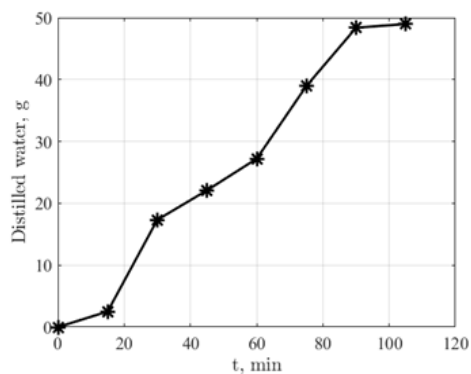
انجام شود:

$$Q_{\text{fuzzy}} = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i \times Q_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i} \quad (4)$$

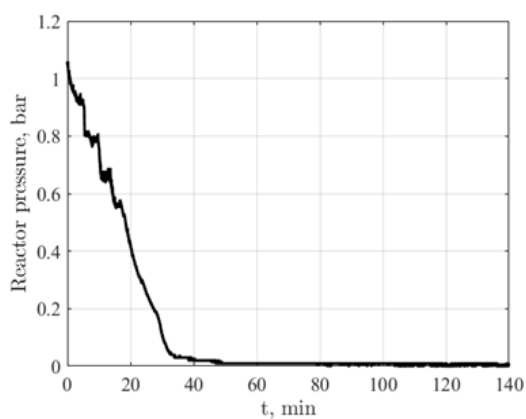
۳ نتایج و بحث

براساس روش گفته شده، نمونه‌های PET سنتز شد. شکل ۱۰ آب جمع‌آوری شده در مرحله استری شدن را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که تولید آب به تدریج افزایش سپس کاهش می‌یابد. در نهایت تولید آب، کم شده و انتهای این مرحله تعیین می‌شود. فشار مرحله پلیمر شدن تراکمی در شکل ۱۱ نشان

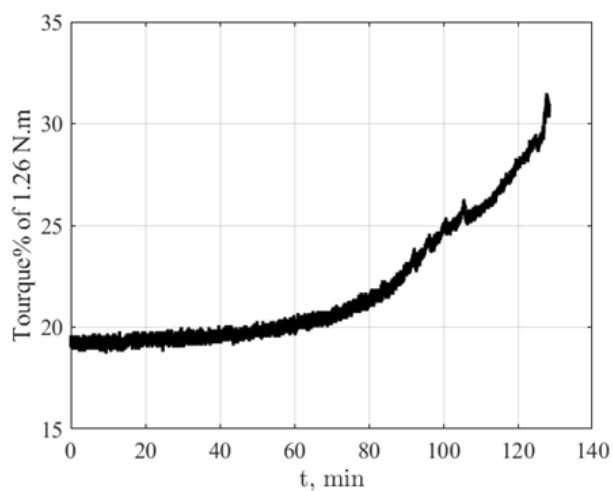
شکل ۹ خروجی کنترل کننده فازی را به صورت سه‌بعدی (توان وارده به المنت بر حسب خطا و تغییرات خطا) نشان می‌دهد. این منطق کنترلی به HMI (Human machine



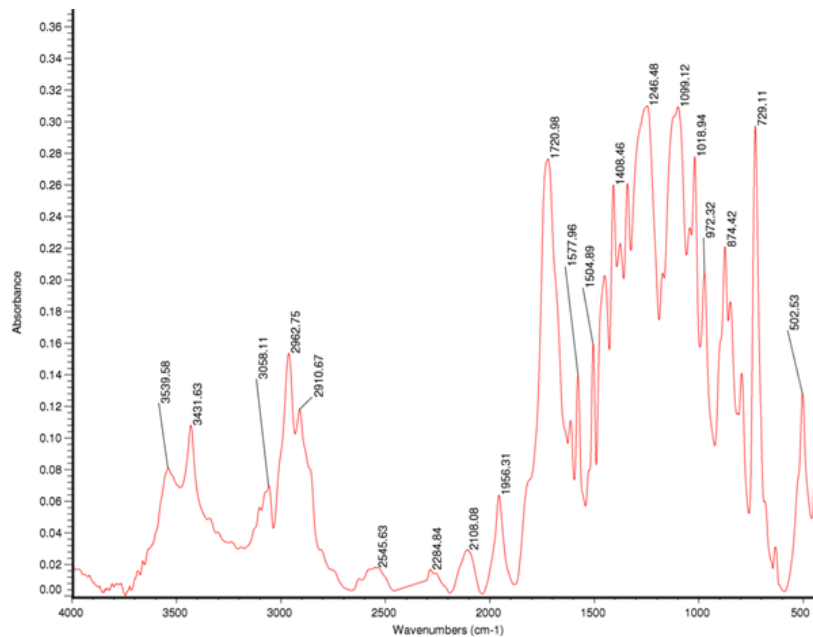
شکل ۱۰ آب تقطیر شده در مرحله استری شدن
Figure 10. Produced water in esterification step



شکل ۱۱ فشار در مرحله پلیمر شدن تراکمی
Figure 11. Pressure in polycondensation step



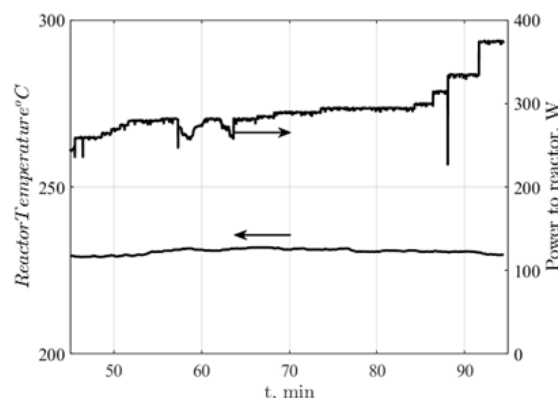
شکل ۱۲ گشتاور در مرحله پلیمر شدن تراکمی
Figure 12. Torque in polycondensation step



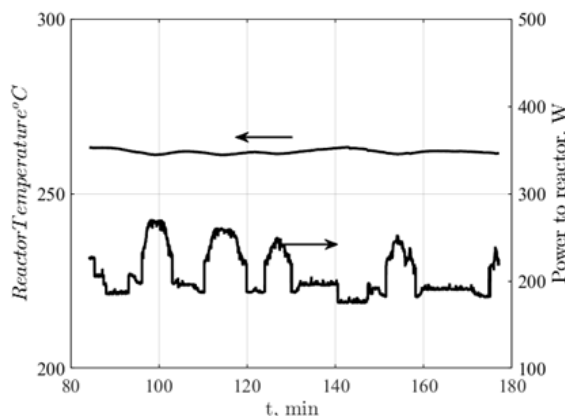
شکل ۱۳ طیف FTIR تهیه شده از نمونه پلی اتیلن ترفتالات
Figure 13. FTIR spectra of prepared PET

پیوند C=O است، ۱۷۲۰ محدوددهی پیوند استری cm^{-1} بوده و پیوند O-H قله جذبی پهنی در طول موج ۳۴۰۰-۳۵۵۰ cm^{-1} می‌دهد که اغلب با قله های جذبی C-H تداخل کرده، زیرا پیوند C-H آروماتیک در طول موج 2962 cm^{-1} و پیوند C-H آلیفاتیک در 2910 cm^{-1} قله داده‌اند. قله تیز در طول موج 1720 cm^{-1} نیز به پیوند CH= حلقه‌ی آروماتیک مربوط است؛ بنابراین، نتیجه گرفته می‌شود که PET سنتز شده است. شکل ۱۴ نتیجه اعمال کنترل کننده فازی در مرحله استری شدن را نشان می‌دهد. در این شکل علاوه بر دمای راکتور، گرمای اعمال شده به راکتور نیز نشان داده شده است. دمای مرجع این مرحله 230°C است. میانگین خطا در این مرحله $1-1/5^\circ\text{C}$ است. بنابراین مشاهده می‌شود که عملکرد منطق کنترل فازی بسیار خوب و قابل قبول است. شکل ۱۵ نتیجه اعمال کنترل کننده فازی در مرحله

داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود، خلأ در مدت ۳۰ دقیقه اعمال شده است تا از فلش شدن مخلوط واکنش دهنده جلوگیری شود و در نهایت به خوبی خلأ اعمال شده است. این خلأ خروج اتیلن گلیکول را تسهیل می‌کند. شکل ۱۲ تغییرات گشتاور اختلاط بر حسب زمان در مرحله پلیمر شدن تراکمی را نشان می‌دهد. این اطلاعات به ندرت در مراجع دیده می‌شود. با ملاحظه گشتاور می‌توان به وضوح شروع و پیشرفت واکنش چگالش را دید، همچنین با دقت خوبی انتهای این مرحله را تعیین کرد. پلیمر به دست آمده دارای گرانیروی ذاتی است. جرم مولکولی نمونه محاسبه شده است. طیف FTIR تهیه شده از نمونه PET در شکل ۱۳ نشان داده شده است. قله ای که در 1246 cm^{-1} مشاهده می‌شود، بیانگر



شکل ۱۴ دمای مرحله استری شدن و گرمای اعمال شده
Figure 14. Temperature of esterification step and applied heat



شکل ۱۵ دمای مرحله پلیمر شدن تراکمی و گرمای اعمال شده

Figure 15. Temperature of polycondensation step and applied heat

(پلی اتیلن ترفتالات) اعمال شد. نتایج حاصل از سنتز پلی اتیلن ترفتالات نشان می‌دهد که دما به خوبی و نزدیک به مقدار دمای مرجع کنترل شده است. خطای دمای راکتور نیز در مرحله استری شدن، برای بیش از یک ساعت، تغییراتی در محدوده $\pm 1^\circ\text{C}$ در محدوده دمای مرجع قرار دارد. این کنترل کننده فازی در مرحله ی پلیمر شدن تراکمی نیز بر روی راکتور اعمال شد. در این مرحله، با کنترل بهینه ی دما، ضمن جلوگیری و کنترل واکنش های جانبی، می توان به خواص نهایی مطلوب و بهینه رسید. دمای راکتور سنتز پلی اتیلن ترفتالات در مرحله ی چگالش نیز به خوبی کنترل شده است و برای بازه ی بیش از دو ساعت در محدوده $\pm 1/5^\circ\text{C}$ دمای مرجع باقی می ماند.

پلیمر شدن تراکمی را نشان می‌دهد. دمای مرجع این مرحله 260°C است. میانگین خطا در این مرحله $1/2-5$ است. مشاهده می‌شود که کنترل کننده، بسیار خوب عمل کرده است. البته پیشنهاد می‌شود که به گونه‌ای منطق پیش‌بینی یا مود لغزشی (Sliding mode) وارد منطق کنترلی شود.

۴ نتیجه گیری

در این پژوهش، با استفاده از الگوریتم منطق فازی، کنترل کننده ی فازی مبتنی بر قوانین زبانی برای دمای راکتور نیمه‌پیوسته تهیه پلی اتیلن ترفتالات طراحی شد. سپس نتایج استفاده از این کنترل کننده که دارای دو ورودی خطا و مشتق خطا و یک خروجی یعنی توان گرم کن بود، توسط زبان برنامه‌نویسی Visual C#.net نوشته و به راکتور سنتز پلی استر

مراجع

- [1]. Scheirs, J. and Long T. E., Modern polyesters: chemistry and technology of polyesters and copolyesters, John Wiley & Sons, 2005 ,104-31.
- [2]. Tserki V., Matzinos P., Pavlidou E., Vachliotis D. and Panayiotou C., Biodegradable aliphatic polyesters. Part I. Properties and biodegradation of poly(butylene succinate-co-butylene adipate), *Polymer Degradation and Stability*, 2006 ,376-367 ,91.
- [3]. Jacquel N., Freyermouth F., Fenouillot F., Rousseau A., Pascault J. P., Fuertes P. and Saint-Loup R., Synthesis and properties of Poly(butylene succinate): Efficiency of different transesterification catalysts, *J. Polymer Sci. Part A: Polym. Chem.*, -5301 ,49 2011 ,5312.
- [4]. Jacquel N., Saint-Loup R., Pascault J. P., Rousseau A. and Fenouillot F., Bio-based alternatives in the synthesis of aliphatic aromatic polyesters dedicated to biodegradable film applications, *Polymer*, 59 2015 ,242-234.
- [5]. <http://www.pressreleasepoint.com/gbi-polyethylene-terephthalate-pet-market2020-reports-res-researchcom>.
- [6]. Fakirov S. (ed.), Handbook of thermoplastic polyesters, homopolymers, copolymers, blends & composites, Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim, 2002 ,103-3.
- [7]. Tomita K., Studies on the formation of poly(ethylene terephthalate): Propagation and degradation reactions in the polycondensation of bis(-2hyd roxyethyl) terephthalate, *Polymer*, 14 (February), 1973 ,54-50.
- [8]. Rieckmann T., Rösner F., and Völker S., Mass transfer and volatilization of small molecules in molten poly(ethylene terephthalate), ECCE-2 Second European Congress of Chemical Engineering Montpellier, October ,1999.
- [9]. Rieckmann T. and Volker S., Micro-kinetics and mass transfer in poly(ethylene terephthalate) synthesis, *Chem. Eng. Sci.*, 56 2001 ,953-945.
- [10]. Kim J. Y., Kim H. Y. and Yeo Y. K., Identification of kinetics of direct esterification reactions for PET synthesis based on a genetic algorithm, *Korean J. Chem. Eng.*, -432 ,(4)18 2001 ,441.
- [11]. Zhu Y., Wang Y., Sha L., Zhao J. and Li X., Design of antibacterial polyethylene terephthalate masterbatch functionalized by modified nano-Mg(OH)₂, *J. Appl. Polym. Sci.*, 2018 ,46755 :(46)135.
- [12]. Koyuncu M. and Alwazeer D., Determination of trace elements, heavy metals, and antimony in polyethylene terephthalate-bottled local raw cow milk of Iğdır region in Turkey, *Environ Monit Assess*, 2019 ,666 ,191.
- [13]. Mecozzi M. and Nisini L., The differentiation of biodegradable and non-biodegradable polyethylene terephthalate (PET) samples by FTIR spectroscopy: A potential support for the structural differentiation of PET in environmental analysis, *Infrared Physics and Technology*, 101 2019 ,126-119.
- [14]. Hosen M. A. and Hussain M. A., Optimization and control of polystyrene batch reactor using hybrid based model, *Proceedings of the 11th International Symposium on Process Systems Engineering*, Singapore, 19-15 July, 2012 ,764-760.
- [15]. Ibrehem A. S., Hussain M. A. and Ghasem N. M., Decentralized advanced model predictive controller of fluidized-bed for polymerization process, *Iran. J. Chem. Chem. Eng.*, -91 ,(4)31 2012 ,117.
- [16]. Ghugare S. B. and Tambe S. S., Development of genetic programming based softsensor model for styrene polymerization process and its application in model based control, *Indian Control Conference (ICC)*, Hyderabad, India, January 2016 ,244-238 ,6-4.
- [17]. Wang K., Lv X. and Zhang G., The application of rough set in polymerization reaction temperature control, *2010 International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering (CMCE)*, Changchun, China, 26-24 August, 2010 ,363-360.
- [18]. Lima N. M. N., Linan L. Z., Filho R. M. and Maciel M. R. W., Modeling and predictive control using fuzzy logic: Application for a polymerization system, *AIChE J.*, -965 ,(4)56 2010 ,978.
- [19]. Precup R. E. and Hellendoorn H., A survey on industrial applications of fuzzy control, *Computers in Industry*, 2011 ,226-213 ,62.

- [20]. Kumar V., Nakara B. C. and Mittal A. P., A review on classical and fuzzy PID controllers, Intern. J. Intelligent Control and Systems, 2011 ,181-170 ,(3)16.
- [21]. Sohrabi A. and Rafizadeh M., Condenser temperature control of an ethylene terephthalate polymerization reactor using fuzzy-logic and classic control methods, 3rd International Conference on Control, Instrumentation, and Automation (ICCIA 2013), Tehran, Iran, December ,199-192 ,30-28 2013.
- [22]. Hosen M. A., Khosravi A., Nahavandi S. and Creighton D., Control of polystyrene batch reactor using fuzzy logic controller, 2013 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Washington DC, USA, October ,13 2013 ,4523-4516.
- [23]. Sanchez-Arrieta N., de Ilarduya A. M., Alla A., Munoz-Guerra S., Poly(ethylene terephthalate) copolymers containing -1,4cyclohexane dicarboxylate units, European Polymer J., 2005 ,1501-1493 ,41.