

طراحی کنترل کننده PID فازی برای کنترل دمای سیال خروجی مبدل های حرارتی پوسته و لوله ای

مسعود عابدینی فر^۱، جعفر غفوری^۲ و لاریسا خدادادی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز، Abedinifar@Hotmail.com

^۲ استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز، Gh_jafar@Yahoo.com

^۳ مربی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز، Lkhodadadi@Iaut.ac.ir

چکیده - مبدل های حرارتی به طور گسترده در کارخانه های شیمیایی کاربرد دارند. هدف اصلی آن ها انتقال حرارت از سیال گرم به سیال سرد است. انواع مختلفی از مبدل های حرارتی وجود دارد که در صنعت بیشتر از نوع پوسته و لوله ای استفاده می شود. یکی از سیالات در لوله ها و دیگری درون پوسته در اطراف لوله ها جریان دارد. در این مقاله برای کنترل دمای سیال خروجی مبدل حرارتی پوسته و لوله ای، کنترل کننده PID فازی طراحی شده است. کنترل کننده، دمای سیال خروجی را به یک نقطه مطلوب بدون در نظر گرفتن اغتشاشات و غیر خطی بودن فرایند، تنظیم می کند. مدل سازی فرآیند و طراحی کنترل کننده، در محیط سیمولینک نرم افزار متلب انجام شده است. کلید واژه - سیمولینک متلب، کنترل کننده PID فازی، مبدل حرارتی پوسته و لوله ای.

خروجی آن مبدل های حرارتی مورد استفاده قرار گرفته اند. بنابراین کمتر به موضوع کنترل دمای مبدل های حرارتی پوسته و لوله ای پرداخته شده است. لازم به ذکر می باشد با توجه به تحقیقات انجام شده در داخل کشور تاکنون هیچ گونه طرح معتبری به منظور کنترل دمای انواع مبدل های حرارتی با کنترل کننده های مرسوم انجام داده نشده است و کار پژوهشی انجام شده در این راستا را می توان از جهاتی منحصر به فرد به شمار آورد.

این مقاله، با یک مبدل حرارتی پوسته و لوله ای و یک سیستم تک ورودی و تک خروجی با کمک داده های تجربی موجود، سروکار دارد. دمای سیال خروجی سیستم مبدل حرارتی بایستی با توجه به نیاز فرآیند، در یک نقطه مطلوب نگه داشته شود. در این تحقیق ابتدا مدل سازی سیستم انجام می شود. سپس یک کنترل کننده PID فازی مبتنی بر سوگنو در یک حلقه کنترلی بازخورد به منظور رسیدن به هدف کنترل، اجرا می شود. همچنین تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از عملکرد کنترل کننده در حوزه زمان انجام می شود. مراحل مدل سازی فرآیندها و طراحی کنترل کننده در محیط سیمولینک نرم افزار متلب که یک نرم افزار قدرتمند و قابل انعطاف است، پیاده سازی و اجرا می شود.

۱- مقدمه

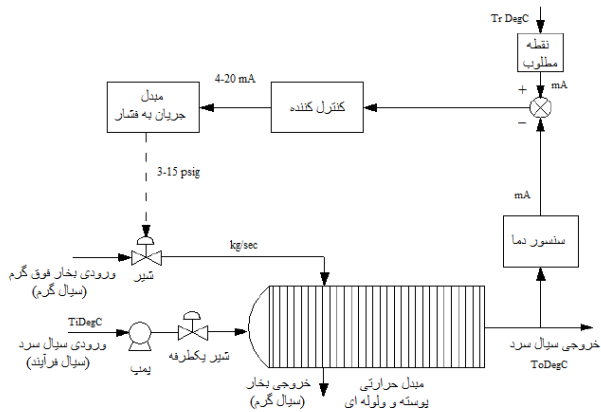
مبدل های حرارتی معمولاً در یک فرآیند شیمیایی، به منظور انتقال حرارت از یک سیال گرم از طریق دیواره جامد به سیال سرد، استفاده می شوند. انواع مختلفی از مبدل های حرارتی در صنعت وجود دارند. نوع خاصی از این مبدل های حرارتی که به مبدل های حرارتی پوسته و لوله ای مشهور هستند، در انواع مختلفی از پیکربندی ها و اندازه ها ساخته و تولید می شوند که قادر به عملیات در فشار بالا هستند. این مبدل های حرارتی در زمینه های متنوعی مانند تبرید، تولید برق، گرمایش و تهویه مطبوع، فرآیندهای شیمیایی، پزشکی و غیره کاربرد دارند. یک مبدل حرارتی پوسته و لوله ای شامل یک سری لوله موازی است که در داخل یک پوسته استوانه ای احاطه شده اند. در این مبدل حرارتی یک سیال از طریق لوله ها و سیال دیگر در فضای بین لوله ها و پوسته جریان می یابد [۱].

پژوهش هایی که در زمینه کنترل دمای مبدل های حرارتی تاکنون انجام شده است بیشتر به سایر انواع مبدل های حرارتی مانند صفحه ای پرداخته اند و همچنین طرح های کنترلی مانند شبکه های عصبی و فازی و غیره به منظور کنترل دمای سیال

۲- مدل سازی ریاضی

توسط ترموکوپل اندازه گیری می شود و خروجی ترموکوپل به واحد ترانسسیمتر ارسال می شود، در نهایت خروجی دما به سیگنال استاندارد در محدوده ۴ الی ۲۰ میلی آمپر تبدیل می شود. این خروجی واحد ترانسسیمتر به واحد کنترل داده می شود.

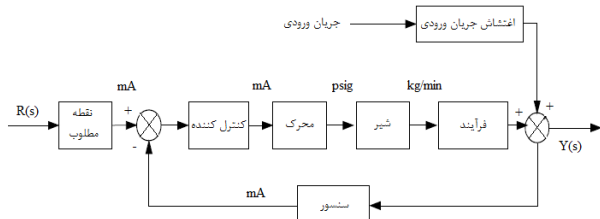
کنترل کننده، الگوریتم کنترل را اجرا می کند و خروجی را با نقطه مطلوب مقایسه می کند و پس از آن دستور لازم را برای عنصر کنترل نهایی از طریق واحد محرک را می دهد. واحد محرک، یک مبدل پنوماتیکی جریان به فشار است و واحد کنترل نهایی شیر پنوماتیکی است. واحد محرک، خروجی کنترل کننده را به یک واحد فشار استاندارد به در محدوده ۳ psig الی ۱۵ تبدیل می کند. محرک با توجه به سیگنال های ارسالی توسط کنترل کننده تصمیم به باز یا بسته کردن شیر می کند.



شکل ۲: طرح کنترل سیستم مبدل حرارتی پوسته و لوله ای [۳]

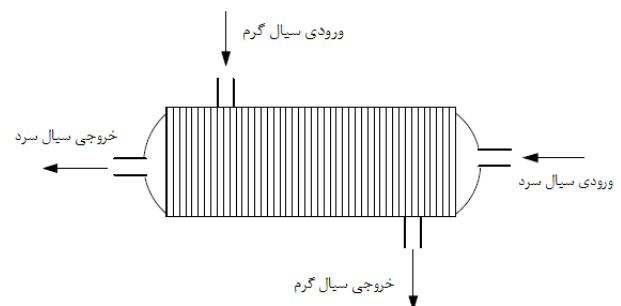
در کل دو نوع اغتشاش در این فرآیند می تواند وجود داشته باشد، که یکی تغییرات جریان سیال ورودی و دیگری تغییرات درجه حرارت سیال ورودی است. اما در عمل تغییرات جریان سیال ورودی اغتشاش برجسته تری نسبت به تغییرات درجه حرارت سیال ورودی دارد.

شکل (۳) بلوک دیاگرام کنترل بازخورد حلقه بسته شامل فرآیند، کنترل کننده، محرک، شیر کنترل، سنسور، نقطه مطلوب و اغتشاش فرآیند را نشان می دهد.



شکل ۳: بلوک دیاگرام کنترل کننده بازخورد مبدل حرارتی [۴]

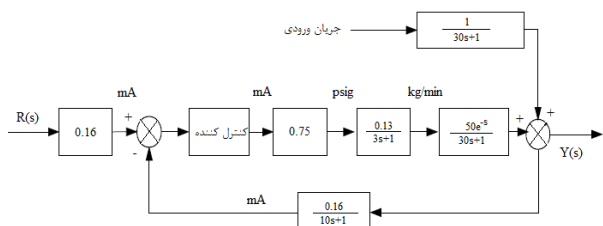
یک فرآیند شیمیایی معمولی برای گرم کردن، شامل رآکتورهای شیمیایی و سیستم مبدل حرارتی می باشد. مبدل حرارتی سیال سرد را با استفاده از بخار فوق گرم ۱۸۰ درجه سانتی گراد می پمپا شده از دیگ بخار را به دمای دلخواه می رساند. مخزن، سیال سرد در دمای ۳۲ درجه سانتی گراد را با استفاده از یک پمپ و یک شیر یک طرفه تامین می کند. بخار فوق گرم از دیگ بخار آمده و از طریق لوله های موجود در مبدل حرارتی جریان می یابد، این در حالیست که سیال فرآیند از طریق فضای بین پوسته و لوله های سیستم مبدل حرارتی جریان می یابد. پس از آن که بخار فوق گرم عمل گرم کردن سیال فرآیند را انجام داد، بخار چگالیده در دمای ۹۳ درجه سانتی گراد از سیستم مبدل حرارتی خارج می شود. مبدل حرارتی، سیال سرد را تا درجه حرارت ۵۲ درجه سانتی گراد گرم می کند. در واقع هدف کنترل دمای خروجی سیال سرد ورودی به مبدل حرارتی می باشد. طرح یک مبدل حرارتی پوسته و لوله ای در شکل (۱) نشان داده شده است [۲].



شکل ۱: طرح یک سیستم مبدل حرارتی [۲]

پیش فرض های مختلفی برای ایجاد معماری کنترل مبدل حرارتی پوسته و لوله ای در نظر گرفته شده است. فرض اول بر این است که نرخ جریان ورودی و نرخ جریان خروجی سیال یکسان هستند. فرض دوم بر این است که ظرفیت ذخیره سازی گرمای دیواره ها ناچیز است. همچنین دیواره های پوسته کاملاً عایق هستند.

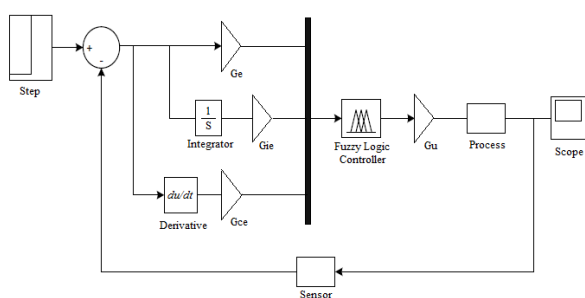
شکل (۲) طرح کنترل بازخورد برای یک سیستم مبدل حرارتی پوسته و لوله ای را نشان می دهد. در این فرآیند، شیر مورد استفاده از نوع بازشونده با هوا است. سنسور مورد استفاده در اینجا یک ترموکوپل به همراه یک ترانسسیمتر می باشد. ترموکوپل به عنوان عنصر سنجش دما استفاده می شود که در مسیر بازخورد معماری کنترل اجرا می شود. دمای سیال خروجی



شکل ۴: توابع تبدیل و بهره‌های موجود در سیستم حلقه بسته کنترل مبدل حرارتی پوسته و لوله‌ای

در ادامه به منظور کنترل دمای سیال خروجی سیستم مبدل حرارتی پوسته و لوله‌ای، کنترل کننده PID فازی طراحی و اجرا می‌شود. کنترل کننده ترکیبی PID فازی که در این تحقیق معرفی می‌شود، یک بسط طبیعی از نسخه معمولی آنها هستند که ساختار خطی کنترل کننده‌های PID را همراه با فرمول‌های تحلیلی ساده به عنوان نتایج نهایی طراحی، حفظ می‌کنند. بنابراین، آنها را می‌توان به طور مستقیم در کنترل کننده‌های PID معمولی در هر یک از سیستم‌های کنترلی جایگزین نمود. تفاوت اصلی کنترل کننده‌های ترکیبی با کنترل کننده‌های PID این است که کنترل کننده‌های PID فازی با استفاده از اصول و تکنیک‌های کنترلی منطق فازی طراحی می‌شوند، تا بتوان به کنترل کننده‌هایی جدید که دارای فرمول‌های تحلیلی بسیار شبیه به کنترل کننده‌های PID معمولی هستند، دست یافت [۶].

شکل (۵) طرح کنترل کننده ترکیبی PID فازی را نشان می‌دهد که در ادامه از این طرح به منظور کنترل دمای مبدل حرارتی پوسته و لوله‌ای استفاده خواهیم نمود.



شکل (۵) معماری کنترل کننده PID فازی

۳- نتایج شبیه‌سازی کامپیوتری

با استفاده از داده‌های تجربی موجود، طرح سیمولینک کنترل کننده PID فازی مبتنی بر سوگنو برای مبدل حرارتی پوسته و لوله‌ای در شکل (۶) نشان داده شده است:

کنترل کننده عمل کنترل را با عنصر کنترل نهایی از طریق محرک اعمال می‌کند. سنسور، خروجی را دریافت می‌کند و به کنترل کننده بازخورد می‌دهد. در واقع دما توسط سنسور اندازه گیری می‌شود و سیگنال خروجی به کنترل کننده فرستاده می‌شود؛ جایی که با مقدار نقطه مطلوب مقایسه می‌گردد. سیگنال خروجی از کنترل کننده به مبدل پنوماتیکی جریان به فشار وارد می‌شود که یک سیگنال پنوماتیکی به منظور تنظیم شیر کنترل ایجاد می‌شود و جریان بخار وارد می‌شود. این جریان وارد مبدل حرارتی شده و به همراه ورودی‌های دیگر دمای نهایی خروجی را ایجاد می‌کند.

داده‌های تجربی فرآیند در جدول (۱) آورده شده‌اند [۵].

جدول ۱: داده‌های تجربی فرآیند کنترلی مبدل حرارتی

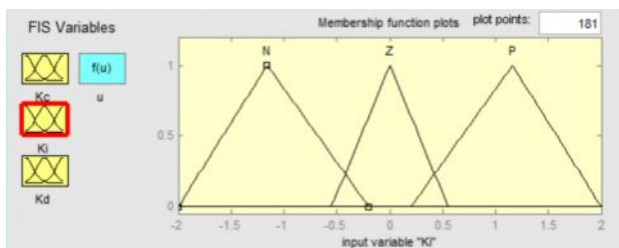
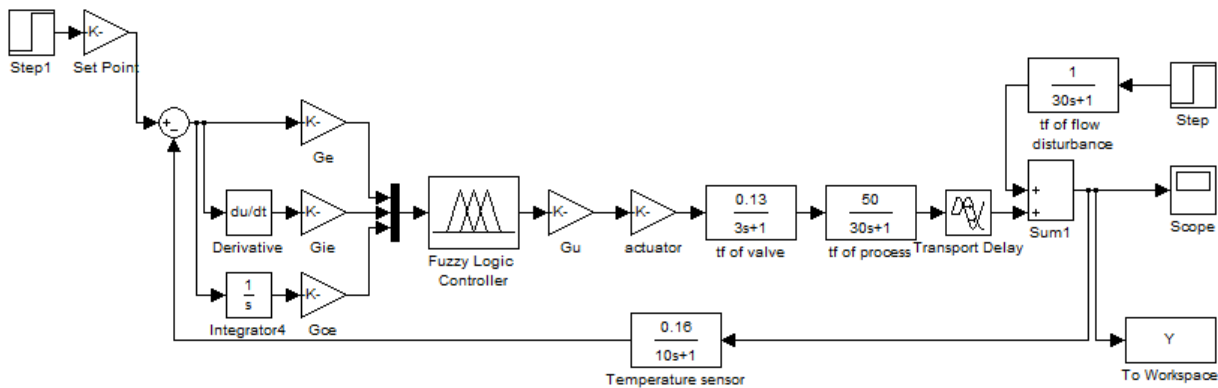
پاسخ مبدل به بهره جریان بخار	$50 \text{ } ^\circ\text{C} / (\text{kg} / \text{sec})$
ثابت زمانی فرآیند	30 sec
محدوده جریان محرک	$4-20 \text{ mA}$
محدوده فشار محرک	$3-15 \text{ psig}$
ظرفیت شیر کنترل	$1/6 \text{ kg} / \text{sec}$
ثابت زمانی شیر کنترل	3 sec
محدوده دمای سنسور	$50-150 \text{ } ^\circ\text{C}$
ثابت زمانی سنسور	10 sec
فاکتور مقیاسی نقطه مطلوب	$0.16 \text{ mA} / ^\circ\text{C}$

توابع تبدیل مربوط به اجزای مختلف سیستم و فرآیندها و همچنین بهره‌های مربوط به آنها در جدول (۲) گردآوری شده‌اند.

جدول (۲) توابع تبدیل و بهره‌های اجزای مختلف سیستم

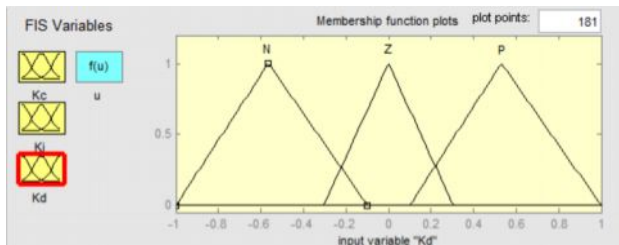
تابع تبدیل فرآیند	$\frac{50e^{-s}}{30s+1}$
تابع تبدیل شیر	$\frac{0.13}{3s+1}$
بهره محرک	0.75
تابع تبدیل اغتشاش	$\frac{1}{30s+1}$
تابع تبدیل سنسور	$\frac{0.16}{10s+1}$

با استفاده از داده‌های تجربی، توابع تبدیل و بهره‌های موجود در سیستم کنترل حلقه بسته مبدل حرارتی پوسته و لوله‌ای در شکل (۴) نشان داده شده‌اند:



شکل ۹: تابع عضویت برای ورودی ۲

شکل (۱۰) تابع عضویت برای ورودی ۳ (K_d) را نشان می‌دهد. محدوده مشتق‌گیری بین $[-1, 1]$ است.



شکل ۱۰: تابع عضویت برای ورودی ۳

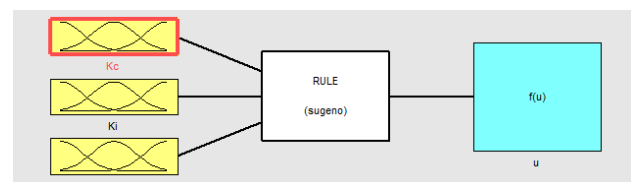
۲۷ قانون فازی برای این مورد به دلیل استفاده از مجموعه قوانین سه بعدی استفاده می‌شود که در شکل (۱۱) نشان داده شده است.

$u(t)$	K_i								
	N	N	N	Z	Z	Z	P	P	P
K_c	N	P	P	P	P	Z	P	Z	N
	Z	P	P	Z	P	Z	N	Z	N
	P	P	Z	N	Z	N	P	N	N
	K_d								
	N	Z	P	N	Z	P	N	Z	P

جدول ۳) پایگاه قوانین فازی برای کنترل‌کننده PID فازی

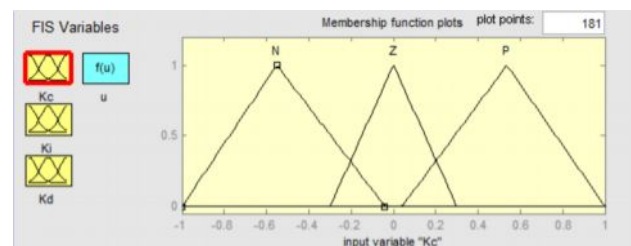
در این طرح فاکتورهای مقیاسی ورودی و خروجی بر اساس روش آزمون و خطا تعیین شده‌اند. فاکتورهای مقیاسی ورودی G_e و G_{ce} هستند که به ترتیب 0.11 و 0.22 بدست آمده‌اند و همچنین فاکتور مقیاسی خروجی G_u است. کنترل‌کننده PID فازی مبتنی بر سوگنو دارای ۳ ورودی است که به ترتیب بهره تناسب (K_c), بهره انتگرال‌گیر (K_i) و بهره مشتق‌گیر (K_d) تعریف شده‌اند. همچنین متغیر خروجی، عمل کنترلی است. در این حالت سه سطح فازی منفی (N), صفر (Z) و مثبت (P) وجود دارد.

شکل (۷) سیستم استنتاج فازی مبتنی بر سوگنو با ورودی‌های K_c , K_i و K_d را نشان می‌دهد.



شکل ۷: سیستم استنتاج فازی مبتنی بر سوگنو

شکل (۸) تابع عضویت برای ورودی ۱ (K_c) را نشان می‌دهد. با روش آزمون و خطا می‌توان گفت محدوده تناسبی بین $[-1, 1]$ است.



شکل ۸: تابع عضویت برای ورودی ۱

شکل (۹) تابع عضویت برای ورودی ۲ (K_i) را نشان می‌دهد. محدوده انتگرال‌گیری بین $[-2, 2]$ است.

با تحلیل پاسخ پله واحد این سیستم، زمان نشست ۵۱/۴۶۹ ثانیه و مقدار حداکثر فراجهش را صفر درصد بدست می‌آید. به منظور ارزیابی عملکرد کنترل‌کننده، از شاخص‌های عملکرد استفاده شده است. شاخص‌های عملکرد ارزیابی در این سیستم کنترلی، انتگرال قدر مطلق خطا (IAE)، انتگرال مجذور خطا (ISE)، انتگرال قدر مطلق خطا در زمان (ITAE) و انتگرال مجذور خطا در زمان (ITSE) هستند. شاخص‌های عملکرد یک مقدار کمی از عملکرد سیستم هستند. یک سیستم، زمانی به عنوان یک سیستم کنترلی بهینه در نظر گرفته می‌شود که شاخص‌های عملکرد را به حداقل مقدار ممکن برساند. شاخص‌های عملکرد بیان شده را می‌توان با روابط زیر بدست آورد [۷]:

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (2)$$

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \quad (3)$$

$$ITAE = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (4)$$

$$ITSE = \int_0^{\infty} t e^2(t) dt \quad (5)$$

شاخص‌های عملکرد کنترل‌کننده PID فازی طراحی شده، در جدول (۳) نشان داده شده‌اند.

جدول ۳: شاخص‌های عملکرد کنترل‌کننده PID فازی

کنترل‌کننده	IAE	ISE	ITAE	ITSE
PID فازی	۲/۸۸۷	۰/۲۸۶	۴۶/۹۶	۲/۴۶۹

۴- نتیجه‌گیری

مقدار حداکثر فراجهش در این سیستم صفر بوده و همچنین زمان نشست ۵۱/۴۶۹ ثانیه است که در فرآیندهای شیمیایی زمان نشستی در حدود چند دقیقه مقدار قابل قبولی است. مقادیر شاخص‌های عملکرد نیز در محدوده رضایت‌بخشی هستند. با توجه به نتایج، می‌توان دمای سیال خروجی مبدل حرارتی پوسته و لوله‌ای را در کوتاه‌ترین زمان ممکن بدون در نظر گرفتن اغتشاشات و غیرخطی بودن فرآیند، کنترل نمود. با کنترل دمای سیال خروجی مبدل حرارتی، می‌توان صرفه‌جویی چشمگیری در حوزه مصرف انرژی انجام داد.

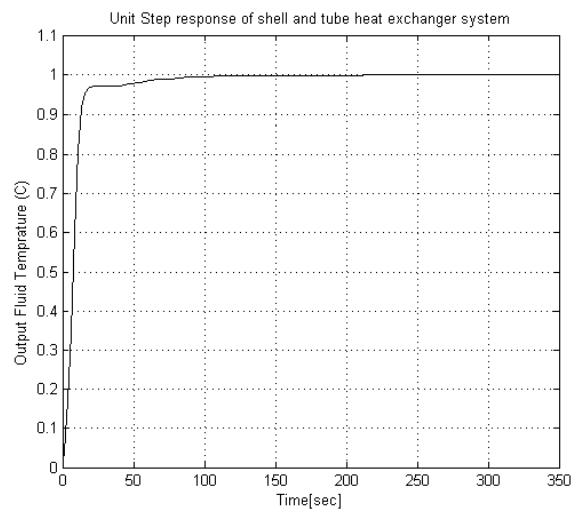
مراجع

- [1] K. Ramesh and P. Dusan, Fundamentals of heat exchanger design. John Wiley and Sons, pp. 103-112, 2003.

یک نمونه از قوانین بیان شده در شکل (۱۱) را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

*IF Ki is Negative and Kc is Negative and Kd is Negative
THEN u(t) is Positive*

پاسخ پله واحد کنترل‌کننده PID فازی مبتنی بر سوگنو برای سیستم مبدل حرارتی پوسته و لوله‌ای در شکل (۱۲) نشان داده شده است.



شکل ۱۲: پاسخ پله واحد کنترل‌کننده PID فازی مبتنی بر سوگنو برای مبدل حرارتی پوسته و لوله‌ای

منظور از طراحی سیستم‌های کنترل در حوزه زمان استفاده از خواص و مشخصه‌های حوزه زمانی سیستمی است که قرار است طراحی شود. این مشخصات اغلب به صورت مقادیری استاندارد در زمان صعود، زمان نشست، حداکثر فراجهش، زمان اوج و خطای حالت ماندگار با استفاده از پاسخ پله واحد بیان می‌شوند. در این کنترل‌کننده طراحی شده دو پارامتر زمان نشست و حداکثر فراجهش ارزیابی شده‌اند. حداکثر فراجهش مقدار تفاوت بین اوج پاسخ زمانی و خروجی پایدار را نشان می‌دهد. آن را به صورت زیر می‌توان تعریف نمود [۷]:

$$\%M_p = \frac{C(t_p) - C(\infty)}{C(\infty)} * 100\% \quad (1)$$

زمان نشست (t_s)، زمان مورد نیاز برای اینکه پاسخ سیستم به محدوده مقدار نهایی (حدود ۲٪ الی ۵٪ مقدار نهایی) رسیده و باقی بماند [۷]. در اینجا به صورت تصادفی ۵٪ مقدار نهایی گرفته شده است.

- [2] N. Kaddour, Process modeling and control in chemical engineering. Marcel Dekker Inc, pp. 186-192, 1989.
- [3] S. Anton, "Some aspect of Modeling shell and tube heat exchangers". Proc.of 7th modelica Corif. Italy, pp. 716-721, 2009.
- [4] D. Orlando, R. Nibaldo and A. Luiz, "Neural networks for cost estimation of shell and tube heat exchangers". International Multi Conference of Engineers and Computer Scientists, Vol. 2, No 1, pp. 1584-1589, 2008.
- [5] M. Gopal, Control systems principles and design. Tata McGraw-Hill Education, pp. 245-250, 2008.
- [6] O. Ursaru, M. Lucanu and L. Tigaeru, "A hybrid PID-fuzzy controller for dc/dc converters". Signals, Circuits and Systems, Vol. 1, pp. 97-100, 2003.
- [7] M. Kenneth and V. Wim, Management Control Systems: Performance Measurement, Evaluation and Incentives. Prentice Hall, pp. 109-119, 2007.