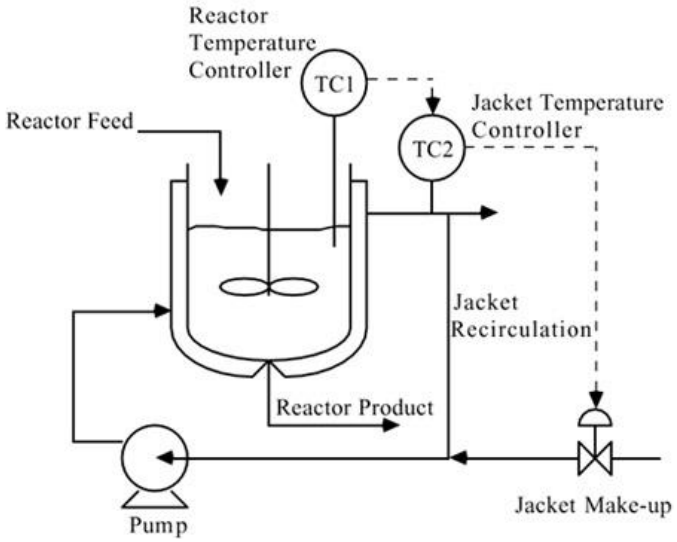
راکتورهای شیمیایی به دلیل واکنش‌هایی که درون آنها انجام می‌شود نیاز به از بین بردن یا افزودن گرما به آن را دارند. در یک CSTR[1] تفاوت دما بین مایع درون مخزن و مایعی که در پوشش احاطه شده آن جریان دارد موجب این انتقال گرمای مورنیاز برای انجام واکنش شیمیایی خواهد شد. نمونه‌ای از این فرآیند را در شکل 1 مشاهده می‌نمایید.



شکل 1– نمایی از فرآیند CSTR

همانطور که ملاحظه می‌شود در این سیستم دو حلقه‌ی کنترلی به صورت cascade بسته شده است. کنترلر حلقه داخلی مربوط به دمای مایع درون مخزن و کنترلر دوم مربوط به تنظیم دمای مایع درون پوشش مخزن است. سیگنال کنترلی حاصل از کنترلر دوم بر روی شیری تاثیر می‌گذارد که مایع درون پوشش را تامین می کند.

الف: مدل سازی

در این قسمت برای اینکه بتوانیم مدلی از سیستم بدست آوریم فرض‌های زیر را انجام می‌دهیم:

۱) وجود مدت زمان لازم برای به تعادل دمایی رسیدن مایع درون پوشش و مخزن

۲) ثابت بودن حجم مخزن و پوشش‌آن

۳) ثابت بودن مقادیر پارامترها

۴) سریعتر بودن دینامیک‌های تغییر دمای پوشش نسبت به دینامیک‌هایی تغییر دمای مخزن.

توجه کنید که فرض ۴ باعث می‌گردد که بتوانیم از مدل‌سازی تغییر دمای پوشش مخزن و به نوعی مدل کردن محرک سیستم صرفنظر کنیم. در نتیجه در این پروژه فقط دینامیک تغییرات دمای مخزن مورد توجه می‌باشد.

[1]continuous stirred-tank reactor

این امر را می‌توان به این صورت نیز بیان کرد که تغییر در فشار مایع پوشش توسط شیر مستقیما منجر به تغییر دمای آن خواهد شد.

یکی از فرآیندهای شیمیایی پرکاربرد در صنعت تولید پروپیلن گلیکول است که توسط هیدرولیز کردن اکسید پروپیلن با کاتالیزور اسید سولفوریک بدست می‌آید. معادله‌ی واکنش شیمیایی آن به صورت زیر می‌باشد:

$$CH_2 - O - CH - CH_3 + H_2O \rightarrow CH_2OH - CH_2O - CH_3$$

از آنجایی که میزان آب مصرفی در این واکنش زیاد می‌باشد در نتیجه نرخ واکنش پرویلین اکسید نسبت به غلظت آن به صورت خطی تغییر می‌کند و از معادله‌ی زیر حاصل می‌گردد:

$$r_A = -k_0 \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) C_A$$

که در آن k_0 ضریب فرکانسی، E_a انرژی فعالسازی، R ثابت ایده‌آل گازها و T دمای مخزن برحسب کلوین می‌باشد.

برای راحتی در ادامه‌ی پروژه نماد A را به جای اکسید پروپیلن و نماد B را به جای پروپیلن گلیکول جایگزین می‌نماییم. حال با توجه به این فرایض و توضیحاتی که بیان شد، به سوالات زیر پاسخ دهید:

۱) با استفاده از قوانین توازن ماده برای ماده A و تعادل انرژی مخزن معادلات دینامیکی این سیستم را بنویسید.

راهنمایی: در نوشتن معادلات تعادل انرژی مخزن توجه کنید که در اثر انجام واکنش شیمیایی گرمایی آزاد می‌شود که باید آن را در این معادلات لحاظ کنید.

۲) نقطه‌ی کار سیستم را در حالت ماندگار (C_{As}, T_s) که به ترتیب دمای مخزن در حالت ماندگار و غلظت ماده‌ی A در حالت ماندگار است)بر حسب مقدار دبی ورودی به سیستم در حالت ماندگار و دمای پوشش مخزن در حالت ماندگار و سایر پارامترها بدست آورید.

۳) سیستم خطی‌سازی شده را با درنظر گرفتن ورودی، خروجی‌ها و حالت‌های سیستم به صورت زیر، بدست آورید:

$$u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_j - T_{js} \\ T_f - T_{fs} \\ C_{Af} - C_{Afs} \\ F - F_s \end{bmatrix}, \quad y = T - T_s,$$

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_A - C_{As} \\ T - T_s \end{bmatrix}$$

که در آن T_j دمای پوشش مخزن، T_f دمای مایع ورودی به سیستم، C_{Af} غلظت ماده‌ی ورودی ، F دبی ماده‌ی ورودی به مخزن ، T دمای مخزن و C_A غلظت ماده‌ی مخزن است. توجه کنید که تنها ورودی کنترلی در این سیستم دمای پوشش مخزن می‌باشد و سه ورودی دیگر برای سیستم ورودی اغتشاش محسوب می‌شوند.

پارمترهای مورد نیاز در این مدل‌سازی در جدول 1 آمده است.

جدول 1 پارامترهای سیستم

پارامتر	مقدار	واحد
E_a	32.4	$Btu/lbmol$
k_0	16.96×10^{12}	hr^{-1}
$-\Delta H$	39000	$Btu/lbmol\ PO$
U	75	$Btu/hr\ ft^2\ °F$
ρc_p	53.25	$Btu/hr\ ft^3\ °F$
R	1.987	$Btu/lbmol\ °F$
C_{Af}	0.132	$lbmol/ft^3$
T_f	519.67	$Kelvin$
V	85	ft^3
A	88	ft^2
F	340	ft^3/hr

ب:کنترل

در این قسمت برای اینکه بتوانیم با استفاده از روش‌های بیان شده در این درس به طراحی کنترلر بپردازیم ابتدا باید مدلی از سیستم بدست آوریم. برای انجام این کار موارد زیر را انجام دهید:

۱) ابتدا مدل غیرخطی سیستم که در قسمت مدل‌سازی بدست آوردید را در نرم‌افزار متلب (سیمولینک) شبیه‌سازی نمایید.

۲) با اعمال ورودی مناسب به سیستم غیرخطی در نقطه‌ی کار، یک مدل مناسب خطی برای آن بدست آورید.

توجه: در این قسمت باید دلیل انتخاب این مدل خطی را **حتماً** بیان کنید. برخی از این دلایل می تواند نزدیکی به مدل اصلی، سادگی مدل، نوع پاسخ سیستم و .... باشد.

۳) از طریق روش پاسخ‌های فرکانسی نقطه‌ی نهایی را برای سیستم در این نقطه‌ی کار بدست آورید.

۴) با اعمال ورودی‌های پله با دامنه‌ی مختلف به سیستم غیرخطی و سیستم خطی بدست آمده در قسمت ۲، محدوده‌ای را که به ازای آن سیستم خطی بدست آمده قابل قبول می‌باشد، را تعیین کنید.

۵) قسمت ۴ را برای سیستم خطی حاصل از خطی‌سازی سیستم تکرار کنید و نتایج را مقایسه کنید.

۶) برای مدل بدست آمده حاصل از خطی‌سازی سیستم و مدل شناسایی شده تجربی در قسمت ۲ ، کنترلرهای PID و PI به روش ZN و روش طراحی ITAE و روش Cohen-Coon طراحی کنید و موارد زیر را با انجام شبیه‌سازی‌های مختلف بررسی کنید:

الف) پاسخ سیستم حلقه بسته کنترلرهای طراحی شده روی سیستم خطی

ب) پاسخ حلقه بسته کنترلرهای طراحی شده روی سیستم غیرخطی و مقایسه آنها

ج) پاسخ سیستم غیرخطی در صورتی که نقطه‌ی کار سیستم تغییر کند.

در انتها جدولی تهیه کنید و در آن کنترلرهای طراحی شده را از نظر زمان خیز، زمان نشست، خطای حالت ماندگار، فراجهش، زمان حذف اغتشاش هم برای سیستم خطی و هم برای سیستم غیرخطی مقایسه کنید.

۷) با استفاده از مقادیری که در قسمت ۳ بدست آوردید کنترل PI و PID به روش ZN پاسخ فرکانسی بدست آورید و قسمت ۶ را برای آن تکرار کنید.

امتیازی: فرض کنید شیر کنترلی برای کنترل دبی مایع درون پوشش باشد و میزان بازشدگی آن بین ۳۰٪ تا ۷۰٪ باشد و دینامیک بین خروجی کنترلر دمای مایع درون پوشش به میزان باز شدگی شیر دارای ثابت زمانی ۰,۱ ساعت باشد. با این فرض بهترین کنترلر بدست آمده در قسمت ۶ و ۷ را بر روی سیستم خطی و غیرخطی شبیه‌سازی نمایید و عملکرد آن را در این صورت بررسی کنید. برای رفع این مشکل چاره‌ای بیندیشید و آن را بر روی سیستم خطی و غیر خطی شبیه‌سازی نمایید.