



دانشگاه صنعتی همدان

گروه مهندسی شیمی

دستورالعمل آزمایشگاه کنترل فرایند

آزمایش ۱

کنترل دما

ویرایش سوم

۱۳۹۴

تهیه کننده:

بیژن مدی

Processcontrol.hut@gmail.com

۱- نکات ایمنی

توجه کنید که محیط آزمایشگاه همانند محیط یک کارخانه یا یک واحد فرایندی می‌تواند برای افراد خطر ساز باشد. بنابراین هر دانشجو باید قبل از انجام آزمایش با مخاطرات انجام کار آشنا باشد. به علاوه در صورت نیاز دانشجو باید از تجهیزات حفاظت فردی همچون دستکش، عینک محافظ و ... استفاده نماید. به خصوص دانشجو باید به علائم هشدار دهنده زیر و معانی آنها توجه داشته باشد:

جدول ۱: علائم هشدار دهنده مخاطرات موجود در آزمایشگاه کنترل فرایند.

معنی	علامت هشدار دهنده
خطر گیر کردن دست	
نماد عمومی خطر	
سطح داغ	
گاز فشرده	
خطر برق گرفتگی	

۲- مقدمه

تجهیزات فعلی آزمایشگاه کنترل فرایند همه ساخت شرکت GUNT آلمان بوده و دارای امکانات مانیتورینگ و کنترل به روز هستند. نقاط مثبت این امکانات تنها شامل سخت افزار نیست بلکه نرم افزارهای واسط کاربری (Human-Machine Interface-HMI) که به همراه ادوات فرایندی

تحويل داده شده بسیار مناسب محیط آموزشی هستند بطوریکه دانشجویان به سرعت می‌توانند کار با این سیستمها را فرا بگیرند. یک نکته حائز اهمیت اختلاف در نمادگذاری در این سیستمها است که کاربران باید به آن دقت کنند. نمادهای استفاده شده در جزوات آموزشی مربوط به این تجهیزات و نمایش داده شده بر روی نرم افزارها با روال کتب درسی متفاوت هستند. جهت آشنایی دانشجویان مهمترین این نمادها و معادل متداول آنها در جدول ۲ آمده‌اند.

جدول ۲: پارامترهای تعریف شده در مدارک تجهیزات آزمایشگاهی شرکت GUNT و معادل متعارف آنها.

GUNT symbol	GUNT definition	Common symbol	Common definition	معادل فارسی
K_p	Controller gain	k_c	Proportional gain	بهره تناسبی
K_s	Proportional gain	k_p	Process gain	بهره فرایند
T_a / T_g	Compensating time	τ	Process time constant	ثابت زمانی فرایند
T_n	Reset time	τ_I	Integral time	زمان انتگرالی
T_t	Dead time	t_D	Time delay	تأخیر
T_u	Dwell time	-	-	زمان سکون
T_u^*	Sum of T_t and T_u	t_D	Time delay	تأخیر
T_v	Rate time	τ_D	Derivative time	زمان مشتقی
w	Reference variable	y_{sp}	Setpoint	مقدار مقرر
x	Controlled variable	y	Process output	خروجی فرایند
x_{sd}	Differential gap	-	Deadband	باند مرده
y	Manipulating variable	u	Process input	ورودی فرایند
z	Disturbance	d	Disturbance	اغتاش

۳- آزمایش حلقه کنترل دما

۳-۱- اهداف آزمایش

- ۱- بدست آوردن خصوصیات فرایند مدار باز
- ۲- مقایسه روشهای تنظیم کنترل کننده PID^۱
- ۳- آشنایی با کنترل کننده دو وضعیتی
- ۴- اعمال کنترل مدار بسته

۳-۲- شرح فرایند

در این آزمایش، فرایند یک میله فلزی است که از اطراف عایق شده اما از دو سر تبادل حرارت دارد. یک المان پلتیر^۲ نقش منبع حرارتی را ایفا می‌کند. البته این المان هم می‌تواند به سیستم گرما بدهد و هم از آن گرما بگیرد. در حالت اول این المان همچون هیتر عمل می‌کند و در حالت دوم نقشی همانند یخچال دارد یعنی با صرف انرژی الکتریکی از محیط سرد گرما گرفته و به محیط گرم گرما می‌دهد. بار حرارتی این المان متغیر کنترل کننده^۳ (MV) است که هم به صورت

¹ Proportional-Integral-Derivative

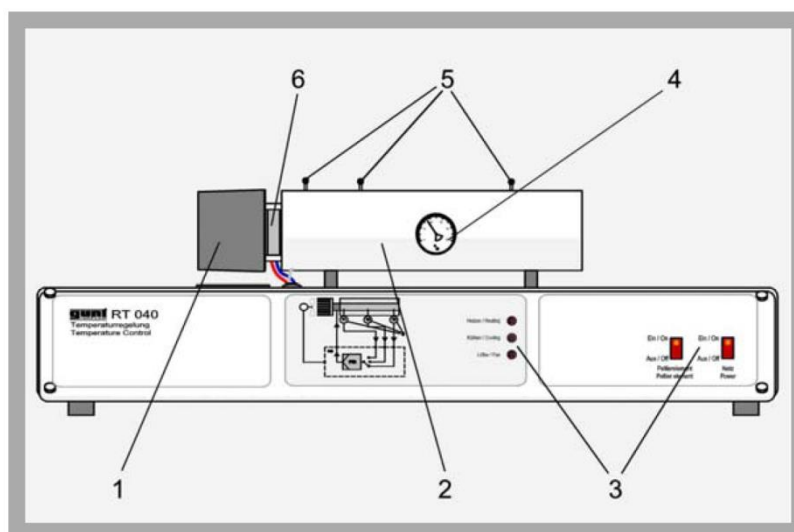
² Peltier element

³ Manipulated variable

دستی و هم به صورت مدار بسته برحسب درصد از 100- تا 100+ متغیر است.

به منظور بررسی اثر اغتشاش بر فرایند، یک فن کوچک در همان سمتی که المان پلتیر قرار گرفته نصب شده است که با تغییر میزان اتلاف حرارت، دینامیک سیستم را تحت تأثیر قرار می‌دهد. توجه کنید که جهت جلوگیری از آسیب دیدن دستگاه در اثر انباشت حرارت دور فن باید همواره در حدود حداکثر آن باشد.

سه عدد سنسور PTC^۱ در طول میله فلزی قرار گرفته‌اند. بدیهی است که به علت وجود فاصله بین منبع حرارتی و سنسورها، وجود تأخیر زمانی در فرایند قطعی است که البته مقدار تأخیر تابعی از فاصله تا منبع حرارتی است. دیاگرام شماتیک این دستگاه در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: دیاگرام شماتیک سیستم کنترل دما، (۱) فن (۲) میله عایق شده (۳) کلیدهای قطع و وصل برق و چراغهای نمایشگر (۴) ترمومتر (۵) سنسورهای دما (۶) المان پلتیر (هیتر/خنک کننده).

۳-۳- تئوری

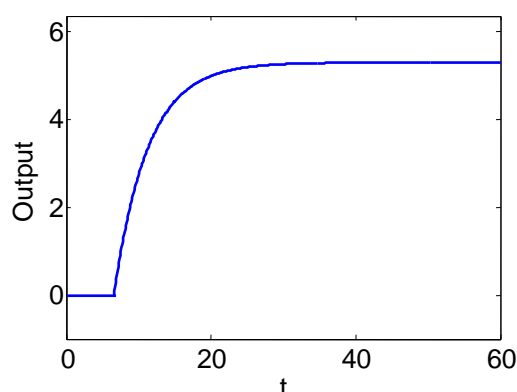
برای بررسی دینامیک یک سیستم ناگزیر از انجام آزمایش هستیم. ساده‌ترین نوع آزمایش دینامیکی، اعمال تغییر پله بر روی یکی از ورودیهای سیستم و سپس ثبت تغییرات در خروجی در طول زمان است. طبیعت اجسام و فرایندها بر رفتار دینامیکی سیستم اثر می‌گذارد. ساده ترین نوع پاسخ دینامیکی که معمولاً مشاهده می‌شود، تغییرات نمایی بدون نوسان اما با مقداری تأخیر ابتدایی است. با توجه به تابع انتقال فرایند که از بیان معادله دیفرانسیل سیستم در فضای لاپلاس بدست می‌آید، به چنین سیستمی FOPTD^۲ می‌گویند که به کمک آن دینامیک بسیاری از سیستمهای غیر نوسانی را می‌توان تشریح کرد. برای چنین سیستمی تنها سه مجهول وجود دارد: تأخیر انتقالی (T_u)، بهره (K_s) و ثابت زمانی فرایند (T_a). نمونه‌ای از پاسخ این سیستم به ورودی پله در شکل ۲ نشان داده شده است.

^۱ Positive temperature coefficient

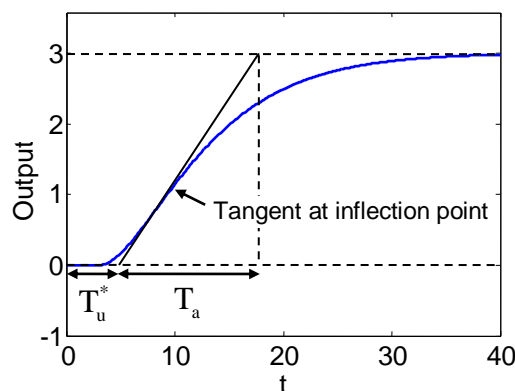
^۲ First order plus time delay

اما پاره‌ای از عوامل هستند که باعث ایجاد به اصطلاح دینامیکهای پیچیده در سیستم می‌شوند. مثلا اجسامی که انرژی ذخیره می‌کنند می‌توانند باعث نوسان در سیستم شوند و یا پدیده‌های انتقال می‌توانند شکل پاسخ دینامیکی را تغییر دهند.

در آزمایش کنترل دما، نفوذ حرارتی باعث ایجاد پاسخ دینامیکی می‌شود که پیچیده‌تر از سیستم درجه اول است اگرچه همچنان در حالت مدار باز بدون نوسان است. وجه تمایز پاسخ این سیستم و سیستم درجه اول، وجود نقطه عطف است. خصوصیات پاسخ دینامیکی چنین سیستمی در شکل ۳ نشان داده شده است. برای محاسبه پارامترهای سیستم از نتایج تجربی، می‌توان مماسی در نقطه عطف این سیستمها رسم کرد و همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده، تأخیر و ثابت زمانی سیستم را محاسبه نمود. البته روشهای دیگری هم برای این کار وجود دارند.



شکل ۲: نمونه‌ای از پاسخ سیستم درجه اول با تأخیر به ورودی پله (بدون نقطه عطف).



شکل ۳: نمونه‌ای از پاسخ سیستمی از درجات بالا به ورودی پله (با نقطه عطف).

۳-۴- کنترل کننده PID

کنترل کننده PID یکی از متداولترین کنترل کننده‌های صنعتی است که با وجود ساده بودن اهداف کنترلی را بخوبی ارضاء می‌کند. توجه کنید که کنترل کننده‌های بسیار پیچیده ممکن است برای اپراتور قابل درک نباشند و از سوی دیگر رفتار این نوع کنترل کننده‌ها هم به آسانی قابل پیشبینی نیست. بنابراین در صنعت گزینه نخست معمولا یک کنترل کننده ساده است، مگر اینکه در عمل کارایی کنترل کننده ضعیف باشد یا حساسیت ما نسبت به خطای کنترل زیاد باشد (مثل صنایع هوا-فضا).

برای یک کنترل کننده PID متغیر کنترل کننده (Y) به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$Y = Y_s + K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_n} \int e(t) dt + T_v \frac{de(t)}{dt} \right)$$

در این آزمایش متغیر کنترل شونده (X) همان دما است که در این آزمایش در سه نقطه مختلف قابل اندازه گیری است. یا به عبارت دیگر ما سه گزینه T_1 ، T_2 و T_3 برای کنترل داریم که البته فقط یکی از آنها را در هر زمان می‌توانیم کنترل کنیم زیرا کنترل کننده PID یک کنترل کننده تک ورودی-تک خروجی^۱ است. متغیر کنترل کننده (Y) بار حرارتی المان پلتیر است که در این آزمایش برحسب درصد بیان می‌شود. اغتشاش (Z) سرعت گردش فن می‌باشد که آن نیز برحسب درصد بیان شده اما توجه کنید که سرعت گردش صفر معادل 100 درصد و حداکثر سرعت معادل صفر درصد است. بدین شکل علامت بهره اثر اغتشاش بر فرایند مثبت می‌شود.

توجه: به منظور جلوگیری از آسیب دیدن دستگاه در اثر انباشت حرارت همواره سرعت گردش فن را در حدود حداکثر آن یعنی $Z=0$ تنظیم کنید.

۳-۵- کنترل دو وضعیتی

یک نوع کنترل کننده که ساختار بسیار ساده‌ای دارد و برای پیاده سازی آن نیز تجهیزات ارزان قیمت کافی هستند، کنترل کننده دو وضعیتی یا خاموش-روشن^۲ است. این نوع کنترل کننده در اغلب ترموستات‌ها در سیستم‌های گرمایش-سرمایش خانگی، کمپرسورها، پمپ‌ها و ... مورد استفاده قرار می‌گیرد. خروجی کنترل کننده‌های PID و کنترل کننده‌های مشابه آن می‌تواند در یک محدوده به صورت تقریباً پیوسته تغییر کند. مثلاً می‌توان درصد باز بودن شیر کنترل را از 0 تا 100 درصد با گام 0.1 تغییر داد. حال آنکه خروجی کنترل کننده‌های دو نقطه‌ای معمولاً دو مقدار (خاموش یا روشن) را می‌پذیرد. بنابراین اگر خروجی کنترل کننده بر یک شیر کنترل اعمال شود، شیر کنترل فقط می‌تواند باز (100) یا بسته (0) باشد. یا اگر عنصر کنترل نهایی یک پمپ باشد، خروجی کنترل کننده فقط می‌تواند معادل خاموش یا روشن بودن پمپ باشد.

علی‌رغم سادگی ساختاری، در عمل کار کردن با چنین کنترل کننده‌ای چندان ساده نیست. تصور کنید که دمای داخل یخچال را می‌خواهیم توسط چنین کنترل کننده‌ای حول نقطه 4°C کنترل کنیم. در حالت ایده‌آل با یک کنترل کننده دو وضعیتی هیچ چاره‌ای وجود ندارد جز اینکه کمپرسور یخچال در دمای بالای 4°C روشن و زیر این دما خاموش شود که این یعنی خاموش و روشن شدن متناوب. بدیهی است چنین یخچالی عمر چندانی نخواهد داشت و دیر یا زود باید یک کمپرسور جدید برای آن خریداری کنید.

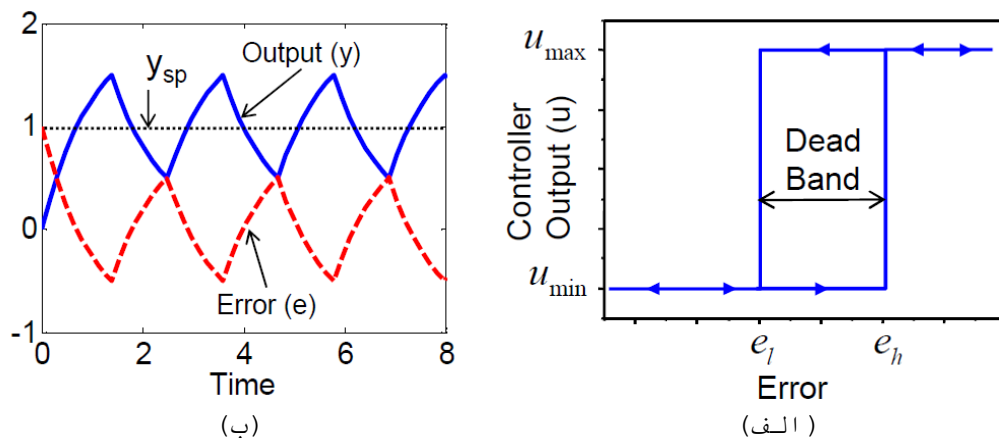
برای مقابله با چنین مشکلی از خاصیت هیستریزیس^۳ که در طبیعت بعضی اجسام و پدیده‌ها وجود دارد الهام گرفته شده به این صورت که با

¹ Single-Input Single-Output (SISO)

² On-Off controller

³ Hysteresis

افزودن یک باند مرده^۱ به محدوده عملکرد کنترل کننده، از نوسانات شدید یا قطع و وصل شدید در خروجی آن جلوگیری می‌کنند. نمونه‌ای از رفتار چنین کنترل کننده‌ای در شکل ۴-الف نشان داده شده است. به طور مثال برای یخچال مفروض با یک باند مرده 2 درجه‌ای متقارن حول 4°C ، اگر کمپرسور خاموش باشد تا 5°C روشن نمی‌شود و اگر روشن باشد تا 3°C خاموش نخواهد شد. بدین شکل خروجی حول نقطه مقدار مقرر نوسان می‌کند. با کاهش پهنای باند مرده دامنه نوسان کم می‌شود که خوب است اما فرکانس نوسان یا تعداد دفعات خاموش و روشن شدن زیاد می‌شود که مضر است. تنظیم باند مرده مصالحه‌ای است بین این دو خاصیت (دامنه و فرکانس نوسان در خروجی) که باید به دقت انجام شود. نمونه‌ای از خروجی یک فرایند با کنترل کننده دو وضعیتی با باند مرده در شکل ۴-ب نشان داده شده است.



شکل ۴: نمونه‌ای از رفتار یک کنترل کننده دو وضعیتی با باند مرده: (الف) تغییرات خروجی کنترل کننده (ورودی فرایند) بر حسب خطا، (ب) خروجی فرایند و مقدار مقرر.

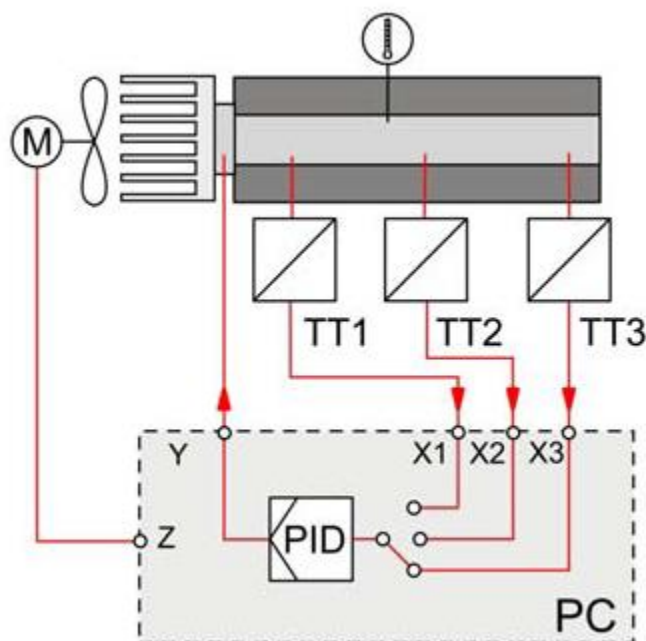
در آزمایش فعلی کنترل دما جهت سادگی می‌توان دو مقدار برای خروجی کنترل کننده در نظر گرفت:

- وضعیت 100: هیتر با تمام توان روشن، خنک کننده خاموش
 - وضعیت -100: هیتر خاموش و خنک کننده با تمام توان روشن
 - حالت پیچیده‌تر کنترل خاموش-روشن، کنترل سه نقطه‌ای است که در آن خروجی کنترل کننده سه وضعیت را می‌تواند اتخاذ کند. در مورد فرایند مورد نظر در این آزمایش سه حالت خروجی عبارتند از:
 - وضعیت 100: هیتر با تمام توان روشن، خنک کننده خاموش
 - وضعیت 0: هیتر و خنک کننده هر دو خاموش
 - وضعیت -100: هیتر خاموش و خنک کننده با تمام توان روشن
- در این آزمایش ما فقط حالت دو وضعیتی را بررسی می‌کنیم و عملکرد این نوع کنترل کننده را به صورت کیفی با کنترل کننده PID مقایسه می‌نماییم.

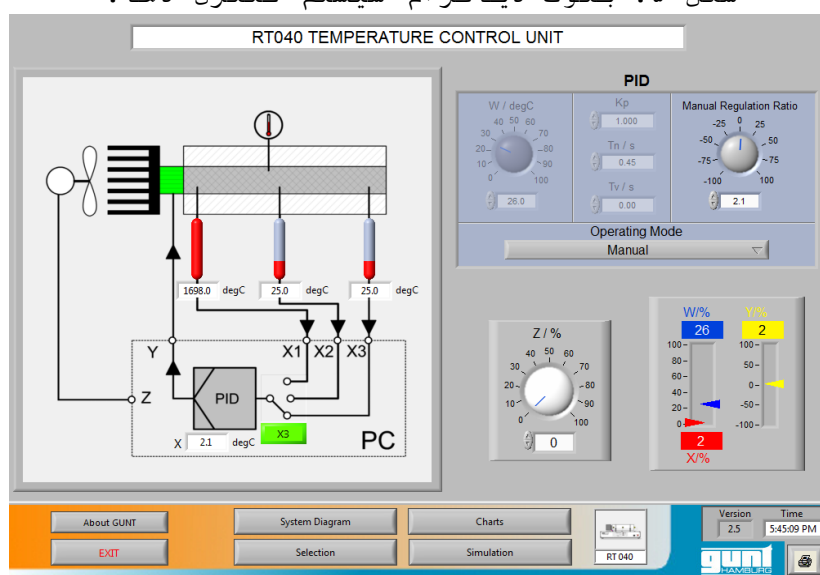
همه انواع این کنترل کننده‌ها در حالت مدار بسته بر روی نرم افزار در اختیار کاربر هستند. البته توجه کنید که روش نامگذاری پارامترها و متغیرها در این آزمایش متفاوت با کتب معمول و منابع

¹ Deadband

درسی است و دانشجویان باید از قبل با این روش نماد گذاری آشنایی داشته باشند. شکل ۶ نمایی از منوی اصلی آزمایش کنترل دما است.



شکل ۵: بلوک دیاگرام سیستم کنترل دما.



شکل ۶: منوی اصلی نرم افزار کنترل دما.

۳-۶- روش انجام آزمایش

الف) تعیین خصوصیات سیستم مدار باز

برای تعیین خصوصیات فرایند از آزمون پله^۱ استفاده می‌کنیم:

۱- از طریق نرم افزار سنسور T1 را برای اندازه گیری انتخاب کنید.

۲- نرم افزار را در حالت Manual قرار دهید.

۳- مقدار متغیر کنترل کننده (Manual Regulation) را بر روی 20 % و مقدار اغتشاش (دور فن) را بر روی حداکثر (0 %) قرار دهید.

۴- حدوداً ۱۰ دقیقه صبر کنید تا سیستم به حالت پایا^۱ برسد.

¹ Step test

۵- پس از ثابت شدن دمای خروجی یک تغییر پله به میزان $10\% +$ در میزان متغیر کنترل کننده اعمال کنید. در این حالت میزان Manual Regulation باید روی 30% باشد.

۶- صبر کنید تا سیستم دوباره به حالت پایا برسد.

۷- به کمک دکمه Pause نرم افزار، رسم منحنی پاسخ را متوقف کنید.

۸- دکمه Display را در بخش Charts فشار دهید.

۹- علامت نشانگرهای شماره ۱ و ۲ ظاهر شده در نمودار را بر روی منحنی به ترتیب در نقطه اعمال تغییر پله و در انتهای تغییرات قرار دهید.

۱۰- با فشار بر روی دکمه Evaluation، نرم افزار به طور خودکار بهره فرایند (K_s) ، تأخیر $(T_t + T_u)$ و ثابت زمانی (T_a) را محاسبه کرده و نمایش می‌دهد.

توجه: در صورتی که اعداد بدست آمده منطقی به نظر نمی‌آیند از مسؤول آزمایشگاه کمک بگیرید.

۱۱- با فشردن دکمه Save Graph از بخش Charts، منحنی پاسخ را به صورت یک فایل txt با نام گروه، زیر گروه و شماره آزمایش ذخیره کنید.

۱۲- خود نمودار را نیز با راست کلیک کردن بر روی نمودار و انتخاب گزینه Export Simplified Image به صورت فایل تصویری ذخیره کنید.

ب) تنظیم کنترل کننده PID به روش مدار باز

در اینجا از روش مدار باز Chien-Hrones-Reswick (CHR) برای محاسبه پارامترهای کنترل کننده PID برحسب پارامترهای بدست آمده در قسمت قبل استفاده می‌کنیم. فرمولهای مورد نیاز در جدول ۳ آمده‌اند. پارامترهای ستون سوم این جدول برای تعقیب مقدار مقرر و پارامترهای ستون چهارم برای حذف اغتشاش تعیین شده‌اند. توجه کنید در این جدول:

$$T_u^* = T_t + T_u = \text{Dead time}$$

توجه: در منوی نرم افزار T_u همان T_u^* است.

جدول ۳: تنظیم کنترل کننده PID به روش مدار باز.

Controller type	Parameter	Setpoint tracking	Disturbance rejection
P	K_p	$0.3 \times T_a / (T_u^* \times K_s)$	$0.3 \times T_a / (T_u^* \times K_s)$
PI	K_p	$0.9 \times T_a / (T_u^* \times K_s)$	$0.6 \times T_a / (T_u^* \times K_s)$
	T_n	$3.3 \times T_a$	$4.0 \times T_a$
PID	K_p	$1.2 \times T_a / (T_u^* \times K_s)$	$0.95 \times T_a / (T_u^* \times K_s)$
	T_n	$2.0 \times T_a$	$2.4 \times T_a$
	T_v	$0.5 \times T_u^*$	$0.42 \times T_u^*$

جدول ۴: تنظیم کنترل کننده PID به روش زیگلر-نیکولز مدار بسته.

Controller type	Parameter	Value
P	K_p	$0.5 \times K_{pu}$
PI	K_p	$0.45 \times K_{pu}$
	T_n	$P_u / 1.2$
PID	K_p	$0.6 \times K_{pu}$
	T_n	$P_u / 2.0$
	T_v	$P_u / 8.0$

ج) تنظیم کنترل کننده PID به روش مدار بسته

برای این بخش از آزمایش از همان روش زیگلر-نیکولز مدار بسته که در درس کنترل فرایند گفته شد استفاده می‌کنیم:

۱- سیستم را از حالت Manual خارج کرده و در حالت Continuous Control قرار دهید.

۲- بجز K_p همه ثوابت کنترلی را بر روی صفر قرار دهید. مقدار کوچکی برای K_p وارد کنید.

۳- مقدار مقرر را به 30°C تغییر دهید.

۴- صبر کنید تا سیستم به حالت پایا برسد.

۵- در صورتی که سیستم به حالت نوسان دائم (آستانه ناپایداری) نرسیده K_p را افزایش دهید.

۶- مرحله قبل را آنقدر تکرار کنید تا سیستم به حالت نوسان دائم برسد. مقدار نهایی K_p را یادداشت نمایید (K_{pu}).

۷- رسم نمودار را متوقف کنید و دوره تناوب نوسان (P_u) را از روی شکل بدست آورید.

۸- نمودار را با راست کلیک کردن بر روی نمودار و انتخاب گزینه Export Simplified Image به صورت فایل تصویری ذخیره کنید.

۹- با استفاده از جدول ۴ پارامترهای کنترل کننده برحسب K_{pu} و P_u قابل محاسبه هستند.

د) کنترل مدار بسته فرایند (تعقیب مقدار مقرر)

توجه: مراحل زیر را یکبار توسط پارامترهایی که از روش مدار باز بدست آوردید و یکبار توسط پارامترهایی که از روش مدار بسته بدست آوردید، انجام دهید.

۱- ابتدا سیستم را در حالت Continuous Control قرار دهید.

۲- پارامترهای کنترلی را که بدست آورده‌اید وارد نمایید.

۳- مقدار مقرر را به 30°C تغییر دهید.

۴- صبر کنید تا سیستم به حالت پایا برسد.

۵- مقدار مقرر را به 35°C تغییر دهید.

۶- صبر کنید تا سیستم دوباره به حالت پایا برسد.

۷- با فشردن دکمه Save Graph از بخش Charts، منحنی پاسخ را به صورت یک فایل txt با نام گروه، زیر گروه و شماره آزمایش ذخیره کنید.

۸- خود نمودار را نیز با راست کلیک کردن بر روی نمودار و انتخاب گزینه **Export Simplified Image** به صورت فایل تصویری ذخیره کنید.

ه) کنترل مدار بسته توسط کنترل کننده دو وضعیتی (Step control)

- ۱- ابتدا سیستم را در حالت **Step Control** قرار دهید.
 - ۲- پارامتر X_{sd} را بر روی 2°C قرار دهید.
 - ۳- مقدار مقرر را به 35°C تغییر دهید.
 - ۴- صبر کنید تا سیستم به حالت پایا برسد.
 - ۵- با فشردن دکمه **Save Graph** از بخش **Charts**، منحنی پاسخ را به صورت یک فایل **txt** با نام گروه، زیر گروه و شماره آزمایش ذخیره کنید.
- خود نمودار را نیز با راست کلیک کردن بر روی نمودار و انتخاب گزینه **Export Simplified Image** به صورت فایل تصویری ذخیره کنید.

۴- خواسته‌ها

- ۱- الف) شرح مختصری از روش انجام آزمایش بنویسید.
 ب) چه نکات عملی مفیدی از این آزمایش آموختید؟
 ج) چه نکات مبهمی در این آزمایش وجود داشت؟
- ۲- الف) پارامترهایی را که نرم افزار برای سیستم مدار باز بدست آورده بود (T_u ، K_s و T_a) از طریق فرمولهای مناسب (مثلا روش **Process reaction curve** برای سیستمهای با درجه بالاتر از یک) مجددا محاسبه نموده و نتایج خود را با نتایج نرم افزار مقایسه کنید.
 ب) وجود اختلاف را چگونه توجیه می‌کنید؟
- ۳- الف) نتایج آزمایشهای مداربسته را که توسط دو دسته پارامترهای کنترلی (**CHR** و **ZN**) بدست آورده اید رسم کنید.
 ب) خصوصیات پاسخها را از نظر سرعت، اورشوت و دیگر پارامترها مقایسه نمایید.
 ج) کدام تنظیم پاسخ بهتری ارائه داده است؟
- ۴- الف) خصوصیات کنترل مداربسته توسط کنترل کننده دو وضعیتی را با کنترل **PID** مقایسه کنید.
 ب) آیا سادگی کنترل دو وضعیتی در مقایسه با کنترل **PID** کاربرد آن را توجیه می‌کند؟
 ج) در یک فرایند که دارای چندین حلقه کنترلی متداخل است، یک کنترل کننده دو وضعیتی چه مشکلی می‌تواند ایجاد کند؟
- ۵- محدودیت کاربرد المان پلتیر چیست؟ چه تکنولوژیهای دیگری مشابه المان پلتیه وجود دارد؟

۵- منابع

1. Romagnoli, J.A. and A. Palazoglu, *Introduction to process control*. 2nd ed. Chemical industries. 2012, Boca Raton: CRC Press.

توجه: گزارشهای گروهی خود را حداکثر تا دو هفته بعد از تاریخ انجام آزمایش از طریق ایمیل به آدرس processcontrol.hut@gmail.com ارسال کرده یا کتبا تحویل دهید.