



دانشکده: مهندسی شیمی

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته: مهندسی شیمی

گرایش: طراحی فرآیندهای شیمیایی

عنوان پایان نامه:

بررسی تاثیر فشار در جداسازی نیتروژن از هوا با روش جذب سطحی با تناوب فشار

بر روی جاذب غربال مولکولی کربن

نام دانشجو:

نیر رحمتی

استاد راهنما (اصلی):

دکتر جعفر توفیقی

استاد راهنما (دوم):

دکتر مسعود مفرحی

خرداد ۱۳۸۸

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



بسمه تعالی

## تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان نامه

خانم نیر رحمتی پایان نامه ۹ واحدی خود را با عنوان بررسی تاثیر فشار بر عملکرد جداسازی نیتروژن از هوا با روش PSA در تاریخ ۱۳۸۸/۳/۲۴ ارائه کردند. اعضای هیات داوران نسخه نهایی این پایان نامه را از نظر فرم و محتوا تایید کرده و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد مهندسی شیمی - مهندسی شیمی پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر جعفر توفیقی داریان	استاد	
استاد ناظر	دکتر عبدالصمد زرین قلم مقدم	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر رامین کریم زاده	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر شهره فاطمی	دانشیار	
مدیر گروه (یا نماینده گروه تخصصی)	دکتر رامین کریم زاده	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر مسعود مفرحی	دانشیار	

## آیین‌نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهش‌های علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی و فناوری دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیأت علمی، دانشجویان، دانش‌آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهش‌های علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرح‌های تحقیقاتی با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد زیر را رعایت نمایند:

ماده ۱- حق نشر و تکثیر پایان‌نامه/ رساله و درآمدهای حاصل از آنها متعلق به دانشگاه می‌باشد ولی حقوق معنوی پدید آورندگان محفوظ خواهد بود.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان‌نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و با تایید استاد راهنمای اصلی، یکی از اساتید راهنما، مشاور و یا دانشجو مسئول مکاتبات مقاله باشد. ولی مسئولیت علمی مقاله مستخرج از پایان‌نامه و رساله به عهده اساتید راهنما و دانشجو می‌باشد.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش‌آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه/ رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب، نرم افزار و یا آثار ویژه (اثری هنری مانند فیلم، عکس، نقاشی و نمایشنامه) حاصل از نتایج پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی کلیه واحدهای دانشگاه اعم از دانشکده‌ها، مراکز تحقیقاتی، پژوهشکده‌ها، پارک علم و فناوری و دیگر واحدها باید با مجوز کتبی صادره از معاونت پژوهشی دانشگاه و براساس آئین‌نامه‌های مصوب انجام شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه یافته‌ها در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق معاونت پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این آیین‌نامه در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۸۷/۴/۱ در شورای پژوهشی و در تاریخ ۸۷/۴/۲۳ در هیأت رئیسه دانشگاه به تایید رسید و در جلسه مورخ ۸۷/۷/۱۵ شورای دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب در شورای دانشگاه لازم‌الاجرا است.

«اینجانب.....  
مقطع.....  
ماده ۱- معنوی در مورد نتایج پژوهش‌های علمی دانشگاه تربیت مدرس را در انتشار یافته‌های علمی مستخرج از پایان‌نامه / رساله تحصیلی خود رعایت نمایم. در صورت تخلف از مفاد آئین‌نامه فوق‌الاشعار به دانشگاه وکالت و نمایندگی می‌دهم که از طرف اینجانب نسبت به لغو امتیاز اختراع بنام بنده و یا هر گونه امتیاز دیگر و تغییر آن به نام دانشگاه اقدام نماید. ضمناً نسبت به جبران فوری ضرر و زیان حاصله بر اساس برآورد دانشگاه اقدام خواهم نمود و بدینوسیله حق هر گونه اعتراض را از خود سلب نمودم»

امضا:.....  
تاریخ:.....

۸۸/۴/۲۵

## آیین نامه چاپ پایان نامه (رساله) های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله) های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه، دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله) ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد/ رساله دکتری نگارنده در رشته

در دانشکده دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی سرکار خانم/جناب آقای دکتر

، مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر و مشاوره سرکار خانم/جناب آقای دکتر

از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت چاپ) را به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر در معرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب **نیر رحمتی** دانشجوی رشته **مهندسی شیمی** مقطع **کارشناسی ارشد**

تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم. نام و نام خانوادگی: **نیر رحمتی** تاریخ و امضا:

۸۸/۴/۲۵



دانشکده: مهندسی شیمی

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته: مهندسی شیمی

گرایش: طراحی فرآیندهای شیمیایی

عنوان پایان نامه:

بررسی تاثیر فشار در جداسازی نیتروژن از هوا با روش جذب سطحی با تناوب فشار

بر روی جاذب غربال مولکولی کربن

نام دانشجو:

نیر رحمتی

استاد راهنما(اصلی):

دکتر جعفر توفیقی

استاد راهنما(دوم):

دکتر مسعود مفرحی

خرداد ۱۳۸۸

تقدیم به

پدر و مادر مهربانم

برادرم

و

همسر عزیزم

خداوند بزرگ را سپاسگذارم که در لحظه لحظه زندگی یاورم بوده و من همواره سایه لطف و عنایتش را در زندگی احساس کرده‌ام. او که فرصت آموختن و بالندگی را در محضر اساتیدی ارجمند برایم فراهم آورده است و البته برای ادامه این مسیر بی انتها از او یاری می‌خواهم.

وظیفه خویش می‌دانم از زحمات و حسن رفتار و منش والای استاد بزرگوار و فرزانه ام جناب آقای دکتر توفیقی کمال تشکر و قدردانی را بنمایم. از خداوند بزرگ برای ایشان و خانواده محترمشان آرزوی سعادت و سلامت دارم.

همچنین لازم است از زحمات و راهنمایی‌های ارزشمند استاد دلسوز جناب آقای دکتر مسعود مفرحی کمال تشکر و قدردانی را بنمایم. از خداوند عزیز برای ایشان آرزوی سلامت و موفقیت روزافزون دارم.

همچنین از تمام دوستانی که مرا در انجام این پایان نامه یاری نمودند تشکر می‌کنم.

در انتها از کادر آموزشی دانشکده مهندسی شیمی دانشگاه تربیت مدرس که شرایط مناسب و مطلوب تحصیلی را در این مقطع تحصیلی برایم فراهم کردند تشکر و قدردانی می‌نمایم.



## چکیده

PSA یا جذب سطحی با تناوب فشار، یک تکنولوژی جدید مرحله ای برای تولید بسیاری از گازهای صنعتی مانند اکسیژن، نیتروژن، هیدروژن و دی اکسید کربن می باشد.

با هدف بومی سازی و توسعه فن آوری جذب سطحی با تناوب فشار، یک واحد آزمایشگاهی برای جداسازی گازها در آزمایشگاه اولفین دانشگاه تربیت مدرس طراحی و ساخته شده است. این واحد آزمایشگاهی دارای چهار بستر جذب به طول یک متر و قطر خارجی ۳/۵ سانتی متر و با قابلیت استفاده از انواع جاذب های جذب سطحی می باشد. این واحد مجهز به سیستم کنترل و آنالیز است. آزمایشات این پایان نامه در چهار فشار ۶، ۷، ۸ و ۹ بار بر روی این پایلوت انجام شدند. در هر فشار عملیاتی سه زمان سیکل (۱۶۰، ۲۰۰، ۱۲۰ ثانیه ای) و شدت جریان های محصول (۱/۲۵، ۳/۷۵، ۶/۲۵ و ۱۰ لیتر بر دقیقه) و پاکسازی (۲، ۴، ۶، ۸، ۱۲، ۱۵ لیتر بر دقیقه) انتخاب شدند. در این پروژه هدف اصلی، بررسی تاثیر فشار، در کنار دیگر پارامترهای طراحی و عملیاتی، روی تولید نیتروژن از هوا است. بیشترین درصد خلوص نیتروژن در محصول خروجی ۹۸/۴ درصد با میزان بازیابی ۳/۷ درصد در فشار عملیاتی ۹ بار و بیشترین میزان بازیابی نیتروژن به میزان ۵۴ درصد با خلوص محصول ۹۲/۶ درصد در فشار عملیاتی ۹ بار بدست آمدند.

بعد از انجام آزمایشات طراحی شده، مدل سازی فرایند انجام گرفت. در حل معادلات دیفرانسیل جزئی، از روش اورتوگونال کالوکیشن استفاده شد. در نهایت کل فرایند با نرم افزار مطلب شبیه سازی گردید و نتایج به دست آمده با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شدند. نتایج حاصل از مدل سازی فرایند مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی داشتند.

**لغات کلیدی:** جذب سطحی با تناوب فشار (PSA)، نیتروژن، غربال مولکولی کربن، اورتوگونال

کالوکیشن

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
	فصل اول: مقدمه
۱.....	مقدمه
۳.....	۱ جذب سطحی
۴.....	۱ فرایندهای احیای جاذب
۴.....	۱ مکانیزم های جداسازی در جذب سطحی
۵.....	۱ جاذب های صنعتی
۶.....	1-4-1 غربال مولکولی کربن
۶.....	۱ جذب سطحی با تناوب فشار
۸.....	1-5-1 مراحل ضروری در فرایند جذب سطحی با تناوب فشار
10.....	1-5-2 مزایای فرایند جذب سطحی با تناوب فشار
۱۰.....	1-5-3 مهمترین کاربردهای فرایند جذب سطحی با تناوب فشار
۱۱.....	۱ جداسازی هوا به روش جذب سطحی با تناوب فشار
11.....	1 6 جداسازی اکسیژن از هوا
۱۲.....	۱ ۴ جداسازی نیتروژن از هوا

## فصل دوم: واحد آزمایشگاهی جذب سطحی با تناوب فشار

- مقدمه..... ۱۶
- 1-2 شرح واحد آزمایشگاهی..... ۱۸
- 1-1-2 بخش خوراک..... ۱۸
- ۲ + ۴ بسترها..... ۱۸
- ۲ + ۳ بخش تنظیم فشار..... ۲۰
- 4-1-2 بخش کنترل فرایند..... ۲۰
- ۲ + ۴ بخش آنالیز..... ۲۰
- 2 2 شرح فرایند..... 20

## فصل سوم: مدلسازی ریاضی

- مقدمه..... 28
- 1-3 ایزوترم جذب سطحی..... 29
- 2-3 تئوری مدل..... 30
- 1-2-3 فرضیات مدل سازی..... 30
- 2-2-3 موازنه جرم..... 31
- ۱-۲-۲-۳ موازنه مولی در فاز گاز..... 31

۳-۲-۲-۲-۲ موانزه مول در فاز جامد.....	۳۳
3-2-3 معادلات و شرایط مرزی مراحل مختلف جذب سطحی با تناوب فشار	34
3 3 بدون بعد کردن معادلات.....	39
4 3 حل معادلات.....	44
1-4-3 روش اورتوگونال کالوکیشن.....	44
2 4 3 آماده سازی معادلات به روش اورتوگونال کالوکیشن برای حل.....	48
<b>فصل چهارم: نتایج و پیشنهادات</b>	
مقدمه.....	54
1-4 شرایط عملیاتی آزمایش ها.....	55
2-4 نتایج مدل سازی.....	64
1-2-4 بررسی تغییرات غلظت و سرعت بدست آمده از شبیه سازی فرایند برای کلیه مراحل.....	۶۵
3-4 بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر خلوص محصول و بازیابی.....	70
1-3-4 تاثیر فشار جذب.....	70
2-3-4 تاثیر جریان پاکسازی.....	72
3-3-4 تاثیر جریان محصول.....	73
4-3-4 تاثیر زمان سیکل.....	74

75 ..... 4-4 بررسی نفوذ محوری.

77 ..... 5-4 نتیجه گیری.

78 ..... 6-4 پیشنهادات.

## فهرست علائم و نشانه ها

علامت

عنوان

### اختصاری

$A(\text{cm}^2)$	سطح مقطع خالی بستر
$A(j,i)$	ضریب گرادیان در روش اورتوگونال کالوکیشن
$b(1/\text{atm})$	پارامتر تعادلی مدل لانگمویر
$B(j,i)$	ضریب لاپلاسیان در روش اورتوگونال کالوکیشن
$C_i(\text{mol}/\text{cm}^3)$	غلظت جزء $i$ در فاز گاز
$C_i(\text{mol}/\text{cm}^3)$	غلظت کل در داخل بستر
$D_L(\text{cm}^2/\text{sec})$	ضریب نفوذ محوری
$k_i(1/\text{sec})$	ضریب انتقال جرم جزء $i$
$L(\text{cm})$	طول بستر
$n$	تعداد ذرات جامد
$N$	تعداد نقاط کالوکیشن
$N_i(\text{mol}/\text{cm}^2 \cdot \text{sec})$	شار مولی جزء $i$
$P_t(\text{bar})$	فشار کل
$q_i(\text{mol}/\text{cm}^3)$	غلظت جزء $i$ در فاز جامد
$q(\text{mol}/\text{cm}^3)$	غلظت جزء $i$ در فاز جامد در حالت تعادل با فاز گاز
$q_{is}(\text{mol}/\text{cm}^3)$	غلظت اشباع جزء $i$ در فاز جامد

$R$ (J/mol.K)	ثابت عمومی گازها
$t$ (sec)	زمان
$T$ (K)	دمای بستر
$V$ (cm/sec)	سرعت جریان داخل بستر
$V_{OH}$ (cm/sec)	سرعت جریان در ورودی (ابتدای بستر) مرحله جذب
$V_{OL}$ (cm/sec)	سرعت جریان در ورودی (انتهای بستر) مرحله پاکسازی
$V_P$ (cm <sup>3</sup> )	حجم یک ذره جاذب
$V_t$ (cm <sup>3</sup> )	حجم کل بستر
$z$ (cm)	فاصله از نقطه ورودی بستر
$\varepsilon$	ضریب تخلخل

## فهرست شکل ها

صفحه	عنوان
17.....	شکل (۱-۲) نمایی از واحد آزمایشگاهی.....
20.....	شکل (۲-۲) نمودار جریان واحد آزمایشگاهی.....
24.....	شکل (۳-۲) وضعیت بسترها در ۳۰ ثانیه از یک سیکل ۱۲۰ ثانیه ای.....
31.....	شکل (۱-۳) المان حجمی به شکل استوانه.....
63.....	شکل (۱-۴) تغییرات فشار بسترها نسبت به زمان.....
64.....	شکل (۲-۴) تغییرات دما نسبت به زمان.....
67.....	شکل (۳-۴) تغییرات جزء مولی نیتروژن در فاز گاز نسبت به زمان در انتهای بستر...67
69.....	شکل (۴-۴) تغییرات سرعت بدون بعد نسبت به زمان در ورودی بستر.....
70.....	شکل (۵-۴) تاثیر فشار جذب بر خلوص و بازیابی محصول.....
72.....	شکل (۶-۴) تاثیر جریان پاکسازی بر خلوص و بازیابی محصول.....
73.....	شکل (۷-۴) تاثیر جریان محصول بر خلوص و بازیابی.....
75.....	شکل (۸-۴) تاثیر مدت زمان سیکل.....
75.....	شکل (۹-۴) مقایسه غلظت خروجی از بستر نسبت به زمان در دو حالت وجود وعدم وجود نفوذ محوری.....
76.....	شکل (۱۰-۴) مقایسه سرعت در ورودی بستر نسبت به زمان در دو حالت وجود وعدم وجود نفوذ محوری.....



## فهرست جدول ها

عنوان	صفحه
جدول (۱-۲) مشخصات جاذب مورد استفاده در جداسازی نیتروژن از هوا.....	19
جدول (۲-۲) مقدار جاذب موجود در هر بستر.....	19
جدول (۳-۲) ترتیب زمانی بسترها.....	23
جدول (۱-۴) شرایط عملیاتی آزمایشات.....	55
جدول (۲-۴) نتایج آزمایشات جداسازی نیتروژن از هوا توسط غربال مولکولی کربن در فشار جذب ۶ بار.....	56
جدول (۳-۴) نتایج آزمایشات جداسازی نیتروژن از هوا توسط غربال مولکولی کربن در فشار جذب ۷ بار.....	57
جدول (۴-۴) نتایج آزمایشات جداسازی نیتروژن از هوا توسط غربال مولکولی کربن در فشار جذب ۸ بار.....	59
جدول (۵-۴) نتایج آزمایشات جداسازی نیتروژن از هوا توسط غربال مولکولی کربن در فشار جذب ۹ بار.....	61
جدول (۶-۴) پارامترهای مورد استفاده در شبیه سازی فرایند.....	65

# فصل اول

## مقدمه

## مقدمه

در این فصل به طور مختصر، روش جذب سطحی با تناوب فشار به عنوان یکی از روش های نسبتاً جدید جداسازی گازها توصیف می شود. سپس کاربردها و مزایای جذب سطحی با تناوب فشار ذکر گردیده و برخی از پیشرفت ها و مطالعات صورت گرفته در زمینه جداسازی هوا، به ویژه در زمینه تولید نیتروژن با این روش جداسازی ارائه می گردد.

بسیاری از عملیات مهندسی شیمی با مسئله تغییر غلظت در محلول ها و مخلوط ها سرو کار دارند، که این تغییرات الزاما توسط واکنش های شیمیایی صورت نمی پذیرند . این عملیات بیشتر به جداسازی مخلوط ها به سازنده های آنها مربوط می شوند . در مورد مخلوط ها این اعمال ممکن است بطرق کاملا مکانیکی (بدون انتقال جرم) مانند صاف کردن یک مخلوط معلق و جدا نمودن جز جامد از مایع و یا جداسازی اجزاء مختلف و خرد شده یک مخلوط با اندازه های مختلف از طریق غربال نمودن و یا جداسازی ذرات آسیاب شده با استفاده از اختلاف جرم ویژه آنها صورت گیرد. اهمیت این عملیات کاملا واضح بوده و ندرتا می توان یک فرایند شیمیایی را یافت که نیاز به خالص سازی مواد خام و یا خالص سازی نهایی محصولات از محصولات جانبی حاصل از واکنش نداشته باشد. غالبا قسمت اعظم هزینه های مربوط به یک فرایند صرف انجام جداسازی های وابسته می گردد .

## ۱۱ جذب سطحی

عملیات جذب سطحی از قابلیت بعضی از جامدات در جذب برخی از مواد موجود در مخلوط گازی، روی سطح جامد استفاده می نماید [۱]. به این ترتیب اجزاء یک مخلوط گازی را می توان از هم جدا نمود. عملیات جذب سطحی از نظر مکانیزم جذب، به دو گروه کلی جذب سطحی فیزیکی و جذب سطحی شیمیایی تقسیم بندی می شوند.

در جذب سطحی فیزیکی، جذب از طریق نیروهای بین مولکولی جامد و اجزاء جذب شونده صورت می گیرد. این نوع جذب یک پدیده برگشت پذیر می باشد و می توان با پایین آوردن فشار گاز روی جاذب یا بالا بردن دما، جاذب اشباع شده را احیا نمود.

جذب سطحی شیمیایی، نتیجه واکنش بین جامد و اجزاء جذب شده است . در این نوع جذب سطحی پیوندهای قوی تری نسبت به جذب فیزیکی صورت می گیرد . جذب سطحی شیمیایی یک پدیده برگشت ناپذیر است.