

دانشکده مهندسی

گروه مهندسی شیمی

مدل سازی و شبیه سازی جداسازی اکسیژن از هوا

توسط تماس دهنده غشایی

پایان نامه کارشناسی ارشد پدیده های انتقال و فرآیندهای جداسازی

حجت بنزاده

استاد راهنما

دکتر سید محمود موسوی

۱۳۹۰



دانشکده مهندسی

گروه مهندسی شیمی

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی شیمی (پدیده‌های انتقال و فرآیندهای جداسازی)

آقای حجت بنزاده تحت عنوان

مدل سازی و شبیه سازی جداسازی اکسیژن از هوا توسط تماس دهنده غشایی

در تاریخ ۱۳۹۰/۰۶/۲۷ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

دکتر سید محمود موسوی

۱- استاد راهنمای پایان نامه

دکتر حمید نیازمند

۲- استاد داور خارجی

دکتر مهدی پورافشاری چنار

۳- استاد داور داخلی و نماینده تحصیلات تکمیلی

دکتر مهدی پورافشاری چنار

مدیر گروه مهندسی شیمی

اینجانب حجت بنزاده دوره کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، نویسنده پایان نامه: مدل‌سازی و شبیه‌سازی جداسازی اکسیژن از هوا توسط تماس دهنده غشایی، تحت راهنمایی آقای دکتر سید محمود موسوی متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه فردوسی مشهد می‌باشد و مقالات مستخرج با نام دانشگاه فردوسی مشهد و یا Ferdowsi University of Mashhad به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در بدست آوردن نتایج اصلی پایان نامه تاثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از رساله رعایت شده است.
- در کلیه مراحل این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آنها) استفاده شده ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است، اصل رازداری و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه فردوسی مشهد می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر گردد.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

متن این صفحه باید در ابتدای تمام نسخه‌های تکثیر شده وجود داشته باشد.

تشکر و قدردانی

خدواند متعال را به خاطر تمامی نعمت‌هایی که به ما عطا فرموده شاکرم. نعمات بی‌شماری که توانایی شمارش آن نیست.

همچنین از استاد بزرگوار جناب آقای دکتر سید محمود موسوی، به‌خاطر در اختیار گذاشتن تجربیات ارزنده‌شان در طول تحصیل و به‌ویژه زحمات فراوان و بی‌دریغی که در طی مراحل تهیه و نگارش این تحقیق متحمل شده‌اند و با راهنمایی‌های راه‌گشایشان در جهت هر چه بهتر شدن پروژه حاضر نقش بسیار مؤثری داشته‌اند، صمیمانه کمال تشکر و قدردانی را دارم.

از سایر اساتید محترم، جناب آقای دکتر حمید نیازمند و به‌ویژه جناب آقای دکتر مهدی پورافشاری چنار مدیر محترم گروه مهندسی شیمی که در طول تحصیل در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد از دانش و تجربیات ارزنده‌شان بهره‌مند بوده‌ام و نیز به‌خاطر نقد و بررسی دقیق ایشان در مورد پروژه حاضر صمیمانه سپاسگزارم.

در پایان از جناب آقای مهندس احسان سلجوقی به‌خاطر نظرات سازنده‌شان در نگارش پروژه و همچنین از برادر عزیزم به‌خاطر کمک‌های همه‌جانبه و نیز از کلیه زحمات خانواده‌ام که بی‌شک بدون پشتیبانی‌های صبورانه‌شان دستیابی به این مرحله ممکن نبود، صمیمانه تشکر می‌کنم.

تقدیم به پدر و مادرم

چکیده

تاکنون سه روش عمده برای جداسازی اکسیژن از هوا مطرح گردیده که از بین آنها، فرایند دما پایین علی‌رغم داشتن هزینه‌های بالا، بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. با در نظر گرفتن مزایای تماس دهنده‌های غشایی الیاف توخالی در مقایسه با سایر روش‌های جداسازی اکسیژن از هوا، این تجهیزات می‌توانند جهت تولید اکسیژن بکار روند. با توجه به نقش اصلی مایع جاذب در تماس دهنده‌های غشایی، نیاز است مایع جاذب مناسبی جهت جذب اکسیژن در دسترس باشد. از این رو در پروژه حاضر به مدل‌سازی و شبیه‌سازی جداسازی اکسیژن از هوا توسط محلول هموگلوبین به عنوان مایع جاذب پرداخته شده است. هموگلوبین، پروتئینی آهن‌دار است که در گلبول‌های قرمز خون مهره‌داران وجود داشته و نقش اصلی آن، انتقال اکسیژن از اندام‌های تنفسی (ریه یا آبشش) به سایر قسمت‌های بدن می‌باشد. این پروتئین از انتخاب‌پذیری بالایی نسبت به اکسیژن برخوردار بوده و با آن به صورت تعادلی واکنش می‌دهد.

دستگاه معادلات دیفرانسیل پاره‌ای ارائه شده در مدل به همراه شرایط مرزی آن، با شبیه‌سازی به وسیله نرم‌افزار COMSOL، به روش المان محدود حل شده‌اند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی با اطلاعات تجربی موجود مقایسه گردیده و انطباق مناسبی مشاهده شده است. همچنین اثر تغییر شرایط مختلف عملیاتی بر راندمان حذف و نرخ انتقال جرم نیز مورد بررسی قرار گرفته است. بر طبق نتایج مدل، افزایش دبی مایع، کاهش دبی هوا، افزایش دمای گاز ورودی و افزایش غلظت اولیه محلول هموگلوبین، راندمان حذف را بهبود می‌بخشند.

کلمات کلیدی: جداسازی، تماس دهنده غشایی، مدل‌سازی، انتقال جرم، اکسیژن، محلول هموگلوبین

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
-----	-----
	چکیده
یک	فهرست مطالب
۱	پیش‌گفتار
۳	فصل اول: کلیات
۳	۱-۱- اکسیژن: اهمیت و کاربردها
۳	۱-۱-۱- تاریخچه
۴	۱-۱-۲- خواص فیزیکی و شیمیایی
۵	۱-۱-۳- کاربردها
۸	۲-۱- مروری بر انواع روش‌های جداسازی اکسیژن
۸	۱-۲-۱- جداسازی اکسیژن از آب
۹	۲-۲-۱- جداسازی اکسیژن از هوا
۹	۱- روش دما پایین
۱۲	۲- جذب سطحی
۱۶	۳- جداسازی غشایی
۱۶	۳-۲-۱- مقایسه کلی روشها
۲۰	۳-۱- انواع روشهای جداسازی گازها به وسیله غشاء
۲۱	۱-۳-۱- جداسازی غشایی گازها
۲۷	- مدل‌های مهم برای غشاهای جداسازی گاز
۲۹	۲-۳-۱- جذب غشایی گازها
۲۹	۱- اصول کلی
۳۱	۲- مزایا و معایب
۳۳	۳- فشار بحرانی و شرایط عملیاتی
۳۶	۴-۱- معرفی مایع جاذب
۳۸	۵-۱- هدف پروژه
۳۹	فصل دوم: مروری بر نثریات
۳۹	۱-۲- مطالعات انجام شده پیرامون عملکرد انتقال جرم جذب‌کننده غشایی گازها
۴۳	۲-۲- مروری بر انواع مدل‌های ارائه شده در جذب غشایی گازها
۴۳	۱-۲-۲- مدل‌های تجربی بر مبنای ضریب انتقال جرم

۴۷	۲-۲-۲- مدلهای نیمه تجربی
۴۷	۱- جذب فیزیکی
۵۱	۲- جذب شیمیایی
۶۸	۲-۲-۳- مدلهای تئوری برای تعیین توزیع غلظت در هر دو فاز
۶۸	۱- جذب فیزیکی
۷۴	۲- جذب شیمیایی
۸۲	۲-۳-۳- مروری بر مطالعات انجام گرفته پیرامون جذب اکسیژن توسط خون
۸۲	۲-۳-۱- اکسیژن دار کردن خون با اکسیژناتورها
۸۶	۲-۳-۲- استفاده از هموگلوبین به عنوان انتقال دهنده
۸۹	۲-۴- جمع بندی از مرور کارهای انجام شده
۹۰	فصل سوم: معرفی مدل ریاضی
۹۰	۳-۱- اصول کلی معادلات حاکم
۹۴	۳-۲- ساده سازی ها و فرضیات
۹۵	۳-۲-۱- معادلات حاکم بر سمت پوسته
۹۷	۳-۲-۲- معادلات حاکم بر غشاء
۹۸	۳-۲-۳- معادلات حاکم بر داخل الیاف
۱۰۱	۳-۳- مکانیزم واکنش
۱۰۳	۳-۴- نحوه محاسبه نتایج
۱۰۶	فصل چهارم: شبیه سازی
۱۰۶	۴-۱- مقدمه
۱۰۶	۴-۲- درباره‌ی نرم افزار COMSOL Multiphysics
۱۰۸	۴-۳- تعریف مدل در نرم افزار
۱۰۸	۴-۳-۱- قوانین حاکم بر دامنه‌ها
۱۱۰	۴-۳-۲- رسم هندسه مساله
۱۱۲	۴-۳-۳- معادلات حاکم بر دامنه‌ها
۱۱۵	۴-۳-۴- تعیین شرایط مرزی
۱۱۷	۴-۳-۵- مش بندی و انتخاب روش حل
۱۱۹	۴-۳-۶- نحوه استفاده از نتایج
۱۲۰	فصل پنجم: نتایج و بحث
۱۲۰	۵-۱- مقدمه

۱۲۰	۲-۵- توزیع غلظت اجزاء
۱۲۰	۱-۲-۵- توزیع غلظت اکسیژن در گاز، غشاء و مایع
۱۲۵	۲-۲-۵- توزیع غلظت هموگلوبین و اکسی هموگلوبین
۱۲۹	۳-۵- اثر تغییرات پارامترهای مختلف بر نرخ انتقال جرم و راندمان حذف
۱۲۹	۱-۳-۵- اثر تغییرات شدت جریان‌های گاز و مایع
۱۳۱	۲-۳-۵- اثر تغییرات غلظت اولیه هموگلوبین ورودی
۱۳۲	۳-۳-۵- اثر تغییرات میزان اشباع هموگلوبین ورودی
۱۳۳	۴-۳-۵- اثر تغییرات دمای گاز ورودی
۱۳۵	۵-۳-۵- اثر تغییرات دمای مایع ورودی
۱۳۷	۴-۵- بازیابی جواب‌های بدست آمده
۱۳۷	۱-۴-۵- بررسی پیوستگی فلاکس‌ها
۱۳۸	۲-۴-۵- آنالیز حساسیت
۱۳۹	۳-۴-۵- بررسی همگرایی مش‌بندی
۱۳۹	۴-۴-۵- مقایسه با اطلاعات تجربی
۱۴۳	۵-۴-۵- مقایسه مدل با سیستم‌های شیمیایی دیگر
۱۴۴	فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۱۴۴	۱-۶- نتیجه‌گیری
۱۴۵	۲-۶- پیشنهادات
۱۴۷	مراجع

پیش‌گفتار

مصارف صنعتی و پزشکی اکسیژن روز به روز افزایش می‌یابد به طوری که بر طبق آمار موجود، سالیانه حدود ۱۰ درصد بر میزان مصرف اکسیژن افزوده می‌شود. از این رو نیاز است روش‌های جدیدتری که هزینه‌های عملیاتی کمتری دارند جهت تولید اکسیژن ارائه گردند.

فرایندهای رایج برای تولید اکسیژن از هوا عمدتاً، جداسازی در دماهای پایین (کرایوجنیک)، جذب سطحی و روش‌های جداسازی غشایی می‌باشند. روش اول با اینکه بیشتر مورد توجه می‌باشد نسبتاً گران قیمت بوده و روش‌های دوم و سوم معمولاً خلوص بالایی از اکسیژن را فراهم نمی‌کنند. با این وجود با توجه به خلوص مورد نیاز و اندازه واحد، از هر کدام از روش‌ها در جای خود استفاده می‌شود.

جذب غشایی گازها^۱ در تماس دهنده‌های غشایی^۲، روش جدیدی برای تماس مایع و گاز در مقیاس صنعتی به شمار آمده و از مزایای بیشتری در مقایسه با برج‌های جذب برخوردار می‌باشد. تماس دهنده‌ی غشایی هیچ یک از مشکلات برج‌های جذب از قبیل کف‌زایی^۳، مجراسازی^۴، طغیان کردن^۵، حمل ذرات گاز توسط مایع^۶ و هزینه‌های بالای راه‌اندازی و ... را ندارد. تماس دهنده‌های غشایی الیاف توخالی به علت فشردگی و نسبت سطح به حجم بالایی که دارند (گاه در حدود ۳۰ برابر برج‌های پرشده)، می‌توانند صرفه‌جویی قابل توجهی در وزن دستگاه‌ها و همچنین فضای مورد نیاز ایجاد کنند. در حقیقت در جذب غشایی گازها مزایای جذب و فناوری غشایی با یکدیگر ترکیب شده‌اند.

با در نظر گرفتن ویژگی‌های فرایند جذب غشایی گازها در مقایسه با سایر روش‌های جداسازی اکسیژن از هوا، می‌توان از تماس دهنده‌های غشایی جهت جداسازی اکسیژن بهره گرفت. با توجه به اینکه در جذب غشایی گازها، مایع جاذب نقش اصلی در جداسازی را بر عهده دارد از این رو در پروژه حاضر به مدل‌سازی و شبیه‌سازی جداسازی اکسیژن از هوا توسط محلول هموگلوبین به عنوان مایع جاذب پرداخته‌ایم. هموگلوبین، پروتئینی است که برای اکسیژن انتخاب‌پذیری بالایی داشته و با آن به صورت تعادلی واکنش می‌دهد.

در فصل اول از پروژه حاضر، ابتدا کلیاتی در مورد خواص، کاربردها و میزان مصرف اکسیژن، انواع روش‌های جداسازی اکسیژن و مزایا و معایب هر کدام گفته می‌شود. سپس فرایند جذب غشایی گازها به

¹ - Membrane gas absorption

² - Membrane contactor

³ - Foaming

⁴ - Channeling

⁵ - Flooding

⁶ - Air entrainment

اختصار معرفی شده و ویژگی‌های آن بیان می‌گردد. در انتها توضیحاتی در خصوص هموگلوبین به عنوان مایع جاذب اکسیژن و توجیه استفاده از آن ارائه می‌شود.

در فصل دوم سعی شده تا کلیه مدل‌هایی که تاکنون برای بررسی عملکرد انتقال جرم در تماس دهنده‌های غشایی ارائه شده است، مرور گردیده و نتایج آنها به همراه اشکال مربوطه، ارائه شود. همچنین سعی شده که مدل‌های قدیمی و همچنین جدیدتر نیز مورد بررسی قرار گیرند. در نهایت ویژگی‌های هر کدام از مدل‌ها با یکدیگر مقایسه شده و با جمع بندی آنها، مدلی که بتواند تعیین کننده توزیع غلظت‌ها در هر دو فاز مایع و گاز باشد انتخاب گردیده است.

در فصل سوم، مدل‌سازی فرایند انجام گرفته و معادلات حاکم بر هر سه قسمت فاز گاز، درون غشا و فاز مایع، به همراه شرایط مرزی مناسب آنها، ارائه شده است. در انتهای فصل سوم مکانیسم واکنش تعادلی اکسیژن با هموگلوبین و معادله سرعت آن مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

در فصل چهارم ابتدا نرم افزار COMSOL و ویژگی‌های آن به اختصار معرفی شده و سپس مراحل انجام شبیه‌سازی و پیاده‌سازی معادلات حاکم بر مدل به همراه شرایط مرزی آنها در نرم‌افزار، گام به گام توضیح داده خواهد شد.

در فصل پنجم نتایج حاصل از شبیه‌سازی و اثر تغییر متغیرهای مختلف بر راندمان حذف و نرخ انتقال جرم بررسی می‌گردد. همچنین در انتهای این فصل نتایج حاصل از مدل با اطلاعات تجربی حاصل از آزمایشات مربوط به عملکرد هموگلوبین به عنوان جایگزین خون، مقایسه می‌گردد.

در فصل ششم نیز جمع بندی از نتایج انجام شده و پیشنهاداتی برای مطالعات آینده ارائه می‌گردد.

فصل اول

کلیات

۱-۱- اکسیژن: اهمیت و کاربردها

۱-۱-۱- تاریخچه

اکسیژن مولکولی (O_2) عنصری گازی است که ۲۰/۹۴۶ درصد از اتمسفر زمین را تشکیل می‌دهد. اکسیژن برای تنفس و زندگی جانداران ضروری است و به عنوان محصول زائد توسط بسیاری از اشکال گیاهی تشکیل می‌شود. اکسیژن در احتراق سوختها که منبع تامین گرما، نور و قدرت است نقش بسزایی داشته و با مواد بسیاری ترکیب می‌شود. سرعت واکنشها و همچنین اثربخشی آنها با افزایش غلظت اکسیژن موجود در هوا، افزایش می‌یابد.

کشف اکسیژن به توسعه درک روشنی از ماهیت هوا و افزایش آگاهی در خصوص نقش اکسیژن در احتراق و همچنین در فرایندهای زیستی انجامید. اکسیژن در سال ۱۷۷۱ از سوی داروساز سوئدی، شيله^۱، کشف شد، ولی این کشف خیلی سریع شناخته نشد و با اکتشاف مستقل پریستلی^۲ به طور گسترده تری شناخته شد. لاوازیه^۳ در ۱۷۷۵ میلادی با بررسی کار بقیه دانشمندان متوجه شد که هوا عمدتاً از دو گاز تشکیل شده است که یکی گاز حیاتی^۴ و دیگری ازت نام گرفت و بعدها گاز حیاتی اکسیژن نامیده شد. واژه اکسیژن از دو واژه یونانی OX به معنای اسید (تلقی غلطی که لاوازیه برای اسید داشت، وجود اکسیژن

¹ - Scheele

² - Priestley

³ - Lavoisier

⁴ - vital

در آن بود) و gen به معنای تولید، ساخته شده است. حتی تا حدود ۱۰۰ سال پس از کشف اکسیژن، این گاز با روشهای شیمیایی و یا با الکترولیز آب تهیه می شد [۱].

۱-۲- خواص فیزیکی و شیمیایی

اکسیژن گازی بی رنگ، بی بو و بی مزه است. وقتی که تا دمای ۹۰/۱۸۸ درجه کلوین سرد می شود به مایعی با رنگ آبی کم رنگ و کمی چگالتر از آب تبدیل می شود. با سرد کردن بیشتر، به جامدی آبی رنگ تبدیل می شود. احتمالاً رنگ آبی به خاطر تعادلی است که با اندک مولکول های اکسیژن برقرار می شود. مایع زمانیکه از طریق بستر سیلیکا ژل فعال شده عبور کند بی رنگ می شود و این احتمالاً به دلیل حذف مولکول های اکسیژن در تعادل است. البته رنگ پس از چند ساعت ماندن دوباره برمی گردد. اکسیژن در آب نسبتاً محلول است (جدول ۱-۱). برخی از خواص فیزیکی اکسیژن در جدول ۱-۲ آمده است.

اکسیژن با تمام عناصر دیگر به جز گازهای نجیب سبک مثل هلیم، نئون و آرگون واکنش می دهد. ترکیب اکسیژن با مواد دیگر در صورتیکه با نور و گرما همراه باشد سوختن یا احتراق نامیده می شود. انرژی مورد نیاز بدن جانداران از واکنش اکسیژن و ترکیبات آلی حاوی کربن، هیدروژن، اکسیژن و نیتروژن تامین می شود. البته آنزیم ها این واکنش ها را کاتالیز کرده و موجب می شوند سوختن در دماهای پایینی در حدود ۳۰ تا ۴۰ درجه سلسیوس انجام گیرد [۱].

اکسیژن معمولاً با ظرفیت ۲- با سایر مواد ترکیب می شود. اکثر ترکیباتی که با اکسیژن ترکیب می شوند الکترون گاتیو هستند. بحث بیشتر در مورد نحوه ترکیب شدن و پیدایش انواع اکسیدها در مراجع آمده است [۳].

جدول ۱-۱: انحلال پذیری اکسیژن در آب [۱]

انحلال پذیری اکسیژن در شرایط استاندارد L/L	دما (°C)
۰/۰۴۸۹	۰
۰/۰۴۲۹	۵
۰/۰۳۸۰	۱۰
۰/۰۳۴۲	۱۵
۰/۰۳۱۰	۲۰
۰/۰۲۸۳	۲۵
۰/۰۲۶۱	۳۰
۰/۰۲۳۱	۴۰
۰/۰۲۰۹	۵۰
۰/۰۱۹۵	۶۰
۰/۰۱۸۳	۷۰
۰/۰۱۷۶	۸۰
۰/۰۱۷۲	۹۰
۰/۰۱۷۰	۱۰۰

جدول ۱-۲: خواص فیزیکی اکسیژن [۱]

ویژگی	مقدار
triple point	
temperature, K	54.359 ± 0.002
pressure, Pa	146.4
density, g/L	
gas	0.0108
liquid	1306.5
solid	1300
boiling point, at 101.3 kPa, K	90.188
density, g/L	
gas	4.470
liquid	1141.1
melting point, K	54.22
critical point	
temperature, K	154.581
pressure, MPa	5.043
density, g/L	436.1
gas, at 101.3 kPa	
density, g/L	
at 0°C	1.42908
at 21°C	1.327
heat capacity, J/(mol·K)	
C _p , at 25°C	29.40
C _p , at 26°C	1.396
dielectric constant at 20°C	1.0004947
n _D ²⁰	1.0002639
viscosity at 25°C, μPa·s(=cP × 10 ⁻³)	20.639
thermal conductivity, at 0°C, mW/(m·K)	2.448
sound velocity, at 0°C, m/s	317.3
liquid	
heat capacity, sat liq, J/(mol·K)	54.317
heat of vaporization, J/mol	6820
viscosity, μPa·s(=cP × 10 ⁻³)	189.4
thermal conductivity, mW/(m·K)	149.87
sound velocity, at 87 K, m/s	904.6
surface tension, at 87 K, N/m	13.85 × 10 ⁻⁷
volume ratio, gas at 21°C to liquid at bp	859.9
solid	
heat of sublimation, J/mol	8204.1
heat capacity, J/(mol·K)	46.40
heat of fusion, J/(mol)	444.5

۳-۱-۱- کاربرد ها

معمولاً در اکثر مصارف اکسیژن، نمی‌توان جایگزینی برای آن پیدا کرد. به طور معمول بازیابی تجاری اکسیژن فقط با استفاده از هوا میسر می‌باشد. پس از جنگ جهانی دوم به دلیل سهولت دسترسی و مفید بودن، اکسیژن در صنایع فولادسازی، تولید مواد شیمیایی، پتروشیمی، کوره‌های دمای بالا، تصفیه آب و نابودی زباله‌های خطرناک، تولید اکسیژن افزایش چشمگیری پیدا کرد. بیشترین استفاده از اکسیژن در ایالات متحده آمریکا به صنایع فولاد، شیمیایی، جوش و برش، زغال سنگ، پالایشگاهی و در نهایت درمانی مربوط می‌گردد. جدول ۱-۳ میزان عرضه و تقاضای اکسیژن در سالهای مختلف را در کشور ایران نشان می‌دهد.

جدول ۱-۳ میزان عرضه و تقاضای اکسیژن در سالهای مختلف بر حسب متر مکعب [۴]

سال	۱۳۸۴	۱۳۸۵	۱۳۸۶
تولید	۴۴۸۵۸۷۸۲	۵۱۱۰۲۷۸۱	۵۴۰۰۰۰۰۰
واردات	۴۹۰۰۰	۳۲۲۰۰	۲۱۰۰۰
صادرات	۱۱۲۰۰۰	۳۵۰۰۰	۳۵۰۰۰
مصرف ظاهری	۴۴۷۹۵۷۸۲	۵۱۰۹۹۹۸۱	۵۳۹۸۶۰۰۰

مزایای عملی و اقتصادی استفاده از اکسیژن و هوای غنی شده با اکسیژن به جای هوای تنها در اکثر صنایع را عموماً می‌توان در یک یا چند دسته از طبقه بندی زیر قرار داد.

۱- احتراق بیشتر یا واکنش در دمای بالاتر و در نتیجه، سرعت بیشتر واکنشها. به عنوان مثال بیشترین دمای شعله در احتراق با اکسیژن ۳۰۳۳ کلوین است و این در حالی است که دمای شعله با هوا حدود ۵۵۵ کلوین کمتر است. حتی در برخی از فرایندها نتیجه مطلوب و مورد نظر در دماهای احتراق پایین (احتراق با هوا) بدست نمی‌آید (شکل ۱-۱).

۲- اتلاف کمتر انرژی در گاز یا گازهای دودکش. معمولاً برای بازیافت انرژی از گازهای دودکش از مبدل‌های حرارتی استفاده می‌شود اما حتی میزان گرمای باقیمانده در جریان گاز نیز اتلاف انرژی را به همراه دارد. زمانی که نیتروژن حذف شود جریان گاز دودکش تولیدی ۷۵ درصد کاهش می‌یابد.

۳- کاهش حجم عملیات مورد نیاز روی گاز دودکش یا گاز خروجی. در مواقعی که گازها بایستی برای حذف آلاینده‌ها تصفیه شوند کم بودن حجم گاز (اگر بدون نیتروژن باشد) موجب کاهش اندازه دستگاه‌های مورد استفاده از قبیل اسکروبر^۱ و ته نشین کننده‌های الکترواستاتیکی^۲ شده و همچنین میزان حذف آلاینده‌ها را افزایش می‌دهد.

۴- کاهش تولید اکسیدهای نیتروژن. کاهش نیتروژن از فرایند احتراق و یا هوای فرایندی اغلب موجب کاهش چشمگیر تولید اکسیدهای نیتروژن از قبیل NO، NO₂ و N₂O می‌شود.

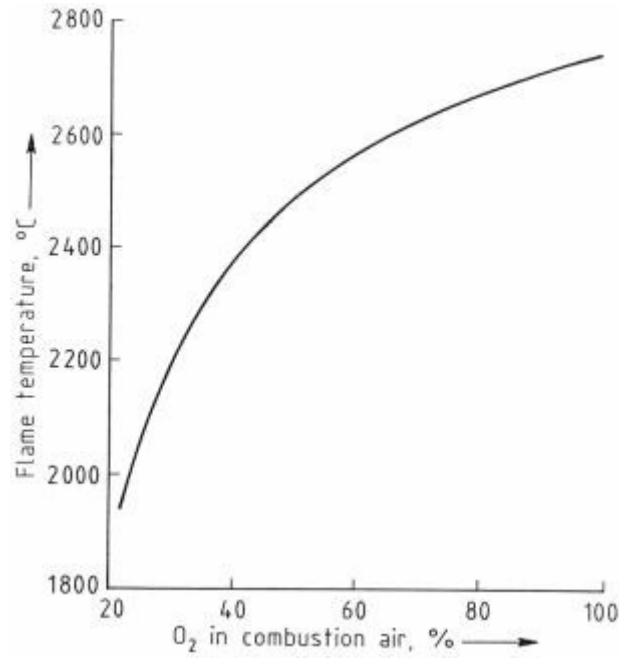
۵- راحت تر بودن جداسازی محصول مورد نظر در انتهای فرایند. کاهش و یا حذف نیتروژن از خوراک ورودی به معنای غلظت بیشتر محصول در جریان‌های واحد بوده و در نتیجه جداسازی محصول راحت تر خواهد بود.

۶- صرفه جویی اقتصادی از فشرده سازی هوا. در فرایندهایی که اکسیژن یا هوا در فشارهای بالا (حدود ۱۴۰ اتمسفر) مورد نیاز می‌باشد، اقتصادی تر است که ابتدا جداسازی را بر روی هوا انجام داده و فقط اکسیژن را در فشار بالا به سیستم وارد کنیم چرا که عملاً فقط اکسیژن برای واکنش مورد نیاز است. با این روش می‌توان در هزینه مورد نیاز برای فشرده سازی نیتروژن صرفه جویی نمود.

۷- وجود نیتروژن در محصول، نامطلوب بوده و هنوز به صورت اقتصادی قابل حذف نیست [۱].

^۱ - Scrubber

^۲ - Electrostatic Precipitator



شکل ۱-۱: اثر افزایش غلظت اکسیژن بر دمای شعله در احتراق متان [۲]

عمده ترین کاربردهای صنعتی اکسیژن عبارتند از:

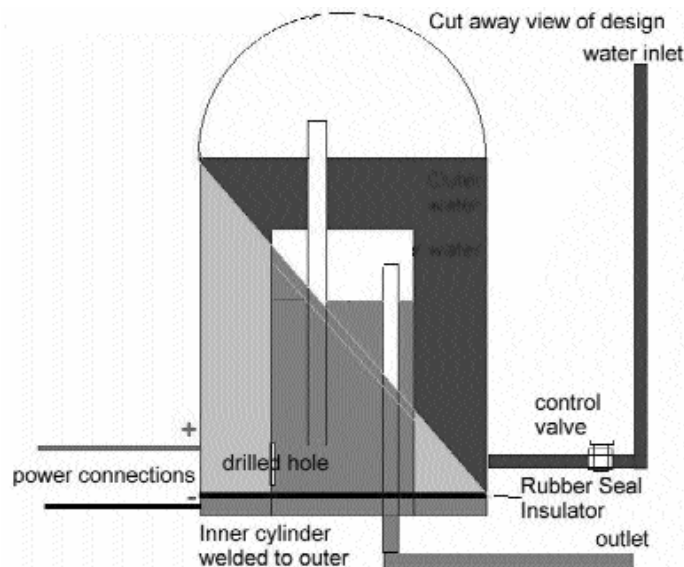
- ۱- صنایع فولاد- جوش و برش
- ۲- صنایع متالورژی غیر فولادی
- ۳- کوره ها
- ۴- فرایندهای شیمیایی
- ۵- کاربردهای پزشکی
- ۶- تصفیه پسابها
- ۷- صنایع الکترونیک

۲-۱- مروری بر انواع روش‌های جداسازی اکسیژن

۱-۲-۱- جداسازی اکسیژن از آب

عمده منابع اکسیژن در دسترس آب و هوا هستند لذا رایج ترین روش های تولید اکسیژن، شامل جداسازی آن از آب و هوا می باشد.

جداسازی اکسیژن از آب از طریق الکترولیز آب انجام می شود که این روش با توجه به نسبت اتمی هیدروژن به اکسیژن در آب، غالباً به منظور تولید هیدروژن یا اصلاح خواص مواد و مصارف سوخت استفاده می شود. یکی از معمول ترین روش های موجود در ایران برای تولید هیدروژن جهت هیدراته (هیدروژن دار) کردن روغن نباتی می باشد که در آن به روش الکترولیز، هیدروژن آب را استخراج کرده و اکسیژن باقی مانده را به عنوان محصول جانبی به فروش می رسانند. اکسیژن تولیدی داخل کپسول هایی ذخیره شده و جهت استفاده مصرف کنندگان حمل می گردد. این روش، به روش کپسولی معروف شده است. اکسیژن در کپسول ها و تحت فشار بالا به صورت مایع قرار دارد. در شکل ۱-۲، یک نمونه از دستگاه الکترولیز آب آورده شده است. مزیت این سیستم از منظر تولید این است که تولید اکسیژن به این روش نیاز به تمهیدات خاصی ندارد. هزینه اولیه تولید با این روش در مقایسه با سایر روش هایی که به منظور تولید میزان بالای اکسیژن مطرح هستند کمتر است. در ضمن از تکنولوژی ساده ای برخوردار است. اکسیژن تولیدی تحت فشار حدود ۱۵۰ بار در کپسول ذخیره شده و برای مصرف کننده ارسال می شود. خلوص اکسیژن در این روش بالای ۹۹٪ است. برای استفاده از این اکسیژن از رگولاتورهای مناسب جهت افت فشار گاز تا مقدار مورد نظر استفاده می شود. استفاده از اکسیژن خشک جهت تنفس در کاربردهای پزشکی مناسب نیست و باید اکسیژن را مرطوب کرد. جهت مرطوب کردن اکسیژن از مرطوب کننده هایی که برای این کاربرد طراحی شده اند استفاده می شود [۵و۴].



شکل ۱-۲: شمای کلی الکترولیز آب [۵]

۲-۲-۱- جداسازی اکسیژن از هوا

هوا از دو بخش عمده اکسیژن و نیتروژن تشکیل شده است البته سایر گازها نیز به مقدار نسبتاً کمی در هوا وجود دارند. جدول ۱-۴ نوع و میزان گازهای موجود در هوا را نشان می‌دهد. روش های جداسازی اکسیژن از هوا به سه روش کلی تقسیم می‌شود. روش اول نسبتاً گران قیمت بوده و روش های دوم و سوم به این علت که بر اساس اختلاف در خواص فیزیکی مولکول اکسیژن با سایر گازها عمل جداسازی را انجام می‌دهند معمولاً خلوص بالایی از اکسیژن را فراهم نمی‌کنند [۶].

جدول ۱-۴: ترکیب گازهای موجود در هوا [۱]

نقطه جوش (K)	درصد حجمی	گاز*
۷۷/۳۶	$۷۸/۰۸۴ \pm ۰/۰۰۴$	نیتروژن
۹۰/۱۸	$۲۰/۹۴۶ \pm ۰/۰۰۲$	اکسیژن
۸۷/۲۸	$۰/۹۳۴ \pm ۰/۰۰۱$	آرگون
۲۱۷	$۰/۰۳۳ \pm ۰/۰۰۳$	کربن دی اکسید
۲۷/۰۹	$(۱/۸۲۱ \pm ۰/۰۰۴) \times ۱۰^{-۳}$	نتون
۴/۱۲۵	$(۵/۲۳۹ \pm ۰/۰۰۵) \times ۱۰^{-۴}$	هلیوم
۱۱۹/۸۱	$(۱/۱۴ \pm ۰/۰۰۱) \times ۱۰^{-۴}$	کریپتون
۱۶۵/۰۴	$(۸/۷ \pm ۰/۰۱) \times ۱۰^{-۶}$	زنون
۲۰/۲۷	۵×۱۰^{-۱۰}	هیدروژن
۱۰۰	۲/۸-۰/۱	بخار آب
	$۱/۵ \times ۱۰^{-۴}$	متان
	$(۱۰۰-۶) \times ۱۰^{-۶}$	کربن مونو اکسید
	۱ تا ۰/۱	سولفور دی اکسید
	۵×۱۰^{-۵}	اکسیدهای نیتروژن

* ترکیب گازهای موجود در هوا تا ارتفاع ۲۰ کیلومتری از زمین ثابت است.

۱- روش دمایی^۱

در اواخر دهه ۱۸۰۰ میلادی، تلاشهای زیادی برای جداسازی اکسیژن از هوا آن هم در مقیاس صنعتی انجام شد. تمامی این روشها بر پایه چرخه های گرمایی استوار بودند. موفق ترین فرایند تا آن زمان، حرارت دادن تحت فشار باریم اکسید در هوا و رساندن آن تا دمای $۵۹۰^{\circ}C$ بود که به تشکیل باریم پراکسید می‌انجامد. سپس به پراکسید تا دمای ۸۷۰ درجه سلسیوس حرارت داده می‌شد تا نیمی از اکسیژن خود را رها کرده و در نتیجه اکسیژن با خلوص ۹۵ درصد جمع آوری گردد. متعاقباً این روش با حرارت دادن باریم

^۱ - Cryogenic

اکسید تا ۶۰۰ درجه سلسیوس بهبود داده شد. این درحالی بود که اکسیژن از هوا در فشار ۱۷۰ کیلو پاسکال جذب شده و سپس تحت شرایط خلا از باریم دفع می‌گردید [۲].

در این زمان آزمایشات موفقیت آمیزی برای مایع سازی هوا در حال انجام بود که در نهایت منجر به جداسازی اکسیژن از طریق تقطیر گردید. از آنجاییکه درصد اکسیژن موجود در فاز گازی که در تعادل با هوای مایع (حاوی ۲۱٪ اکسیژن) است تنها ۶٪ می‌باشد، جداسازی اکسیژن با تقطیر آسان می‌باشد. در سال ۱۹۰۱ میلادی کارل ون لیند^۱ (آلمان) اولین روش عملیاتی برای کنترل تقطیر هوای مایع را ارائه کرد. برج های اولیه خیلی کارا نبودند اما تا سال ۱۹۱۰ لیند یک برج دوتایی را پیشنهاد کرد که در آن یکی بالای دیگری بود و یک کندانسور- تبخیر کننده در بین آنها قرار داشت [۱ و ۲].

پس از گذشت سالها واحدهای تولید اکسیژن، توسعه یافته و به کارایی بهتری رسیدند. امروزه بزرگترین واحد قادر به تولید اکسیژن به میزان ۲۲۵۰ تن در روز می‌باشد.

فرایند جداسازی هوا از روش کرایوجنیک عمدتاً شامل سه مرحله است:

- ۱- تصفیه هوای ورودی برای حذف ذرات جامد، دی اکسید کربن و آب
- ۲- سردسازی^۲
- ۳- جداسازی با تقطیر

شکل ۱-۳ نمایی شماتیک از این فرایند و شکل ۱-۴ نمایی از یک واحد نصب شده توسط شرکت لیند را نشان می‌دهد. هوای فیلتر شده تا فشار ۶۰۰-۷۰۰ کیلو پاسکال فشرده شده، سپس خنک شده و در تماس مستقیم با آب موجود در برج شستشو قرار می‌گیرد (a) در ادامه هوای مذکور به یک مبدل انتقال حرارت صفحه- پره^۳ (شکل ۱-۵) فرستاده می‌شود (b) که در آن بیشتر سرد گردیده و محصول اکسیژن و جریان پسماند نیتروژن حاصل می‌گردد. کربن دی اکسید و آب با میعان و تولید جامد در این مبدل از جریان هوا جدا می‌شوند. هر چند دقیقه یکبار مسیر هوای ورودی و نیتروژن پسماند تعویض می‌گردند. با این عمل ناخالصی های مانده در مبدل به بیرون منتقل می‌شود. با این روش فرایند قادر است به صورت پیوسته و بر مبنای سیکل های مشخص کار کند. واحدهای جدید به جای استفاده از مبدل دارای جریان تعویض شونده از واحدهای جذب سطحی غربال مولکولی^۴ استفاده می‌کنند. پس از جداسازی کربن دی اکسید و آب با غربال مولکولی، هوای ورودی با گاز پسماند سرد می‌شود.

سردسازی در این فرایند معمولاً از تبدیل انرژی به کار و از طریق انبساط یک گاز فشرده در یک توربین بدست می‌آید. قبل از انبساط به ۱۲۰ کیلو پاسکال در توربین (c) مقداری از هوای سرد دوباره به انتهای سرد مبدل برگشته و سپس به نقطه مناسبی از برج دوتایی رکتیفایر^۵ که فشار کمی دارد وارد می‌شود (d). باقیمانده

¹ - Carl von Linde

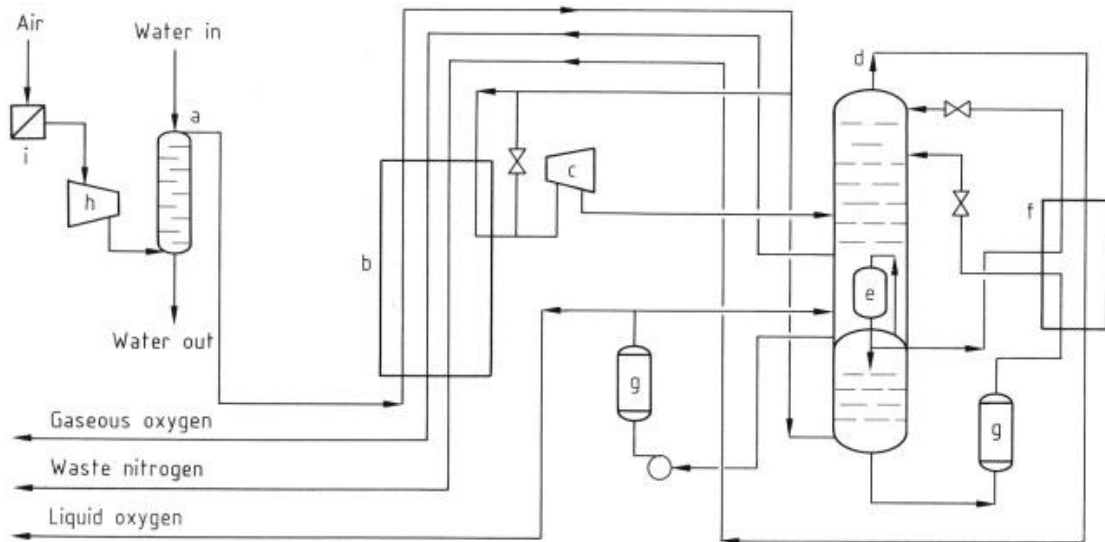
² - Refrigeration

³ - Plate-fin

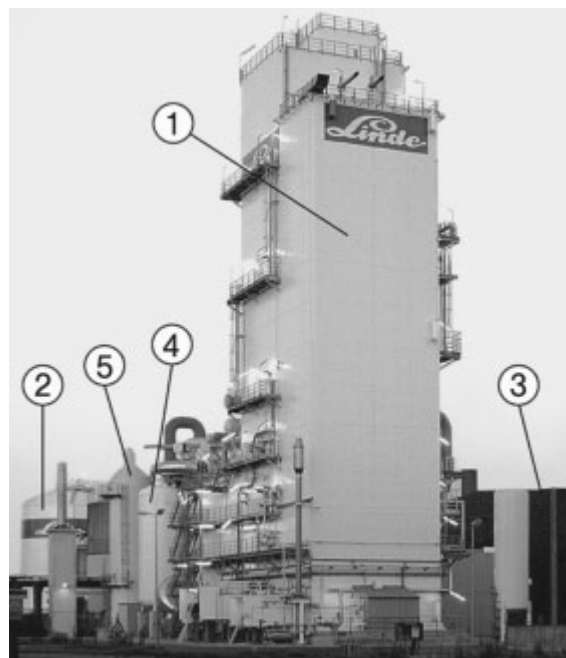
⁴ - Molecular sieve adsorption

⁵ - Rectifier

هوا به برج پایینی و فشار بالا (۵۰۰-۶۰۰ کیلو پاسکال) منتقل شده و به گاز نیتروژن در بالای برج و جریان مایع غنی از اکسیژن (۳۸٪ اکسیژن) در پایین برج تبدیل می شود.



شکل ۱-۳: نمای شماتیک واحد کرایوجنیک [۲]



شکل ۱-۴: نمایی از یک واحد کرایوجنیک، استرالیا [۷]

۱-محفظه سرمایش ۲-تانک ۳- اتاق ماشین آلات ۴- سردکننده تماسی ۵- سردکننده تبخیری

نیتروژن گازی با اکسیژن مایعی که تبخیر گردیده در کندانسور- ریویولر میعان می یابد (e). قسمتی از این نیتروژن مایع به عنوان جریان برگشتی به برج پایینی بازگشته و قسمتی از آن نیز انبساط یافته و به قسمت