



دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده فنی و مهندسی
بخش مهندسی شیمی

پایان نامه کارشناسی ارشد

تعیین ضریب انتقال جرم متان در آب در حضور سیکلودکستترین - نانولوله‌ی کربنی

دانشجو

ابوالفضل محمدی

استاد راهنما:

دکتر مهرداد منطقیان

استاد مشاور:

محسن ظهیر میردامادی

شهریور ۸۷

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

تقریم به

پدر و مادر عزیز و مهربانم

با تشکر از

فداوند خوب و مهربان که در تمام مراحل زندگی کمک کرده
جناب آقای دکتر مهرداد منطقیان، استاد راهنمای دلسوزم
جناب آقای مهندس محسن میردامادی، استاد مشاورم
جناب آقای مسعود متولیان، استاد مشاور صنعتی‌ام
سرکار خانم‌ها محصومه میرزایی و حمیده التجایی و جناب آقای علی امجدیان به
فاطر کمک‌های ارزنده‌شان
دوستان خوبم در آزمایشگاه جداسازی آقایان میثم عبدالکریمی مه‌آبادی، علیرضا
جهانگیری، رضا شیدپور، مهدی همدی، مؤمن و علیرضا عظیمی
بچه‌های آزمایشگاه بازیافت انرژی و آزمایشگاه بیوتکنولوژی
هم‌اطاقی‌های عزیزم به‌ویژه جناب آقای علی قدمی
سرکار خانم تیموری مسئول آزمایشگاه بیوتکنولوژی

و با تشکر ویژه از

خانواده‌ی عزیزم

همچنین از شرکت ملی گاز ایران و ستاد ویژه توسعه فناوری نانو جهت حمایت مالی
از این پایان نامه کمال تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

چکیده

در این تحقیق اثر بتاسیکلودکستین (CD)، نانولوله‌ی کربنی چند جداره (NT) و SDS روی ضریب انتقال جرم، مقدار و سرعت انحلال متان در آب بررسی شده است. آزمایش‌ها در دو فشار ۳ و ۵ بار، هشت دمای ۱، ۳، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ درجه سانتیگراد و نه محلول با غلظت‌های مختلف از CD ، SDS و NT انجام شد. حجم هر محلول ۳۰۰ سانتیمتر مکعب در نظر گرفته شد. برای هر محلول منحنی‌های کاهش فشار ناشی از انحلال متان، در فشارهای اولیه و دماهای مورد نظر رسم شد و ضرایب انتقال جرم آن‌ها محاسبه و بر حسب فشار رسم شد و در نهایت نمودارهای $P-T-t$ و $k-T-P$ برای هر محلول در دو فشار اولیه‌ی ۳ و ۵ بار، توسط نرم افزار $TableCurve 3D$ ، رسم و با یک رابطه ریاضی برازش شد.

استفاده از CD ، SDS و NT و ترکیب آن‌ها در تمامی دماها سرعت انحلال متان را افزایش داد. استفاده از ۰/۵ درصد سیکلودکستین مقدار انحلال متان را در دمای $1^{\circ}C$ و فشار اولیه‌ی ۳ بار ۱۴/۶۳ درصد افزایش داد ولی تأثیر آن در افزایش مقدار انحلال با افزایش دما، کاهش یافت. استفاده از این محلول ضریب انتقال جرم را - به‌خصوص در دماهای پایین - به‌خوبی افزایش داد. افزایش غلظت سیکلودکستین از ۰/۵ به ۱ درصد، تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر مقدار انحلال و ضریب انتقال جرم نداشت. استفاده از ۰/۱ درصد SDS در فشار ۳ بار مقدار انحلال را کاهش داد ولی در فشار ۵ بار اندکی افزایش انحلال مشاهده شد. این محلول تقریباً در تمام دماها ضریب انتقال جرم را افزایش داد ولی این افزایش در مقایسه با محلول‌های دیگر، خیلی کمتر بود. استفاده از NT به همراه SDS در فشار ۳ بار، تأثیر چندانی در افزایش انحلال متان نداشت ولی در فشار ۵ بار و دماهای پایین تا ۵/۲۶ درصد مقدار انحلال را افزایش داد. این محلول ضریب انتقال جرم را در دماهای پایین به‌میزان قابل توجهی افزایش داد. استفاده‌ی همزمان از CD ، SDS و NT بیشترین تأثیر را در افزایش ضریب انتقال جرم، مقدار و سرعت انحلال داشت. بطوریکه محلولی با مشخصات $CD = 1\%$ ، $SDS = 0.1\%$ و $NT = 1\%$ بیشترین افزایش را در ضریب انتقال جرم، مقدار و سرعت انحلال، در مقایسه با آب خالص ایجاد کرد. این محلول مقدار انحلال را در دمای $1^{\circ}C$ و فشار اولیه‌ی ۳ بار ۱۴/۶۳ درصد افزایش داد.

واژه‌های کلیدی: مقدار انحلال، سرعت انحلال، بتاسیکلودکستین، نانولوله‌ی کربنی چند جداره،

SDS ، ضریب انتقال جرم، جذب، متان

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فهرست مطالب	أ
فهرست شکل‌ها	ج
فهرست جدول‌ها	ز
فهرست نمادها	ی
فصل ۱	مقدمه
۱-۱- مقدمه	۲
۲-۱- ماهیت گاز طبیعی	۲
۳-۱- متان	۳
۴-۱- نانو لوله‌ی کربنی	۴
۵-۱- سیکلودکسترن	۷
فصل ۲	مروری بر مطالب گذشته
۱-۲- نانولوله‌ی کربنی	۹
۲-۱-۱- ساختار مولکولی	۹
۲-۱-۲- خواص نانولوله‌ی کربنی	۱۱
۲-۲-۱-۱- خواص مکانیکی	۱۱
۲-۲-۱-۲- خواص الکتریکی	۱۱
۲-۲-۱-۳- خواص حرارتی	۱۲
۲-۲-۱-۴- خواص شیمیایی	۱۳
۲-۲- سیکلودکسترن	۱۴
۲-۲-۱- تاریخچه‌ی سیکلودکسترن‌ها	۱۴
۲-۲-۲- نگرشی اجمالی به ساختمان سیکلودکسترن‌ها	۱۵
۲-۲-۳- تولید سیکلودکسترن‌ها	۱۸
۲-۲-۴- خواص فیزیکی و شیمیایی سیکلودکسترن‌ها	۱۹
۲-۲-۵- تشکیل کمپلکس در سیکلودکسترن‌ها	۲۴
۳-۲- انحلال متان در آب	۲۷
۴-۲- هیدرات متان	۲۸

۳۱	۱-۴-۲- اثر مواد فعال سطحی بر سرعت، پایداری و میزان ذخیرهسازی هیدرات متان
۳۳	۲-۴-۲- بررسی اقتصادی روش‌های مختلف صدور گاز طبیعی
۳۴	۱-۲-۴-۲- انتقال گاز طبیعی به صورت LNG
۳۷	۳-۴-۲- انتقال گاز طبیعی به صورت NGH
۳۸	۴-۴-۲- مقایسه بین LNG و NGH
۴۰	فصل ۳.....آزمایش‌ها
۴۱	۱-۳- دستگاه
۴۴	۲-۳- مواد مورد استفاده
۴۵	۳-۳- نحوه انجام آزمایش‌ها
۴۶	۴-۳- مدل کردن سطح فصل مشترک بین آب و متان در سل
۴۸	۱-۴-۳- تعیین سطح تماس آب و گاز در حالت اول
۵۱	۲-۴-۳- تعیین سطح تماس آب و گاز در حالت دوم
۵۴	۳-۴-۳- تعیین سطح تماس آب و گاز در حالت سوم
۵۵	۴-۴-۳- ارائه‌ی یک رابطه‌ی کلی برای حالت‌های اول، دوم و سوم
۵۶	۵-۳- نحوه‌ی محاسبه‌ی ضریب انتقال جرم متان در هر محلول
۵۷	۶-۳- نحوه‌ی محاسبه‌ی حلالیت متان در محلول‌ها
۵۷	۱-۶-۳- محاسبه‌ی ضریب تراکم‌پذیری (Z) با استفاده از معادله‌ی حالت Peng-Robinson
۵۹	فصل ۴.....نتایج و بحث
۶۰	۱-۴- مقایسه‌ی کاهش فشار متان بر اثر انحلال در محلول‌ها
۸۰	۲-۴- محاسبه‌ی حلالیت متان در محلول‌ها
۸۳	۳-۴- مقایسه‌ی ضریب انتقال جرم متان در محلول‌ها
۹۴	۴-۴- اثر دما بر میزان انحلال متان در هر یک از محلول‌ها
۹۸	۵-۴- اثر دما بر ضریب انتقال جرم در هر یک از محلول‌ها
۱۰۴	فصل ۵.....نتیجه‌گیری و پیشنهادها
۱۰۴	۱-۵- نتیجه‌گیری
۱۰۵	۲-۵- پیشنهادها
۱۰۷	مراجع
۱۰۷	پیوست الف: تعریف روابط ریاضی استفاده شده در روبه‌های فصل چهارم

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱: پیوندهای اتمی در (a) الماس، (b) گرافیت [۶].....	۵
شکل ۲-۱: ساختار اتم‌های کربن در الماس [۶].....	۵
شکل ۳-۱: ساختار اتم‌های کربن در گرافیت [۶].....	۵
شکل ۴-۱: ساختار مولکولی فولرین [۸].....	۶
شکل ۵-۱: نانولوله کربنی چند دیواره [۱۰].....	۶
شکل ۶-۱: نانولوله کربنی تک دیواره [۱۰].....	۶
شکل ۱-۲: صفحه گرافیت با بردار رول شدن r [۱۴].....	۱۰
شکل ۲-۲: نانولوله‌های (a) آرمچیر و (b) زیگزاگ و (c) کاپرال [۱۵].....	۱۰
شکل ۳-۲: خم شدن نانولوله در اثر اعمال فشار [۱۴].....	۱۱
شکل ۴-۲: نمایی از l : α -سیکلودکسترین. 2: β -سیکلودکسترین. و 3: γ -سیکلودکسترین [۱۳].....	۱۶
شکل ۵-۲: ساختمان α -سیکلودکسترین [۱۱].....	۱۶
شکل ۶-۲: نمودار شماتیکی دو واحد گلوکوپیرانوز از یک ملکول سیکلودکسترین [۱۲].....	۱۷
شکل ۷-۲: از چپ به راست، مدل ملکولی Corey-Pauling-Coltun برای α ، β و γ -سیکلودکسترین ها [۱۲].....	۱۷
شکل ۸-۲: تشکیل دکسترین‌های حلقوی و غیر حلقوی از نشاسته [۲۲].....	۱۸
شکل ۹-۲: ساختار α -سیکلودکسترین هگزا هیدرات. فقط دو ملکول آب داخلی نشان داده شده است. شماره‌ها نشان دهنده ی واحدهای گلوکوز می باشند. علامت * بیان گر مرکز ملکول سیکلودکسترین می باشد [۱۲].....	۲۳
شکل ۱۰-۲: انواع چیدمان سیکلودکسترین‌ها در شبکه کریستالی [۲۲].....	۲۴
شکل ۱۱-۲: شیوه‌های مختلف ورود نیتروفنول به عنوان میهمان در فضای خالی پرمیتیلیت α -سیکلودکسترین (الف): در حالت جامد. (ب): در حالت محلول [۱۳].....	۲۵
شکل ۱۲-۲: نمونه‌ای از کمپلکس ۲:۲ [۱۳].....	۲۶
شکل ۱۳-۲: روش‌های مختلف انتقال گاز طبیعی [۲].....	۳۴
شکل ۱۴-۲: فرآیند پیشنهادی برای تولید NGH [۱].....	۳۷
شکل ۱۵-۲: هزینه‌ی کل محصول گاز طبیعی صادر شده از بندر عسلویه واقع در مناطق جنوبی ایران به بعضی از بازارهای گازی دنیا را از دو طریق LNG و NGH . ستون سفید: خوراک دارای قیمت $\$ \cdot MJ^{-1}$ $4 \cdot 10^4 \times 10^4 / 74$. ستون تیره: خوراک دارای قیمت $\$ \cdot MJ^{-1}$ $4 \cdot 10^4 \times 10^4 / 58$. [۲۸].....	۳۹
شکل ۱-۳: فشار سنج و نمایشگر دیجیتال استفاده شده در آزمایش‌ها (محصول شرکت $BD SENSORS$ کشور آلمان، مدل: 26.600 محدوده عملکرد: $0-100 \text{ bar}$).....	۴۱

- شکل ۳-۲: دما سنج و نمایشگر دیجیتال مورد استفاده در آزمایش ۴۲
- شکل ۳-۳: الکتروموتور و اهرم ها برای حرکت سل ۴۳
- شکل ۳-۴: حمام برای ثابت نگه داشتن دما ۴۳
- شکل ۳-۵: کپسول گاز متان استفاده شده ۴۳
- شکل ۳-۶: نمای کلی دستگاه ۴۳
- شکل ۳-۷: بتاسیکلودکستین استفاده شده ۴۴
- شکل ۳-۸: عکس *SEM* نانولوله‌ی کربنی چند جداره‌ی مورد استفاده ۴۵
- شکل ۳-۹: عکس *TEM* نانولوله‌ی کربنی چند جداره‌ی مورد استفاده ۴۵
- شکل ۳-۱۰: طیف رامان نانولوله‌ی کربنی چند جداره‌ی مورد استفاده ۴۵
- شکل ۳-۱۱: نمودار *X-ray* نانولوله‌ی کربنی چند جداره‌ی مورد استفاده ۴۵
- شکل ۳-۱۲: رآکتور مورد استفاده جهت تشکیل هیدرات متان ۴۶
- شکل ۳-۱۳: سطح مقطع آب درون رآکتور ۴۸
- شکل ۳-۱۴: سطح تماس آب-گاز در حالت اول ۴۹
- شکل ۳-۱۵: برش افقی از رآکتور در حالت اول ۵۱
- شکل ۳-۱۶: برش افقی از رآکتور در زاویه‌ی θ_{C1} ۵۱
- شکل ۳-۱۷: سطح تماس آب-گاز در حالت دوم ۵۲
- شکل ۳-۱۸: سطح تماس آب-گاز در حالت دوم ۵۳
- شکل ۳-۱۹: برش افقی از رآکتور در زاویه‌ی θ_{C2} ۵۴
- شکل ۳-۲۰: سطح تماس آب-گاز در حالت سوم ۵۴
- شکل ۳-۲۱: برش افقی از رآکتور در حالت سوم ۵۵
- شکل ۳-۲۲: سطح تماس آب-گاز نسبت به θ ؛ خطچین های قرمز نشان‌دهنده‌ی مقادیر محاسبه شده و خط توپر آبی نشان‌دهنده‌ی رابطه‌ی گوسین تقریب زده زده شده برای سطح تماس آب-گاز می‌باشد. ۵۵
- شکل ۴-۱: نمودار *P-t* برای انحلال متان در نه محلول باغلظت‌های مختلف، در دمای $1^{\circ}C$ و فشار اولیه 3 bar ۶۰
- شکل ۴-۲: نمودار *P-t* برای انحلال متان در نه محلول باغلظت‌های مختلف، در دمای $1^{\circ}C$ و فشار اولیه 5 bar ۶۱
- شکل ۴-۳: نمودار *P-t* برای انحلال متان در نه محلول باغلظت‌های مختلف، در دمای $3^{\circ}C$ و فشار اولیه 3 bar ۶۲
- شکل ۴-۴: نمودار *P-t* برای انحلال متان در نه محلول باغلظت‌های مختلف، در دمای $3^{\circ}C$ و فشار اولیه 5 bar ۶۳
- شکل ۴-۵: نمودار *P-t* برای انحلال متان در نه محلول باغلظت‌های مختلف، در دمای $5^{\circ}C$ و فشار اولیه 3 bar ۶۴
- شکل ۴-۶: نمودار *P-t* برای انحلال متان در نه محلول باغلظت‌های مختلف، در دمای $5^{\circ}C$ و فشار اولیه 5 bar ۶۵
- شکل ۴-۷: نمودار *P-t* برای انحلال متان در نه محلول باغلظت‌های مختلف، در دمای $10^{\circ}C$ و فشار اولیه 3 bar ۶۶
- شکل ۴-۸: نمودار *P-t* برای انحلال متان در نه محلول باغلظت‌های مختلف، در دمای $10^{\circ}C$ و فشار اولیه 5 bar ۶۷

- شکل ۳۷-۴: نمودار $P-T-t$ برای محلول ۰/۱۵٪ از CD در فشار اولیه‌ی ۵ bar ۹۴
- شکل ۳۸-۴: نمودار $P-T-t$ برای محلول ۰/۱۵٪ از CD در فشار اولیه‌ی ۳ bar ۹۴
- شکل ۳۹-۴: نمودار $P-T-t$ برای محلول ۱٪ از CD در فشار اولیه‌ی ۵ bar ۹۵
- شکل ۴۰-۴: نمودار $P-T-t$ برای محلول ۱٪ از CD در فشار اولیه‌ی ۳ bar ۹۵
- شکل ۴۱-۴: نمودار $P-T-t$ برای محلول ۰/۱۱٪ از SDS در فشار اولیه‌ی ۵ bar ۹۵
- شکل ۴۲-۴: نمودار $P-T-t$ برای محلول ۰/۱۱٪ از SDS در فشار اولیه‌ی ۳ bar ۹۵
- شکل ۴۳-۴: نمودار $P-T-t$ برای محلول ۰/۱۱٪ از SDS و ۰/۰۲٪ از NT در فشار اولیه‌ی ۵ bar ۹۶
- شکل ۴۴-۴: نمودار $P-T-t$ برای محلول ۰/۱۱٪ از SDS و ۰/۰۲٪ از NT در فشار اولیه‌ی ۳ bar ۹۶
- شکل ۴۵-۴: نمودار $P-T-t$ برای محلول ۰/۱۱٪ از SDS و ۰/۰۵٪ از NT در فشار اولیه‌ی ۵ bar ۹۶
- شکل ۴۶-۴: نمودار $P-T-t$ برای محلول ۰/۱۱٪ از SDS و ۰/۰۵٪ از NT در فشار اولیه‌ی ۳ bar ۹۶
- شکل ۴۷-۴: نمودار $P-T-t$ برای محلول ۰/۱۵٪ از CD ، ۰/۱۱٪ از SDS و ۰/۰۲٪ از NT در فشار اولیه‌ی ۵ bar ۹۷
- شکل ۴۸-۴: نمودار $P-T-t$ برای محلول ۰/۱۵٪ از CD ، ۰/۱۱٪ از SDS و ۰/۰۲٪ از NT در فشار اولیه‌ی ۳ bar ۹۷
- شکل ۴۹-۴: نمودار $P-T-t$ برای محلول ۰/۱۵٪ از CD ، ۰/۱۱٪ از SDS و ۰/۰۵٪ از NT در فشار اولیه‌ی ۵ bar ۹۷
- شکل ۵۰-۴: نمودار $P-T-t$ برای محلول ۰/۱۵٪ از CD ، ۰/۱۱٪ از SDS و ۰/۰۵٪ از NT در فشار اولیه‌ی ۳ bar ۹۷
- شکل ۵۱-۴: نمودار $P-T-t$ برای محلول ۱٪ از CD ، ۰/۱۱٪ از SDS و ۰/۰۵٪ از NT در فشار اولیه‌ی ۵ bar ۹۸
- شکل ۵۲-۴: نمودار $P-T-t$ برای محلول ۱٪ از CD ، ۰/۱۱٪ از SDS و ۰/۰۵٪ از NT در فشار اولیه‌ی ۳ bar ۹۸
- شکل ۵۳-۴: نمودار $k-T-P$ برای آب خالص در فشار اولیه‌ی ۵ bar ۹۹
- شکل ۵۴-۴: نمودار $k-T-P$ برای آب خالص در فشار اولیه‌ی ۳ bar ۹۹
- شکل ۵۵-۴: نمودار $k-T-P$ برای محلول ۰/۱۵٪ از CD در فشار اولیه‌ی ۵ bar ۹۹
- شکل ۵۶-۴: نمودار $k-T-P$ برای محلول ۰/۱۵٪ از CD در فشار اولیه‌ی ۳ bar ۹۹
- شکل ۵۷-۴: نمودار $k-T-P$ برای محلول ۱٪ از CD در فشار اولیه‌ی ۵ bar ۱۰۰
- شکل ۵۸-۴: نمودار $k-T-P$ برای محلول ۱٪ از CD در فشار اولیه‌ی ۳ bar ۱۰۰
- شکل ۵۹-۴: نمودار $k-T-P$ برای محلول ۰/۱۱٪ از SDS در فشار اولیه‌ی ۵ bar ۱۰۰
- شکل ۶۰-۴: نمودار $k-T-P$ برای محلول ۰/۱۱٪ از SDS در فشار اولیه‌ی ۳ bar ۱۰۰
- شکل ۶۱-۴: نمودار $k-T-P$ برای محلول ۰/۱۱٪ از SDS و ۰/۰۲٪ از NT در فشار اولیه‌ی ۵ bar ۱۰۱
- شکل ۶۲-۴: نمودار $k-T-P$ برای محلول ۰/۱۱٪ از SDS و ۰/۰۲٪ از NT در فشار اولیه‌ی ۳ bar ۱۰۱
- شکل ۶۳-۴: نمودار $k-T-P$ برای محلول ۰/۱۱٪ از SDS و ۰/۰۵٪ از NT در فشار اولیه‌ی ۵ bar ۱۰۱
- شکل ۶۴-۴: نمودار $k-T-P$ برای محلول ۰/۱۱٪ از SDS و ۰/۰۵٪ از NT در فشار اولیه‌ی ۳ bar ۱۰۱
- شکل ۶۵-۴: نمودار $k-T-P$ برای محلول ۰/۱۵٪ از CD ، ۰/۱۱٪ از SDS و ۰/۰۲٪ از NT در فشار اولیه‌ی ۵ bar ۱۰۲

شکل ۴-۶۶: نمودار $k-T-P$ برای محلول 0.15% CD ، 0.11% SDS و 0.02% از NT در فشار اولیه 3 bar 102

شکل ۴-۶۷: نمودار $k-T-P$ برای محلول 0.15% CD ، 0.11% SDS و 0.05% از NT در فشار اولیه 5 bar 102

شکل ۴-۶۸: نمودار $k-T-P$ برای محلول 0.15% CD ، 0.11% SDS و 0.05% از NT در فشار اولیه 3 bar 102

شکل ۴-۶۹: نمودار $k-T-P$ برای محلول 1% CD ، 0.11% SDS و 0.05% از NT در فشار اولیه 5 bar 103

شکل ۴-۷۰: نمودار $k-T-P$ برای محلول 1% CD ، 0.11% SDS و 0.05% از NT در فشار اولیه 3 bar 103

فهرست جدول‌ها

عنوان	صفحه
جدول ۱-۲: خواص فیزیکی سیکلودکسترین‌ها [۱۲].....	۱۹
جدول ۲-۲: خواص دیگری از سیکلودکسترین‌ها [۱۳].....	۲۰
جدول ۳-۲: حلالیت سیکلودکسترین‌ها در آب در دماهای مختلف [۲۲].....	۲۱
جدول ۴-۲: ترکیب گاز طبیعی برای سه منطقه‌ی گازی دنیا بر حسب جزء مولی [۳۵].....	۳۵
جدول ۵-۲: زنجیره‌ی هزینه‌ی تولید LNG [۷].....	۳۶
جدول ۶-۲: هزینه‌ی محصول LNG در عسلویه برای تحویل در بعضی از بازارهای گازی دنیا [۳۵].....	۳۶
جدول ۷-۲: شرایط عملیاتی و بعضی از متغیرهای طراحی برای فرآیند پیشنهادی تولید NGH [۱].....	۳۸
جدول ۸-۲: کل هزینه‌ی محصول NGH برای صدور از عسلویه به بعضی از بازارهای گازی دنیا [۱].....	۳۸
جدول ۱-۳: غلظت (درصد وزنی) محلول‌های استفاده شده برای جذب متان.....	۴۶
جدول ۱-۴: درصد افزایش انحلال متان در محلولهای ۲ تا ۹ نسبت به آب خالص در دماهای هشت‌گانه و فشار اولیه‌ی ۳ بار مطابق با رابطه‌ی (۱-۴).....	۷۵
جدول ۲-۴: درصد افزایش انحلال متان در محلولهای ۲ تا ۹ نسبت به آب خالص در دماهای هشت‌گانه و فشار اولیه‌ی ۵ بار مطابق با رابطه‌ی (۱-۴).....	۷۵

نمادها

\bar{A}	سطح تماس محلول - متان درون سل
C	میانگین سطح تماس محلول - متان در سل
C_e	غلظت متان در محلول در هر لحظه
k	غلظت تعادلی متان در محلول
n	ضریب انتقال جرم متان در هر محلول
P	تعداد مول‌های گاز متان در فاز گازی درون سل
P_e	فشار گاز متان درون سل
R	فشار تعادلی گاز متان درون سل
T	ثابت جهانی گازها
V	دمای سیستم
Z	حجم گاز درون سل
	ضریب تراکم‌پذیری گاز متان

فصل ۱

مقدمه

۱-۱- مقدمه

گاز طبیعی که مهم ترین و بیشترین ماده تشکیل دهنده آن متان می باشد، یکی از مهم ترین منابع انرژی و همچنین مواد اولیه شیمیایی می باشد. مصرف جهانی گاز طبیعی به سرعت در حال افزایش است. با این وجود بازارهای جهانی گاز دور از ذخایر گازی می باشند. تکنولوژی‌های زیادی برای انتقال گاز طبیعی از مناطق تولیدی به دست مصرف کنندگان در هر نقطه دنیا وجود دارد [۱] که یکی از آن‌ها تبدیل گاز طبیعی به جامد^۱ (*Gas to Solid*)، به عنوان مثال هیدرات گاز طبیعی^۲ (*Natural Gas Hydrate*)، می باشد [۲]. از طرفی یکی از شرایط تشکیل هیدرات وجود آب می باشد [۳]. بنابراین بررسی جذب گاز طبیعی و به طور خاص گاز متان در آب اهمیت فراوانی دارد.

جذب گازها توسط آب برای تشکیل هیدرات‌ها در کارهای تئوری و آزمایشگاهی زیادی بررسی شده است. گاز طبیعی که بیش از ۹۰ درصد آن متان می باشد، یکی از مهم ترین و پاکیزه ترین منابع سوختی موجود، می باشد و در طبیعت هم به شکل گازی وجود دارد و هم به شکل هیدرات. متان همچنین به عنوان یک ماده‌ی اولیه برای تولید کردن بسیاری از مواد مهم، استفاده می‌شود. از طرفی با توجه به این که منابع مهم گازی در نقاط خاصی از دنیا قرار گرفته‌اند، بسیاری از کشورها نیاز به وارد کردن این گاز دارند. بنابراین یافتن روشی کم هزینه و اقتصادی برای صدور گاز الزامی به نظر می‌رسد.

۱-۲- ماهیت گاز طبیعی

گاز طبیعی به طور عمده از متان، که ساده ترین هیدروکربن می باشد، و هیدروکربن‌های ساده تر و پیچیده تری چون اتان، پروپان و بوتان تشکیل شده است. گاز معروفی که در منازل، محل‌های کسب و کار و بخش‌های صنعتی استفاده می شود، در اصل متان خالص است که گازی بی رنگ و بی بو است و با شعله‌ای نسبتاً روشن می سوزد (بویی که هنگام استفاده از گاز طبیعی به مشام می رسد، به آن افزوده شده است).

^۱ Gas to solid

^۲ Natural gas hydrate

گاز طبیعی تمیز سوزترین نوع سوخت فسیلی است زیرا هنگام سوختن فقط بخار آب و دی اکسید کربن تولید می‌کند. متان یک ماده خام اصلی برای ساخت حلال‌ها و دیگر مواد شیمیایی آلی است. گاز طبیعی در فرآیندهای گوناگون و مختلف صنعتی کاربرد دارد. مشتریان صنعتی گاز نیز همانند مشتریان آن در بخش تجاری، از گاز برای گرم کردن و یا خنک کردن هوای کارخانه‌ها استفاده می‌کنند ولی در کوره‌های صنعتی، دیگ‌های بخار، سیستم‌های ذوب، خشک‌کننده‌ها و سایر تجهیزات صنعتی نیز گاز بسیار زیادی مصرف می‌شود. به هر حال بسته به نوع مهندسان و دست‌اندرکاران بخش تولیدات صنعتی، کاربرد صنعتی گاز طبیعی افزایش یافته است [۴].

۱-۳- متان

متان که گاز مرداب نیز نامیده می‌شود، گازی بی‌رنگ و بی‌بو می‌باشد که در طبیعت به وفور یافت می‌شود. متان یکی از اجزای اصلی گاز طبیعی است که در معادن زغال سنگ نیز یافت می‌شود. همچنین از تجزیه باکتری‌های بی‌هوازی موجود در گیاهان زیر آب، متان به دست می‌آید (به همین دلیل به آن گاز مرداب می‌گویند). در حالت صنعتی، از تقطیر تخریبی زغال سنگ معمولی در کارخانه گاز زغال سنگ و گاز کوره زغالی نیز می‌توان متان به دست آورد. تجزیه لجن توسط باکتری‌های بی‌هوازی در فرآیندهای تصفیه فاضلاب، گازی غنی از متان تولید می‌کند.

متان ساده‌ترین عضو از هیدروکربن‌های پارافینی می‌باشد. فرمول شیمیایی آن CH_4 است و سبک‌تر از هوا است. چگالی آن در شرایط معمولی 0.554 kg/m^3 می‌باشد. متان به مقدار اندکی در آب حل می‌شود؛ به آسانی در هوا آتش می‌گیرد و دی اکسید کربن و آب تولید می‌کند. نقطه جوش متان 162°F - درجه سانتیگراد $(259/6^\circ\text{C}$ - درجه فارنهایت) و نقطه ذوبش $182/5^\circ\text{C}$ - $(296/5^\circ\text{F})$ می‌باشد. متان در حالت کلی بسیار پایدار است اما ترکیبات متان و هوا که شامل ۵ تا ۱۴ درصد حجمی متان است، قابل احتراق می‌باشد. احتراق چنین ترکیباتی به طور مکرر در معادن زغال سنگ باعث به وجود آمدن بسیاری از فجایع معدنی می‌شوند.

منبع اصلی متان گاز طبیعی می باشد که بسته به نوع منبع شامل ۵۰ تا ۹۰ درصد متان می باشد. تولید متان از طریق تقطیر تخریبی زغال سنگ و همچنین کربن دار کردن زغال سنگ در مکان هایی که گاز طبیعی فراوان نیست، مهم می باشد.

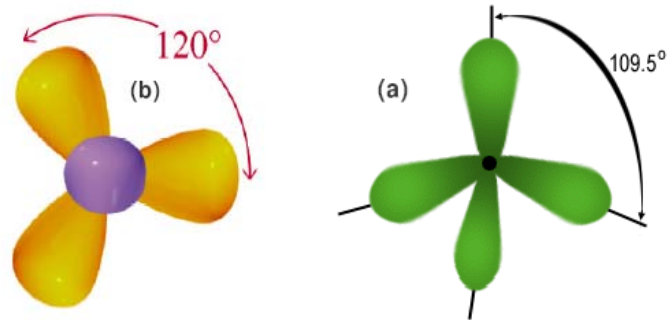
از آن جایی که گاز طبیعی تجارتي از مقدار زیادی متان تشکیل شده است، شاید استفاده از آن برای تمام مقاصد عملی مشخص باشد. به خاطر فراوانی، ارزان بودن، سهولت حمل و نقل و پاکي، این گاز به عنوان سوخت در منازل، تأسیسات تجاری و کارخانه ها استفاده می شود.

متان یکی از مهم ترین منابع هیدروژن و بعضی مواد شیمیایی آلی می باشد و در دماهای بالا با بخار آب واکنش می دهد و مونوکسید کربن و هیدروژن تولید می کند. از این گاز در کارخانه تولید آمونیاک برای تهیه کود شیمیایی و مواد منفجره استفاده می شود. از دیگر مشتقات شیمیایی با ارزش متان، متانول، کلروفرم، تتراکلرید کربن و نیترومتان می باشند. احتراق ناقص متان باعث تولید کربن سیاه می شود که به طور وسیعی در لاستیک های تایر اتومبیل به عنوان یک عامل تقویتی استفاده می شود [۵].

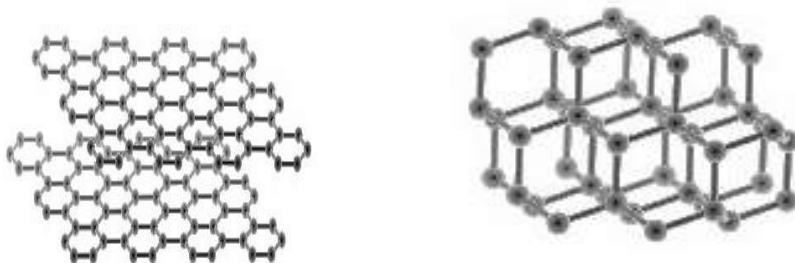
۱-۴- نانولوله‌ی کربنی

کربن یکی از فراوان ترین عناصر تشکیل دهنده جهان پیرامون ماست. تا سال ۱۹۸۵ تنها مواد ساختاری شناخته شده از کربن عبارت بودند از گرافیت و الماس. تفاوت بسیار شدید در خواص این دو ماده، ناشی از تفاوت در نوع پیوند اتم های کربن در آنها می باشد. اتم های کربن در الماس با هیبرید SP^3 به یکدیگر متصل شده اند و لذا هر اتم کربن با چهار اتم دیگر در ارتباط است. اما هیبرید اتم های کربن در ساختار گرافیت بصورت SP^2 بوده و هر کربن با سه اتم کربن دیگر در ارتباط است. شکل هیبریدی پیوند های اتمی الماس و گرافیت در شکل ۱-۱ رسم شده اند.

اتم های کربن در ساختار گرافیت بصورت ورقه هایی روی یکدیگر قرار دارند و عدم وجود پیوند بین این ورقه ها موجب لغزندگی آنها نسبت به یکدیگر می گردد. ساختارهای الماس و گرافیت در شکل های ۱-۲ و ۱-۳ نشان داده شده اند.



شکل ۱-۱: پیوندهای اتمی در (a) الماس ، (b) گرافیت [۶]

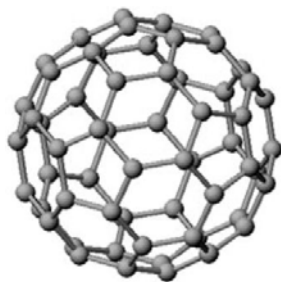


شکل ۲-۱: ساختار اتم‌های کربن در الماس [۶] شکل ۳-۱: ساختار اتم‌های کربن در گرافیت [۶]

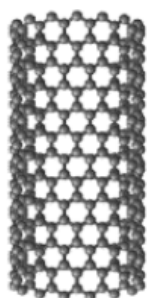
در سال ۱۹۸۵ ساختارهای جدیدی از کربن با نام باکی‌بال کشف شد [۷]. اتم‌های کربن در این ساختارها به صورت پنج و شش ضلعی به شکل‌های توپ مانند در می‌آیند. معروف‌ترین این ساختارها مولکول C_{60} است که حاوی ۶۰ اتم کربن می‌باشد. نوع هیبرید اتم‌ها در این ساختارها نیز بصورت SP^2 می‌باشد. شکل ۴-۱ نمونه‌ای از این ساختارها را نشان می‌دهد [۸].

در سال ۱۹۹۱ پروفیسور ایچیمیا متوجه ساختارهای جدیدی شد که فرم کشیده شده مولکول‌های فولرین بودند [۹]. این ساختارهای جدید با نام نانولوله‌های کربنی شناخته شدند.

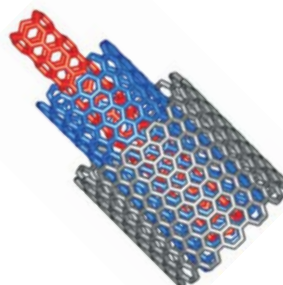
نانولوله‌های کربنی به دو گروه تک‌دیواره ($SWNT$) و نانولوله‌های چنددیواره ($MWNT$) تقسیم می‌شوند. انواع تک‌دیواره، حاصل رول شدن یک ورقه گرافیت بوده، چنددیواره‌ها به صورت لوله‌های تودرتو از انواع تک‌دیواره می‌باشند. شکل‌های ۱-۵ و ۱-۶ تصاویری از این ساختارها را نشان می‌دهند.



شکل ۱-۴: ساختار مولکولی فولرین [۸]



شکل ۱-۶: نانولوله کربنی تک دیواره [۱۰]



شکل ۱-۵: نانولوله کربنی چند دیواره [۱۰]

علت علاقه به نانولوله‌های کربنی تک‌دیواره و تلاش برای جایگزین کردن آنها در صنعت براساس محاسبات تئوری و تأییدات آزمایشگاهی بر خصوصیات عالی مکانیکی و رسانایی الکتریکی آنها مانند فلزات می‌باشد.

در دسترس و تجاری بودن نانولوله‌های کربنی چنددیواره باعث شده است که پیشرفت‌های بیشتری در این زمینه داشته باشیم. تاحدی که محصولاتی در آستانه تجاری شدن تولید شده است. به عنوان مثال از نانولوله‌های کربنی چنددیواره به‌عنوان جایگزین *Carbon-black* در پودرهای رنگ استفاده شده است. یکی از معایب نانولوله‌های چنددیواره نسبت به تک‌دیواره این است که استحکام‌دهی آنها کمتر می‌باشد زیرا پیوندهای صفحات داخلی ضعیف می‌باشند. در حال حاضر علت استفاده از نانولوله‌ها در پلیمرها بهبود خواص گرمایی و الکتریکی می‌باشد نه بهبود خواص مکانیکی آنها. بنابراین کاربرد نانولوله‌های کربنی چنددیواره بسیار زیاد می‌باشد.