

بسمه تعالی

مقدمه مؤلف

رشد فزاینده رقابت دانشجویان برای دستیابی به مراتب عالی و تحصیلات تکمیلی، اینجانب را بر آن داشت تا شرایط بهتری را برای آمادگی بیشتر شرکت‌کنندگان فراهم نمایم. در مجموعه حاضر که به همین منظور و با هدف آشنایی بیشتر شرکت‌کنندگان در کنکور، تهیه و تدوین گردیده است، سعی شده که تا حد ممکن دانشجویان عزیز را با جزئیات کامل درس و تست‌ها آشنا کند. مطالب درسی به شکل طبقه‌بندی شده همراه با تست‌ها و پاسخ‌های تشریحی در پانزده فصل ارائه شده است.

کلیه سوالات به تناسب امکان دستیابی مربوط به آزمون‌های سراسری کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، بیوتکنولوژی، فرآوری و انتقال گاز تا سال ۱۳۸۹ جمع‌آوری شده است. در پایان هر فصل برای خودآزمایی دانشجو آزمون همراه با پاسخ تشریحی آورده شده است. با عنایت به این که یقیناً این مجموعه بدون اشکال نخواهد بود، انتظار می‌رود که استادان محترم و دانشجویان عزیز و سایر علاقه‌مندان که کتاب حاضر را مطالعه می‌نمایند، نقطه نظرات اصلاحی و پیشنهادات خود را برای بهبود کیفی و کمی کار در چاپ‌های بعدی دریغ نفرمایند.

محمد سمیع پور گیری

فهرست مطالب

فصل اول: کلیات و تعاریف	۱
سؤال های چهارگزینه ای طبقه بندی شده فصل اول	۱۰
فصل دوم: نفوذ مولکولی در سیالات	۱۱
سؤال های چهارگزینه ای طبقه بندی شده فصل اول	۳۳
فصل سوم: ضرائب انتقال جرم	۴۵
سؤال های چهارگزینه ای طبقه بندی شده فصل اول	۶۵
فصل چهارم: انتقال جرم بین فازها	۷۳
سؤال های چهارگزینه ای طبقه بندی شده فصل اول	۹۶
فصل پنجم: دستگاههای مربوط به عملیات گاز - مایع	۱۰۳
سؤال های چهارگزینه ای طبقه بندی شده فصل اول	۱۳۴
فصل ششم: جذب گاز	۱۳۹
سؤال های چهارگزینه ای طبقه بندی شده فصل اول	۱۴۵
فصل هفتم: تقطیر	۱۵۳
سؤال های چهارگزینه ای طبقه بندی شده فصل اول	۲۱۳
فصل هشتم: استخراج مایع - مایع	۲۲۹
سؤال های چهارگزینه ای طبقه بندی شده فصل اول	۲۵۱
فصل نهم: تبخیر	۲۵۹
سؤال های چهارگزینه ای طبقه بندی شده فصل اول	۲۷۸

۲۸۳	..... فصل دهم: رطوبت‌دهی و رطوبت‌زدایی
۲۹۸	..... سؤال‌های چهارگزینه‌ای طبقه‌بندی شده فصل اول
۳۰۳	..... فصل یازدهم: خشک کردن Drying
۳۲۵	..... سؤال‌های چهارگزینه‌ای طبقه‌بندی شده فصل اول
۳۳۱	..... فصل دوازدهم: جذب سطحی Adsorption
۳۴۱	..... سؤال‌های چهارگزینه‌ای طبقه‌بندی شده فصل اول
۳۴۳	..... فصل سیزدهم: استخراج از جامد Leaching
۳۴۸	..... سؤال‌های چهارگزینه‌ای طبقه‌بندی شده فصل اول
۳۴۹	..... فصل چهاردهم: کریستالیزاسیون
۳۵۷	..... فصل پانزدهم: فیلتراسیون Filtration
۳۶۰	..... منابع

فصل اول

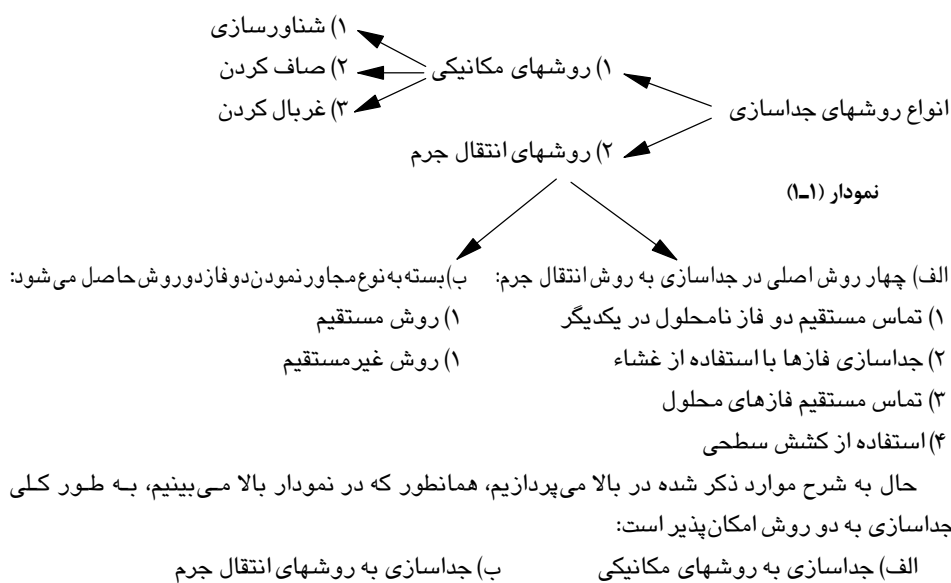
کلیات و تعاریف

بسیاری از عملیات مهندسی شیمی با تغییر غلظت در مخلوطها و محلولها همراه است که این تغییرات الزاماً توسط واکنشهای شیمیایی صورت نمی‌گیرد. این عملیات بیشتر در جداسازی مخلوطها به سازنده‌های آنها مربوط می‌شود.

همانطور که گفته شد بحث اصلی در انتقال جرم جداسازی می‌باشد. انتقال جرم در نتیجه اختلاف غلظت صورت گرفته و ماده نفوذکننده از محلی با غلظت بیشتر به محلی که دارای غلظت کمتری است منتقل می‌شود. البته لازم به ذکر است که عامل اصلی انتقال جرم اختلاف پتانسیل شیمیایی است و نه اختلاف غلظت که بعداً اشاره خواهد شد.

۱-۱- روشهای جداسازی

به منظور تسهیل یادگیری و جلوگیری از اشتباه، انواع مختلف روشهای جداسازی در نمودار زیر (نمودار ۱-۱) خلاصه شده است:



الف) جداسازی به روشهای مکانیکی (فیزیکی) Mechanical Separation

این روش به طریقی کاملاً مکانیکی و فیزیکی انجام می‌شود، مانند صاف کردن یک مخلوط معلق یا غربال کردن ذرات یک ماده برای تعیین سایز و...
مهمترین روشهای مکانیکی برای جداسازی عبارت‌اند از:
۱) شناورسازی (Floatation): مهمترین عامل در این روش اختلاف دانسیته دو فاز است، مثل جدا کردن گندم و شن ریزه بوسیله شناورسازی در آب.
۲) صاف کردن (Filtration): این روش بیشتر برای مخلوطهای دو یا چند فازی به کار می‌رود، مانند صاف کردن یک مخلوط معلق و جدا کردن چند جامد از مایع.
۳) غربال کردن (Screening): این روش بر مبنای تفاوت اندازه ذرات با یکدیگر است، مانند استفاده از الک برای جدا کردن ذرات درشت یک مخلوط.

ب) جداسازی به روشهای انتقال جرم (Mass Transfer Separation)

جداسازی به روشهای انتقال جرم به چهار دسته کلی زیر تقسیم می‌شود (همانطور که در نمودار (۱-۱) نیز مشخص است)
۱) تماس مستقیم دو فاز نامحلول در یکدیگر
۲) جداسازی فازها با استفاده از غشاء
۳) تماس مستقیم فازهای محلول
۴) استفاده از کشش سطحی

۱-۱-۱-۱-۱) تماس مستقیم دو فاز نامحلول در یکدیگر

این گروه نسبت به گروههای دیگر از اهمیت بیشتری برخوردار است و غالب عملیات انتقال جرم در این گروه قرار می‌گیرد.
معمولاً در این حالت از برقراری تعادل بین اجزا مختلف در دو فاز استفاده می‌گردد و به دلیل وجود سه فاز مختلف جامد، مایع، گاز، امکان مجاور شدن دو فاز به شش صورت زیر فراهم می‌شود:

۱) گاز-گاز

به جز در موارد استثنایی، تمام گازها به طور کامل با یکدیگر مخلوط شده و فرآیندهای متداول در صنعت در این گروه قرار نمی‌گیرند.

۲) گاز-مایع

در حالت کلی می‌توان عملیات جذب، دفع، رطوبت‌دهی و تقطیر جز به جز را در این گروه قرار داد و بسته به چگونگی توزیع سازندگان مخلوط در دو فاز سه حالت زیر بوجود می‌آید:
الف) اگر کلیه سازندگان یک سیستم در حال تعادل در هر دو فاز وجود داشته باشند، عمل را تقطیر جز به

جز (یا فقط تقطیر) می‌نامند. (مثل جداسازی آب و متانول)
مهمترین عامل در تقطیر، اختلاف نقطه جوش اجزا می‌باشد و فاز بخار در اثر حرارت دادن فاز مایع تولید می‌شود.

ب) ممکن است دو فاز به صورت محلول باشند و یک سازنده (یا گروهی از سازنده‌ها) بین دو فاز توزیع شوند که بسته به جهت انتقال نفوذکننده دو حالت زیر را داریم:

۱) اگر انتقال از فاز گاز به مایع صورت گیرد این عمل را جذب گازی (Gas absorption) گویند، مثل حل شدن آمونیاک موجود در هوا درون آب.

۲) اگر انتقال از فاز مایع به گاز باشد، این عمل را دفع گازی (Stripping) گویند. کاملاً مشهود است که تفاوت بین دو عمل جذب و دفع فقط مربوط به جهت انتقال نفوذکننده می‌باشد.

ج) اگر فاز مایع فقط از یک جز تشکیل شده باشد (خالص باشد) ولی فاز گاز دو یا چند سازنده‌ای باشد، عمل را رطوبت دادن (Humidification) و یا رطوبت‌گیری (Dehumidification)، (بسته به جهت انتقال نفوذ کننده) می‌نامند، مانند تماس هوای خشک با آب که بخشی از آب به درون هوا تبخیر می‌شود (رطوبت دادن هوا).

۳) گاز - جامد

عملیاتی مثل تصعید، خشک کردن، جذب سطحی و دفع سطحی در این گروه قرار می‌گیرند.
تقسیم بندی عملیات این گروه با توجه به تعداد سازنده‌هایی که در هر دو فاز ظاهر می‌شوند به شرح زیر است:

الف) اگر کلیه سازندگان در هر دو فاز جامد و گاز موجود باشند، که خود به دو دسته تقسیم می‌شوند:
۱) اگر انتقال از فاز جامد به گاز (مثل تبخیر یک جامد متشکل از چند سازنده) باشد به نحوی که فاز مایعی ظاهر نشود، فرآیند را تصعید جز به جز (Fractional Sublimation) گویند.

۲) اگر انتقال از فاز گاز به جامد باشد و سازندگان از فاز گاز با مقادیر متفاوت بر روی جامد جذب شوند، فرایند را جذب سطحی گویند.

ب) اگر کلیه سازندگان در دو فاز موجود نباشند، با توجه به جهت انتقال دو حالت زیر را داریم،
۱) اگر انتقال از فاز جامد به گاز صورت گیرد، آن را دفع سطحی (Desorption) گویند که فرآیند خشک کردن (Drying) نیز در این گروه قرار می‌گیرد.

تفاوت فرآیند خشک کردن (Drying) با دفع سطحی در این است که در فرآیند خشک کردن علاوه بر انتقال ماده قابل انتقال از سطح جامد به فاز گاز (همانند دفع سطحی) انتقال از بطن (درون) ماده به سطح نیز صورت می‌گیرد.

۲) اگر انتقال از فاز گاز به فاز جامد صورت گیرد، این عمل را جذب سطحی (Adsorption) گویند.
در این گروه (گاز - جامد) هنگامی که فاز گاز یک بخار خالص است، مانند تصعید یک جامد فرار از یک مخلوط حاوی یک جسم غیر فرار، عمل بیشتر به حرارت دادن به مخلوط بستگی پیدا می‌کند تا به اختلاف غلظت و اساساً از نوع نفوذی خواهد بود.

۴) مایع - مایع

استخراج مایع - مایع یا استخراج از مایعات (Liquid - Liquid Extraction) در این گروه قرار می‌گیرد. به عملیات جداسازی که در آنها دو فاز نامحلول با یکدیگر تماس داده می‌شوند، استخراج مایع گفته می‌شود (مانند جدا کردن محلول استن - آب بوسیله تتراکلرید کربن). فرایندی که در آن از یک محلول تک فاز در اثر سرد کردن و رسانیدن آن به زیر نقطه بحرانی دو فاز مایع تولید می‌شود (که غلظت‌های دو فاز با هم متفاوت است)، استخراج جز به جز (Fractional - Extraction) گویند.

به عنوان مثال دیگری برای استخراج جز به جز می‌توان از افزودن محلولی از اسید استیک و استن به مخلوط ناهمگون آب و تتراکلرید کربن نام برد که پس از تکان دادن و جداسازی، دو فاز دیده می‌شود که استن و اسید استیک در هر دو فاز ولی با نسبت‌های مختلفی وجود دارند.

۵) مایع - جامد

عملیاتی چون کریستالیزاسیون، تصفیه منطقه‌ای و لیچینگ در این گروه قرار می‌گیرند. تقسیم بندی عملیات این گروه به شرح زیر است:

الف) اگر کلیه سازنده‌ها (اجزا) در دو فاز موجود بوده و در حالت تعادل نیز باشند، عمل را تبلور جز به جز (Fractional Crystallization) گویند که از مثال‌های این گروه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ۱) تصفیه منطقه‌ای (Zone refining)، به منظور بدست آوردن فلزات بسیار خالص و یا نیمه هادی‌ها.
- ۲) تبلور همراه با مواد اضافی (Adductive Crystallization).

ب) اگر کلیه سازندگان در دو فاز نباشند با توجه به جهت انتقال داریم:

- ۱) اگر انتقال از فاز مایع به جامد صورت گیرد فرآیند را جذب سطحی (Adsorption) گویند.
- ۲) اگر انتقال از فاز جامد به مایع صورت گیرد، که مهمترین حالت آن، جداسازی انتخابی یک سازنده از یک مخلوط جامد توسط یک حلال مایع است، فرایند را Leaching گویند. (مثل جداسازی روغن از پنبه دانه بوسیله هگزان).

۶) جامد - جامد

چون شدت انتقال جرم و نفوذ، در فازهای جامد فوق العاده کند است، هیچ نوع عملیات صنعتی در این گروه قرار نمی‌گیرد.

۱-۲-۱- جداسازی فازها با استفاده غشاء

نقش مهم غشاءها جلوگیری از مخلوط شدن دو فاز محلول در یکدیگر است. وجود غشاء باعث جداسازی مواد از یکدیگر در اثر کنترل راه عبور سازنده‌ها از یک سو به سوی دیگر غشاء می‌گردد. استفاده از این روش معمولاً برای سه حالت زیر امکان پذیر است:

الف) گاز-گاز

برای اینحالت دو روش داریم:

۱) روش نفوذ گازی، که غشاء مورد استفاده دارای تخلخل بسیار ریز است و اگر یک مخلوط گاز که دارای سازنده‌های مختلفی با جرم مولکولی‌های متفاوت است با چنین غشایی تماس داشته باشد، سازنده‌های مخلوط با شدتهای گوناگونی که بستگی به جرم مولکولی آنها دارد، از درون غشاء عبور خواهند نمود. بدین جهت غلظت سازنده‌ها در دو طرف غشاء متفاوت خواهد شد. جداسازی ایزوتوپیهای اورانیوم در مقیاس بزرگ به همین ترتیب انجام می‌پذیرد.

۲) فرآیند تراوش (Permeation)، که غشاء مورد استفاده دارای تخلخل نیست و گاز هنگام عبور از غشاء ابتدا درون آن حل شده و سپس نفوذ می‌نماید. جدا سازی در اینحالت در اثر اختلاف حلالیت سازنده‌ها انجام خواهد شد. هلیوم را از گاز طبیعی به همین طریق جدا می‌کنند (بوسیله غشاهایی از نوع پلیمرهای فلور و کربن).

ب) گاز-مایع

در این حالت از تراوایی اجسام استفاده می‌شود، مثل جداسازی آب و الکل با یک غشاء مناسب غیر متخلخل که الکل را در خود حل می‌کند و در سمت دیگر غشاء، الکل تبخیر می‌شود.

ج) مایع-مایع

عملیاتی چون دیالیز، دیالیز جز به جز، الکترو دیالیز، اسمز و اسمز معکوس در این گروه قرار می‌گیرند که شرح مختصری در مورد هر یک از عملیات بالا را مشاهده می‌کنید:

دیالیز: جدا سازی یک جسم بلوری از یک محلول کلونیدی با استفاده از یک حلال مایع و غشایی که بتوانند فقط بلورهای حل شده را در حلال فوق از خود عبور دهد انجام می‌پذیرد که به این عمل دیالیز گویند.

دیالیز جز به جز: برای جداسازی دو جسم بلوری از یک مخلوط مایع مورد استفاده قرار می‌گیرد که در آن اختلاف تراوایی اجسام از غشاء، جدا سازی را امکان‌پذیر می‌سازد.

الکترو دیالیز: فرآیندی است که در آن یک نیروی محرکه الکترونیکی سبب نفوذ ذرات باردار از غشاء می‌شود.

اسمز: فرآیندی است که در آن حلال را از محلولی که در آن است با استفاده از غشایی که فقط بتواند حلال را از خود عبور دهد، جدا می‌کنند.

اسمز معکوس: اگر با استفاده از فشاری مخالف و غالب بر فشار اسمزی جریان حلال را معکوس نمود و حلال و حل شونده را بدین ترتیب از یکدیگر جدا کرد، به آن اسمز معکوس می‌گویند (مثل شیرین کردن آب دریا).

۱-۳-۱- تماس مستقیم فازهای محلول

عملیاتی مثل نفوذ حرارتی، نفوذ جارویی و Atmolysis در این گروه قرار می‌گیرند که استفاده از این

روشها در صنعت به علت مخلوط شدن سیالات و حفظ گرادیان غلظت آنها و مشکلاتی که به این دلیل به وجود می آید، بسیار کم است.

شرح مختصری در مورد هر یک از این فرآیندها را مشاهده می کنید:

۱- نفوذ حرارتی (Thermal diffusion): در این فرایند گرادیان غلظت در یکی از فازهای گاز یا مایع در اثر به وجود آمدن اختلاف درجه حرارت در سیستم حاصل می شود و بدین ترتیب جدا سازی نسبی سازه ها امکان پذیر می شود (مثل جداسازی ^3He از ^4He).

۲- نفوذ جارویی (Sweep diffusion): در این عملیات یک بخار قابل میعان مانند بخار آب را از درون یک مخلوط گاز می گذرانند که می تواند ترجیحاً یکی از سازه های مخلوط گاز را جدا کند. زیرا این جز از مخلوط گاز داخل بخار آب شده (جذب می شود) و با آن خارج می شود.

۳- Atmolysis: اگر دو منطقه از یک فاز گاز با غلظتهای متفاوت را با استفاده از غربالی با منافذ نسبتاً درشت جدا کنیم فرآیند را Atmolysis گویند.

۴- روش دیگر جداسازی در این گروه، قرار دادن یک مخلوط گازی تحت تأثیر نیروی گریز از مرکز است که به جهت اختلاف جرم مولکولی اجزا مختلف مخلوط، نیروی وارده بر آنها متفاوت بوده و در نتیجه مولکولهای سنگین و سبک از هم جدا می شوند (مثل جداسازی ایزوتوپهای اورانیوم).

۴-۱-۱- استفاده از کشش سطحی

در این روش از موادی استفاده می شود که با حل شدن در یک مایع ایجاد محلولی با کشش سطحی کمتری می کند و وقتی این محلول در تماس با یک گاز قرار می گیرد، غلظت در سطح مایع افزایش یافته و به این طریق جداسازی صورت می گیرد. مثل جداسازی مواد شوینده از آب که با روش جداسازی با ایجاد کف امکان پذیر است، به این ترتیب که در اثر دمیدن هوا به درون محلول و جمع آوری کف می توان جسم حل شده را تغلیظ نمود.

۲-۱- عملیات مستقیم و غیر مستقیم

جداسازی به روشهای انتقال جرم با توجه به نوع مجاور نمودن (تماس) دو فاز به دو نوع مستقیم و غیر مستقیم تقسیم می شود.

در اعمال مستقیم در اثر افزایش یا کاهش حرارت، دو فاز از یک فاز اولیه بدست می آید. تقطیر جزئی، تبلور جزئی و نوعی از استخراج جزئی از این گونه هستند.

در عملیات غیر مستقیم یک جسم خارجی بر سیستم افزوده می شود، مانند جذب گاز، دفع گاز، خشک کردن، استخراج از جامدات، استخراج از مایعات و انواع خاص تبلور جزئی.

ویژگی خاص عملیات مستقیم آن است که محصولات به طور مستقیم و عاری از مواد افزوده شده بدست می آیند. پس اگر محصولات به صورت خالص مورد نیاز باشد استفاده از روش مستقیم ارجح است، زیرا در روش غیر مستقیم مشکلاتی به دلیل هزینه های بازیابی مجدد جسم افزوده شده به سیستم و هم چنین جدا نشدن آن به طور کامل وجود دارد. هم چنین افزایش یک ماده خارجی به سیستم ممکن است مسائل مربوط به

خوردگی دستگاهها را هم تشدید کند.

عملیات غیر مستقیم زمانی بر عملیات مستقیم ترجیح داده می‌شود که جداسازی با استفاده از روش مستقیم امکان‌پذیر نباشد یا ماده جدا شده به صورت خالص مورد نیاز نباشد و یا هزینه‌های جداسازی به روش غیر مستقیم کمتر باشد.

۳-۱- عملیات پایا و ناپایا

۱-۳-۱- عملیات ناپایا (ناپایدار)

در عملیات ناپایا، در هر نقطه‌ای از سیستم (دستگاه) غلظتها با زمان تغییر می‌کند. حالت ناپایا ممکن است در اثر تغییرات مواد حاصله در خوراک، شدت جریانها و یا تغییرات دما و فشار ایجاد شود. مهمترین ویژگی عملیات ناپایا تغییر غلظت هر نقطه از سیستم با زمان است. عملیات ناپیوسته (بسته یا Batch) و نیمه پیوسته (Semi Batch) همواره جز عملیات ناپایا محسوب می‌شوند.

۲-۳-۱- عملیات پایا

از ویژگیهای عملیات پایا، ثابت بودن غلظت در هر نقطه‌ای از دستگاه با گذشت زمان است، لذا به این منظور باید شدت جریانها مداوم و ثابتی به درون سیستم و بالعکس داشته باشیم. هم چنین باید رژیم جریان، غلظت اجزا در جریانهای خوراک، فشار و درجه حرارت ثابت باشند (با زمان تغییر نکنند).

۴-۱- نحوه تماس فازها

در حالت کلی نحوه تماس فازها به دو گونه عملیات مرحله‌ای (Stage - Wise) و عملیات تماس پیوسته (دیفرانسیل) می‌باشد که مهمترین عامل در انتخاب هر یک از این دو روش بازده مرحله‌ای می‌باشد.

۱-۴-۱- عملیات مرحله‌ای

چنانچه دو فاز نامطلوب در تماس با یکدیگر قرار گیرند، مواد مختلف در دو فاز توزیع متفاوتی خواهند داشت. حال اگر فازها را به طریقه مکانیکی از یکدیگر جدا کنیم، این عمل را انتقال جرم در یک مرحله می‌نامند. عملیات مرحله‌ای هم به صورت مداوم (پایا) و هم به صورت ناپیوسته انجام‌پذیر است. معیار ارزیابی هر مرحله، نزدیکی آن به حالت تعادل است، بدین معنی که اگر جریانهای خروجی از هر مرحله در حالت تعادل با یکدیگر باشند، آن مرحله را یک مرحله تعادلی یا ایده‌آل یا تئوری گویند. بدیهی است که در یک مرحله تعادلی زمان تماس بیشتر سبب تغییر بیشتر غلظت نخواهد گردید. میزان نزدیکی به تعادل در هر مرحله را بازده (efficiency) گویند.

۲-۴-۱- عملیات تماس پیوسته (دیفرانسیلی)

در این حالت فازها به صورت مداوم در دستگاه با یکدیگر تماس حاصل می‌نمایند و جز عملیات پایا محسوب می‌شوند. در اعمال تماس پیوسته، امکان رسیدن دو فاز به حالت تعادل در هیچ جایی از دستگاه

وجود ندارد. در واقع اگر تعادل در هر محلی از سیستم برقرار گردد بدین معنی است که معادل با بینهایت مرحله تعادلی عمل می‌کند.

تفاوت بین عملیات مرحله‌ای و تماس پیوسته

در اعمال مرحله‌ای انتقال جرم بین دو فاز سبب کاهش اختلاف غلظت بین آنها می‌شود و با افزایش زمان تماس، تعادل بین دو فاز برقرار خواهد شد که پس از برقراری تعادل، نفوذ بین دو فاز متوقف خواهد شد. در اینحالت شدت نفوذ و زمان، تعیین کننده بازده هر مرحله خواهد بود. ولی در عملیات تماس پیوسته، دو فاز همواره از حالت تعادل دور بوده و نفوذ بین فازها به طور مرتب و در سرتاسر سیستم (دستگاه) انجام می‌گیرد.

۵-۱- اصول طراحی

در طراحی هر واحد مربوط به انتقال جرم، چهار عامل اصلی زیر بایستی مشخص باشند:

۱-۵-۱- تعداد مراحل ایده‌آل یا معادل آنها

تعداد مراحل با استفاده از مشخصات تعادلی سیستم و موازنه‌های جرم بدست می‌آید.

۲-۵-۱- زمان لازم برای تماس فازها

در عملیات مرحله‌ای، زمان تماس دو فاز به بازده مرحله‌ای مربوط می‌شود، در حالیکه در عملیات تماس پیوسته، زمان تعیین کننده حجم و یا طول دستگاه خواهد بود.

۳-۵-۱- شدت جریانهای مجاز

تعیین شدت جریانهای مجاز در عملیات نیمه پیوسته و پایا (پیوسته) مطرح می‌شود که بوسیله آن سطح مقطع دستگاه محاسبه می‌شود.

۴-۵-۱- انرژی‌های مورد نیاز

انرژی به دو صورت زیر تقسیم بندی می‌شود:

(۱) حرارتی:

جهت تولید فازهای جدید (مثل تبخیر) و تأمین اثرات گرمای انحلال و ...

(۲) مکانیکی:

برای انتقال سیالات و جامدات و پخش کردن مایعات و گازها و ...

۶-۱- نفوذ و انتقال جرم

دیدیم که در اغلب عملیات انتقال جرم، جدا سازی سازنده‌های یک فاز به کمک تماس آن فاز با یک فاز

نامحلول در آن، صورت می‌پذیرد. بنابراین به منظور جداسازی سازنده‌های یک فاز، باید اختلاف غلظت‌های در حالت تعادل دو فاز را مدنظر قرار داد. البته مقادیر مربوط به ضرایب انتقال جرم نیز دارای اهمیت زیادی هستند زیرا که کنترل کننده سرعت رسیدن به تعادل می‌باشند و این ضرایب، زمان لازم برای جدا سازی را کنترل نموده و لذا ابعاد و هزینه دستگاه‌های لازم را تعیین می‌نماید.

۷-۱- برخی نکات مهم فصل اول

- ۱) در حالت کلی انتقال از فاز سیال (مایع یا گاز) به فاز جامد را جذب سطحی (Adsorption) گویند.
- ۲) در جدا سازی فازها با استفاده از غشاء، برای حالت گاز - گاز، نفوذ گازی در اثر اختلاف اندازه مولکولهای مخلوط گاز صورت می‌گیرد، ولی فرآیند تراوش در اثر اختلاف حلالیت سازنده‌ها در غشاء اتفاق می‌افتد.
- ۳) تفاوت فرآیند شناور سازی با جدا سازی با ایجاد کف در این است که فرآیند شناور سازی (Filtration) در عملیات معدنی به منظور جدا سازی مواد جامد نامحلول از دوغاب (Slurry) به کار می‌رود.
- ۴) با استفاده از اعمال مکانیکی برای جدا سازی، مواد خالص بدست می‌آیند، در صورتیکه اگر از عملیات انتقال جرم برای جدا سازی استفاده شود، محصول اغلب با جسم دیگری همراه خواهد بود.
- ۵) معیار اصلی انتخاب بهترین روش جدا سازی، هزینه است.
- ۶) انتخاب روش مناسب از بین دو روش بازیابی جز حل شده (Solute - recovery) و یا تفکیک جز به جز، بستگی به خواص فیزیکی سازندگان مخلوط خواهد داشت.
- ۷) فرآیندها در مهندسی شیمی یا به صورت بسته (Batch) انجام می‌شوند یا پیوسته (Continious) فرآیند Batch، فرآیندی ناپایدار است، یعنی در سیستم، تغییرات با زمان داریم و برای ظرفیتهای کم (کمتر از $\frac{1b}{year} \times 10^7$)، یا داشتن محصولات فصلی و خوردگی زیاد مواد، مورد استفاده قرار می‌گیرد. در حالیکه فرآیند پیوسته، فرآیندی پایا می‌باشد، یعنی در هیچ نقطه‌ای از سیستم تغییرات با زمان نداریم و برای ظرفیتهای بالا به کار می‌رود.
- ۸) شدت انتقال جرم بین فازها بستگی به دور بودن سیستم از وضعیت تعادلی، خواص فیزیکی فازها و رژیم جریان دارد.
- ۹) به مقدار متوسط مسافتی که یک مولکول طی می‌کند تا با مولکول دیگر برخورد نماید، مسیر آزاد متوسط مولکول (mean free path) گفته می‌شود.

[سؤال‌های چهارگزینه‌ای طبقه‌بندی شده فصل اول]

- ۱- فرایند Elution عبارتست از: (سراسری - ۸۷)
- (۱) فرایند Absorption به صورت شیمیایی
 - (۲) فرایند Desorption به کمک حلال
 - (۳) فرایند Stripping به صورت شیمیایی
 - (۴) فرایند Adsorption در حضور حلال در یک محلول آبی
- ۲- اگر یک مخلوط مایع A و B با ویسکوزیته زیاد داشته باشیم، کدام یک از روش‌های زیر، برای جداسازی A و B مناسب‌تر و آسان‌تر می‌باشد؟ (سراسری - ۸۹)
- (۱) جذب سطحی
 - (۲) تقطیر
 - (۳) استخراج مایع - مایع
 - (۴) تبخیر

[پاسخ سؤال‌های چهارگزینه‌ای طبقه‌بندی شده فصل اول]

- ۱- گزینه «۲» صحیح است.
 - ۲- گزینه «۳» صحیح است.
- در فرآیند استخراج می‌توان با پراکندن (dispersing) فاز ویسکوز تا حدی اثر ویسکوزیته را از بین برد. در حالیکه در سایر روش‌ها این امکان به سادگی وجود ندارد.

فصل دوم

نفوذ مولکولی در سیالات

۱-۲- تعاریف

نفوذ مولکولی در اثر حرکت مولکولهای یک جسم و بعثت وجود انرژی حرارتی انجام می پذیرد. پدیده نفوذ مولکولی در نهایت منجر به یکنواخت شدن غلظت در سرتاسر یک مخلوط می گردد. مسافت خالصی را که مولکول در زمان معین و در جهت معین طی می کند، شدت نفوذ نامیده می شود. نیروی محرکه واقعی برای نفوذ (انتقال جرم) ضریب فعالیت یا پتانسیل شیمیایی می باشد نه غلظت. بنابراین برابری پتانسیل شیمیایی باعث توقف عمل نفوذ و برقراری تعادل خواهد شد.

۲-۲- نفوذ در سیالات

در حالت کلی دو مکانیزم برای نفوذ وجود دارد:
(۱) نفوذ مولکولی (Molecular Diffusion)
(۲) حرکت توده ای سیال یا نفوذ در اثر حرکت توده (Bulk flow)
در یک سیستم هر دو مکانیزم نفوذ به صورت همزمان می تواند وجود داشته باشند (ممکن است با هم، هم جهت یا در خلاف جهت هم باشند).

۱-۲-۲- نفوذ مولکولی

مکانیزم انتقال جرم در سیالات ساکن و یا سیالاتی که جریان آرام دارند از طریق نفوذ مولکولی می باشد.

۲-۲-۲- حرکت توده

در این حالت حتماً باید سیال حرکت کند. حرکت توده، بواسطه اختلاط، همزدن و... می تواند بوجود آید.

۳-۲- محاسبه شار انتقال جرم و سرعت متوسط مولی مخلوط

در انتقال جرم تغییرات مول وجود دارد، که شار آن بیانگر تغییرات مول بر واحد سطح و زمان است. از این رو شدت نفوذ مولکولی را می توان برحسب شار مولی (Molar flux) بیان کرد (در اینجا سطح عمود بر جهت نفوذ، مدنظر است).

برای نشان دادن حرکت هر سازنده دو نوع شار خواهیم داشت:

(۱) شار نسبت به محل مشخصی از فضا که آن را با N نشان می دهیم.

(۲) شار یک سازنده نسبت به سرعت مولی متوسط کلیه سازنده های دیگر، که آن را با J نشان می دهند.

از شار N در طراحی دستگاه‌ها استفاده می‌شود ولی شار \dot{z} بیشتر به طبیعت آن سازنده بستگی خواهد داشت.

مولکولها در یک مخلوط دارای سرعت ثابتی هستند که در اثر برخورد با مولکولهای دیگر مسیر و سرعتشان تغییر می‌کند. اگر سرعت تک تک اجزاء را با هم جمع کرده و بر تعداد مولکولها تقسیم کنیم، یک سرعت متوسط مولکولی حاصل می‌شود. چنانچه در یک مخلوط جزء i را در نظر بگیریم سرعت متوسط مولکولی آن را با V_i و غلظت آن را C_i نشان می‌دهند حاصلضرب سرعت در غلظت $(V_i.C_i)$ ، کل نفوذ یا فلاکس مولی (شدت مول از واحد سطح و زمان) را نشان می‌دهد که آن را با N_i نشان می‌دهیم:

$$N_i = C_i V_i$$

که N_i فلاکس مولی بوده و برابر مجموع نفوذ مولکولی و حرکت توده است و نسبت به دستگاه مختصات ساکن است. N_i تابع زمان بوده و برای یک نقطه از مکان نوشته می‌شود. (پس تابع مکان نیز می‌باشد).

برای یک سیستم متشکل از دو جزء A و B می‌توان نوشت:

$$N_A = C_A V_A$$

نفوذ کل جزء A برابر است با:

$$N_B = C_B V_B$$

نفوذ کل جزء B برابر است با:

$$N_A + N_B = N$$

شار (نفوذ) کلی سیستم در حالت پایا برابر است با:

$$\Rightarrow C_A V_A + C_B V_B = C.u$$

u سرعت متوسط مولی مخلوط است که توضیحات آنرا خواهید دید.

از آنجا که میزان عبور یک سازنده از یک نقطه معین است، ولی اندازه سرعت تک تک مولکولها مشخص نمی‌باشد، برای محاسبه سرعت هر جزء باید از رابطه زیر استفاده کرد:

$$V_i = \frac{N_i}{C_i}$$

که در نتیجه برای کل اجزاداریم:

$$u = \frac{\sum N_i}{\sum C_i} = \frac{\sum C_i V_i}{C} = \sum x_i V_i \quad \text{یا} \quad \sum y_i V_i$$

که در رابطه بالا $\sum C_i = C$ غلظت کل و x_i یا y_i بیانگر جزء مولی سازنده i در مخلوط است.

توجه به این نکته بسیار مهم است که حتماً باید برای V_i (سرعت مولی جزء i) جهت خاصی در نظر گرفته شود و همه پارامترهای جهت‌دار نسبت به آن جهت سنجیده شود.

مثال: مطلوب است محاسبه سرعت مولی متوسط مخلوطی در جهت چپ، در صورتیکه مخلوط متشکل از دو جزء A و B با جزء مولی $0/2$ و $0/8$ باشد (چنانچه جزء A با سرعت $5 \frac{m}{S}$ به سمت راست، و جزء B با سرعت $6 \frac{m}{S}$ به سمت چپ حرکت کند).

$$x_A = 0/2$$

$$x_B = 0/8$$

$$V_A = -5 \frac{m}{S}$$

چون حرکت به سمت چپ، مثبت در نظر گرفته می‌شود پس:

$$V_B = 6 \frac{m}{S}$$

در نتیجه داریم:

$$u = \sum x_i V_i \Rightarrow u = x_A V_A + x_B V_B$$

$$\Rightarrow u = 0/2(-5) + 0/8(6) = 3/8 \frac{m}{s}$$

یعنی سرعت متوسط مولی مخلوط برابر $3/8 \frac{m}{s}$ و به طرف چپ می باشد.

نکته: اگر بخواهیم سرعت متوسط جرمی را محاسبه کنیم جزء مولیها را به جزء جرمی تبدیل کرده و در رابطه بالا جاگذاری می کنیم.

همانطور که قبلاً گفته شد، شار انتقال جرم برای جزء A برابر است با تعداد مولهای A که در واحد زمان از

واحد سطح عبور می کند، یعنی:

$$N_A = C_A V_A$$

با افزودن و کاستن ترم $C_A u$ به این معادله داریم:

$$N_A = C_A V_A + C_A u - C_A u$$

$$\Rightarrow N_A = C_A (V_A - u) + C_A u$$

که:

$C_A u$ بیانگر سهمی از شار است که بواسطه حرکت توده ای سیال انجام می شود و $C_A (V_A - u)$ بیانگر

سهمی از شار است که بواسطه نفوذ مولکولی حاصل می شود (جزء A نسبت به بک یک سرعت نسبی دارد

که این پارامتر، منجر به نفوذ می شود) و آن را با J_A نشان می دهیم یعنی:

$$J_A = C_A (V_A - u)$$

حال برای بدست آوردن J_A از قانون اول فیک استفاده می کنیم.

۲-۴- قانون اول فیک

اولین کسی که در زمینه نفوذ مولکولی روابطی را ارائه کرد فیک بود. فیک نشان داد که نفوذ مولکولی با

اختلاف غلظت، نسبت مستقیم و با فاصله بین دو نقطه، نسبت عکس دارد، یعنی:

$$J_A \propto \frac{dC_A}{dZ}$$

برای تبدیل این رابطه به تساوی، از ضریب ثابتی به نام ضریب نفوذ (diffusion coefficient)

استفاده می کنیم و آنرا با D_{AB} نشان می دهیم که شاخصی از قدرت نفوذ است. (D_{AB} معیار سهولت نفوذ یک

سازنده درون مخلوط است). لذا قانون اول فیک را می توان به صورت زیر نوشت:

$$J_A = -D_{AB} \frac{dC_A}{dZ} = -CD_{AB} \frac{dx_A}{dZ}$$

$$J_A: \text{ نفوذ مولکولی } \left(\frac{\text{mol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right)$$

$$D_{AB}: \text{ ضریب نفوذ } \left(\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right)$$

$$\left(\frac{\text{mol}}{\text{m}^3} \right): \text{ گرادیان غلظت یک سازنده نسبت به فاصله } \frac{dC_A}{dZ}$$

علامت منفی در رابطه فوق مشخص کننده آن است که نفوذ در جهتی که غلظت کاهش می یابد، انجام می شود.

شار مولی نیز مانند انتقال حرارت هدایتی یک بردار است. یعنی می توان نوشت:

$$J_A = J_{Ax} + J_{Ay} + J_{Az} = -D_{AB} \left(\frac{\partial C_A}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial C_A}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial C_A}{\partial z} \vec{k} \right)$$

همانطور که گفته شد نفوذ کل جزء A به واسطه نفوذ مولکولی و توده می باشد، یعنی:

$$N_A = J_A + C_A u = J_A + x_A \sum N_i$$

برای یک مخلوط دو جزئی داریم:

$$N_A = (N_A + N_B) x_A - D_{AB} \frac{dC_A}{dZ} \quad (1) \text{ برای جزء A}$$

$$N_B = (N_A + N_B) x_B - D_{BA} \frac{dC_B}{dZ} \quad (2) \text{ برای جزء B}$$

از حاصل جمع دو رابطه فوق داریم:

$$-D_{AB} \frac{dC_A}{dZ} = D_{BA} \frac{dC_B}{dZ} \quad (3)$$

$$\Rightarrow J_A = -J_B \Rightarrow J_A + J_B = 0$$

که از رابطه بالا می توان نتیجه گرفت که مجموع شارهای نفوذی در یک سیستم برابر صفر است.

$$\sum J_i = 0$$

حال اگر غلظت کل مقدار ثابتی باشد داریم:

$$C_A + C_B = C = C_{te}$$

$$\Rightarrow \frac{dC_A}{dZ} + \frac{dC_B}{dZ} = 0 \Rightarrow \frac{dC_B}{dZ} = -\frac{dC_A}{dZ}$$

با توجه به نتیجه بدست آمده از فرض ثابت بودن غلظت کل، به این نتیجه می رسیم که ضرایب نفوذ نیز با

یکدیگر برابر می شوند، یعنی:

$$D_{AB} = D_{BA}$$

۵-۲- معادله پیوستگی

چنانچه یک المان حجمی سیال در حال حرکت را در نظر بگیریم و موازنه ماده را برای آن بنویسیم، داریم:

Consumption (مصرف) - Generation (تولید) + Output (خروجی) - Input (ورودی)

= Accumulation (تجمع)

$$\dot{n}_{Ax} + \dot{n}_{Ay} + \dot{n}_{Az} - (\dot{n}_{A_{x+dx}} + \dot{n}_{A_{y+dy}} + \dot{n}_{A_{z+dz}}) - R_A dx dy dz = \frac{\partial n_A}{\partial t}$$

در بالا فرض بر این است که تولید نداشته و مصرف طبق واکنش با سرعت R_A داریم که واحد R_A مول بر واحد حجم و زمان مثلاً $\frac{\text{mol}}{\text{lit.S}}$ است و به همین دلیل در حجم ضرب می‌شود تا واحدها در معادله بالا یکسان شوند.

طبق بسط اولر داریم:

$$f_{x+dx} = f_x + \frac{\partial f_x}{\partial x} \cdot dx \Rightarrow \dot{n}_{A_{x+dx}} = \dot{n}_{A_x} + \frac{\partial \dot{n}_{A_x}}{\partial x} \cdot dx$$

با توجه به تعریف فوق برای سایر جهات داریم:

$$- \left[\frac{\partial \dot{n}_{A_x}}{\partial x} dx + \frac{\partial \dot{n}_{A_y}}{\partial y} \cdot dy + \frac{\partial \dot{n}_{A_z}}{\partial z} \cdot dz \right] - R_A dx dy dz = \frac{\partial (C_A \cdot dx dy dz)}{\partial t}$$

لازم به ذکر است که از روابط $n_A = C_A \cdot V$ استفاده شده است.

\dot{n}_A بیانگر مول بر ثانیه و برابر حاصلضرب شار مولی در سطح می‌باشد، یعنی

$$\dot{n}_A = N_A \cdot A$$

و اگر برای جهت x نوشته شود داریم:

$$\dot{n}_{A_x} = N_{A_x} \cdot A_x$$

که A_x سطحی است که \dot{n}_{A_x} بر آن عمود است، پس داریم:

$$\dot{n}_{A_x} = N_{A_x} \cdot dy dz$$

چنانچه برای \dot{n}_{A_y} و \dot{n}_{A_z} نیز مانند بالا بنویسیم و در رابطه اصلی جاگذاری کنیم، داریم:

$$- \left[\frac{\partial N_{A_x}}{\partial x} + \frac{\partial N_{A_y}}{\partial y} + \frac{\partial N_{A_z}}{\partial z} \right] - R_A = \frac{\partial C_A}{\partial t}$$

جملات داخل پرانتز معادله بالا بیانگر ∇N_A هستند یعنی داریم:

$$-\nabla N_A - R_A = \frac{\partial C_A}{\partial t}$$

در روابط گذشته دیدیم که:

$$N_A = J_{A_x} + C_A u_x = J_{A_x} + x_A \sum \dot{n}_i$$

چنانچه رابطه بالا را برای سایر جهات بنویسیم، داریم:

$$- \left[\frac{\partial J_{A_x}}{\partial x} + \frac{\partial J_{A_y}}{\partial y} + \frac{\partial J_{A_z}}{\partial z} + \frac{\partial (C_A u_x)}{\partial x} + \frac{\partial (C_A u_y)}{\partial y} + \frac{\partial (C_A u_z)}{\partial z} \right]$$

$$- R_A = \frac{\partial C_A}{\partial t}$$

که در معادله بالا $\nabla J_A = \frac{\partial J_{A_x}}{\partial x} + \frac{\partial J_{A_y}}{\partial y} + \frac{\partial J_{A_z}}{\partial z}$ ، معرف نفوذ مولکولی بوده در حالیکه جملات

$$\frac{\partial (C_A u_x)}{\partial x} + \frac{\partial (C_A u_y)}{\partial y} + \frac{\partial (C_A u_z)}{\partial z}$$

معرف نفوذ توده (Bulk Flow Diffusion) می‌باشند.

طبق قانون اول فیک داشتیم:

$$J_{Ax} = -D_{AB} \frac{\partial C_A}{\partial x}$$

و با استفاده از این رابطه و جاگذاری در رابطه نهایی نفوذ داریم:

$$D_{AB} \left[\frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial z^2} \right] - \left[C_A \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) + u_x \frac{\partial C_A}{\partial x} + u_y \frac{\partial C_A}{\partial y} + u_z \frac{\partial C_A}{\partial z} \right] - R_A = \frac{\partial C_A}{\partial t}$$

که جملات $D_{AB} \left(\frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial z^2} \right) = D_{AB} \nabla^2 C_A = -\nabla J_A$ در معادله بالا هستند.

اگر فرض شود که سیال تراکم‌ناپذیر است آنگاه داریم:

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

اگر فرض شود حالت پایدار است آنگاه، $\frac{\partial C_A}{\partial t} = 0$ است.

چنانچه فرض شود واکنش شیمیایی نداریم آنگاه $R_A = 0$ می‌شود.

۲-۶- قانون دوم فیک (Fick's Second Law)

چنانچه رابطه نفوذ را با فرضیات زیر، بازنویسی کنیم، به قانون دوم فیک می‌رسیم:

(۱) واکنش شیمیایی نداریم (یعنی $R_A = 0$ است).

(۲) فقط نفوذ مولکولی داریم، یعنی نفوذ بواسطه حرکت توده نداریم و لذا حرکتی وجود ندارد.

$$-\nabla J_A = \frac{\partial C_A}{\partial t} \quad \text{or} \quad D_{AB} \nabla^2 C_A = \frac{\partial C_A}{\partial t}$$

همانطور که از معادله فوق مشخص است، قانون دوم فیک برای حالت ناپایدار (Unsteady State)

نوشته شده است.

قانون دوم فیک تغییرات نفوذ مولکولی (شار مولی نفوذ) را در سه جهت نشان می‌دهد که در نهایت

پروفیل غلظت را برای ما مشخص می‌کند، ولی قانون اول فیک نفوذ مولکولی را در یک جهت نشان می‌دهد.

۲-۷- نفوذ مولکولی در حالت پایا در سیالات

سیستمها را از لحاظ نفوذ (انتقال جرم) می‌توان به سه دسته زیر تقسیم کرد:

۲-۷-۱- سیستمهای با نفوذ متقابل با شار مولی مساوی (در حالت پایا)

مهمترین فرآیند در اینحالت تقطیر دو جزئی است. در سایر فرآیندها تقریباً حالت نفوذ در فیلم ساکن

صادق است.

در نفوذ متقابل با مولهای مساوی داریم:

$$N_A = -N_B \Rightarrow N_A + N_B = 0 \text{ یا } \sum N_i = 0$$

در نتیجه رابطه $N_A = J_A + x_A \sum N_i$ تبدیل به رابطه $N_A = J_A = -D_{AB} \frac{dC_A}{dz}$ می‌شود.

$$\Rightarrow N_A \int_{z=0}^{z=L} dz = -D_{AB} \int_{C_{A_1}}^{C_{A_2}} dC_A$$

حال باید این رابطه را در دو فاز گاز و مایع مورد بررسی قرار دهیم.

فاز مایع:

با انتگرال‌گیری از رابطه فوق داریم:

$$N_A = \frac{D_{AB}}{Z} (C_{A_1} - C_{A_2}) = \frac{CD_{AB}}{Z} (x_{A_1} - x_{A_2})$$

$$\Rightarrow N_A = \frac{D_{AB}}{Z} \left[\frac{\rho}{M} \right]_{\text{ave}} (x_{A_1} - x_{A_2})$$

فاز گاز:

از آنجا که غلظت گازها وابسته به دما و فشار است $\left(C = \frac{P}{RT} \right)$ می‌توان نوشت:

$$N_A = \frac{D_{AB}}{ZRT} (P_{A_1} - P_{A_2}) = \frac{D_{AB} P_t}{ZRT} (y_{A_1} - y_{A_2})$$

دیدیم که در نفوذ متقابل $N_A = J_A$ شد، در نتیجه داریم:

$$N_A = -D_{AB} \frac{dC_A}{dz} \Rightarrow \frac{dC_A}{dz} = \frac{N_A}{-D_{AB}} = K_1 \Rightarrow C_A = K_1 Z + K_2$$

چنانچه معادله فوق را با دو شرط مرزی زیر حل کنیم به رابطه مهمی می‌رسیم که بوسیله آن می‌توان

نموداری برای حالت نفوذ متقابل رسم کرد و توزیع غلظت را نشان داد.

$$\begin{cases} @Z=0 \Rightarrow C_A = C_{A_1} \\ @Z=L \Rightarrow C_A = C_{A_2} \end{cases}$$

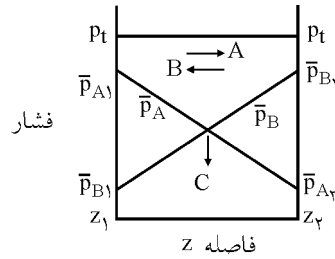
$$\Rightarrow C_A = \left(\frac{C_{A_2} - C_{A_1}}{L} \right) Z + C_{A_1}$$

می‌بینیم که در نفوذ متقابل تغییرات غلظت با Z خطی و شیب آن منفی می‌باشد $(C_{A_2} < C_{A_1})$.

چنانچه رابطه فوق را برای گازها بنویسیم، داریم:

$$P_A = \left(\frac{P_{A_2} - P_{A_1}}{L} \right) Z + P_{A_1}$$

که با استفاده از رابطه فوق، شکل (۱-۲) داده شده است:



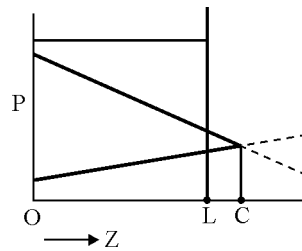
شکل (۱-۲)

با توجه به شکل (۱-۲) داریم:

$$P_{A_1} + P_{B_1} = P_{A_2} + P_{B_2} = P_t$$

از رابطه بالا در می‌یابیم که همواره در این نمودار رابطه $P_t = P_{A_1} + P_{B_1} = P_{A_2} + P_{B_2}$ برقرار است. محلی که دو نمودار یکدیگر را قطع می‌کنند با C نشان داده شده است. اگر بخواهیم این فاصله را بدست آوریم می‌توان از این نکته استفاده کرد که در این نقطه P_B با P_A برابرند و بدین وسیله می‌توان محل تقاطع دو نمودار را بدست آورد (شکل‌های (۱-۲) و (۲-۲)).

اگر ضخامت فیلم خیلی کوچک باشد ممکن است نمودارها یکدیگر را در فاصله مشخص شده (L) قطع نکنند، که برای محاسبه محل تقاطع دو نمودار، از نکته گفته شده در بالا استفاده می‌کنیم. اگر $C > L$ باشد، در ضخامت فیلم انتقال جرم، تقاطع غلظت‌ها وجود ندارد. تصویر این حالت را در شکل (۲-۲) مشاهده می‌کنید.



شکل (۲-۲)

۲-۷-۲- نفوذ در فیلم ساکن در حالت پایا (نفوذ جزء A درون جزء ساکن B، در حالت پایا):

در این حالت $N_B = 0$ است (در مخلوط n جزیی $\sum Ni = N_A$ می‌باشد) و با توجه به رابطه کلی نفوذ داریم:

$$N_A + N_B = N_A$$

$$\Rightarrow \sum Ni = N_A$$

پس رابطه $N_A = J_A + x_A \sum Ni$ به رابطه زیر تبدیل می‌شود:

$$N_A = J_A + x_A N_A$$

$$N_A(1-x_A) = J_A \quad x_A = \frac{C_A}{C_1} = \frac{C_A}{C}$$

$$N_A \left[\frac{C-C_A}{C} \right] = -D_{AB} \frac{dC_A}{dZ}$$

$$N_A \int_{Z=0}^{Z=Z} dZ = CD_{AB} \int_{C_{A_1}}^{C_{A_2}} \frac{-dC_A}{C-C_A}$$

$$\Rightarrow N_A = \frac{CD_{AB}}{Z} \ln \left(\frac{C-C_{A_2}}{C-C_{A_1}} \right)$$

غلظت کل طبق رابطه زیر به غلظت اجزاء مرتبط می‌شود:

$$C_{A_1} + C_{B_1} = C_{A_2} + C_{B_2} = C_1 = C$$

$$\Rightarrow C_{B_2} - C_{B_1} = C_{A_1} - C_{A_2} \Rightarrow \frac{C_{A_1} - C_{A_2}}{C_{B_2} - C_{B_1}} = 1$$

با ضرب عبارت $\frac{C_{A_1} - C_{A_2}}{C_{B_2} - C_{B_1}}$ در رابطه شار کل N_A داریم:

$$N_A = \frac{CD_{AB}}{Z} \ln \frac{C_{B_2}}{C_{B_1}} \times \frac{C_{A_1} - C_{A_2}}{C_{B_2} - C_{B_1}}$$

که این رابطه نهایی را باید برای دو فاز مایع و گاز مورد بررسی قرار دهیم.

برای فاز مایع داریم:

$$N_A = \frac{CD_{AB}}{ZC_{BM}} (C_{A_1} - C_{A_2})$$

که C_{BM} متوسط لگاریتمی غلظت‌ها و عبارت است از:

$$C_{BM} = \frac{C_{B_2} - C_{B_1}}{\ln \left(\frac{C_{B_2}}{C_{B_1}} \right)}$$

حال اگر طرفین رابطه بالا را بر غلظت کل تقسیم کنیم داریم:

$$x_{B_M} = \frac{C_{B_M}}{C}$$

$$\Rightarrow x_{B_M} = \frac{x_{B_2} - x_{B_1}}{\ln \left(\frac{x_{B_2}}{x_{B_1}} \right)}$$

$$\Rightarrow N_A = \frac{CD_{AB}}{Zx_{BM}} (x_{A_1} - x_{A_2}) = \frac{D_{AB}}{Zx_{BM}} \left(\frac{\rho}{M} \right)_{ave} (x_{A_1} - x_{A_2})$$

برای فاز گاز با توجه به رابطه $C = \frac{P}{RT}$ داریم:

$$N_A = \frac{D_{AB}P}{RTZP_{BM}} (P_{A_1} - P_{A_2}) = \frac{D_{AB}P}{ZRTy_{BM}} (y_{A_1} - y_{A_2})$$

$$y_{BM} = \frac{(y_{B_2} - y_{B_1})}{\ln\left(\frac{y_{B_2}}{y_{B_1}}\right)}$$

با توجه به رابطه $N_A = J_A + x_A N_A$ و رابطه $J_A = -D_{AB} \frac{dC_A}{dZ}$ داریم:

$$N_A(1-x_A) = J_A = -D_{AB} \frac{dC_A}{dZ}$$

$$\Rightarrow N_A = \frac{-D_{AB}}{1-x_A} \cdot \frac{dC_A}{dZ} \Rightarrow -D_{AB} C \frac{dx_A}{1-x_A} = N_A dZ$$

$$\Rightarrow \int \frac{-dx_A}{1-x_A} = K_1 \int_{Z_1=0}^{Z_2=Z} dZ, \quad K_1 = \frac{N_A}{CD_{AB}}$$

$$\Rightarrow \ln(1-x_A) = K_1 Z + K_2$$

$$\Rightarrow 1-x_A = \exp(K_1 Z + K_2)$$

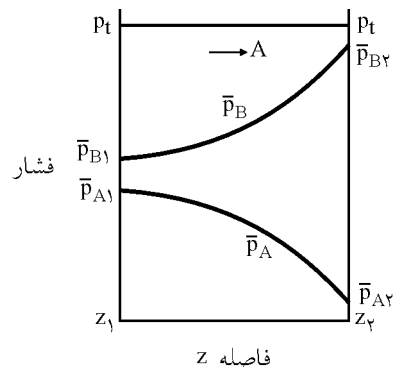
با توجه به شرایط مرزی و حل کلی معادله رابطه توزیع غلظت به شکلی که مشاهده می‌کنید، حاصل می‌شود.

$$\text{at } Z=Z_1, \quad x_A = x_{A_1}$$

$$\text{at } Z=Z_2, \quad x_A = x_{A_2} \quad \frac{Z-Z_1}{Z_2-Z_1}$$

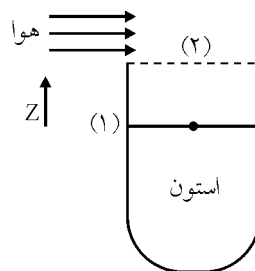
$$\Rightarrow \left(\frac{1-x_A}{1-x_{A_1}} \right) = \left(\frac{1-x_{A_2}}{1-x_{A_1}} \right)^{\frac{Z-Z_1}{Z_2-Z_1}}$$

تغییرات غلظت (فشار جزئی) در این حالت بصورت نمایی با Z تغییر می‌کند و نقطه تلاقی نیز با هم ندارند. نمودار این حالت را در شکل (۳-۲) مشاهده می‌کنید.



شکل (۳-۲) نفوذ جزء A درون جزء ساکن B

مثال: ظرفی از استن مشابه شکل (۳-۲) را در نظر بگیرید که استن به درون هوا نفوذ می‌کند. در این صورت



شکل (۴-۲)

می‌توان نوشت:

(۱) نفوذ در فیلم ساکن است.

(۲) فشار در سطح مایع (P_{A_1}) برابر فشار بخار استن است یعنی $P_{A_1} = P_A^{Sat}$.

(۳) اگر هوا خالص باشد آنگاه $P_{A_2} = 0$ است (زیرا استنی در هوا وجود ندارد) که در این حالت $P_{B_2} = P_t$ می‌باشد در ضمن همواره رابطه $P_A + P_B = P_t$ برقرار است.

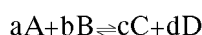
(۴) برای محاسبه N_A می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد:

$$N_A = \frac{D_{AB} P_t}{ZRT} \ln \left(\frac{1 - \frac{P_{A_2}}{P_t}}{1 - \frac{P_{A_1}}{P_t}} \right) = \frac{D_{AB} P_t}{ZRT} \ln \left(\frac{P_t - P_{A_2}}{P_t - P_{A_1}} \right) = \frac{D_{AB} P_t}{ZRT} \ln \frac{P_{B_2}}{P_{B_1}}$$

هدف از تبدیل رابطه N_A به شکل متوسط لگاریتمی، ایجاد نیرو محرکه است که در فصل بعد مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۳-۷-۲- نفوذ در سیستمهای همراه با واکنش شیمیایی

چنانچه سیستمی همراه با واکنش شیمیایی باشد آنگاه این واکنش روی $\sum Ni$ تاثیر می‌گذارد. به عنوان مثال چنانچه واکنش زیر در سیستمی انجام شود، داریم:



$$\Rightarrow \frac{N_A}{a} = \frac{N_B}{b} = \frac{-N_C}{c} = \frac{-N_D}{d}$$

$$N_A = J_A + x_A \sum Ni$$

$$\sum Ni = N_A + N_B + N_C + N_D = N_A + \frac{bN_A}{a} - \frac{cN_A}{a} - \frac{dN_A}{a}$$

$$\Rightarrow \sum Ni = N_A \left[\frac{(a+b)-(c+d)}{a} \right]$$

از طرف دیگر فرض می‌کنیم که $r_A = \frac{N_A}{\sum Ni}$ باشد، در نتیجه $\sum Ni = \frac{N_A}{r_A}$ و با جاگذاری در رابطه کلی N_A داریم:

$$N_A = J_A + x_A \frac{N_A}{r_A} \Rightarrow N_A \left[\frac{r_A - x_A}{r_A} \right] = J_A$$

$$\Rightarrow N_A = r_A \frac{CD_{AB}}{Z} \ln \left[\frac{r_A C - C_{A_2}}{r_A C - C_{A_1}} \right] = r_A \frac{CD_{AB}}{Z} \ln \left[\frac{r_A - x_{A_2}}{r_A - x_{A_1}} \right]$$

اگر بخواهیم رابطه فوق را برای فاز گاز بنویسیم، $y_A = \frac{P_A}{P_t}$ به جای x_A قرار می‌گیرد و داریم:

$$N_A = r_A \frac{D_{AB} C}{Z} \ln \left[\frac{r_A - y_{A_2}}{r_A - y_{A_1}} \right] = \frac{r_A D_{AB} P}{RTZ} \ln \left[\frac{r_A P - P_{A_2}}{r_A P - P_{A_1}} \right]$$

نکته: اگر واکنش خیلی سریع باشد آنگاه x_{A_2} و یا y_{A_2} برابر «صفر» است.

۸-۲- نکاتی در مورد ضریب نفوذ مولکولی

- ضریب نفوذ مولکولی (D_{AB}) یکی از خواص سیستم بوده و در حالت کلی وابسته به فشار، درجه حرارت و طبیعت سازنده‌های سیستم است.

- واحد ضریب نفوذ مولکولی $\frac{m^2}{S}$ بوده و دارای دیمانسیون $\frac{L^2}{T}$ می‌باشد.

- ضریب نفوذ مولکولی عکس ضریب هدایت حرارتی است یعنی در حالت کلی نفوذ در گازها بیشتر از مایعات و در مایعات بیشتر از جامدات است، مقایسه زیر را می‌توان در نظر گرفت:

$$D_{\text{جامد}} > D_{\text{مایع}} > D_{\text{گازها}}$$

- مرتبه بزرگی ضریب نفوذ گاز در گاز در حدود $\frac{m^2}{S} \cdot 10^{-5}$ یا $\frac{cm^2}{S} \cdot 10^{-1}$ است.

- مرتبه بزرگی ضریب نفوذ مایع در مایع در حدود $\frac{m^2}{S} \cdot 10^{-9}$ یا $\frac{cm^2}{S} \cdot 10^{-5}$ است.

- مرتبه بزرگی ضریب نفوذ در جامدات در حدود $\frac{m^2}{S} \cdot 10^{-12}$ است.

- ضریب نفوذ گاز در مایع به حالت مایع در مایع نزدیکتر است تا حالت گاز در گاز.

- در حالت کلی ضریب نفوذ در سیستم گاز - گاز به پارامترهای زیر وابسته است:

$$(1) \text{ وابستگی به دما: } D \sim T^{\frac{3}{2}}$$

$$(2) \text{ وابستگی به فشار: } D \sim \frac{1}{P}$$

$$(3) \text{ وابستگی به شعاع اتمی: } D \sim \frac{1}{r_{AB}^2} \text{ (فاصله بین دو مولکول در حالت برخورد است: } r_{AB} \text{)}$$

در حالت کلی می‌توان تابعیت ضریب نفوذ در گازها به پارامترهای مختلف را به صورت زیر نمایش داد:

$$\Rightarrow \frac{D_2}{D_1} = \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \left(\frac{r_{AB1}}{r_{AB2}} \right)^2$$

که از رابطه فوق می‌توان ضریب نفوذ در شرایط جدید، را با استفاده از شرایط معلوم اولیه محاسبه کرد.

- جرمهای مولکولی A و B (M_A و M_B) نیز در ضریب نفوذ موثر هستند.

- انرژی جاذبه ملکولی ϵ_{AB} و تابع برخورد نیز در ضریب نفوذ گازها موثرند که به واسطه پیچیدگی

رابطه از آوردن آن خودداری شده است.

- ضریب نفوذ در گازها تابع غلظت نمی‌باشد.

ضریب نفوذ در مایعات به پارامترهای زیر وابسته است:

$$1- \text{وابستگی به دما: } D \sim T$$

$$2- \text{وابستگی به لزجت: } D \sim \frac{1}{\mu}$$

$$3- \text{وابستگی به غلظت: } D \sim \left(\frac{1}{\nu} \right)^{0/6}$$

ν ، حجم مولی و عکس غلظت است و برابر $\frac{M}{\rho}$ بوده و از جنس غلظت می‌باشد.

در حالت کلی تابعیت ضریب نفوذ مایعات به پارامترهای مختلف به صوت رابطه زیر ارائه می‌شود:

$$\Rightarrow \frac{D_2}{D_1} = \frac{T_2}{T_1} \times \frac{\mu_1}{\mu_2} \times \left(\frac{\nu_{AB1}}{\nu_{AB2}} \right)^{0/6}$$

- ضریب نفوذ در مایعات علیرغم گازها، تابع غلظت می‌باشد.

- همانطور که از روابط فوق مشخص است حساسیت ضریب نفوذ به دما در گازها بیشتر از مایعات است.

یعنی اگر دما دو برابر شود، تاثیر بیشتری روی ضریب نفوذ گازها می‌گذارد.

- در روابط فوق، دمای مطلق (کلوین یا رانکین) مدنظر است.

- در مایعات با افزایش جرم ملکولی حلال (M_B) و ضریب تجمع ملکولی حلال (ϕ)، ضریب نفوذ افزایش می‌یابد ($D \sim \sqrt{\phi M_B}$).

- در پلی‌مرها ضریب نفوذ ملکولی متناسب با عکس ریشه دوم جرم ملکولی پلی‌مر ($D_{AB} \sim \frac{1}{\sqrt{M}}$) و ضریب خود نفوذی متناسب با عکس مربع جرم ملکولی پلی‌مر ($D_{AA} \sim \frac{1}{M^2}$) می‌باشد.

۹-۲- نفوذ در مخلوطهای چند جزئی در حالت پایا

نفوذ در مخلوطهای چند جزئی را می‌توان با استفاده از یک ضریب نفوذ موثر و با استفاده از روابط قبل بدست آورد.

۹-۲-۱- ضریب نفوذ موثر یک جزء در یک مخلوط

در حالت کلی می‌توان ضریب نفوذ موثر ($D_{A,m}$) را از رابطه زیر، محاسبه کرد:

$$D_{A,m} = \frac{N_A - y_A \sum_{i=A}^n N_i}{\sum_{i=A}^n \frac{1}{D_{A,i}} (y_i N_A - y_A N_i)}$$

که در رابطه بالا، $D_{A,i}$ ، ضرایب نفوذ دو جزئی و $D_{A,m}$ ، ضریب نفوذ موثر است که $D_{A,m}$ ممکن است در مسیر نفوذ تغییر کند، زیرا $D_{A,m}$ بستگی به اجزای مولی سازنده‌ها (y_i) دارد، پس $D_{A,m}$ بدلیل وابستگی به y_i ، تابع مسیر است.

حالت خاص، که غالباً صادق است، نفوذ فقط یک جزء در مخلوط می‌باشد، یعنی کلیه N_i ها به جزء N_A ، صفر است. در نتیجه معادله $D_{A,m}$ به شکل رابطه (۲-۱) در می‌آید:

$$D_{A,m} = \frac{1 - y_A}{\sum_{i=B}^n \frac{y_{A,i}}{D_{A,i}}} = \frac{1}{\sum_{i=B}^n \frac{y'_{A,i}}{D_{A,i}}} \quad (\text{رابطه ۲-۱})$$

که در این رابطه، $y'_{A,i}$ جزء مولی سازنده i بر مبنای مخلوط فاقد A است.

نکته: ضریب نفوذ موثر یک جزء در یک مخلوط زمانی با ضریب نفوذ آن جزء در یک جزء دیگر (مثل A) برابر می‌شود که ضریب نفوذ آن جزء در تمام اجزاء با هم برابر باشد یعنی زمانی $D_{A,m} = D_{A,i}$ می‌شود که داشته باشیم:

$$D_{AB} = D_{AC} = D_{AD} = \dots$$

مثال: اگر مواد A و B و C ، هر کدام به ترتیب شامل ۱۰ و ۲۰ و ۳۰ مول سازنده‌های یک مخلوط باشند داریم:

$$n_t = n_A + n_B + n_C \Rightarrow n_t = 60 \text{ mole}$$

$$y_A = \frac{n_A}{n_t} = \frac{1}{6}$$

$$y_B = \frac{n_B}{n_t} = \frac{2}{6} = \frac{1}{3} \quad \& \quad y_C = \frac{n_C}{n_t} = \frac{1}{2}$$

ولی اگر بخواهیم جزء مولی مواد B و C را بدون حضور جسم A محاسبه کنیم، داریم:

$$n_t = n_B + n_C = 2 + 3 = 5$$

$$y'_B = \frac{n_B}{n_B + n_C} = \frac{2}{5} \quad \& \quad y'_C = \frac{n_C}{n_B + n_C} = \frac{3}{5}$$

مثال: ضریب نفوذ هیدروژن در هوا را محاسبه کنید.

$$D_{H_2-Air} = ?$$

هوا مخلوطی از نیتروژن و اکسیژن است. پس ضریب نفوذ موثر (نفوذ یک جز در یک مخلوط) را باید محاسبه کرد.

هوا را مخلوطی از اکسیژن و نیتروژن به نسبت‌های ۲۱ و ۷۹ در نظر می‌گیریم، پس در آن هیدروژن وجود ندارد و مخلوط خود به خود فاقد هیدروژن می‌باشد یعنی:

$$y'_{O_2} = 0/21 \quad \& \quad y'_{N_2} = 0/79$$

با استفاده از رابطه ۱-۲ داریم:

$$\Rightarrow D_{H_2-Air} = \frac{1}{\frac{y'_{O_2}}{D_{H_2-O_2}} + \frac{y'_{N_2}}{D_{H_2-N_2}}}$$

$$\Rightarrow D_{H_2-Air} = \frac{1}{\frac{0/21}{(D_{H_2-O_2})} + \frac{0/79}{(D_{H_2-N_2})}}$$

۱-۲- تشابهات بین پدیده‌های انتقال

در مکانیک سیالات دیدیم که تنش برشی بیانگر فلاکس مومنتوم است، یعنی:

$$\tau = -\mu \frac{du}{dy} = -\frac{\mu}{\rho} \cdot \frac{d(\rho u)}{dy}, \quad \nu = \frac{\mu}{\rho} \Rightarrow$$

$$\text{Momentum Flux: } \tau = -\nu \frac{d(\rho u)}{dy}$$

و در انتقال حرارت داشتیم:

$$q'' = -K \frac{dT}{dx} \quad \& \quad \alpha = \frac{K}{\rho C_p}$$

$$\Rightarrow \text{Heat Flux: } q'' = -\alpha \frac{d(\rho C_p T)}{dx}$$

و در انتقال جرم دیدیم که:

$$\text{Molar Flux: } J_A = -D_{AB} \frac{dC_A}{dz}$$

هر سه انتقال فوق ماهیت مولکولی دارند و در جریان آرام مورد استفاده قرار می‌گیرند به طوریکه تمام

ضرایب بالا واحد یکسانی دارند. به عنوان مثال:

$$[\nu] = [\alpha] = [D_{AB}] = \frac{m^2}{s}$$

تشابه موجود بین پدیده‌های انتقال حرکت، حرارت و جرم را می‌توان به صورت زیر بیان کرد: در حالات ساده خاص، تشابه کامل بین سه پدیده فوق وجود داد. اما وقتی در هر سه جهت وجود داشته باشد، طبیعت متفاوت انتقال مقدار حرکت، سبب از بین رفتن این تشابه خواهد گردید. هم چنین در مواردیکه انتقال مقدار حرکت و جرم، به صورت توأم انجام می‌شود، این تشابه با انجام تغییراتی برقرار می‌شود.

نکته: انتقال جرم روی پروفیل سرعت نیز تاثیر می‌گذارد.

۱۲-۱- ضریب خودنفوذی: (Self diffusivity)

ضریب خودنفوذی مربوط به نفوذ یک ماده در خودش یا نفوذ یک جزء در جزء مشابه می‌باشد و معمولاً برای گازها مطرح می‌شود.

طبق تئوری جنبشی گازها، ضریب خودنفوذی گازها برابر ویسکوزیته سینماتیک است، یعنی:

$$D_{AA} = \frac{1}{3} \omega \lambda = \frac{\mu_A}{\rho_A} = \nu_A$$

λ : فاصله متوسط آزاد (Mean free path)، که برابر است با فاصله متوسطی که یک مولکول گاز بین

دو برخورد متوالی طی می‌کند.

ω : سرعت متوسط مولی

این مسئله در مورد انتقال حرارت نیز مطرح می‌شود که داریم:

$$\alpha = \frac{K}{\rho C_p} = \frac{1}{3} \omega \lambda \cdot \frac{C_v}{C_p}$$

۱۲-۲- نکاتی در مورد اعداد پرانتل، اشمیت و لوئیس

عدد بدون بعد اشمیت تشابه بین انتقال مومنتوم و انتقال جرم (نفوذ)، یا به عبارت دیگر تشابه بین سیالات

و جرم را بیان می‌کند و طبق تعریف برابر است با:

$$Sc = \frac{\nu}{D} = \frac{\mu}{\rho D}$$

عدد بدون بعد پرانتل تشابه بین انتقال مومنتوم و نفوذ حرارتی، یا به عبارتی دیگر تشابه بین سیالات و

حرارت را بیان می‌کند و طبق تعریف برابر است با:

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu C_p}{K}$$

طبق تئوری جنبشی گازها، عدد اشمیت برای گازها باید برابر یک باشد. (چون $D_{AA} = \nu_A$ شد پس

$Sc = \frac{\nu}{D} = 1$ می‌شود) عموماً این مقدار (عدد Sc) برای گازها بین ۰/۶۷ تا ۰/۸۳ در حال تغییر است. در

مخلوطهای دو جزئی گاز، این عدد ممکن است تا حدود ۵ بالا برود.

در مایعات عدد Sc بزرگتر از گازها است، مثلاً برای خودنفوذی آب در $25^\circ C$ برابر ۲۹۷ و برای مایعات با

ویسکوزیته بیشتر و ضریب نفوذ کمتر، این مقدار ممکن است تا چند هزار نیز افزایش پیدا کند.

عدد Pr برای گازها از مایعات کمتر است و برای گازها در فشارهای پایین و با توجه به ساختمان مولکولی آن، در حدود ۰/۶۵ تا ۰/۹ است و تقریباً می‌توان گفت که به یک میل می‌کند. عدد Pr در مایعات خیلی بزرگ نیست. اما همانطور که گفتیم، عدد پرانتل در مایعات از گازها بیشتر است، مثلاً برای آب در حدود ۷/۰۲ است.

در شرایط مشابه عدد Pr از عدد S_c کوچکتر است. همواره در حالت کلی، حد min (مینیمم) برای عدد Pr است، مثلاً عدد Pr برای فلزات مایع در حدود ۰/۰۰۸ می‌باشد. البته در این حالت استثنا نیز وجود دارد، مثلاً عدد Pr برای روغن موتور در حدود ۸۰۰۰۰ است که هیچ عدد اشمیتی به این بزرگی نیست. در گازها اعداد S_c و Pr تقریباً با هم برابرند و به یک میل می‌کنند.

عدد بدون بعد لوئیس از تقسیم ضریب نفوذ حرارتی به ضریب نفوذ جرمی بدست می‌آید و برابر است با:

$$Le = \frac{\alpha}{D} = \frac{Sc}{Pr}$$

کاربرد عدد لوئیس معمولاً زمانی است که انتقال حرارت و انتقال جرم را به صورت همزمان داریم و می‌توان به فرآیندهای رطوبت‌دهی و رطوبت‌زدایی اشاره کرد.

۱۳-۲- معادلات نفوذ یک بعدی، پایدار و بدون واکنش شیمیایی در مختصات کارتیزین، استوانه‌ای و کروی

۱-۱۳-۲- مختصات کارتیزین

اگر المانی از سیال را در نظر بگیریم، داریم:

$$\dot{n}_A \Big|_z - \dot{n}_A \Big|_{z+dz} = 0 \quad \& \quad \dot{n}_A = N_A \cdot A$$

$$\Rightarrow N_A \cdot A \Big|_z - N_A \cdot A \Big|_{z+dz} = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{d(N_A \cdot A)}{dz} = 0$$

چون A در مختصات کارتیزین مقداری ثابت است پس:

$$\frac{dN_A}{dz} = 0 \quad \Rightarrow \quad N_A = Cte$$

به عبارت دیگر، در سیستم کارتیزین مقدار N_A ثابت و مستقل از Z است.

۲-۱۳-۲- مختصات استوانه‌ای

یک المان روی شعاع داخلی در نظر می‌گیریم. مساحتی که در هر نقطه N_{Ar} بر آن عمود است، استوانه‌ای

با مساحت $2\pi rL$ است، لذا داریم:

$$n_A \Big|_r - n_A \Big|_{r+dr} = 0$$

$$\Rightarrow N_A \cdot A \Big|_r - N_A \cdot A \Big|_{r+dr} = 0 \quad \& \quad A = 2\pi rL$$

$$\Rightarrow N_{Ar} \cdot 4\pi r L \Big|_r - N_{Ar} \cdot 4\pi r L \Big|_{r+dr} = 0$$

$$\Rightarrow \frac{d(N_{Ar} \cdot r)}{dr} = 0 \Rightarrow N_{Ar} \cdot r = Cte \quad \text{or} \quad N_{Ar} \sim \frac{1}{r}$$

به عنوان مثال در حل مسائل می توان نوشت:

$$N_{Ar_1} \cdot r_1 = N_{Ar_2} \cdot r_2 = Cte$$

۳-۱۳-۲-۳. مختصات کروی

برای کره هم محاسبات مشابه را می توان انجام داد، با این تفاوت که در کره $A = 4\pi r^2$ است. با نوشته معادله موازنه داریم:

$$\Rightarrow N_A \cdot 4\pi r^2 \Big|_r - N_A \cdot 4\pi r^2 \Big|_{r+dr} = 0$$

$$\Rightarrow \frac{d(N_A \cdot r^2)}{dr} = 0 \Rightarrow N_{Ar} \cdot r^2 = Cte \quad \text{or} \quad N_{Ar} \sim \frac{1}{r^2}$$

به عنوان مثال در این حالت می توان نوشت:

$$N_{Ar_1} \cdot r_1^2 = N_{Ar_2} \cdot r_2^2 = Cte$$

در این قسمت به بررسی انتقال جرم در خارج کره صلب در محیطی ساکن می پردازیم.

۴-۱۳-۲-۴. بررسی انتقال جرم در خارج کره صلب در شرایط یکنواخت

کره ای به شعاع R در نظر بگیرید. این کره می تواند کره جامد یا کره سیال صلب (همچون جامد) فرض شود. انتقال جرم از کره به اطراف صورت می گیرد. شرایط عملیاتی دما و فشار ثابت است. سیستم را دو جزیی در نظر گرفته و فقط انتقال جزء A (از کره به اطراف) صورت می گیرد در این حالت، انتقال جرم را یک بعدی و در جهت r در نظر می گیریم. با نوشتن موازنه داریم:

$$N_{Ar} = J_{Ar} + x_A (N_{Ar} + N_{Br})$$

$$N_{Br} = 0$$

با فرض اینکه غلظت کل ثابت است داریم:

$$N_{Ar} = -D_{AB} \frac{dC_A}{dr} + x_A N_{Ar}$$

$$N_{Ar} = -\frac{D_{AB}}{1-x_A} \cdot \frac{dC_A}{dr} = -\frac{D_{AB} \cdot C}{C-C_A} \frac{dC_A}{dr}$$

$$x_A = \frac{C_A}{C}$$

شار N_{Ar} متغیر ولی شدت انتقال جرم ثابت است و لذا داریم:

$$\dot{m}_A = N_{Ar} \cdot A_r \cdot M_A \Big|_{r=R}^{r=r} \quad , \quad A_r = 4\pi r^2$$

$$= - \frac{D_{AB} \cdot C}{C - C_A} \cdot 4\pi r^2 \cdot M_A \cdot \frac{dC_A}{dr}$$

$$\dot{m} \frac{dr}{r^2} = - \frac{D_{AB} \cdot C}{C - C_A} \cdot 4\pi \cdot M_A \cdot dC_A$$

شرایط مرزی B.C_S:

$$B.C_1 \quad r=R \quad C_A = C_{AS} = C_A^*$$

C_A^* غلظت روی سطح (فصل مشترک) می باشد.

$$B.C_2 \quad r=r \quad C_A = C_A$$

C_A غلظت در شعاع r از مرکز کره می باشد.

با اعمال شرایط مرزی داریم:

$$\dot{m}_A = \frac{4\pi \cdot D_{AB} \cdot C \cdot M_A \cdot r \cdot R}{r - R} \ln \frac{C - C_A}{C - C_{AS}}$$

رابطه فوق، دبی جرمی از کره‌ای به شعاع R به نقطه‌ای به فاصله r از مرکز کره را می‌دهد.

در حالت یکنواخت، بدون هیچگونه واکنش شیمیایی می‌توان معادله بیلان را به صورت زیر نوشت:

$$N_{Ar} \cdot A_r \cdot M_A \Big|_r - N_{Ar} \cdot A_r \cdot M_A \Big|_{r+\Delta r} = 0$$

$$A_r = 4\pi r^2$$

$$- \frac{d(N_{Ar} \cdot r^2)}{dr} = 0 \quad \text{یا} \quad N_{Ar} \cdot r^2 = \text{ثابت}$$

$$\dot{m}_A = N_{Ar} \cdot 4\pi r^2 \cdot M_A \Big|_{r=R}^{r=r}$$

مثال ۱۰- انتقال جرم از کره‌ای به شعاع R به نقطه‌ای به فاصله r از مرکز کره صورت می‌گیرد.

هدف محاسبه عدد شروود (Sh) می‌باشد.

با توجه به رابطه قبل داریم:

$$\dot{m}_A = N_{Ar} \cdot A_r \cdot M_A \Big|_{r=R}^{r=r} = \frac{4\pi \cdot M_A \cdot D_{AB} \cdot C \cdot r \cdot R}{r - R} \ln \frac{C - C_A}{C - C_{AS}}$$

از طرفی مقدار فلاکس انتقال جرم از سطح کره به محیط اطراف را به صورت حاصلضرب ضریب k_C (ضریب انتقال جرم) در نیروی محرکه ΔC نیز می‌توان تعریف کرد. لذا داریم:

$$N_{Ar} \Big|_{r=R} = k_C \cdot \Delta C = k_C (C_{AS} - C_A)$$

$$\dot{m}_A \Big|_{r=R} = N_{Ar} \cdot A \cdot M_A \Big|_{r=R} = k_C (C_{AS} - C_A) \cdot \pi R^2 \cdot M_A$$

از تساوی دو رابطه فوق به رابطه زیر می‌رسیم:

$$\frac{\gamma \pi \cdot M_A \cdot D_{AB} \cdot C \cdot r \cdot R}{r-R} \ln \frac{C-C_A}{C-C_{AS}} = k_C (C_{AS} - C_A) \cdot \pi R^2 \cdot M_A$$

غلظت کل $C_A + C_B = C_{AS} + C_{BS} = C$

$$\frac{D_{AB} \cdot C \cdot r}{r-R} \ln \frac{C_B}{C_{BS}} = k_C \cdot R \cdot (C_B - C_{BS})$$

$$C_{B,M} = \frac{C_B - C_{BS}}{\ln \frac{C_B}{C_{BS}}}, \quad R = \frac{d}{\gamma}$$

با جاگذاری C_{BM} داریم:

$$\frac{k_C \cdot C_{B,M} \cdot d}{C \cdot D_{AB}} = \frac{\gamma r}{r-R}$$

با توجه به تعریف عدد شروود (Sh) و روابط فوق داریم:

$$Sh = \frac{K_C d}{D_{AB}} = \frac{F d}{C D_{AB}}, \quad F = K_C C_{BM}$$

که رابطه Sh برابر خواهد بود با:

$$Sh = \frac{\gamma r}{r-R}$$

اگر انتقال جرم از کره به نقطه‌ای بسیار دور از مرکز کره در نظر گرفته شود داریم:

$$\frac{r}{R} = \infty \quad \text{یا} \quad r \gg R \quad Sh = \gamma$$

۵-۱۳-۲- تغییرات قطر کره با زمان:

با نوشتن معادله موازنه برای کره داریم:

$$\dot{m}_1 - \dot{m}_\gamma = \frac{dm}{dt}$$

$$\dot{m}_1 = 0, \quad \dot{m}_\gamma = \dot{m}_A, \quad m = \rho_A V = \text{جرم کره}, \quad V = \frac{4}{3} \pi R^3, \quad R = \text{شعاع کره}$$

$$-\dot{m}_A = \rho_A \frac{dv}{dt} = \frac{4}{3} \pi \rho_A \times r^3 \frac{dR}{dt}$$

با جاگذاری مقدار \dot{m}_A از قبل داریم:

$$-\frac{4\pi M_A D_{AB} C_A r R}{r-R} \ln \frac{C-C_A}{C-C_{AS}} = \frac{4}{3} \pi \rho_A R^3 \frac{dR}{dt}$$

$$r \geq R, \quad 0 \leq t \leq t \quad R_{\text{اولیه}} \leq R \leq R_t$$

$$t = \frac{\rho_A}{D_{AB} C_A M_A \ln \frac{C-C_A}{C-C_{AS}}} \left[\frac{1}{3} (R_t^3 - R^3) - \frac{1}{3r} (R^3 - R_t^3) \right]$$

رابطه فوق زمان لازم برای تغییر شعاع کره از شعاع R به R_t وقتی انتقال جرم در شرایط یکنواخت و از سطح کره به نقطه‌ای به فاصله r از مرکز کره صورت می‌گیرد را خواهد داد.

۲-۱۳-۶- انتقال جرم خارج یک استوانه در شرایط یکنواخت

اگرچه انتقال جرم در خارج یک استوانه در شرایط یکنواخت مانند انتقال جرم در خارج یک کره کاربرد وسیعی ندارد، لیکن می‌توان به مواردی نظیر تصعید، لیچینگ (استخراج جامد - مایع)، جذب و انتقال جرم در خارج یک استوانه و در شرایط یکنواخت اشاره نمود. استوانه‌ای به شعاع R و ارتفاع L در نظر بگیرید که انتقال جرم از سطح جانبی استوانه به محیط اطراف آن صورت می‌گیرد. فرض کنید مقدار انتقال جرم کم است به نحویکه بتوان از حرکت توده‌ای صرف نظر کرد. انتقال جرم یک بعدی و در جهت r می‌باشد. لذا داریم:

$$N_{Ar} = J_{Ar} + x_A(N_{Ar} + N_{Br})$$

$$N_{Ar} = J_{Ar}$$

$$N_{Ar} \cdot A_r \Big|_{r=R} = \text{ثابت} = J_{Ar} \cdot A_r \Big|_{r=r} = \text{ثابت}$$

$$\dot{m}_A = N_{Ar} \cdot S_r \cdot M_A \Big|_{r=R} = \left(-D_{AB} \cdot \frac{dC_A}{dr} \right) (\pi r L) (M_A)$$

شرایط مرزی موجود عبارتند از:

$$r=R \quad C_A = C_A^*, \quad r=r \quad C_A = C_A$$

با اعمال شرایط مرزی در رابطه فوق خواهیم داشت:

$$\dot{m}_A = \frac{\pi L M_A D_{AB} (C_A^* - C_A)}{\ln \frac{r}{R}}$$

رابطه فوق انتقال جرمی که در واحد زمان از استوانه‌ای به شعاع R به نقطه‌ای به فاصله r از مرکز استوانه

صورت می‌گیرد را نشان می‌دهد.
با توجه به رابطه مشابه کره داریم:

$$N_{Ar} = k_C (C_A^* - C_A)$$

$$\dot{m}_A = (N_{Ar} \cdot A_r \cdot M_A) \Big|_{r \geq R} = \text{ثابت} = (N_{Ar} \cdot A_r \cdot M_A) \Big|_{r=R}$$

$$\dot{m}_A = k_C \cdot (C_A^* - C_A) \cdot 2\pi R \cdot L \cdot M_A$$

$$Sh = \frac{k_C \cdot d}{D_{AB}}$$

عدد بدون بعد شروود را برای خارج استوانه و زمانیکه حرکت توده‌ای نداریم به صورت

تعریف می‌کنیم که d قطر استوانه و k_C ضریب انتقال جرم است، بنابراین از تساوی دو رابطه فوق برای \dot{m}_A خواهیم داشت:

$$\frac{k_C \cdot R}{D_{AB}} = \frac{1}{\ln \frac{r}{R}}$$

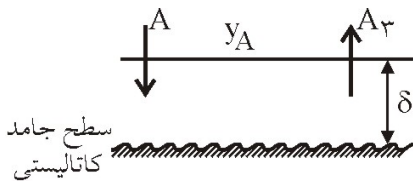
$$Sh = \frac{k_C \cdot d}{D_{AB}} = \frac{2}{\ln \frac{r}{R}}$$

$$= \frac{2\pi L \cdot D_{AB} \cdot (C_A^* - C_A)}{\ln \frac{r}{R}}$$

[سؤال‌های چهارگزینه‌ای طبقه‌بندی شده فصل دوم]

۱- فعل و انفعالات پلیمری شدن بسیار سریع فاز گاز $A_3 \rightarrow A_2$ در سطح کاتالیست مطابق شکل زیر اتفاق می‌افتد، کدام یک از روابط زیر میزان انتقال A به سطح جامد کاتالیستی بر واحد زمان در واحد سطح در حالت پایدار را بیان می‌کند؟ (فرض شود ۱۰۰٪ تبدیل A صورت می‌پذیرد)

(سراسری - ۸۶)



$$N_A = -\frac{3}{2} \frac{D_{AB} P_t}{RT \delta} \text{LN} \left[1 - \frac{3}{2} y_A \right] \quad (1)$$

$$N_A = -\frac{2}{3} \frac{D_{AB} P_t}{RT \delta} \text{LN} \left[1 - \frac{2}{3} y_A \right] \quad (2)$$

$$N_A = -\frac{2}{3} \frac{D_{AB} P_t}{RT \delta} \text{LN} \left[1 - \frac{2}{3} y_A \right] \quad (3)$$

$$N_A = \frac{3}{2} \frac{D_{AB} P_t}{RT \delta} \text{LN} \left[1 - \frac{2}{3} y_A \right] \quad (4)$$

۲- در تبخیر از سطح یک استوانه به داخل فضای گاز اطراف آن به صورت یک جهته r در شرایط steady معادله پیوستگی جزء تبخیر شونده (A) در فاز گاز کدام است؟ (N_{Ar} شار جزء A در جهت r است)

(سراسری - ۸۶)

$$\frac{d}{dr} (N_{Ar} r) = 0 \quad (4) \quad \bar{\nabla} N_{Ar} = 0 \quad (3) \quad \frac{d}{dr} (N_{Ar} r^2) = 0 \quad (2) \quad \frac{d}{dr} N_{Ar} = 0 \quad (1)$$

۳- در $T = 300 \text{ K}$ ضریب نفوذ A در B در محلول رقیق از A $D_{AB} = 2 \times 10^{-9} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$ است. اگر دمای محلول به 330 K افزایش یابد، ویسکوزیته مایع ۴۵٪ کاهش می‌یابد. در این دما ضریب نفوذ

(سراسری - ۸۷)

برحسب $\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$ چقدر است؟

$$2/2 \times 10^{-9} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \quad (1)$$

$$4 \times 10^{-9} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \quad (2)$$

$$2/3 \times 10^{-9} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \quad (3)$$

$$4/9 \times 10^{-9} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \quad (4)$$

۴- کدام یک از روابط زیر برای شار مولی A صحیح است؟

(سراسری - ۸۷)

$$(N_A + N_B) X_A - D_{AB} C_T \nabla X_B \quad (2) \quad (N_A + N_B) X_A - D_{AB} C_T \nabla X_A \quad (1)$$

$$(N_A + N_B) X_A + D_{AB} C_T \nabla X_A \quad (4) \quad (N_A + N_B) X_A - D_{AB} \rho \nabla X_A \quad (3)$$

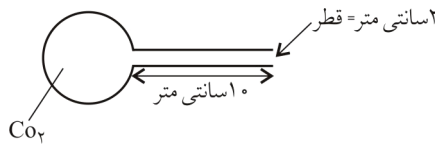
۵- نفتالین به شکل یک استوانه بلند به طول L و شعاع R در هوای ساکن و در دمای نسبتاً پایین تصید می‌شود. سرعت انتقال جرم m_A برابر است با: جرم مولکولی $M_A : A$ و غلظت روی سطح استوانه (حد اشباع): C_A^* (سراسری - ۸۸)

$$m_A = \frac{2\pi L M_A D_{AB} (C_A^* - C_A)}{(1 - x_A)(r - R)} \quad (۲) \quad m_A = \frac{2\pi L M_A D_{AB} (C_A^* - C_A)}{\ln \frac{r}{R}} \quad (۱)$$

$$m_A = \frac{2\pi L M_A D_{AB} (C_A^* - C_A)}{(1 - x_A) \ln \frac{r}{R}} \quad (۴) \quad m_A = \frac{2\pi L M_A D_{AB} (C_A^* - C_A)}{r - R} \quad (۳)$$

۶- گاز CO_2 درون ظرفی به حجم ۱۰۰ سانتی متر مکعب و از طریق لوله موئینه در شرایطی یکنواخت به محیط هوای خالص وارد می‌شود. ابعاد لوله موئینه داده شده است. چند ثانیه طول می‌کشد تا غلظت CO_2 درون ظرف به $\frac{2}{3}$ مقدار اولیه خود برسد؟ (سراسری - ۸۸)

سایر اطلاعات: $\ln 1/5 = 0/4$, $\pi = 3/0$, $M_{CO_2} = 40$, $\frac{m}{s} = 10^{-5} \times 3/33$ هوا D_{CO_2}



- ۱۰ (۱)
- ۱ (۲)
- ۰/۱ (۳)
- ۱۰۰ (۴)

۷- هوای عاری از نفتالین با سرعت ظاهری V_0 از بستر سیالی حاوی کره‌های نفتالین به ارتفاع L عبور می‌کند. اگر سطح ویژه بستر a و ضریب انتقال جرم k_c باشد، غلظت نفتالین در هوای خروجی تقریباً چقدر است؟ (فشار بخار نفتالین P^* ، دمای مطلق T و R ثابت عمومی گازهاست.) (سراسری - ۸۸)

$$C_{Aout} = \frac{2P^*}{RT \left(1 + \frac{2V_0}{aLk_c} \right)} \quad (۲) \quad C_{Aout} = \frac{P^*}{RT \left(1 + \frac{2V_0}{aLk_c} \right)} \quad (۱)$$

$$C_{Aout} = \frac{2P^*}{RT \left(1 + \frac{V_0}{aLk_c} \right)} \quad (۴) \quad C_{Aout} = \frac{P^*}{RT \left(1 + \frac{V_0}{aLk_c} \right)} \quad (۳)$$

۸- توزیع غلظت ماده‌ی نفوذ کننده‌ی A در دو غشاء مجاور هم در حالت پایا به صورت زیر می‌باشد. اگر هم‌زمان ضرایب نفوذ در غشاءها و همچنین ضخامت آنها دو برابر شوند، شار مولی چگونه تغییر می‌کند؟ (سراسری - ۸۹)

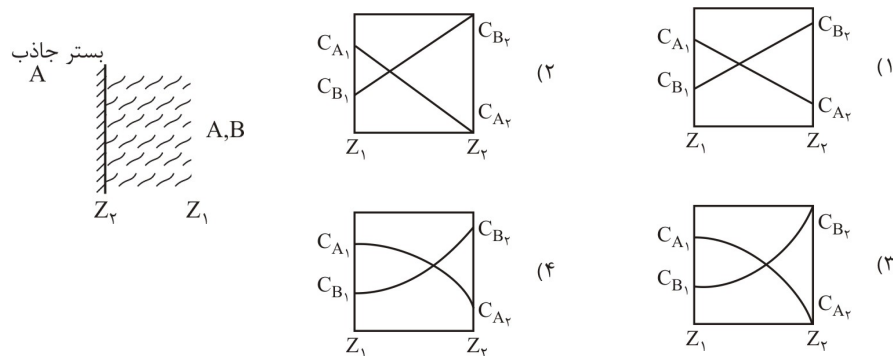


۹- یک جسم کروی از جنس نفتالین در یک محیط ساکن از هوا تصعید گردید. اگر سرعت تصعید به اندازه‌ای کم باشد که از تغییر قطر صرف‌نظر شود میزان تصعید W برحسب شعاع کره R_0 و ضریب نفوذ D_{AB} و فشار کل P_T ، دما T و جزء مولی نفتالین در هوای اشباع x_{AS} کدام یک از روابط زیر است؟ (سراسری - ۸۹)

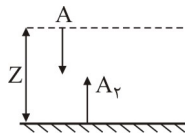
$$W = \frac{4\pi R_0 P_T D_{AB}}{RT} \ln\left(\frac{1}{1-x_{AS}}\right) \quad (۲) \qquad W = \frac{4\pi R_0 P_T}{RT D_{AB}} \ln\left(\frac{1}{1-x_{AS}}\right) \quad (۱)$$

$$W = \frac{4\pi R_0}{RTP_T D_{AB}} \ln\left(\frac{1}{1-x_{AS}}\right) \quad (۴) \qquad W = \frac{4\pi R_0 P_T}{RT D_{AB}} \ln\left(\frac{x_{AS}}{1-x_{AS}}\right) \quad (۳)$$

۱۰- در شکل مقابل جذب A به همراه واکنش خیلی سریع $A \rightarrow B$ صورت می‌گیرد. در این صورت پروفایل غلظت جزء A در لایه انتقال جرم به چه صورتی است؟ (سراسری - ۹۱)



۱۱- واکنش سریع $A_2 \rightarrow A_1$ بر روی سطح یک کاتالیست مطابق شکل صورت می‌پذیرد. کدام یک از روابط زیر برحسب N_A میزان انتقال جرم به سطح کاتالیست‌ها در حالت پایدار را نشان می‌دهد؟ (فشار کل و درجه حرارت به صورت P_T و T نشان داده شده‌اند. (سراسری - ۹۱)



$$\frac{1}{2} \frac{D A A_1 P_T}{R T Z} \ln \left(1 - \frac{y_A}{2} \right) \quad (2) \quad - \frac{1}{2} \frac{D A A_1 P_T}{R T Z} \ln \left(1 - \frac{y_A}{2} \right) \quad (1)$$

$$- \frac{1}{2} \frac{D A A_1 P_T}{R T Z} \ln \left(1 - \frac{y_A}{2} \right) \quad (4) \quad \frac{1}{2} \frac{D A A_1 P_T}{R T Z} \ln \left(1 - \frac{y_A}{2} \right) \quad (3)$$

۱۲- ضریب نفوذ CO_2 در نیتروژن 1.5×10^{-5} برابر ضریب نفوذ CO_2 در آب در دمای $5^\circ C$ است. در دمای $4^\circ C$ کدام یک از گزینه‌های زیر صحیح است؟ (سراسری - ۹۱)

$$\frac{C_{CO_2} - N_2}{D_{CO_2-water}} = 1.5 \times 10^{-5} \quad (2) \quad \frac{C_{CO_2} - N_2}{D_{CO_2-water}} < 1.5 \times 10^{-5} \quad (1)$$

$$\frac{C_{CO_2} - N_2}{D_{CO_2-water}} > 1.5 \times 10^{-5} \quad (4) \quad \frac{C_{CO_2} - N_2}{D_{CO_2-water}} = \left(\sqrt{\frac{313}{278}} \right) \times 1.5 \times 10^{-5} \quad (3)$$

۱۳- کریستال کربنات سدیم ($Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$) در حال حل شدن در یک فاز مایع آب خالص را در نظر بگیرید. جهت نفوذ و حرکت توده‌ای برای مولکول‌های آب (B) عبارتست از: $H_2O : B$ و Na_2CO_3 (سراسری - ۹۱)

- (۱) جهت نفوذ B به سمت کریستال و حرکت توده‌ای B از سمت کریستال به سمت آب خالص است.
- (۲) انتقال جرم B فقط در اثر نفوذ مولکولی صورت می‌گیرد و حرکت توده‌ای مربوط به جزء A می‌باشد.
- (۳) جهت نفوذ و حرکت توده‌ای آب همسو و به سمت کریستال است.
- (۴) جهت حرکت توده و نفوذ آب، چون خالص است، از توده آب خالص به سمت کریستال می‌باشد.

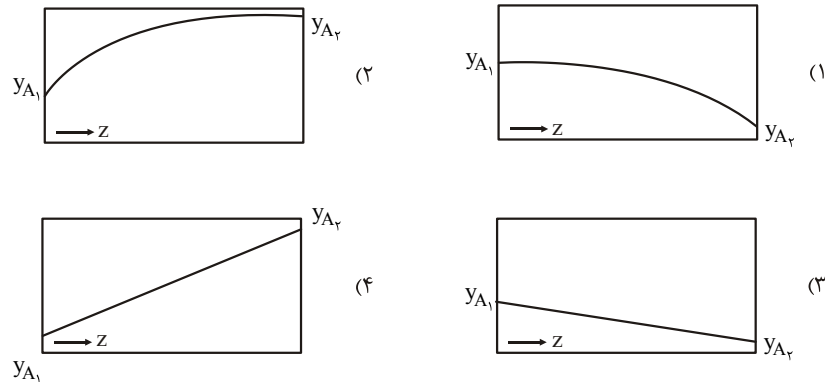
۱۴- یک مخلوط چهار جزئی حاوی ۹۵ درصد D، ۲ درصد C، ۳/۵ درصد B و بقیه A در نظر بگیرید. مقادیر ضریب نفوذ A در تکتک اجزاء موجود است. به نظر شما مقدار ضریب نفوذ در مخلوط در چه حدودی است؟ (سراسری - ۹۱)

$$D_{Am} = \frac{1 - y_A}{\sum_{i=B}^n \frac{y_i}{D_{Ai}}} \quad \text{و} \quad D_{AB} = 4/1 \times 10^{-5} \frac{m^2}{s} \quad \text{و} \quad D_{AC} = 2/18 \times 10^{-5} \quad \text{و} \quad D_{AD} = 1/12 \times 10^{-5}$$

$$2/16 \times 10^{-5} \quad (2) \quad 1/14 \times 10^{-5} \quad (1)$$

$$2/47 \times 10^{-5} \quad (4) \quad 4/1 \times 10^{-5} \quad (3)$$

۱۵- برای نفوذ پایای A در B ساکن ($N_B = 0$)، در حالت گازی در یک لوله موئین با سطح مقطع ثابت که کسر مولی A دو طرف آن، y_{A_1} و y_{A_2} است، کدام گزینه، شکل توزیع غلظت را صحیح نشان می‌دهد؟ (سراسری - ۹۲)



۱۶- در رابطه $N_A = J_A + x_A (N_A + N_B)$ مقدار $x_A (N_A + N_B)$ مشخص‌کننده کدام یک از موارد زیر است؟ (سراسری - ۹۴)

- (۱) فلاکس انتقال جرم جزء A ناشی از نفوذ مولکولی
- (۲) فلاکس انتقال جرم جزء A ناشی از جابه‌جایی
- (۳) جمع فلاکس‌های نفوذی تمام اجزاء
- (۴) جمع فلاکس‌های جابه‌جایی تمام اجزاء

۱۷- واکنش هتروژنی سریع $2C \rightarrow A + B$ (جامد) روی بستر کاتالیستی در موضع خاص صورت می‌گیرد. فلاکس (شار) انتقال جرم N_C در آن موضع خاص کدام است؟ (سراسری - ۹۴)

$$\begin{aligned} (1) & -\frac{2D_{AC}P_t}{RTz} \ln(1+y_{A_1}) \\ (2) & \frac{D_{AC}P_t}{RTz} \ln\left(\frac{1}{1+y_{A_1}}\right) \\ (3) & \frac{D_{AC}P_t}{RTz} \ln\left(\frac{1+y_{A_1}}{1+y_{A_2}}\right) \\ (4) & \frac{D_{AC}P_t}{2RTz} \ln\frac{1}{1+y_{A_1}} \end{aligned}$$

۱۸- در انتقال جرم فاز گاز A به درون جزء، غیرنفوذی B از نقطه ۱ به نقطه ۲ در فشار ۲ atm و $y_{A_1} = 0/1$ و $y_{A_2} = 0$ در شرایط یکنواخت و فشار و دمای ثابت در مختصات کارتزین، نسبت شیب تغییرات فشار جزئی A در نقطه ۱ به نقطه ۲ کدام است؟ (سراسری - ۹۴)

- (۱) ۰/۹ (۲) ۱ (۳) ۱/۱۱ (۴) ۱۰

۱۹- یک استوانه پلاستیکی بلند که شعاع داخلی آن r_1 و شعاع خارجی آن r_0 است، برای نگهداری گاز تحت فشار هیدروژن استفاده می‌شود. غلظت هیدروژن در جامد در سطح جامد در تماس با

هیدروژن تحت فشار $C_{Ai} \frac{\text{kmol}}{\text{m}^3}$ و در جامد در سطح جامد در تماس با اتمسفر ناچیز است. غلظت هیدروژن در وسط ضخامت جداره‌ی پلاستیکی یعنی در $\frac{r_i+r_o}{2}$ (برحسب C_A) چقدر است؟ (سراسری - ۹۴)

$$C_{Ai} \left[\frac{\frac{1}{r} - \frac{1}{r_o}}{\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_o}} \right] \quad (۲)$$

$$C_{Ai} \left[\frac{r - r_i}{r_o - r_i} \right] \quad (۴)$$

$$C_{Ai} \left[\frac{\ln\left(\frac{r_i + r_o}{2r}\right)}{\ln\left(\frac{r_i}{r}\right)} \right] \quad (۱)$$

$$C_{Ai} \left[\frac{r - r_o}{r_i - r_o} \right] \quad (۳)$$

پاسخ سؤال‌های چهارگزینه‌ای طبقه‌بندی شده فصل دوم

۱- گزینه «۳» صحیح است.

$$\frac{N_A}{3} = \frac{N_{Ar}}{-1}, r_A = \frac{N_A}{N_A + N_{Ar}} = \frac{N_A}{N_A - \frac{N_A}{3}} = \frac{3}{2}$$

$$N_A = r_A \frac{D_{AB}C}{\tau} \ln \left[\frac{1-y_{Ar}}{1-y_{A1}} \right], C = \frac{P}{RT}$$

چون واکنش سریع است، $0y_{Ar} = 0$ می‌باشد، لذا داریم:

$$\Rightarrow N_A = \frac{3}{2} \frac{D_{AB}P}{RT\tau} \ln \left[\frac{1-0}{1-y_{A1}} \right] = -\frac{3}{2} \frac{D_{AB}P}{RT\tau} \ln [1-y_{A1}]$$

۲- گزینه «۴» صحیح است.

۳- گزینه «۲» صحیح است.

$$T_1 = 300 \text{ K}, D_1 = 2 \times 10^{-9} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}, T_2 = 330 \text{ K}, \mu_2 = (1-0.45)\mu_1 = 0.55\mu_1$$

$$\frac{D_2}{D_1} = \frac{T_2}{T_1} \cdot \frac{\mu_1}{\mu_2} = \left(\frac{330}{300}\right) \left(\frac{\mu_1}{0.55\mu_1}\right) \Rightarrow D_2 = 4 \times 10^{-9} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

۴- گزینه «۱» صحیح است.

$$N_A = J_A + x_A \sum N_i = -D_{AB}c \frac{dx_A}{dz} + x_A (N_A + N_B)$$

۵- گزینه «۱» صحیح است.

$$m_A = N_A A M_A = \text{cte}, N_A = -D_{AB} \frac{dC_A}{dr}, A = 2\pi rL$$

$$\Rightarrow m_A = (-D_{AB} \frac{dC_A}{dr})(2\pi rL)(M_A)$$

$$\Rightarrow m_A \int_R^r \frac{dr}{r} = -2\pi L M_A D_{AB} \int_{C_A^*}^{C_A} dC_A = 2\pi L M_A D_{AB} \int_{C_A}^{C_A^*} dC_A$$

$$\Rightarrow m_A \ln\left(\frac{r}{R}\right) = 2\pi L M_A D_{AB} (C_A^* - C_A) \Rightarrow \dot{m}_A = \frac{2\pi L M_A D_{AB} (C_A^* - C_A)}{\ln\left(\frac{r}{R}\right)}$$

۶- گزینه «۱» صحیح است.

کاهش تعداد مولهای CO_2 درون ظرفکه به $\frac{2}{3}$ غلظت اولیه می‌رسد در مدت زمان t صورت می‌گیرد. کاهش تعداد مولهای CO_2 برابر $\frac{1}{3}$ تعداد مولهای اولیه می‌باشد که اگر بر t تقسیم شود از واحد مول بر زمان خواهد شد.

$$\dot{n}_A \text{ بر زمان} = \frac{\frac{1}{3} C_{A0}}{t} = \frac{\text{تعداد مولهای اولیه}}{t}$$

از طرفی $\frac{\text{mole}}{\text{زمان}}$ ماده CO_2 انتقال یافته به طریق شار نفوذی N_A از لوله خارج شده و بر

محیط اتمسفر تخلیه می‌شود. اگر N_A در سطح مقطعی که از آن عبور می‌کند ضرب شود $(\frac{\pi d^2}{4})$ تعدادمولهای انتقال یافته محاسبه خواهد شد. با توجه به توضیحات داریم:

$$\dot{n}_A \frac{\frac{1}{3} C_{A0}}{t} = N_A \cdot A = \frac{D_{AB} P}{RTZ} \ln\left(\frac{P_t - P_{A2}}{P_t - P_{A1}}\right) \cdot \frac{\pi d^2}{4}$$

$$\bar{R} = \frac{R}{M}, \frac{P}{RT} = C_{A0}, Z = 0.1 \text{ m}, d = 0.02 \text{ m}, P_{A2} = 0, P_{A1} = \frac{2}{3} P_t$$

$$D_{AB} = 3/33 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$\Rightarrow \frac{\frac{1}{3} C_{A0}}{t} = 3/33 \times 10^{-5} C_{A0} \times M \times \ln\left(\frac{P_t - 0}{P_t - \frac{2}{3} P_t}\right) \times \frac{\pi \times 0.02^2}{4}$$

$$\ln\left(\frac{P_t}{P_t - \frac{2}{3} P_t}\right) = \ln 3 = 2 \ln 1.5 = 0.4 \Rightarrow t = \frac{10000}{24} = 10/4 \text{ s}$$

P_{A2} متوسط غلظت نهایی است که ما همان غلظت نهایی $(\frac{2}{3} P_t)$ فرض کردیم.

۷- گزینه «۲» صحیح است.

انتقال جرم صورت گرفته با توجه به تفاوت غلظت خروجی و ورودی انجام می‌شود. این مقدار انتقال جرم بواسطه نفوذ نفتالین به درون هوا صورت می‌گیرد.

با توجه به توضیحات داریم:

$$V_o(C_{Aout} - C_{Ain}) = V_o(C_{Aout} - 0) = V_o C_{Aout} \quad (1)$$

$$k_c a l(C_A^* - \bar{C}_A) = \text{شار ناشی از نفوذ نفتالین به درون هوا} \quad (2)$$

\bar{C}_A متوسط غلظت هوای گذرنده از روی کره‌های نفتالین است. برای \bar{C}_A داریم:

$$\bar{C}_A = \frac{C_{Aout} + C_{Ain}}{2} = \frac{C_{Aout} + 0}{2} = \frac{C_{Aout}}{2}$$

$$(1) = (2) \Rightarrow V_o C_{Aout} = k_o a L (C_A^* - \frac{C_{Aout}}{2})$$

$$\Rightarrow \frac{V_o}{k_o a L} C_{Aout} + \frac{C_{Aout}}{2} = C_A^* \Rightarrow C_{Aout} = \frac{2C_A^*}{1 + \frac{2V_o}{k_o a L}}$$

$$C_A^* = \frac{P^*}{RT} \Rightarrow C_{Aout} = \frac{2P^*}{RT \left[1 + \frac{2V_o}{k_o a L} \right]}$$

۸- گزینه «۲» صحیح است.

با توجه به تست شماره (۴۶) فصل دوم داریم:

$$N = \frac{D_1(C_o - C_1) + D_2(C_1 - C_2)}{L}$$

اگر ضرایب نفوذ (D_1, D_2) و همچنین ضخامت (L) دو برابر بشود، اثر آنها از صورت و مخرج N حذف شده و شار N تغییر نمی‌کند.

۹- گزینه «۲» صحیح است.

با توجه به رابطه کلی در فصل دوم (به جای R از R_o استفاده می‌کنیم) داریم:

$$\dot{m}_A = \frac{4\pi D_{AB} r R_o}{r - R_o} \ln \left(\frac{C - C_A}{C - C_{A_s}} \right)$$

C_A غلظت در $\begin{cases} r = r \\ r > R_o \end{cases}$ می‌باشد که می‌تواند این غلظت صفر باشد (به واسطه دور بودن از کره)

از طرفی در مخرج و کسر می‌تواند $r \gg R_o$ باشد، یعنی در مخرج کسر فقط r ظاهر می‌شود. در

رابطه کلی نیز می‌توان به جای C از $\frac{P_T}{RT} (R)$ ثابت جهانی گازها استفاده کرد. همچنین ساده‌سازی

$$\frac{C - C_A}{C - C_{A_s}} = \frac{C - 0}{C - C_{A_s}} = \frac{1}{1 - \frac{C_{A_s}}{C}} = \frac{1}{1 - x_{A_s}}$$

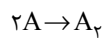
توضیحات گفته شده N_A برابر است با:

$$\frac{\dot{m}_A}{M_A} = N_A = \frac{4\pi D_{AB} \frac{P_T}{RT} r R_o}{r} \ln \left(\frac{1}{1 - x_{A_s}} \right) = \frac{4\pi R_o P_T D_{AB}}{RT} \ln \left(\frac{1}{1 - x_{A_s}} \right)$$

۱۰- گزینه «۲» صحیح است.

واکنش $A \rightarrow B$ شبیه سیستم‌های نفوذ متقابل با مول‌های مساوی ($N_A = -N_B$) است، لذا گزینه (۱) یا (۲) صحیح می‌باشد. از طرفی چون واکنش خیلی سریع است غلظت A روی سطح بستر صفر می‌باشد و لذا غلظت B در این نقطه با غلظت کل برابر است. با توجه به توضیحات گزینه‌ی (۲) صحیح است.

۱۱- گزینه «۴» صحیح است.



$$\frac{N_A}{2} = -\frac{N_{A_2}}{1} \Rightarrow r_A = \frac{N_A}{N_A + N_{A_2}} = \frac{N_A}{N_A - \frac{1}{2}N_A} = 2$$

$$N_A = r_A \cdot \frac{D_{AB}C}{z} \ln\left(\frac{r_A - y_{A_2}}{r_A - y_{A_1}}\right)$$

چون واکنش سریع است $y_{A_2} = 0$ بوده و با توجه به رابطه‌ی فوق داریم:

$$N_A = 2 \frac{P}{RTz} \ln\left(\frac{2-0}{2-y_{A_1}}\right) = -2 \frac{p}{RTz} \ln\left(1 - \frac{y_{A_1}}{2}\right)$$

۱۲- گزینه «۹» صحیح است.

ضریب نفوذ در گازها متناسب با $T^{3/2}$ و در مایعات متناسب با T می‌باشد و لذا داریم:

$$D \sim \frac{T^{3/2}}{T} \sim T^{1/2}$$

$$\frac{D_2}{D_1} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{1/2} \Rightarrow \frac{D_2}{D_1} = \left(\frac{273+41}{273+5}\right)^{1/2} > 1$$

گزینه‌های (۳) و (۴) صحیح هستند.

۱۳- گزینه «۱» صحیح است.

غلظت آب (B) در توده‌ی آب خالص بیشتر از غلظت آب در کریستال بوده و لذا جهت نفوذ مولکولی B از آب خالص به سمت کریستال است. از طرفی چون کل کریستال در آب خالص حل می‌شود جهت نفوذ توده از سمت کریستال به سمت آب خالص است.

۱۴- گزینه «۹» صحیح است.

این تست اشتباه است زیرا مجموع درصد‌های مولی از ۱۰۰ بیشتر می‌باشد.

۱۵- گزینه «۱» صحیح است.

با توجه به توضیحات فصل اول در حالت نفوذ در فیلم ساکن گزینه (۱) صحیح است.

۱۶- گزینه «۴» صحیح است.

ترم J_A نشان‌دهنده‌ی شار ناشی از نفوذ ملکولی و ترم $X_A \sum Ni$ نشان‌دهنده‌ی شار ناشی از نفوذ توده می‌باشد.

۱۷- گزینه «۱» صحیح است.

$$\frac{N_A}{1} = \frac{-N_C}{2}, \quad N_A = r_A \frac{D_{AB}}{RTZ} \ln\left(\frac{r_A - y_{A2}}{r_A - y_{A1}}\right)$$

$$r_A = \frac{N_A}{\sum N_i}, \quad \sum N_i = N_A + N_C = N_A - 2N_A = -N_A$$

$$r_A = \frac{N_A}{-N_A} = -1$$

چون B در فاز جامد است در $\sum N_i$ وارد نمی‌شود. از آنجائیکه واکنش سریع می‌باشد $y_{A2} = 0$ بوده و لذا داریم:

$$N_A = (-1) \left(\frac{D_{AB} P}{RTZ} \right) \ln\left(\frac{-1-0}{-1-y_{A1}} \right) = \frac{D_{AB} P}{RTZ} \ln(1+y_{A1})$$

$$N_C = -2N_A = \frac{2D_{AB} P}{RTZ} \ln(1+y_{A1})$$

۱۸- گزینه «۱» صحیح است.

با توجه به تغییرات غلظت در حالت نفوذ در فیلم ساکن داریم:

$$\frac{1-x_A}{1-x_{A1}} = \left(\frac{1-x_{A2}}{1-x_{A1}} \right)^{\frac{Z-Z_1}{Z_2-Z_1}}, \quad Z_1 = 0, \quad Z_2 - Z_1 = L$$

در سیستم گازی x_A به y_A تبدیل شده و با ضرب کردن صورت و مخرج سمت چپ رابطه‌ی فوق در P (فشار کل) داریم:

$$\frac{P - P_A}{P - P_{A1}} = \left(\frac{1 - y_{A2}}{1 - y_{A1}} \right)^{\frac{Z}{L}} \Rightarrow \frac{dP_A}{dZ} = -P_{A1} \left[\left(\frac{1 - y_{A2}}{1 - y_{A1}} \right)^{\frac{Z}{L}} \cdot \ln\left(\frac{1 - y_{A2}}{1 - y_{A1}} \right) \cdot \frac{1}{L} \right]$$

$$\Rightarrow \frac{dP_A}{dZ} \Big|_{Z=0} = \frac{\left(\frac{1 - y_{A2}}{1 - y_{A1}} \right)^{\frac{0}{L}}}{\left(\frac{1 - y_{A2}}{1 - y_{A1}} \right)^{\frac{L}{L}}} = \frac{1}{\left(\frac{1-0}{1-0.1} \right)} = \frac{1}{0.9} = 0.9$$

در مشتق‌گیری از رابطه‌ی زیر استفاده نشده است:

$$(a^u)' = a^u \cdot \ln a \cdot u'$$

۱۹- گزینه «۱» صحیح است.

با توجه به نفوذ در سیستم استوانه‌ای داریم:

$$N_A \cdot r = cte = k, N_A = J_A = -D_{AB} \frac{dc_A}{dr}$$

$$\Rightarrow -D_{AB} \frac{dc_A}{dr} \cdot r = k \Rightarrow dc_A = \left(\frac{-k}{D_{AB}}\right) \frac{dr}{r} = k' \frac{dr}{r}$$

$$\Rightarrow c_A = k' \ln r + k''$$

$$\textcircled{a} r = r_i, c_A = c_{A_i} \Rightarrow c_{A_i} = k' \ln r_i + k'' \quad \text{(I)}$$

$$\textcircled{a} r = r_o, c_A = 0 \Rightarrow 0 = k' \ln r_o + k'' \quad \text{(II)}$$

با توجه به روابط (I) و (II) داریم:

$$k'' = -k' \ln r_o \Rightarrow c_{A_i} = k' \ln r_i - k' \ln r_o = k' \ln \left(\frac{r_i}{r_o}\right)$$

$$\Rightarrow k' = C_{A_i} \ln \left(\frac{r_o}{r_i}\right) \Rightarrow k'' = -C_{A_i} \ln \left(\frac{r_o}{r_i}\right) \cdot \ln r_o$$

با جایگذاری k' و k'' در رابطه کلی غلظت داریم:

$$C_A = C_{A_i} \ln \left(\frac{r_o}{r_i}\right) \ln r - C_{A_i} \ln \left(\frac{r_o}{r_i}\right) \ln r_o$$

$$= C_{A_i} \ln \left(\frac{r_o}{r_i}\right) [\ln r - \ln r_o] = C_{A_i} \ln \left(\frac{r_o}{r_i}\right) \cdot \ln \left(\frac{r}{r_o}\right)$$

در $r = \frac{r_i + r_o}{2}$ غلظت برابر است با:

$$C_A = C_{A_i} \cdot \ln \left(\frac{r_o}{r_i}\right) \ln \left(\frac{r_i + r_o}{2r_o}\right) = C_{A_i} \frac{\ln \left(\frac{r_i + r_o}{2r_o}\right)}{\ln \left(\frac{r_i}{r_o}\right)}$$

منابع

- ۱- انتقال جرم و عملیات واحد - تریبال.
- ۲- عملیات واحد - مک کیب.