
بسم الله الرحمن الرحيم

شرح جامع

انتقال جرم و عملیات واحد ۱ و ۲

«مهندسی شیمی»

مولف: حامد خوری

کارشناس ارشد مهندسی شیمی

از دانشگاه صنعتی شریف



پیشگفتار ناشر

خداوند بزرگ را شاکریم که فرصتی عنایت فرمود تا بتوانیم قدمی در جهت گسترش علم و فرهنگ کشور عزیزمان برداریم و مسیری هموار را در اختیار مخاطبان و داوطلبان علاقمند به ادامه تحصیل قرار دهیم. از آنجائی که درحوزه کتاب‌های درسی و کمک درسی کارشناسی ارشد کتاب‌های زیادی به رشته تحریر در آمده است با این حال وجود یک مجموعه جامع، دقیق، کامل و دارای رفرنس(منابع) مستند احساس می‌شود.

همیشه دغدغه داشتیم که ای کاش می‌شد تمامی منابع پراکنده و گاهاً دست نایافتنی کنکور در یک مجموعه به گونه‌ای جذاب و شیوا آماده می‌شد و همچنین سوالات دوره‌های قبل کنکور نیز به گونه‌ای تشریحی پاسخ داده می شدند، که خدشه‌ای بر آنها وارد نشود و خیال داوطلبان عزیز آنقدر آسوده باشد که اطلاعات مندرج در پاسخنامه‌ها را برای بهره‌گیری در آزمون خود بکار گیرند. این کار با یاری خداوند بزرگ و همکاری نخبه‌ترین دانشجویان و اساتید کشور در انتشارات ارشد هماهنگ گردید و در تمامی مقاطع تحصیلی از کاردانی به کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری در حوزهٔ آزمون‌های سراسری – آزاد و پیام نور بسته‌های آموزشی شامل کتاب‌های بانک سوالات و کتاب‌های شرح جامع درس آماده گردید. در تهیه مجموعه‌های فوق‌الذکر از فارغ‌التحصیلان کارشناسی ارشد و دکتری که حائز رتبه‌های تک رقمی کنکور می‌باشند، استفاده کرده‌ایم، تا شما عزیزان بتوانید در راستای افزایش توان علمی خود در جهت نیل به مقصود خویش نایل آیید. بدون تردید می‌توان گفت که برای اولین بار در نظام آموزشی کشور مجموعه‌ای به این سبک عرضه می‌شود که در کیفیت و کمیت بی‌نظیر بوده و تمامی نیازهای دانشجویان و داوطلبان عزیز را پوشش می‌دهد. امید است که استفاده از این مجموعه عزیزان را در جهت موفقیت در آزمون یاری رسانده باشد. در پایان لازم به ذکر است که بی نقصی محض از آن خداوند متعال می‌باشد، بنا براین از تمامی خوانندگان و داوطلبان عزیز خواهشمندیم نظرات سازنده خود را در مورد این کتاب به سایت انتشارات ارشد اعلام نمایند تا ما را در جهت هر چه بهتر آماده کردن این محصولات یاری رسانند.

با تشکر

ناشـــــر

www.arshadbook. ir

پیشگفتار مولف

درس اتنقال جرم و عملیات واحد در بین دروس تخصصی رشته مهندسی شیمی هم به جهت کاربرد عملی در اشتغال و هم به جهت وسعت و تنوع مطالب، همواره از جایگاه ویژه‌ای برخوردار بوده است. این درس که در مقطع کارشناسی طی ۹ واحد در دانشگاه‌های داخل کشور تدریس می‌گردد، در آزمون کارشناسی ارشد تمام گرایش‌های رشته مهندسی شیمی مورد توجه خاص طراحان آزمون بوده است و همواره ضریب مربوط به این درس از دیگر دروس آزمون کارشناسی ارشد بیشتر بوده است.

در این کتاب، سعی شده است نکات مهم و برجسته مربوط به درس انتقال جرم و عملیات واحد، در یک مجموعه جمع‌آوری گردد و در این مسیر همواره تلاش گردیده است که از مراجع زیر که جزو معتبرترین مراجع این درس می‌باشند، استفاده گردد:

1- mass-transfer operations, R. E. Treybal, McGRAW-HILL
2- Unit operations of chemical Engineering, W.L.Mc Cabe, etal, McGRAW-HILL

بی‌شک، درس انتقال جرم و عملیات واحد، با آن گستردگی مفاهیم و کاربرد، در این کتاب بصورت جامع و مانع تدوین نگردیده است و در این کتاب صرفاً نکات برجسته و خلاصه‌ای از مفاهیم مهم و ضروری آورده شده است. لذا استفاده از این کتاب پس از گذراندن یا در حین گذران دروس دانشگاهی مربوطه، توصیه می‌شود.

این کتاب می‌تواند مورد استفاده داوطلبین کارشناسی ارشد کلیه گرایش‌های مهندسی شیمی، دانشجویانی که در حال گذراندن درس انتقال جرم و عملیات واحد مهندسی شیمی در دانشگاه هستند و دانشجویان رشته‌های شیمی صنعتی، شیمی کاربردی، متالوژی در دروس مربوطه، قرار گیرد.

در تدوین این کتاب، سعی شده است کلیه مطالب مربوط به یک موضوع در یک «نکته» جمع‌آوری شود لذا نکات چند سطری یا چند صفحه‌ای اجتناب‌ناپذیر می‌نمود. علی رغم حجم کم کتاب حاضر، به جرات می‌توان گفت که کلیه نکات سوالات آزمونهای کارشناسی ارشد ۱۰ سال گذشته داخل کشور، در این کتاب موجود است و این کتاب با اطمینان خاطر می‌تواند به عنوان مرجعی مطمئن برای نکات کلیدی این درس مورد استفاده قرار گیرد. تمامی نکات و مطالب درج شده در این کتاب از دو مرجع ذکر شده و دیگر مراجع معتبر این درس اخذ گردیده است. لذا اعتبار و صحت نکات ذکر شده، کاملاً مورد تأیید مراجع ذی صلاح می‌باشد.

این کتاب در بخش نخست به نکات برجسته درس انتقال جرم پرداخته است و در ادامه تست‌های تألیفی برای سنجش صحت درک مطالب درس انتقال جرم آورده شده است که توصیه می‌شود این تست‌ها پس از مطالعه دقیق و عمیق نکات بخش اول پاسخ داده شود. و در انتقال بخش پاسخنامه مربوط به آزمون انتقال جرم آورده شده است. در بخش دوم نکات مربوط به درس عملیات واحد ذکر شده است و در ادامه همان بخش، تست‌های تألیفی مربوطه و در انتها پاسخنامه آزمون عملیات واحد آورده شده است و در بخش انتهایی کتاب سوالات درس انتقال جرم و عملیات واحد کنکور کارشناسی ارشد مهندسی شیمی ۱۳۸۹ به همراه پاسخنامه تشریحی آن آورده شده است. بسیار مناسب است که مطالعه کتاب بانک سوالات

کارشناسی ارشد مهندسی شیمی درس انتقال جرم و عملیات واحد که از همین مولف و همین ناشر بـه زیـور طبـع آراسـته گردیده است و شامل سوالات ۲۳ دوره آزمونهای کارشناسی ارشد مهندسی شیمی به همراه پاسخنامه تشریحی مـی‌باشـد را به خواننده محترم توصیه نمائیم.

علی‌رغم تلاش خارج از تصور، به جهت وفاداری به متن اصلی مطالب و پرهیز از درج مطالب غیر معتبر، بی‌شـک کتـاب حاضر دارای ایرادات و اشکالاتی می‌باشد که از نگاه تیزبین و موشکافانه خواننده محتـرم پنهـان نخواهـد مانـد. لـذا از کلیـه دانشجویان، داوطلبین، مهندسین و اساتید محترم خواهشمند است هر گونه ایراد، اشکال و یا انتقادی را که بر این کتاب وارد می‌دانند، به آدرس ناشر و یا پست الکترونیکی مولـف JUNEEKA@GMAIL.COM ارسـال نماینـد و مـا را در تـصحیح و تکمیل این کتاب یاری نمایند.

هذا من فضل ربی

حامد خوری

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

پیشگفتار ناشر ۳
پیشگفتار مولف ۴

فصل اول: انتقال جرم

درسنامه انتقال جرم ۹

تست‌های تألیفی ۳۵
پاسخ تست‌های تألیفی ۵۳

فصل دوم: عملیات واحد

درسنامه عملیات واحد ۷۳

تست‌های تألیفی ۱۴۰
پاسخ تست‌های تألیفی ۱۵۹

سوالات انتقال جرم و عملیات واحد ۱ و ۲ سراسری سال ۱۳۸۹ ..... ۱۷۹
پاسخنامه انتقال جرم و عملیات واحد ۱ و ۲ سراسری سال ۱۳۸۹ ..... ۱۸۳

فصل اول

انتقال جرم

عناوین اصلی

- درسنامه انتقال جرم
- تست‌های تالیفی
- پاسخ تست‌های تالیفی

فصل اول

انتقال جرم

درسنامه انتقال جرم

۱-۱- در بسیاری از عملیات واحدهای صنعتی، تغییر غلظت در محلول‌ها الزاماً توسط واکنش‌های شیمیایی صورت نمی‌گیرد. چنانچه عملیات واحدی بدون حضور واکنش شیمیایی، شامل تغییر در ترکیب درصد محلول‌ها بشود، به عنوان یک «عملیات انتقال جرم» شناخته می‌شود. مشخصه «عملیات‌های انتقال جرم» انتقال یک ماده از درون ماده‌ای دیگر در مقیاس مولکولی است.»

۱-۲- عملیات‌های انتقال جرم در چهار گروه کلی زیر تقسیم‌بندی می‌شوند:

الف) تماس مستقیم (direct contact) دو فاز نامحلول در یکدیگر
ب) جداسازی با استفاده از غشاء (membrane)
ج) تماس مستقیم (direct contact) دو فاز محلول
د) جداسازی با استفاده از پدیده سطحی (surface phenomena)

۱-۳- عملیات‌های انتقال جرم شامل دو فاز نامحلول، به طریق زیر تقسیم می‌شوند:

الف) عملیات مستقیم (direct): طی عملیات از یک فاز محلول، دو فاز تقریباً خالص با وارد کردن یا خارج کردن حرارت حاصل می‌شود. تقطیر جزئی (fractional distillation)- کریستالیزاسیون جزئی (fractional crystallization) و یکی از شکل‌های استخراج جزئی (fractional extraction) از موارد این نوع عملیات هستند.
ب) عملیات غیر مستقیم (indirect): این عملیات‌ها شامل افزودن یک جسم ثالث هستند. جذب گاز- دفع گاز- جذب سطحی- خشک کردن- (leaching) و استخراج مایع از موارد این نوع عملیات هستند.

۱-۴- انواع عملیات‌های انتقال جرم بصورت تماس مستقیم دو فاز نامحلول

این طبقه از عملیات‌های انتقال جرم از بقیه مهمتر است و اغلب عملیات‌های انتقال جرم در این طبقه قرار می‌گیرند:

- **تقطیر و تقطیر جزئی (fractional distillation):** اگر همه اجزاء (components) درون سیستم در زمان تعادل بین دو فاز توزیع شده باشند، به آن تقطیر یا تقطیر جزئی می‌گویند. (مایع به گاز)
- **جذب گاز (gas absorption):** هر دو فاز مایع و فاز گاز، حاوی یک ماده مشترک هستند که از فاز گاز جذب فاز مایع می‌شود. (گاز به مایع)

- **دفع یا عریان سازی (desorption یا stripping)**: مشابه جذب گاز است با این تفاوت که ماده منتقل شونده از فاز مایع به فاز گاز جذب می‌شود. (مایع به گاز)
- **مرطوب سازی (humidification) و رطوبت زدایی (dehumidification)**: عملیاتی که در آن انتقال جرم از فاز مایع کاملاً خالص (pure) به فاز گاز شامل دو یا چند ماده باشد را عملیات مرطوب‌سازی گاز گویند. برعکس اگر انتقال جرم از فاز گاز شامل دو یا چند ماده به فاز مایع کاملاً خالص باشد به آن عملیات رطوبت‌زدایی گاز گویند.
- **Fractional sublimation**: اگر یک محلول جامد به صورت جزئی در فاز گاز تبخیر شود بطوریکه فاز مایع ظاهر نشود را گویند. (جامد به گاز)
- **خشک کردن (drying)**: اگر یک جامد مرطوب در مجاورت یک گاز خشک قرار گیرد، رطوبت به فاز گاز منتقل می‌شود و به این عملیات، خشک کردن می‌گویند. (جامد به گاز) (شبیه دفع)
- **جذب سطحی (adsorption) یا جذب سطحی جزئی (fractional adsorption)**: اگر انتقال جرم از فاز گاز به جسم جامد باشد، عملیات را جذب سطحی می‌گویند. اگر چند ماده در گاز وجود داشته باشد و هر یک با یک مقدار مشخص جذب جامد شوند، به آن جذب سطحی جزئی گویند. (گاز به جامد)
- **استخراج (extraction) و استخراج جزئی (fractional extraction)**: جداسازی دو فاز مایع نامحلول از یکدیگر را با استفاده از مایع دیگری را استخراج گویند. اگر چند ماده در یکدیگر نامحلول باشند و با استفاده از مایع ثالث، یکی از آنها از بقیه تفکیک شود، به آن استخراج جزئی می‌گویند (مایع به مایع).
- نوع دیگری از استخراج جزئی بدین ترتیب عمل می‌شود که یک محلول تک فاز را تا پایین‌تر از دمای بحرانی محلول سرد می‌کنند و بدین ترتیب دو فاز مایع با ترکیب درصد متفاوت حاصل می‌شود.
- **کرستالیزاسیون جزئی (fractional crystallization)**: در سیستم‌های جامد و مایع، هرگاه همه اجزاء، در حالت تعادل در هر دو فاز حضور داشته باشند، عملیات را کریستالیزاسیون جزئی گویند.
- **پالایش ناحیه‌ای (zone refining)**: یک تکنیک ویژه است که با استفاده از کریستالیزاسیون جزئی، قادر به تولید فلزات فوق خالص (ultra pure) و تولید نیمه هادی‌ها (semiconductors) می‌باشد.
- **کریستالیزاسیون گزینشی (adductive crystallization)**: یک نوع کریستالیزاسیون جزئی است که در آن یک ماده‌ای وجود دارد که بطور گزینشی و انتخابی، مولکول‌های طویل راست- زنجیر شبیه هیدروکربن‌های پارافینی را جذب می‌کند اما خودش مولکول‌های شاخه‌دار دارد. شبیه اوره.
- **Leaching**: عملیات جداسازی یک ماده از مخلوط جامد بوسیله یک حلال مایع را گویند. (جامد به مایع)
- **جذب سطحی (adsorption)**: عملیات جداسازی دو مایع بوسیله یک جامد را گویند (مایع به جامد)

📖 نکته:

- در سیستم‌های گاز به گاز بخاطر محلول بودن کامل اغلب گازها در یکدیگر، عملیات خاصی مورد نیاز نیست.
- در سیستم‌های جامد- جامد بخاطر نفوذ بسیار کم درون یکدیگر، هیچ عملیات صنعتی در این قسمت انجام نمی‌شود.

۱-۵- انواع عملیات انتقال جرم که فازها با کمک غشاء (membrane) جداسازی می‌شوند:

- **تراوش گازی (effusion)**: که همان (gaseous diffusion) است. بر اساس اختلاف جرم مولکولی اجزاء که از غشاء با سرعتی متناسب با جرم مولکولی عبور می‌کنند، پس از مدتی در دو طرف غشاء اختلاف ترکیب درصد حاصل می‌شود. از این عملیات برای جداسازی ایزوتوپ‌های اورانیوم به شکل گازی HF_6 استفاده می‌شود. در این حالت غشاء دارای ریز تخلخل است. (micro porous) (گاز به گاز).

- **تراوایی (permeation):** در این مورد، غشاء متخلخل نیست. اجزاء ابتدا در غشاء حل می‌شوند و سپس در آن نفوذ می‌کنند. این عملیات بر اساس اختلاف حلالیت اجزاء در غشاء عمل می‌کند. جدا سازی هلیوم از گاز طبیعی با غشائی از جنش پلیمر فلوروکربن مثالی از این عملیات است. (گاز به گاز)
- **تراوایی:** می‌تواند برای جداسازی گاز محلول در مایع نیز بکار رود. (مایع به گاز)
- **دیالیز (dialysis):** جداسازی یک ماده کریستالی از محلول غلیظ اولیه بوسیله افزودن یک حلال به محلول و استفاده از یک غشاء که فقط نسبت به حلال و ماده کریستالی حل شده تراوایی دارد را گویند. (مایع به مایع)
- **دیالیز جزئی (fractional dialysis):** هنگامی‌که جداسازی دو ماده کریستالی از محلول با استفاده از تفاوت تراوایی اجسام در غشاء مطرح است، عملیات دیالیز جزئی مطرح می‌شود.
- **الکترودیالیز (electro dialysis):** اگر یک نیروی «محرک الکتریکی» (electro motive) به طرفین غشاء اعمال شود تا به نفوذ مولکولی اجزاء باردار شده، کمک کند، عملیات الکترودیالیز خواهد بود.
- **Osmosis:** هنگامی‌که محلولی از یک حلال خالص توسط یک غشاء، که فقط نسبت به حلال تراوایی دارد، جدا شده‌است و حلال در محلول نفوذ می‌کند، عملیات اسمزی اتفاق افتاده‌است. این عملیات یک عملیات جداسازی نیست این عملیات یک نوع عملیات اختلاط (mixing) است. (مایع- مایع)
- **اسمز معکوس (Reverse osmosis):** در شرایط عملیات اسمزی، اگر یک فشار خارجی در جهت خلاف فشار اسمزی به غشاء اعمال شود، عملیات در جهت برعکس اسمز اتفاق می‌افتد و حلال و محلول از یکدیگر جدا می‌شوند. این عملیات در نمک‌زدایی از آب دریا کاربرد مهمی دارد. (مایع- مایع)

۱-۶- انواع عملیات انتقال جرم که به صورت تماس مستقیم دو فاز «محلول» انجام می‌شود:

به علت اینکه برقراری و حفظ گرادیان غلظت بدون همزدن مکانیکی بسیار مشکل است، عملیات‌های این قسمت عموماً غیرعملی و غیرکاربردی در صنعت هستند مگر در شرایط استثنایی.

- **نفوذ حرارتی (thermal diffusion):** هنگامی‌که درون یک مایع منفرد یا یک فاز گازی، تغییرات غلظت بر اساس اعمال یک گرادیان دما روی سیال اتفاق بیافتد را گویند. مثل جداسازی ایزوتوپ‌های هلیوم ^{3}He از ^{4}He با این روش.
- **نفوذ خزنده (sweep diffusion):** هنگامی‌که یک مقدار از بخار قابل ملاحظه، از میان یک مخلوط گازی نفوذ می‌کند، بطور ترجیحی یکی از اجزاء را نیز به همراه خود منتقل می‌کند که به آن نفوذ خزنده می‌گویند.
- **atmolysis:** اگر دو ناحیه از یک فاز گازی که تفاوت غلظت نیز دارند، توسط یک صفحه سوراخدار با سوراخ‌های نسبتاً بزرگ جدا شود، به این عملیات atmolysis گویند.
- **سانتری فوژ (centrifugation):** اگر یک مخلوط گازی وارد یک سانتری فوژ بسیار سریع شود، اجزاء آن از یکدیگر تفکیک می‌شوند. این تفکیک بر اساس اختلاف جرم مولکولی اجزاء اتفاق می‌افتد که هر چقدر جرم مولکولی بیشتر باشد، آن جزء تمایل بیشتری دارد که در انتهای سانتری فوژ جمع شود. از این عملیات برای جداسازی ایزوتوپ‌های اورانیوم نیز استفاده می‌شود.

۱-۷- انواع عملیات انتقال جرم با استفاده از پدیده سطحی (surface phenomena):

اجسامی هستند که به هنگام حل شدن در یک مایع، یک محلول با کشش سطحی (surface tension) کمتری تولید می‌کنند. این اجسام با تشکیل کف (foam) با سطح تبادل زیاد، باعث تغلیظ محلول می‌شوند. به این عملیات، جداسازی با کف (foam separation) می‌گویند و در تفکیک پودرهای شوینده (detergents) از آب کاربرد دارد.

۱-۸- روش‌های هدایتی (conducting) عملیات‌های انتقال جرم

الف) **عملیات ناپیوسته (unsteady- state):** مشخصه این عملیات این است که غلظت‌ها در هر نقطه از دستگاه با زمان تغییر می‌کند. دارای دو نوع batch و semi batch است.

ب) **عملیات پیوسته (steady- state):** مشخصه این عملیات این است که غلظت‌ها در هر نقطه از دستگاه با گذشت زمان تغییر نمی‌کند و ثابت است.

ج) **عملیات مرحله‌ای (stage wise):** هنگامی که دو فاز نامحلول در ابتدا در تماس با یکدیگر قرار می‌گیرند بطوریکه اجزاء مربوطه بین دو فاز توزیع شوند و سپس فازها بطور مکانیکی جدا می‌شوند را عملیات مرحله‌ای گویند. می‌تواند دارای چندین مرحله (stage) باشد. (cascades)

د) **عملیات تماس- پیوسته (continuous- contact):** این عملیات می‌تواند بصورت semi batch و یا پیوسته عمل کند. تعادل بین دو فاز در هیچ نقطه از تجهیزات هرگز اتفاق نمی‌افتد. در حقیقت، اگر عملیات شامل بینهایت تعداد مرحله (stage) باشد، تعادل اتفاق می‌افتد.

ه) اگر اجزاء یک محلول را بتوان به دو گروه مجزا تفکیک کرد که این دو گروه، خواص کاملاً متفاوتی داشته باشد، بطوریکه بتوان یکی از گروه‌ها را «حلال» و یک گروه دیگر را «حل شونده» فرض نمود آنگاه عملیات جداسازی این دو گروه معمولاً ساده است و به آن عملیات "بازیافت حل شونده" «solute- recovery» می‌گویند.

۱-۹- در هر طراحی تجهیزات عملیات انتقال جرم، چهار اصل طراحی باید در نظر گرفته شود:

الف) تعداد مراحل تعادلی: برای محاسبه آن به اطلاعات تعادلی و محاسبات انتقال جرم مورد نیاز است.

ب) زمان: زمان تماس بین فازها عامل اصلی تعیین راندمان دستگاه در عملیات مرحله‌ای خواهد بود. برای یک درجه مشخص از نزدیکی تماس فازها، زمان مورد نیاز برای تماس، مستقل از مقدار کلی (دبی) فازها است.

ج) انرژی: انرژی مکانیکی و حرارت معمولاً برای انجام عملیات‌های نفوذ مولکولی مورد نیاز است.

د) دبی جریان مجاز: از روی دبی جریان، سطح مقطع دستگاه بدست می‌آید. از ملاحظات دینامیک سیالات، دبی جریان مجاز بدست می‌آید.

۱-۱۰- مبانی انتخاب عملیات مورد نیاز، متفاوت است. عملیات انتقال جرم می‌تواند با یا بدون واکنش شیمیایی و با یا بدون روش‌های مکانیکی انتخاب شود.

اما مهم‌ترین و اساسی‌ترین مبنای انتخاب عملیات مورد نیاز در هر حالتی، قیمت تمام شده (cost) اجرای عملیات طراحی شده، می‌باشد.

۱-۱۱- نفوذ مولکولی عبارت از حرکت مولکول‌های منفرد از درون یک جسم دیگر است. نفوذ مولکول‌ها به انرژی حرارتی (thermal energy) آن‌ها وابسته است. در تئوری جنبشی ساده شده (simplified kinetic theory) مسیر حرکت یک مولکول، تا زمانی‌که به یک مولکول دیگر برخورد کند، یک خط راست با یک سرعت یکنواخت فرض می‌شود.

در واقعیت، مسیر طی شده یک مولکول به شدت زیگ‌زاگ (zig zag) است.
متوسط مسافتی که مولکول بین دو برخورد طی می‌کند را مسافت متوسط آزاد (mean free path) می‌گویند.

۱-۱۲- می‌توان انتظار داشت که در هر شرایطی نرخ نفوذ (diffusion rate) با کاهش فشار و افزایش دما، افزایش یابد.

کاهش فشار تعداد برخورد مولکولی را کاهش می‌هد. افزایش دما باعث افزایش سرعت مولکولی می‌شود.

۱-۱۳- بین سه پدیده زیر باید تفاوت قائل شد:

۱- نفوذ مولکولی
۲- اختلاط مکانیکی (mechanical stirring)- نفوذ اغتشاشی (turbulent or eddy diffusion)
۳- حرکت کنوکسیونی سیال

کمترین نرخ انتقال در نفوذ مولکولی و بیشترین آن در اختلاط مکانیکی است و نرخ کنوکسیونی بین این دو است.

۱-۱۴- نیروی محرکه (driving force) واقعی برای نفوذ، غلظت نیست بلکه اکتیوتیه یا پتانسیل شیمیایی است.

۱-۱۵- N= فلاکس انتقال جرم نسبت به یک نقطه ثابت در فضا. (مقدار کلی تولید را مشخص می‌کند).

J: فلاکس نسبت به سرعت متوسط مولی همه اجزاء. (کیفیت تولید را مشخص می‌کند).

۱-۱۶- قانون اول فیک (Fick) بیان می‌کند در حالتی‌که تنها عامل مؤثر در انتقال جرم نفوذ مولکولی باشد، نسبت فلاکس انتقال جرم به گرادیان غلظت، مقدار ثابتی است که به این مقدار ثابت D_{AB} نفوذیت (diffusivity) یا ضریب نفوذ (diffusion coefficient) گفته می‌شود:

$$J_A = -D_{AB}\frac{\partial C_A}{\partial z} = -CD_{AB}\frac{\partial x_A}{\partial z} = -D_{AB}\nabla C_A$$

علامت (-) تأکید می‌کند که نفوذ در جهت کاهش غلظت رخ می‌دهد.

۱-۱۷- اگر دو عامل نفوذ مولکولی و حرکت کنوکسیونی سیال در انتقال جرم دخالت داشته باشند، آنگاه معادله کلی زیر برقرار است:

$$N_A = N\frac{C_A}{C} - D_{AB}\frac{\partial C_A}{\partial z} \quad ,\sum_i N_i = N_A + N_B$$

$$N_A = (N_A + N_B)x_A - CD_{AB}\frac{\partial x_A}{\partial z}$$

۱-۱۸- معادله پیوستگی (equation of continuity) با فرض ثابت بودن دانسیته ($\rho = cte$) برابر است با:

$$\frac{\partial C_A}{\partial \theta} + U_x \times \frac{\partial C_A}{\partial x} + U_y\frac{\partial C_A}{\partial y} + U_z\frac{\partial C_A}{\partial z} = D_{AB}\left(\frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C_A}{\partial z^2}\right) + R_A$$

اگر سرعت برابر صفر باشد و واکنش شیمیایی وجود نداشته باشد، خواهیم داشت:

$$\frac{\partial C_A}{\partial \theta} = D_{AB}\nabla^2 C_A = -\nabla J_A$$

که قانون دوم فیک (Fick) است.

قانون دوم فیک کاربرد وسیعی در نفوذ در جامدات و برخی موقعیت‌های محدود در سیالات دارد.

۱-۱۹- با استفاده ازرابطه نکته (۱-۱۷) و انتگرال‌گیری خواهیم داشت:

$$N_A = \frac{N_A}{N_A + N_B}.\frac{D_{AB}C}{Z}\,Ln\,\frac{\frac{NA}{N_A+N_B}-\frac{C_{A۲}}{C}}{\frac{N_A}{N_A+N_B}-\frac{C_{A۱}}{C}}$$

این رابطه کلی برای مایعات و گازها و برای نفوذ مولکولی پایا (steady- state) و برای جریان آرام (Laminar flow) صادق است.

برای گازها با فرض گاز ایده‌آل داریم:

$$\frac{C_A}{C}=\frac{\bar{p}_A}{P_t}=y_A\,,\,C=\frac{p_t}{RT}\Rightarrow N_A=\frac{N_A}{N_A+N_B}.\frac{D_AC}{Z}\,Ln\,\frac{\frac{N_A}{N_A+N_B}-y_{A۲}}{\frac{N_A}{N_A+N_B-y_{A۱}}}$$

۱-۲۰- در حالت نفوذ پایا در مخلوط‌های چند جزئی گازی، ضریب نفوذ با ضریب نفوذ مؤثر (effective diffusivity) جایگزین می‌شود. ضریب نفوذ مؤثر با استفاده از ضریب نفوذهای دوتایی (binary) از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$D_{A,m}=\frac{N_A-y_A\sum N_i}{\sum\frac{۱}{D_{Ai}}(y_iN_A-y_AN_i)}$$

در حالت خاص اگر $\sum N_i = N_A$ و همه اجزاء بجز A نفوذ نکنند، خواهیم داشت:

$$\frac{۱}{D_{A,m}}=\sum\frac{y_i'}{D_{Ai}}\quad \text{یا}\quad \frac{۱-y_A}{D_{A,m}}=\sum\frac{y_i}{D_{A,i}}$$

$y_i' =$ جزء مولی بر مبنای بدون نفوذ کننده است.

۱-۲۱- برای تخمین ضریب نفوذ در گازها از رابطه wilke- Lee استفاده می‌شود:

$$D_{AB}=\frac{۱۰^{-۴}\left(۱/۰۸۴-۰/۲۴۹\sqrt{\frac{۱}{M_A}+\frac{۱}{M_B}}\right)T^{۱/۵}\sqrt{\frac{۱}{M_A}+\frac{۱}{M_B}}}{p_t\left(r_{AB}\right)^{۲}f\left(\frac{kT}{\varepsilon_{AB}}\right)}$$

که در آن $T =$ دمای مطلق و $P_t =$ فشار مطلق و $f =$ تابع برخورد (collision function) است. تابع برخورد یک تابع نزولی از دما است یعنی با افزایش دما، مقدار آن کاهش می‌یابد.

برای مقایسه دو حالت دما و فشار متفاوت برای گازها داریم:

$$\frac{D_۲}{D_۱}=\left(\frac{T_۲}{T_۱}\right)^{۱/۵}\times\left(\frac{P_۱}{P_۲}\right)$$

۱-۲۲- در حالتی‌که محلول رقیق و غیرالکترولیت است، برای تخمین نفوذ در مایعات رقیق، رابطه تجربی wilke- chang توصیه شده‌است:

$$D^{\circ}_{AB} = \frac{۱۱۷/۳ \times ۱۰^{-۱۸} (\varphi M_B)^{۰/۵} T}{\mu V_A^{۰/۶}}$$

که در آن T = دمای مطلق، μ = و یسکوزتیه محلول و φ = ضریب وابستگی برای حلال (B) است.
برای مقایسه دو حالت دما و یسکوزیته برای مایعات، داریم:

$$\frac{D_۲}{D_۱} = \frac{T_۲}{T_۱} \times \frac{\mu_۱}{\mu_۲}$$

توجه شود که فشار تأثیری بر ضریب نفوذ در مایعات ندارد.

۱-۲۳- ضریب نفوذ در گازها در سیستم SI در حدود $۱۰^{-۵} \frac{m^۲}{S}$ است.

ضریب نفوذ در مایعات در سیستم SI در حدود $۱۰^{-۹} \frac{m^۲}{S}$ است.

ضریب نفوذ در جامدات در سیستم SI در حدود $۱۰^{-۱۰} \frac{m^۲}{S}$ است.

ضریب نفوذ در گازها مستقل از ترکیب درصد اجزاء است.

ضریب نفوذ در مایعات وابستگی شدید به ترکیب درصد محلول دارد.

برای مقایسه دو حالت برای مایعات غلیظ داریم:

$$\frac{D_{A۲}}{D_{A۱}} = \frac{T_۲}{T_۱} \times \frac{\mu_۱}{\mu_۲} \times \left(\frac{D_{BA۱} \mu_{A۱}}{D_{AB۱} \mu_{B_۱}} \right)^{x_{A۲} - x_{A۱}}$$

با فرض اینکه ویسکوزیته محلول در حالت خیلی دقیق برابر با ویسکوزیته حلال باشد. داریم:

$$\frac{D_{A۲}}{D_{A۱}} = \frac{T_۲}{T_۱} \times \frac{\mu_۱}{\mu_۲} \times \left(\left(\frac{M_A}{M_B} \right)^{۰/۵} \times \left(\frac{V_B}{V_A} \right)^{۰/۶} \right)^{x_{A۲} - x_{A۱}}$$

برای بدست آوردن ضریب خود نفوذی (self- diffusion) در گازها(D_{AA})، از روش‌های بسیار ویژه‌ای استفاده می‌شود. از جمله ردیاب‌های رادیواکتیو (radioactive tracer)

۱-۲۴- فلاکس انتقال جرم نسبت به سرعت متوسط مولی (J) همیشه به معنی انتقال جرم در جهت کاهش غلظت است یعنی از غلظت بیشتر به غلظت کمتر ولی در مورد فلاکس(N) الزاماً چنین نیست. رابطه ذکر شده در نکته (۱-۱۹) این نکته را تأیید می‌کند.

۱-۲۵- مکانیزم نفوذ مولکولی در حالتی کنترل کننده نرخ انتقال جرم است که سیال ساکن باشد، و یا سیال در جریان آرام (Laminar flow) باشد و زیر لایه آرام (Laminar sub layer) نزدیک سطح تماس وجود داشته باشد.

در عمل به ندرت شرایطی بوجود می‌آید که نفوذ مولکولی، کنترل کننده باشد و اغلب حرکت سیال بصورت مغشوش (turbulent) است.

۱-۲۶- اگر مکانیزم نفوذ مولکولی، کنترل کننده باشد و زیر لایه آرام در یک جریان آرام وجود داشته باشد آنگاه برای سه پدیده انتقال جرم، انتقال مومنتوم و انتقال حرارت داریم:

$$J_A = -D\frac{dC_A}{dz} \quad \text{(انتقال جرم)}$$

$$\tau = -\nu\frac{d(\rho v)}{dz} \quad \text{(انتقال مومنتوم)}$$

$$q = -\alpha\frac{d(\rho.C_P.t)}{dz} \quad \text{(انتقال حرارت)}$$

که در آن D = ضریب نفوذ جرمی، $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ = ضریب نفوذ مومنتومی و $\alpha = \frac{k}{\rho.c_p}$ = نفوذ حرارتی است. $Pr = \frac{\nu}{\alpha}$ = عدد پرنتل،

$S_C = \frac{\nu}{D}$ = عدد اشمیت و $Le = \frac{\alpha}{D} = \frac{Sc}{Pr}$ = عدد لویس

از تئوری جنبشی (kinetic theory) می‌توان در این حالت روابط زیر را نتیجه گرفت:

$$\left.\begin{array}{l} D_{AA} = \nu_A = \frac{w\lambda}{۳} \xrightarrow{\text{(برای گاز)}} S_C = ۱ \\ \alpha = \frac{w\lambda}{۳}\frac{C_v}{C_p} \Rightarrow Pr = \frac{C_p}{C_v} \end{array}\right\} \Rightarrow Le = \frac{C_v}{Cp} = \frac{۱}{Pr}$$

که در آن w = سرعت متوسط مولکولی و λ = مسیر متوسط آزاد (mean free path) می‌باشد.

۱-۲۷- عدد بدون بعد اشمیت برای گازها در فشارهای متوسط ۰/۶۷ الی ۰/۸۳۰است. برای مخلوط‌های دوتایی گازی تا حداکثر ۵ می‌رسد. برای مایعات از گازها بسیار بیشتر است و تا چندین هزار برای مایعات غلیظ می‌رسد.

عدد بدون بعد پرنتل برای گازها در فشار پایین ۰/۶۵ الی ۰/۹ است و برای اغلب مایعات بیشتر از گازها است. (برای آب در ۲۰ درجه سانتی‌گراد $pr = ۷/۰۲$ است.) برای مایعات تا ۶۰۰ می‌تواند باشد.

عدد بدون بعد لویس درمواردی که انتقال جرم و انتقال حرارت بطور همزمان وجود دارند، اهمیت خاصی دارد و در محدوده ۰/۳۳۵ الی ۷/۲ می‌باشد. عدد لوئیس برای سیستم هوا- بخار آب برابر ۱ است.

۱-۲۸- هنگامی‌که بجای انتقال تک‌بعدی از انتقال سه بعدی استفاده شود، فرآیند انتقال مومنتوم اساساً طبیعت متفاوتی خواهد داشت و تشابه بین سه پدیده وجود نخواهد داشت.

۱-۲۹- برای مخلوط‌های چند جزئی همواره داریم: $\sum J_i = ۰$ (با فرض انتقال فقط به طریق نفوذ مولکولی)

برای مخلوط‌های گازی دوتایی همواره داریم: $D_{AB} = D_{BA}$

ولی این رابطه برای مایعات همواره صادق نیست.

اگر همه مخلوط های مایع A و B دارای دانسیته جرمی مشابه باشند، آن‌گاه $D_{AB} = D_{BA}$

۱-۳۰- سرعت متوسط جرمی (U_x) بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$U_x = \frac{U_A\rho_A + U_B\rho_B}{\rho} = \frac{M_A.N_A + M_BN_B}{\rho}$$

سرعت متوسط مولی (V) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$V = \frac{C_A V_A + C_B V_B}{C_A + C_B} = \frac{N_A + N_B}{C_A + C_B} = y_A V_A + y_B V_B = \frac{N_T}{C_T} = \frac{N_T.RT}{P_t}$$

$$N_T = V.C_T = \frac{N_i - J_i}{x_i}$$

۱-۳۱- هنگامی‌که سیالی از روی سطح جامدی عبور می‌کند، هر چقدر که از سطح جامد فاصله‌ی بیشتری می‌گیریم طبیعت جریان از آرام (Laminar) در زیر لایه آرام به سمت مغشوش (turbulent) تغییر می‌کند.

گردابه‌ها (eddy) تکه‌های بزرگ سیال هستند که از یک نقطه از سیال به نقطه‌ی دیگر در جهتی عمود بر سطح جامد با سرعت در حرکت هستند.

به علت سرعت زیاد گردابه‌ها، انتقال جرم در منطقه مغشوش درون سیال بسیار بیشتر از مقدار انتقال جرم در منطقه زیر لایه آرام (Laminar sub layer) است.

به علت سرعت زیاد گردابه‌ها، تغییرات (gradients) غلظت بوجود آمده در منطقه مغشوش کمتر از تغییرات غلظت در منطقه زیر لایه آرام است.

مکانیزم انتقال جرم در منطقه مغشوش، نفوذ گردابه‌ای (eddy diffusion) است.

اما مکانیزم انتقال جرم درون گردابه‌ها، نفوذ مولکولی است.

۱-۳۲- با توجه به تطابق خوب نتایج کاربرد نفوذ مولکولی در زیر لایه آرام با نتایج آزمایشگاهی، موجه است که در حالت کلی که شامل منطقه مغشوش نیز می‌شود، به همان شیوه و به طریق مشابه عمل شود.

لذا در معادله نکته ۱-۱۹ بجای $\frac{D_{AB}C}{Z}$ از $F =$ ضریب انتقال جرم منطقه‌ای $(Local)$ استفاده می‌شود:

$$N_A = \frac{N_A}{N_A + N_B}.F.Ln\frac{\frac{N_A}{N_A + N_B} - \frac{C_{A_2}}{C}}{\frac{N_A}{N_A + N_B} - \frac{C_{A_1}}{C}}$$

توجه شود که $N =$ فلاکس انتقال جرم در سطح تماس (interface) فازی است و از C_{A_1} و C_{A_2} حداقل یکی، غلظت در سطح تماس است.

۱-۳۳- اگر غلظت در سطح انتقال سیال ثابت نباشد، باید از غلظت متوسط- کپه‌ای $\left(\overline{C_A}\right)$ (bul k-average) طبق رابطه زیر استفاده نمود:

$$\overline{C}_A = \frac{1}{\overline{U}S}\int_0^S U_x C_A dS$$

که در آن $\overline{U} =$ سرعت متوسط کپه‌ای (bulk- average)$= \frac{\text{دبی حجمی}}{\text{سطح مقطع}}$

$U_x =$ توزیع سرعت در سطح انتقال سیال.

$S =$ مساحت سطح مقطع کانال عبوری سیال است.

۱-۳۴- بخاطر تغییرات طبیعی F که وابستگی به طبیعت حرکت سیال در هر نقطه دارد، از ضرایب نوع K و از روابط زیر استفاده می‌شود:

۱- اگر فقط A منتقل شود: $\frac{N_A}{\sum N}=۱$

$$N_A = k_G\left(\overline{P}_{A۱}-\overline{P}_{A۲}\right)=k_y\left(y_{A۱}-y_{A۲}\right)=k_c\left(C_{A۱}-C_{A۲}\right)=k_x\left(x_{A۱}-x_{A۲}\right)=k_L\left(C_{A۱}-C_{A۲}\right)$$

$$F = k_G\overline{P}_{B,M}=k_y\frac{\overline{P}_{B,M}}{P_t}=k_c\frac{\overline{P}_{B,M}}{RT}=k_x.x_{B,M}=k_L.x_{B,M}.C=\frac{D_{AB}.C}{z}$$

۲- اگر انتقال متقابل همسان مولی (Equimolar counter transfer) باشد: $\frac{N_A}{\sum N}=\infty$

$$N_A = k'_G\left(\overline{P}_{A۱}-\overline{P}_{A۲}\right)=k'_y\left(y_{A۱}-y_{A۲}\right)=k'_c\left(C_{A۱}-C_{A۲}\right)=k'_x\left(x_{A_۱}-x_{A_۲}\right)=k'_L\left(C_{A۱}-C_{A۲}\right)$$

$$F = k'_G p_t = k'_y = k'_c.C = k'_L.C = k'_x = \frac{D_{AB}.C}{z}$$

توجه شود که شرط استفاده از ضرایب انتقال جرم نوع K، زیاد بودن نرخ انتقال جرم است.

در حالت سیستم گاز $C=\frac{p_t}{RT}$ و در حالت سیستم مایع $C=\left(\frac{\rho}{M}\right)_{av}$ است.

اگر مورد سؤال هیچکدام از حالات ۱و۲ نبود، باید از ضریب F استفاده شود ولی باید قبلاً ضرایب انتقال جرم تبدیل به یکدیگر شوند.

۱-۳۵- در جریان آرام (Laminar flow) نفوذ مولکولی کاملاً معتبر است و اصولاً نیازی به استفاده از ضرایب انتقال جرم در این حالت نیست.

۱-۳۶- برای حالت برج دیواره- مرطوب (wetted- wall) داریم:

الف) اگر جریان مایع آرام باشد $(Re<۱۰۰)$، داریم:

توزیع سرعت در زیر لایه آرام: $U=\frac{۳}{۲}\overline{U}\left[۱-\left(\frac{z}{\delta}\right)^۲\right]$

(مقایسه شود با حالت مشابه در برج استوانه‌ای $U=۲\overline{U}\left[۱-\left(\frac{r}{R}\right)^۲\right]$)

(ضخامت زیر لایه آرام) $\delta=\sqrt{\frac{۳\overline{U}}{\nu.g}}$

مقدار کل انتقال جرم: $N_{A,av}=\frac{\overline{U}\delta}{L}\left(\overline{C}_{A,L}-C_{A_\circ}\right)$ و $Sh_{av}=۳/۴۱$

که در آن $\overline{U}$ = سرعت متوسط زیر لایه آرام، L = طول برج جداره- مرطوب، $C_{A_\circ}$ = غلظت متوسط مایع ورودی به برج، $\overline{C}_{A,L}$ = غلظت متوسط مایع خروجی از برج است.

ب) اگر جریان مایع مغشوش $(Re > ۱۰۰)$ **باشد:** $Sh_{av} = \sqrt{\frac{۳\delta Pe}{۲\pi L}}$

که در آن $p_e = R_e S_c$ عدد پکلت است.

توجه شود که در روابط فوق $Re = \frac{۴\Gamma}{\mu}$ است. Γ = دبی جرمی بر واحد عرض دیواره است و $\bar{U} = \frac{\Gamma}{\rho.g}$

۱-۳۷- مشخصه اغتشاش (turbulence) حرکت بی‌نظم ذرات سیال در جهت و زمان متناظر با بی‌نظمی است.

سرعت اغتشاش (deviating or fluctuating velocity)= سرعت حرکت گردابه‌ها (eddy).

گردابه‌های حاوی انرژی (energy- containing eddies)= حالتی (medium) است که گردابه‌های بزرگ، کوچکتر و کوچکتر می‌شوند تا اینکه کل انرژی خود را به سیال منتقل نمایند.

محدوده جهانی (universal range)= در مرحله اغتشاش، مهم نیست که اغتشاش چگونه بوجود آمده‌است. بلکه محدوده انرژی فقط بستگی به انرژی اعمال شده از طرف گردابه‌های بزرگ به گردابه‌های کوچک و انرژی ناپدید شده توسط گردابه‌های کوچک شده به درون سیال دارد.

تئوری پرنتل (prandtl theory)= در این تئوری فرض می‌شود که گردابه‌هایی که درون سیال حرکت می‌کنند؛ گردابه‌ای مساوی حجم گردابه اولیه جایگزین می‌شوند بطوریکه گردابه‌ها در طی تغییرات درونی (interchange)، کیفیت و ماهیت خود را حفظ می‌کنند و فقط در مرحله نهایی در سیال فنا می‌شوند (انتقال انرژی گردابه‌ها به سیال فقط در مرحله نهایی انجام می‌شود)

این فرض یک فرض بسیار ساده شونده و دور از واقعیت است.

۱-۳۸- تشابه سه پدیده انتقال جرم، انتقال حرارت و انتقال مومنتوم در منطقه مغشوش (turbulent) بصورت زیر است:

انتقال جرم: $J_A = -(D_{AB} + E_D)\frac{dC_A}{d_z}$

انتقال حرارت: $q = -(\alpha + E_H)\frac{d(t.\rho.Cp)}{dz}$

انتقال مونتوم: $\tau = -\left(\frac{\mu}{\rho} + E_v\right)\frac{d(\rho.U)}{dz}$

که در آن E_D = ضریب نفوذ جرمی گردابه‌ای (eddy mass diffusivity)

E_H = ضریب نفوذ حرارتی گردابه‌ای (eddy thermal diffusivity)

E_v = ضریب نفوذ مومنتوم گردابه‌ای (eddy momentum diffusivity)

توجه شود که E_D و E_H و E_V بستگی به شدت اغتشاش منطقه‌ای (Local turbulence) و مکان گردابه دارد و در منطقه هسته مغشوش (turbulent core) حاکمیت دارد. در حالی‌که ν, α, D در منطقه نزدیک دیواره حاکمیت دارد.

۱-۳۹- برای اغلب گازها $S_c = \rho_r = ۱$ است لذا $E_D = E_H = E_V$

برای حالاتی که $S_c = \rho_r \gg ۱$ است. $۱/۲ < \frac{E_D}{E_V} = \frac{E_H}{E_V} < ۱/۳$