



انتقال جرم

دکتر حسین بهمنیار

استاد دانشکده فنی - دانشگاه تهران

نام کتاب: انتقال جرم

تألیف: دکتر حسین بهمنیار

چاپخانه: آبرنگ

چاپ:

سال نشر: ۱۳۸۹

تیراژ: ۲۰۰۰

ریال

قیمت:

ISBN:

شابک:

کلیه حقوق برای ناشر محفوظ است

مقدمه مؤلف:

نگاه اجمالی به واحدهای عملیاتی صنایع شیمیایی، پتروشیمی، نفت، غذایی و ... حاکی از این است که انتقال جرم یکی از پدیده‌های بسیار مهم در این واحدهاست. درک بهتر انتقال جرم ما را قادر می‌سازد که واحدهای عملیاتی مربوطه را با دقت و اطمینان بیشتری طراحی نموده و مورد استفاده قرار دهیم.

مطالب این کتاب با این هدف تهیه و تنظیم گردیده است که بتواند پاسخگوی پرسشهای دانشجویان مهندسی شیمی در خصوص مفاهیم اولیه انتقال جرم و کاربرد آن در واحدهای عملیاتی انتقال جرم باشد.

اگرچه مطالب کتاب در چاپ‌های قبل (چاپ نهم) با تأکید بر نیاز دانشجویان و فهرست مطالب درس انتقال جرم در مقاطع کارشناسی تهیه شده بود، لیکن با بازنگری بعضی از مطالب فصلهای کتاب (نظیر فصل ۲، فصل ۳ و ۴ و ۶) فهرست مطالب برای جرم پیشرفته نیز پیشنهاد شده است که می‌تواند مورد استفاده دانشجویان در مقطع تحصیلات تکمیلی و دانشجویان علاقه‌مند در مقطع کارشناسی و علاقه‌مندان به المپیادهای دانشجویی قرار گیرد.

بسیاری از مسائل ارائه شده در فصلها، مسائل امتحانی دوره کارشناسی و امتحان جامع تحصیلات تکمیلی دانشکده فنی دانشگاه تهران بوده است.

بدیهی است گرچه تلاش زیادی در نگارش کتاب صورت گرفته، لیکن این مجموعه خالی از اشکال نبوده، قطعاً انتقادات و پیشنهادهای خوانندگان گرامی نقش به‌سزایی در اصلاح آن خواهد داشت.

در خاتمه لازم می‌دانم از جناب آقای دکتر احمد شریفی زاده مدیر مسئول محترم انتشارات سازمان جهاد دانشگاهی تهران و آقای دکتر کمبرانی مدیر محترم جهاد دانشگاهی دانشکده فنی و سایر همکاران محترم ایشان که امکان چاپ کتاب را فراهم آوردند کمال تشکر را نمایم.

همچنین از سرکار خانم مهندس رخساره مقدسیان بخاطر تلاش بی‌وقفه در ویراستاری چاپ‌های قبلی و از سرکار خانم مهندس الناز جعفری بخاطر همکاری بسیار ارزشمند ایشان در ویراستاری چاپ دهم کتاب بسیار متشکرم.

حسین بهمنیار

فهرست مطالب

فصل ۱ - مقدمه‌ای بر عملیات انتقال جرم

۱-۱	عملیات جداسازی در مهندسی شیمی.....	۱
۲-۱	تقسیم بندی عملیات انتقال جرم.....	۲
۲	تماس مستقیم دو فاز غیرقابل امتزاج.....	۲
۵	تماس مستقیم دو فاز قابل امتزاج.....	۵
۶	تماس غیر مستقیم دو فاز که توسط غشاء از یکدیگر جدا شده‌اند.....	۶
۶	چند نکته.....	۶
۷	تقسیم بندی جامع عملیات انتقال جرم.....	۷
۳-۱	جداسازی مستقیم و غیرمستقیم.....	۸
۴-۱	عملیات پایدار و ناپایدار.....	۹
۵-۱	عملیات یک مرحله‌ای، چند مرحله‌ای و راندمان یک مرحله.....	۹
۶-۱	دستگاه‌های عملیاتی مرحله‌ای و دیفرانسیلی.....	۱۰
۷-۱	اصول طراحی یک واحد عملیاتی.....	۱۱
۱۳	سؤالات.....	۱۳
۱۶	ضمایم.....	۱۶

فصل ۲ - نفوذ مولکولی - ضرایب نفوذ در گازها و مایعات و جامدات

۱-۲	انتقال جرم در اثر نفوذ مولکولی.....	۲۱
۲۱	نفوذ مولکولی چگونه صورت می‌گیرد؟.....	۲۱
۲۳	اثر دما و فشار بر سرعت نفوذ.....	۲۳
۲۳	قانون اول فیک.....	۲۳
۲۴	قانون اول فیک با استفاده از مفهوم سرعت نفوذ.....	۲۴
۲۹	شکل‌های مختلف قانون اول فیک.....	۲۹
۳۰	انتقال جرم در اثر نفوذ مولکولی و حرکت توده‌ای.....	۳۰
۲-۲	ضرایب نفوذ در گازها.....	۳۳
۳۳	ضرایب نفوذ در مخلوط دو جزئی.....	۳۳
۳۳	ضرایب نفوذ در گازها با استفاده از روابط تئوری - تجربی.....	۳۳
۴۴	ضرایب نفوذ در گازها - مقادیر تجربی.....	۴۴
۴۵	اثر دما و فشار بر ضرایب نفوذ در گازها.....	۴۵
۴۷	اثر فشار بالا.....	۴۷
۴۹	ضریب نفوذ در مخلوط چند جزئی‌ها.....	۴۹
۳-۲	ضرایب نفوذ در مایعات.....	۵۱
۵۲	ضرایب نفوذ در مخلوط دو جزئی.....	۵۲
۵۲	ضرایب نفوذ در مایعات غیرالکترولیت و رقیق - دو جزیی ها.....	۵۲
۵۷	ضرایب نفوذ در مایعات - مقادیر تجربی.....	۵۷

۵۷.....	اثر دما و فشار بر ضرایب نفوذ در مایعات
۵۹.....	ضرایب نفوذ در مایعات غیرالکترولیت و غلیظ – دو جزئی ها.....
۶۲.....	ضرایب نفوذ در مخلوط چند جزئی مایعات – غیرالکترولیت و رقیق.....
۶۳.....	ضرایب نفوذ در محلول های الکترولیت
۶۵.....	ضرایب نفوذ در جامدات
۷۱.....	سؤالات و مسائل
۷۵.....	ضمیمه.....

فصل ۳ – انتقال جرم در شرایط یکنواخت (سیال ساکن، موضعی از یک لایه آرام (جریان آرام یا متلاطم) – جامدات متراکم و متخلخل)

۸۳.....	۱-۳ رابطه کلی انتقال جرم در اثر نفوذ مولکولی و حرکت توده ای – شرایط یکنواخت
۸۹.....	همسو و غیر همسو بودن نفوذ مولکولی و حرکت توده ای
۹۰.....	۲-۳ انتقال جرم در اثر نفوذ مولکولی و حرکت توده ای در یک لایه گازی
۹۰.....	رابطه کلی انتقال جرم برای یک لایه گازی.....
۹۱.....	حالت خاص ۱- انتقال جرم مساوی و متقابل A و B
۹۳.....	حالت خاص ۲- انتقال جرم A از میان B ساکن
۱۰۰.....	حالات خاص دیگر
۱۰۱.....	انتقال جرم در مخلوطهای چند جزئی گازها در شرایط یکنواخت.....
۱۰۴.....	۳-۳ انتقال جرم در اثر نفوذ مولکولی و حرکت توده ای در یک لایه مایع
۱۰۴.....	رابطه کلی انتقال جرم برای یک لایه مایع.....
۱۰۶.....	حالت خاص ۱- انتقال جرم مساوی و متقابل A و B
۱۰۶.....	حالت خاص ۲- انتقال جرم A از میان B ساکن
۱۱۰.....	حالات خاص دیگر
۱۱۴.....	۴-۳ توزیع غلظت در لایه انتقال جرم
۱۱۷.....	۵-۳ انتقال جرم در خارج کره
۱۱۷.....	چرا بررسی کره اهمیت دارد ؟
۱۱۸.....	بررسی انتقال جرم در خارج کره صلب در شرایط یکنواخت.....
۱۲۲.....	پروفایل غلظت در لایه غیر ایزو ترم – شرایط یکنواخت.....
۱۲۴.....	۶-۳ انتقال جرم خارج استوانه در شرایط یکنواخت
۱۲۷.....	۷-۳ نفوذ در جامدات در شرایط یکنواخت
۱۲۷.....	جامد متراکم
۱۲۹.....	انتقال جرم درون جامد متخلخل – شرایط یکنواخت.....
۱۲۹.....	انتقال جرم گازها از درون حفرات در شرایط یکنواخت.....
۱۳۱.....	ضریب نفوذ موثر در گاز ها.....
۱۳۱.....	استفاده از فشار هیدرو دینامیکی در دو طرف حفره برای انتقال گاز.....
۱۳۳.....	انتقال جرم مایعات از درون حفرات در شرایط یکنواخت.....
۱۳۳.....	ضریب نفوذ موثر در مایعات
۱۳۵.....	۸-۳ انتقال جرم به همراه واکنش شیمیایی.....

مقدمه	۱۳۵
انتقال جرم به همراه واکنش شیمیایی هتروژنی.....	۱۳۵
الف- واکنش سریع روی سطح.....	۱۳۶
ب- واکنش کند روی سطح.....	۱۳۸
انتقال جرم به همراه واکنش شیمیایی هموژنی.....	۱۴۰
۳- ۹ جذب گاز درون سیال ساکن یا موضعی از یک لایه آرام.....	۱۴۰
۳- ۱۰ جذب گاز در یک ظرف مجهز به همزن به همراه واکنش شیمیایی.....	۱۴۲
۳- ۱۱ حل شدن قطعه جامد کروی در سیال مایع به همراه واکنش شیمیایی در لایه مایع (eaching).....	۱۴۴
۳- ۱۲ انتقال جرم به سیال ساکن یا موضعی از لایه آرام به همراه واکنش شیمیایی.....	۱۴۴
۳- ۱۳ انتقال جرم از فاز پراکنده به مداوم به همراه واکنش شیمیایی (انتقال جرم در فاز مداوم).....	۱۴۵
۳- ۱۴ انتقال جرم از قطعه جامد به سیال اطراف به همراه واکنش شیمیایی در موضع خاص در مایع	۱۴۶
۳- ۱۵ تشابه پدیده های جرم، حرارت و ممنتوم در جریان آرام.....	۱۵۱
سؤالات و مسائل	۱۵۶

فصل ۴- انتقال جرم در شرایط غیر یکنواخت

۴- ۱ مقدمه	۱۶۹
۴- ۲ انتقال جرم درون کره در حالت غیریکنواخت (کره جامد، کره مایع صلب یا حباب کروی صلب)	۱۷۰
وجود مقاومت در فاز مداوم در اطراف کره مایع صلب یا حباب کروی صلب.....	۱۷۵
۴- ۳ انتقال جرم در استوانه جامد در حالت غیریکنواخت	۱۷۷
۴- ۴ انتقال جرم درون تیغه جامد در حالت غیریکنواخت.....	۱۷۹
انتقال جرم درون تیغه جامد با فرض صادق بودن تئوری نفوذ عمقی (تئوری هیگی).....	۱۸۲
۴- ۵ نفوذ و انتقال جرم درون قطعه جامد، در چند بعد در حالت غیریکنواخت	۱۸۴
ضریب نفوذ موثر.....	۱۸۶
۴- ۶ انتقال جرم درون قطعه ی جامد متخلخل در شرایط غیر یکنواخت.....	۱۹۰
۴- ۷ انتقال جرم خارج قطره کروی - شرایط غیر یکنواخت	۱۹۱
۴- ۸ نگاه اجمالی به انتقال جرم درون حباب کروی و قطره کروی غیر صلب.....	۱۹۳
۴- ۹ انتقال جرم درون قطره کروی غیر صلب - شرایط غیر یکنواخت	۱۹۴
استفاده از ضریب تصحیح برای ضریب نفوذ.....	۱۹۹
نمونه ای از کارهای صورت گرفته در دانشگاه تهران.....	۲۰۱
۴- ۱۰ بررسی اجمالی اثر جهت انتقال جرم بر شکست و اپتلاف قطرات و چرخش های درونی آنها.....	۲۰۲
۴- ۱۱ اثر حضور نانو ذرات بر پدیده انتقال جرم	۲۰۵
مقدمه.....	۲۰۵
بررسی اثر حضور نانو ذرات در سیال بر پدیده انتقال حرارت و جرم.....	۲۰۶
تحقیقات اخیر در دانشکده مهندسی شیمی دانشگاه تهران در زمینه حضور نانو ذرات بر پدیده انتقال جرم ۲۰۷	
۴- ۱۲ انتقال جرم به همراه واکنش شیمیایی - شرایط غیر یکنواخت.....	۲۰۹
مقدمه.....	۲۰۹
انتقال جرم خارج قطعه جامد به همراه واکنش شیمیایی - شرایط غیر یکنواخت.....	۲۰۹
انتقال جرم به همراه واکنش شیمیایی درون قطره	۲۱۰
مسائل.....	۲۲۰

۲۲۲	ضمائم.....
-----	------------

فصل ۵ – ضرایب انتقال جرم

۲۴۷	۱-۵ مقدمه.....
۲۴۷	۲-۵ انتقال جرم در یک فاز.....
۲۴۷	تعریف ضریب انتقال جرم F
۲۴۹	تعریف ضریب انتقال جرم k
۲۵۰	رابطه بین ضرایب انتقال جرم F و k
۲۵۲	۳-۵ انتقال جرم بین دوفاز.....
۲۵۲	مقدمه.....
۲۵۳	تئوری دو فیلمی یا دو مقاومتی.....
۲۵۵	دستیابی به غلظت‌ها در فصل مشترک و فلاکس موضعی.....
۲۵۶	ضرایب کلی و موضعی انتقال جرم K
۲۵۶	مقدمه.....
۲۵۷	رابطه بین ضرایب کلی و موضعی K با ضرایب فیلمی و موضعی k
۲۵۹	چند نکته.....
۲۶۶	ضرایب کلی و موضعی انتقال جرم F_{OL} , F_{OG}
۲۶۷	غلظت‌ها در فصل مشترک و محاسبه فلاکس موضعی.....
۲۶۸	رابطه بین ضرایب کلی و موضعی انتقال جرم F_{OL} , F_{OG} با ضرایب فیلمی و موضعی F_L , F_G
۲۷۳	ضرایب انتقال جرم متوسط.....
۲۷۵	سؤالات و مسائل.....

فصل ۶ – انتقال جرم در جریان آرام و متلاطم

۲۷۹	۱-۶ مقدمه.....
۲۸۰	۲-۶ معادلات پیوستگی.....
۲۸۴	۳-۶ بررسی تعدادی از موقعیت‌های هندسی ساده از پدیده انتقال جرم در جریان آرام و متلاطم.....
۲۸۴	مقدمه.....
۲۸۴	انتقال جرم در فیلم مایع در حال ریزش.....
۲۸۴	انتقال جرم از فاز گاز به فیلم مایع در حال ریزش روی دیواره عمودی – شرایط یکنواخت.....
۲۸۹	زمان تماس طولانی بین دو فاز.....
۲۹۰	زمان تماس کم بین دو فاز.....
۲۹۲	زمان تماس کوتاه و رابطه Kramers & Kreygers.....
۲۹۲	چگونگی انجام کار تجربی – مقایسه مقادیر تجربی و تئوری.....
۲۹۳	معیار تماس کم و زیاد براساس کارهای تجربی صورت گرفته.....
۲۹۳	عدم توافق تجربه و تئوری و تعریف ضریب نفوذ مؤثر.....
۲۹۵	انتقال جرم از فاز گاز به فیلم مایع در حال ریزش داخل یا خارج لوله عمودی – شرایط یکنواخت.....
۲۹۷	انتقال جرم از جامد به فیلم مایع در حال ریزش روی دیواره شیب‌دار.....
۳۰۲	انتقال جرم به سیال در حال حرکت روی سطح افقی در جریان آرام.....
۳۰۳	حل دقیق (انتقال جرم درون لایه مرزی آرام).....

۳۰۴	..... روش تقریبی Von Karman
۳۰۹	..... انتقال جرم در لایه مرزی متلاطم روی سطح افقی
۳۱۰	..... انتقال جرم بین دو جریان موازی و غیرقابل امتزاج در یک محدوده آرام
۳۱۲	..... ۴-۶ دستیابی به ضرایب انتقال جرم
۳۱۲	..... استفاده از تئوریه‌ها برای پیش‌بینی ضرایب انتقال جرم
۳۱۲	..... مقدمه
۳۱۲	..... تماس سیال با جامد
۳۱۳	..... تئوری فیلمی
۳۱۴	..... تماس دو سیال غیرقابل امتزاج
۳۱۴	..... تئوری دو فیلمی
۳۱۴	..... تئوری نفوذ عمقی یا تئوری هگبی
۳۱۷	..... تئوری نفوذ عمقی با تجدید سطوح اتفاقی (تئوری Danckwerts)
۳۱۸	..... تئوری ترکیبی فیلمی، نفوذ عمقی و تجدید سطوح اتفاقی (تئوری (Toor – Marchello)
۳۱۸	..... تئوری کشش سطح (تئوری Lighfoot و همکارانش)
۳۱۹	..... جمع‌بندی بررسی اجمالی تئوریه‌ها
۳۲۱	..... قیاس بین جرم و حرارت
۳۲۱	..... مقدمه
۳۲۲	..... شرایط قیاس جرم و حرارت
۳۲۳	..... حل مسائل با استفاده از قیاس
۳۲۳	..... الف - رابطه انتقال حرارت در قالب اعداد بدون بعد باشد
۳۲۳	..... اعداد بدون بعد مشابه به در پدیده جرم و حرارت
۳۲۸	..... ب - قیاس کالبرن
۳۲۹	..... روش کار (حل مسائل با استفاده از قیاس کالبرن)
۳۳۰	..... قیاس ممنتوم و جرم درون لوله‌ها
	..... استفاده از روابط تجربی جرم (روابط تجربی جرم یا روابط تجربی حرارت به همراه استفاده از قیاس جرم و حرارت)
۳۳۸	..... حرارت
۳۴۰	..... حرکت سیال درون لوله
۳۴۸	..... حرکت سیال روی سطح افقی
۳۵۱	..... حرکت سیال درون کانال با سطح مقطع غیردایره‌ای شکل
۳۵۲	..... حرکت سیال به صورت فیلم نازک در حال ریزش روی دیواره عمودی، داخل یا خارج لوله
۳۵۳	..... حرکت سیال عمود بر استوانه
۳۵۴	..... حرکت سیال از روی یک کره (انتقال جرم اطراف کره)
۳۶۶	..... حرکت سیال از روی جامد با شکل نامشخص
۳۶۸	..... انتقال جرم در سیال در حال حرکت درون ستونهای پرشده یا بستر سیال شده
۳۷۶	..... سوالات و مسائل
۳۸۶	..... ضمائم

فصل ۷ - بررسی اجمالی واحدهای عملیاتی انتقال جرم

۴۰۱ ۱-۷ مقدمه
-----	-----------------

۴۰۱	واحدهای عملیاتی یک مرحله‌ای
۴۰۳	واحدهای عملیاتی چند مرحله‌ای
۴۰۵	۲-۷ واحدهای عملیاتی یک مرحله‌ای
۴۰۵	یک مرحله عملیاتی با جریانات موازی و همسو
۴۱۶	یک مرحله عملیاتی موازی و غیرهمسو
۴۲۳	یک مرحله عملیاتی متقاطع
۴۲۴	یک مرحله عملیاتی نیمه پیوسته
۴۲۵	یک مرحله عملیاتی ناپیوسته
۴۲۷	مرحله ایده‌آل - راندمان یک مرحله - راندمان مورفری
۴۲۸	۳-۷ بررسی واحدهای عملیاتی چند مرحله‌ای
۴۲۹	مجموعه مراحل موازی و همسو
۴۳۰	مجموعه مراحل متقاطع
۴۳۵	مجموعه مراحل موازی و غیرهمسو
۴۴۶	سؤالات و مسائل

فصل ۸ - دستگاههای عملیاتی گاز - مایع

۴۵۴	۱-۸ مقدمه
۴۵۵	۲-۸ ظروف مجهز به توزیع کننده‌های گاز (Sparger)
۴۵۵	انتقال جرم درون ظرف مجهز به Sparger
۴۵۶	قطر حباب تولیدی در ظرف مجهز به Sparger
۴۵۷	فاز مداوم ساکن است
۴۵۸	فاز مداوم در حال حرکت است
۴۵۹	سرعت نهایی
۴۶۰	سرعت لغزشی
۴۶۱	سطح ویژه
۴۶۴	۳-۸ ظروف مجهز به بهم زن
۴۶۵	حداقل سرعت پره
۴۶۵	روابط تجربی برای دستیابی به ضرایب انتقال جرم، سطح ویژه، قطر متوسط حباب و هلدآپ فاز گاز
۴۶۶	دستیابی به قدرت پره مورد نیاز
۴۷۳	۴-۸ ستونهای سینی‌دار
۴۷۳	مقدمه
۴۷۴	انواع سینی‌ها
۴۷۴	سینی‌های مشبک
۴۷۴	سینی‌های فنجان‌ی
۴۷۴	سینی‌های شیردار

۴۷۵	مقایسه سینی‌ها.....
۴۷۷	الگوی جریان روی سینی‌ها.....
۴۸۰	منطقه عملیاتی مطمئن برای یک سینی با توجه به دبی فاز بخار و مایع.....
۴۸۱	مراحل طراحی هیدرولیکی یک سینی.....
۴۸۱	مقدمه.....
۴۸۱	مراحل طراحی یک سینی مشبک.....
۴۸۲	فاصله بین سینی‌ها.....
۴۸۲	تخمین قطر ستون.....
۴۸۵	انتخاب الگوی جریان روی سینی.....
۴۸۶	سطوح تعریف شده روی یک سینی.....
۴۸۷	قطر سوراخ – سطح سوراخ‌ها و تعداد سوراخ‌ها.....
۴۸۷	طول و ارتفاع سد.....
۴۸۹	بررسی پدیدهٔ چکه کردن مایع از سوراخ‌ها.....
۴۹۰	بررسی افت فشار بخار.....
۴۹۲	گرادیان مایع روی سینی.....
۴۹۲	ارتفاع مایع درون ناودانی.....
۴۹۴	زمان توقف مایع درون ناودانی.....
۴۹۴	درصد طغیان.....
۴۹۴	مقدار Entrainment.....
۴۹۶	محاسبه سرانگشتی قطر ستون.....
۵۰۲	۵-۸ شوینده‌های ونتوری.....
۵۰۳	۶-۸ ستونهای دیواره مرطوب.....
۵۰۳	۷-۸ ستونهای پاشنده.....
۵۰۳	۸-۸ ستونهای پر شده.....
۵۰۳	مقدمه.....
۵۰۵	پکینگ‌ها.....
۵۰۶	جنس پکینگ‌ها.....
۵۰۶	نحوه قرارگرفتن پکینگ‌ها.....
۵۰۷	پارامترهای مهم در انتخاب پکینگ مناسب.....
۵۰۷	بعضی از مشخصه‌های پکینگ‌ها.....
۵۰۹	اندازهٔ پکینگ‌ها.....
۵۱۰	نگهدارنده پکینگ‌ها.....
۵۱۱	متوقف کننده پکینگ‌ها.....
۵۱۱	توزیع کننده مایع.....
۵۱۲	توزیع کننده مجدد.....
۵۱۴	پدیدهٔ Entrainment و نحوهٔ کاهش آن.....
۵۱۴	پدیده‌های انباشتگی و طغیان در ستون پر شده.....
۵۱۵	افت فشار در ستونهای پر شده.....
۵۱۵	بستر تک فازی.....

۵۱۶	بستر دوفازی
۵۱۷	هلدآپ مایع
۵۱۷	سرعت خیس شدن پکینگ‌ها
۵۱۸	مراحل طراحی یک ستون پر شده
۵۱۸	دستیابی به قطر ستون
۵۲۰	دستیابی به ارتفاع ستون
۵۲۱	مقایسه ستونهای پر شده و سینی‌دار
۵۳۰	سؤالات و مسائل

فصل ۹ - جذب

۵۳۵	۱-۹ مقدمه
۵۳۶	۲-۹ چند نکته در ارتباط با منحنی‌های تعادلی گاز - مایع
۵۳۶	استفاده از قانون راولت و قانون هنری در رسم منحنی تعادلی
۵۳۷	۳-۹ انتخاب حلال
۵۳۸	۴-۹ بررسی واحدهای عملیاتی جذب یا دفع - انتقال یک جزء
۵۳۹	بررسی یک واحد عملیاتی جذب یا دفع - موازی و غیرهمسو
۵۴۰	حداقل حلال مورد نیاز
۵۴۲	بررسی یک واحد عملیاتی جذب یا دفع - موازی و همسو
۵۴۳	۵-۹ تجهیزات مورد استفاده برای عملیات جذب یا دفع - موازی و غیرهمسو
۵۴۴	ستونهای مرحله‌ای
۵۵۰	یک مرحله ایده‌آل، راندمان یک مرحله و ارتفاع ستون مرحله‌ای
۵۵۱	ستونهای دیفرانسیلی
۵۵۱	ارتفاع ستون دیفرانسیلی براساس تعداد مراحل و ارتفاع معادل یک مرحله ایده‌آل
۵۵۵	ارتفاع ستون دیفرانسیلی براساس تعداد واحدهای انتقال و ارتفاع یک واحد انتقال
۴۹۶	حالات خاص
۵۶۴	سؤالات و مسائل
۵۶۶	مسائل میان ترم - سری ۱ تا سری ۱۲
۵۸۶	مسائل پایان ترم - سری ۱ تا سری ۱۲
۶۱۲	مسائل جرم پیشرفته - سری ۱ تا سری ۴
۶۲۰	مسائل جرم، امتحان جامع دکتری - سری ۱ تا سری ۴
۶۲۶	ضمایم

فهرست مطالب انتقال جرم پیشرفته (پیشنهادی)

(مطالبی از فصول ۱، ۲، ۳، ۴، و ۶ به شرح زیر پیشنهاد می شود.)

فصل ۱ - مقدمه‌ای بر عملیات انتقال جرم

چند نکته.....	۶
تقسیم بندی جامع عملیات انتقال جرم.....	۷
ضمیمه ۱-۱.....	۱۶
ضمیمه ۲-۱.....	۱۶

فصل ۲ - نفوذ مولکولی - ضرایب نفوذ در گازها و مایعات و جامدات

قانون اول فیک.....	۲۳
قانون اول فیک با استفاده از مفهوم سرعت نفوذ.....	۲۴
شکل های مختلف قانون اول فیک.....	۲۹
۲-۲ ضرایب نفوذ در گاز ها.....	۳۳
اثر فشار بالا بر ضرایب نفوذ گاز ها.....	۴۷
ضریب نفوذ در مخلوط چند جزئی ها- گاز ها.....	۴۹
ضرایب نفوذ مایعات.....	۵۱
ضرایب نفوذ در محلول های غیر الکترولیت و غلیظ- دو جزئی ها.....	۵۸
ضرایب نفوذ در مخلوط چند جزئی مایعات- غیر الکترولیت و رقیق.....	۶۲
ضرایب نفوذ در محلول های الکترولیت.....	۶۳
ضرایب نفوذ در جامدات.....	۶۵
مسائل.....	۷۱
ضمیمه ۱-۲ روابط بین فلاکس جرمی، مولی و حجمی.....	۷۵
ضمیمه ۲-۲ دستیابی به ضریب نفوذ در گاز ها بر اساس تئوری جنبشی گاز ها.....	۷۷

فصل ۳- انتقال جرم در شرایط یکنواخت (سیال ساکن، موضعی از یک لایه آرام (جریان آرام یا متلاطم) - جامدات متراکم و متخلخل

۴-۳	توزیع غلظت در لایه انتقال جرم.....	۱۱۳
۱۲۲	پروفایل غلظت در لایه غیر ایزو ترم- شرایط یکنواخت.....	
۷-۳	نفوذ در جامدات در شرایط یکنواخت.....	۱۲۶
۱۲۷	جامد متراکم.....	
۱۲۹	انتقال جرم درون جامد متخلخل - شرایط یکنواخت.....	
۱۲۹	انتقال جرم گازها از درون حفرات در شرایط یکنواخت.....	
۱۳۱	ضریب نفوذ موثر در گاز ها.....	۱۳۱
۱۳۱	استفاده از فشار هیدرو دینامیکی در دو طرف حفره برای انتقال گاز.....	
۱۳۲	انتقال جرم مایعات از درون حفرات در شرایط یکنواخت.....	۱۳۲
۱۳۲	ضریب نفوذ موثر در مایعات.....	
۸-۳	انتقال جرم به همراه واکنش شیمیایی.....	۱۳۵
۱۳۵	مقدمه.....	
۱۳۵	انتقال جرم به همراه واکنش شیمیایی هتروژنی.....	
۱۳۶	الف- واکنش سریع روی سطح.....	۱۳۶
۱۳۸	ب- واکنش کند روی سطح.....	۱۳۸
۱۴۰	انتقال جرم به همراه واکنش شیمیایی هموژنی.....	۱۴۰
۹-۳	جذب گاز درون سیال ساکن یا موضعی از یک لایه آرام.....	۱۴۰
۱۰-۳	جذب گاز در یک ظرف مجهز به همزن به همراه واکنش شیمیایی.....	۱۴۲
۱۱-۳	حل شدن قطعه جامد کروی در سیال مایع به همراه واکنش شیمیایی در لایه مایع (eaching).....	۱۴۴
۱۲-۳	انتقال جرم به سیال ساکن یا موضعی از لایه آرام به همراه واکنش شیمیایی.....	۱۴۴
۱۳-۳	انتقال جرم از فاز از پراکنده به مداوم به همراه واکنش شیمیایی (انتقال جرم در فاز مداوم).....	۱۴۵
۱۴-۳	انتقال جرم از قطعه جامد به سیال اطراف به همراه واکنش شیمیایی در موضع خاص در مایع.....	۱۴۶
۱۵۶	سؤالات و مسائل.....	

فصل ۴- انتقال جرم در شرایط غیر یکنواخت

۱-۴	مقدمه.....	۱۶۹
۲-۴	انتقال جرم درون کره در حالت غیر یکنواخت (کره جامد، کره مایع صلب یا حباب کروی صلب).....	۱۷۰
۱۷۵	وجود مقاومت در فاز مداوم در اطراف کره مایع صلب یا حباب کروی صلب.....	
۳-۴	انتقال جرم در استوانه جامد در حالت غیر یکنواخت.....	۱۷۷
۴-۴	انتقال جرم درون تیغه جامد در حالت غیر یکنواخت.....	۱۷۹
۱۸۲	انتقال جرم درون تیغه جامد با فرض صادق بودن تئوری نفوذ عمقی (تئوری هیگی).....	۱۸۲
۵-۴	نفوذ و انتقال جرم درون قطعه جامد، در چند بعد در حالت غیر یکنواخت.....	۱۸۴
۱۸۶	ضریب نفوذ موثر.....	۱۸۶
۶-۴	انتقال جرم درون قطعه ی جامد متخلخل در شرایط غیر یکنواخت.....	۱۹۰
۷-۴	انتقال جرم خارج قطره کروی - شرایط غیر یکنواخت.....	۱۹۱
۸-۴	نگاه اجمالی به انتقال جرم درون حباب کروی و قطره کروی غیر صلب.....	۱۹۳
۹-۴	انتقال جرم درون قطره کروی غیر صلب - شرایط غیر یکنواخت.....	۱۹۴

استفاده از ضریب تصحیح برای ضریب نفوذ.....	۱۹۹
نمونه ای از کارهای صورت گرفته در دانشگاه تهران.....	۲۰۱
۴-۱۰ بررسی اجمالی اثر جهت انتقال جرم بر شکست و اپتلاف قطرات و چرخش های درونی آنها.....	۲۰۲
۴-۱۱ اثر حضور نانو ذرات بر پدیده انتقال جرم.....	۲۰۵
مقدمه.....	۲۰۵
بررسی اثر حضور نانو ذرات در سیال بر پدیده انتقال حرارت و جرم.....	۲۰۶
تحقیقات اخیر در دانشکده مهندسی شیمی دانشگاه تهران در زمینه حضور نانو ذرات بر پدیده انتقال جرم ...	۲۰۷
۴-۱۲ انتقال جرم به همراه واکنش شیمیایی – شرایط غیر یکنواخت.....	۲۰۹
مقدمه.....	۲۰۹
انتقال جرم خارج قطعه جامد به همراه واکنش شیمیایی – شرایط غیر یکنواخت.....	۲۰۹
انتقال جرم به همراه واکنش شیمیایی درون قطره	۲۱۰
مسائل.....	۲۲۳
ضمائم.....	۲۲۵

فصل ۶ – انتقال جرم در جریان آرام و متلاطم

۱-۶ مقدمه.....	۲۷۹
۲-۶ معادلات پیوستگی.....	۲۸۰
۳-۶ بررسی تعدادی از موقعیت های هندسی ساده از پدیده انتقال جرم در جریان آرام و متلاطم.....	۲۸۴
مقدمه.....	۲۸۴
انتقال جرم در فیلم مایع در حال ریزش.....	۲۸۴
انتقال جرم از فاز گاز به فیلم مایع در حال ریزش روی دیواره عمودی – شرایط یکنواخت.....	۲۸۴
زمان تماس طولانی بین دو فاز.....	۲۸۹
زمان تماس کم بین دو فاز.....	۲۹۰
زمان تماس کوتاه و رابطه Kramers & Kreygers.....	۲۹۲
چگونگی انجام کار تجربی – مقایسه مقادیر تجربی و تئوری.....	۲۹۲
معیار تماس کم و زیاد براساس کارهای تجربی صورت گرفته.....	۲۹۳
عدم توافق تجربه و تئوری و تعریف ضریب نفوذ مؤثر.....	۲۹۳
انتقال جرم از فاز گاز به فیلم مایع در حال ریزش داخل یا خارج لوله عمودی – شرایط یکنواخت.....	۲۹۵
انتقال جرم از جامد به فیلم مایع در حال ریزش روی دیواره شیب دار.....	۲۹۷
انتقال جرم به سیال در حال حرکت روی سطح افقی در جریان آرام.....	۳۰۲
حل دقیق (انتقال جرم درون لایه مرزی آرام).....	۳۰۳
روش تقریبی Von Karman.....	۳۰۴
انتقال جرم در لایه مرزی متلاطم روی سطح افقی.....	۳۰۹
انتقال جرم بین دو جریان موازی و غیرقابل امتزاج در یک محدوده آرام.....	۳۱۰

مراجع

- ۱- Treybal, R.E., “*Mass Transfer Operations*”, Third. ed., “McGraw Hill Book Company”, Japan, ۱۹۹۰.
- ۲- Skelland, A.H.P., “*Diffusional Mass Transfer*”, John Wiley and Sons., ۱۹۷۴.
- ۳- Bird, R.B., Stewart, W.E., and E.N. Lightfoot., “*Transport phenomena*” , Wiley, New York, ۲nd.ed., ۲۰۰۱

سؤالات

- ۱- در هر یک از واحدهای عملیاتی زیر انتقال جرم بین چه فازهایی صورت می‌گیرد؟ جهت انتقال جرم را مشخص نمایید.
تقطیر (Distillation)، استخراج جامد – مایع (Leaching)، خشک کردن (Drying)،
استخراج مایع – مایع
- ۲- پارامترهای اساسی در طراحی یک واحد عملیاتی را نام ببرید.
- ۳- نوع جداسازی (مستقیم یا غیرمستقیم) را در هر یک از واحدهای عملیاتی زیر مشخص نمایید.
استخراج مایع – مایع، استخراج فوق بحرانی، استخراج جامد – مایع، متبلور سازی
- ۴- انواع واحدهای عملیاتی که در تقسیم‌بندی دو فاز غیرقابل امتزاج جامد – گاز و جامد – مایع قرار می‌گیرند نام برده و جهت انتقال جرم را در آنها مشخص نمایید.
- ۵- فرق بین Adsorption و Absorption چیست؟
- ۶- کدامیک از پارامترهای مهم در طراحی واحدهای عملیاتی در تعیین ارتفاع و کدامیک در تعیین قطر مؤثرند؟
- ۷- واحدهای عملیاتی در تقسیم‌بندی گاز – جامد را نام برده، مشخص نمایید کدامیک نسبی هستند؟
- ۸- عملیات مرحله‌ای و دیفرانسیلی را تعریف کرده، برای هر یک مثالی بزنید.
- ۹- متبلورسازی (کریستالیزاسیون)، کریستالیزاسیون از نوع Adductive (اضافه کردن کردن ماده خاص به مخلوط برای جداسازی جزء مورد نظر) و استخراج فوق بحرانی در کدامیک از تقسیم‌بندی‌های انتقال جرم قرار می‌گیرند؟ نسبی هستند یا خیر؟