

GS. TS NGUYỄN HỮU TÙNG
PGS. TS TRẦN TRUNG KIÊN

TỦ SÁCH NGÀNH
KỸ THUẬT HÓA HỌC

HÓA CÔNG

CƠ SỞ CHUYỂN KHỐI



NHÀ XUẤT BẢN BÁCH KHOA HÀ NỘI

GS. TS NGUYỄN HỮU TÙNG, PGS. TS TRẦN TRUNG KIÊN

HÓA CÔNG

CƠ SỞ CHUYỂN KHỐI



NHÀ XUẤT BẢN BÁCH KHOA HÀ NỘI

LỜI NÓI ĐẦU

Vận chuyển chất qua bề mặt phân chia pha trong môi trường lỏng được gọi là vận chuyển khối. Các hiện tượng vận chuyển khối diễn ra ở khắp nơi trong tự nhiên và trong nhiều lĩnh vực của công nghiệp. Hiện nay phạm vi ứng dụng của các thuyết về vận chuyển khối ngày càng được mở rộng, từ các ngành công nghiệp hóa chất truyền thống đến các ngành công nghiệp của khoa học sinh học và khoa học môi trường. Việc thiết kế các quá trình mới, tối ưu hóa các quá trình đang được sử dụng, cũng như giải quyết các vấn đề ô nhiễm môi trường sẽ phụ thuộc rất nhiều vào những hiểu biết về vận chuyển khối.

Cuốn sách này được biên soạn nhằm phục vụ cho sinh viên, các kỹ sư ngành Kỹ thuật hóa chất, cũng như cho các độc giả làm việc trong lĩnh vực vận chuyển khối và các lĩnh vực liên quan.

Cuốn sách được sắp xếp theo trình tự bắt đầu từ phần các kiến thức cơ bản của các hiện tượng vận chuyển, sau đó một cách có hệ thống và từng bước một tiến đến phần ứng dụng cụ thể thông qua việc xem xét các quá trình tách thực tế. Các phương trình và các công thức ở đây được mô tả và giải thích một cách chi tiết trên cơ sở các giả thiết chính đã được chấp nhận, đồng thời cũng chỉ ra các hạn chế của phần lý thuyết trong ứng dụng thực tế. Trong cuốn sách này, việc so sánh các kết quả lý thuyết với kết quả tính toán hoặc với các số liệu thực nghiệm thường xuyên được tiến hành và ở mức độ cao nhất có thể. Trong từng chương của cuốn sách đều có dẫn các ví dụ nhằm giúp độc giả hiểu được cách tiếp cận với các bài toán thực tế của vận chuyển khối một cách thuận lợi nhất.

Trong các thiết bị chuyển khối, để các quá trình vận chuyển khối diễn ra được cần phải có sự tiếp xúc trực tiếp giữa các pha: giữa pha phân tán (thường ở dạng các bọt hoặc các giọt) và pha liên tục. Khi các pha tiếp xúc trực tiếp với nhau sẽ diễn ra đồng thời các hiện tượng vận chuyển sau: 1) Truyền động lượng từ pha này sang pha kia; 2) Vận chuyển nhiệt (truyền nhiệt) từ pha này sang pha kia; 3) Vận chuyển vật chất từ pha này sang pha kia do các quá trình như khuếch tán, ngưng tụ một phần, bốc hơi một phần và các quá trình khác như hòa tan... tạo ra.

Do đó để mô tả chân thực các quá trình vận chuyển khối cần phải đồng thời xem xét các hiện tượng trên cũng như tác động qua lại giữa các hiện tượng này trong một hệ thống nhất và không thể tách biệt riêng từng pha. Như vậy, rõ ràng các hệ vận chuyển khối là các hệ rất phức tạp và cho đến thời điểm hiện tại vẫn còn nhiều vấn đề cần phải được tiếp tục nghiên cứu để có thể tiếp cận dẫn đến bức tranh thực tế của vận chuyển khối.

Với phương châm đi từ các kiến thức cơ sở đến các ứng dụng công nghiệp hiện đại của các quá trình tách, cuốn sách đã tiến hành cập nhật các kết quả nghiên cứu mới nhất về vận chuyển khối và

đặc biệt đã trình bày mô hình mới (Mô hình vận chuyển nhiệt và vận chuyển khối đồng thời trong chưng cất) ứng dụng cho thiết kế các quá trình chưng cất hỗn hợp nhiều cấu tử trong tháp chưng cất loại đệm.

Mặc dù các tác giả và Nhà xuất bản Bách khoa Hà Nội đã hết sức cố gắng, nhưng do cuốn sách được xuất bản lần đầu nên khó tránh khỏi các thiếu sót. Rất mong nhận được các nhận xét và góp ý để lần xuất bản sau được hoàn thiện hơn. Mọi thông tin xin gửi theo địa chỉ:

GS. TS Nguyễn Hữu Tùng

PGS. TS Trần Trung Kiên

Bộ môn "Quá trình – Thiết bị Công nghệ Hóa học và Thực phẩm"

Viện Kỹ thuật Hóa học – Trường Đại học Bách khoa Hà Nội.

Email: tungnguyenhu@gmail.com

kiên.trantrung1@hust.edu.vn

Các tác giả

MỤC LỤC

LỜI NÓI ĐẦU.....	3
Chương 1. NHẬP MÔN.....	13
1.1. Quá trình phát triển của kỹ thuật tách sử dụng các phương pháp chuyển khối.....	13
1.2. Các đặc trưng cơ bản của vận chuyển khối.....	14
1.2.1. Cân bằng pha	14
1.2.2. Hỗn hợp	14
1.2.3. Dòng khối đối lưu.....	15
1.2.4. Ảnh hưởng của dòng khối cao	15
1.2.5. Ảnh hưởng của ẩn nhiệt chuyển pha.....	15
1.3. Ba định luật cơ bản của các hiện tượng vận chuyển.....	15
1.3.1. Định luật Newton về độ nhớt của chất lỏng	15
1.3.2. Định luật Fourier về dẫn nhiệt	16
1.3.3. Định luật khuếch tán của Fick	17
1.4. Cân bằng pha trong các hệ lỏng – hơi.....	17
1.4.1. Điều kiện cân bằng pha.....	17
1.4.2. Các định luật Dalton, Raoult và Henry	18
1.4.3. Xác định cân bằng pha lỏng – hơi bằng phương pháp thực nghiệm.....	31
1.4.4. Xác định cân bằng pha lỏng – hơi bằng phương pháp sử dụng hệ số cân bằng pha K.....	36
1.4.5. Dự đoán cân bằng pha lỏng – hơi dựa vào enthalpy dư.....	49
1.4.6. Đánh giá hệ số hoạt độ dựa vào các số liệu đẳng phí	80
1.4.7. Hệ số hoạt độ γ_i của dung dịch vô cùng loãng	82
1.4.8. Xác định hệ số hoạt độ từ các số liệu tan lẫn trong nhau của các cấu tử	83
1.4.9. Đường cân bằng pha lỏng – hơi.....	83
1.4.10. Đường chưng cất	84
1.4.11. Tính cân bằng pha lỏng – hơi theo các phương trình trạng thái	96
1.4.12. Xác định các số liệu cân bằng pha lỏng – hơi dùng cho tính toán và thiết kế	104
1.4.13. Chọn phương pháp xác định cân bằng pha cho tính toán và thiết kế.....	105
Tài liệu tham khảo.....	108
Chương 2. KHUẾCH TÁN VÀ VẬN CHUYỂN KHỐI	110
2.1. Chuyển động của phân tử và khuếch tán phân tử.....	110
2.1.1. Hiện tượng khuếch tán.....	110

2.1.2. Định nghĩa về dòng khuếch tán và tốc độ khuếch tán quy chiếu.....	111
2.1.3. Dòng khuếch tán phân tử trong hệ hai cấu tử.....	112
2.2. Hệ số khuếch tán.....	114
2.2.1. Hệ số khuếch tán hai cấu tử trong pha khí.....	114
2.2.2. Hệ số khuếch tán nhiều cấu tử trong pha khí.....	116
2.3. Tốc độ vận chuyển khối.....	117
2.3.1. Định nghĩa dòng khối.....	117
2.3.2. Khuếch tán một phương trong vận chuyển khối của hệ hai cấu tử.....	118
2.3.3. Khuếch tán ngược chiều đẳng mol.....	119
2.3.4. Dòng khuếch tán khối đối lưu trong vận chuyển khối của hỗn hợp hơi.....	120
2.4. Hệ số cấp khối.....	121
2.5. Hệ số chuyển khối.....	125
2.6. Biểu diễn động lực và động học của quá trình vận chuyển khối.....	126
2.6.1. Biểu diễn động lực của quá trình qua hiệu số nồng độ và động học của quá trình qua hệ số chuyển khối.....	126
2.6.2. Biểu diễn động lực của quá trình qua số bậc tiếp xúc pha lý thuyết và động học của quá trình qua chiều cao tương đương với đĩa lý thuyết.....	129
2.6.3. Biểu diễn động lực của quá trình qua số đơn vị chuyển khối và động học của quá trình qua chiều cao của đơn vị chuyển khối.....	148
2.6.4. Quan hệ giữa chiều cao tương đương với đĩa lý thuyết với chiều cao đơn vị chuyển khối.....	172
Tài liệu tham khảo.....	174
Chương 3. CÁC PHƯƠNG TRÌNH CƠ BẢN CỦA VẬN CHUYỂN KHỐI.....	175
3.1. Dòng chảy tầng và dòng chảy xoáy.....	175
3.2. Phương trình dòng liên tục và phương trình khuếch tán.....	176
3.2.1. Phương trình dòng liên tục.....	176
3.2.2. Phương trình vi phân khuếch tán sử dụng nồng độ phần khối lượng.....	177
3.2.3. Phương trình vi phân khuếch tán sử dụng nồng độ phần mol.....	179
3.3. Phương trình vi phân chuyển động của chất lỏng và phương trình năng lượng.....	180
3.3.1. Phương trình vi phân chuyển động của chất lỏng (Phương trình Navier – Stokes).....	180
3.3.2. Phương trình năng lượng.....	181
3.3.3. Phương trình cơ bản trong hệ trục tọa độ cầu và tọa độ trụ.....	181
3.4. Một số nghiệm gần đúng của phương trình vi phân khuếch tán.....	182
3.4.1. Mô hình lớp màng [6].....	182
3.4.2. Mô hình xâm nhập của Higbie.....	183
3.4.3. Mô hình đối mới bề mặt tiếp xúc pha của Danckwerts.....	184

3.5. Nguyên lý đồng dạng – cơ sở của mô hình hóa vật lý trong hệ một pha.....	185
3.5.1. Sự đồng dạng của các hiện tượng	185
3.5.2. Đồng dạng hình học.....	186
3.5.3. Đồng dạng vật lý.....	187
3.5.4. Biến đổi đồng dạng các phương trình vi phân chuyển động của lỏng	187
3.6. Ý nghĩa vật lý của một số chuẩn số quan trọng.....	189
3.6.1. Chuẩn số Reynolds	189
3.6.2. Chuẩn số Prandtl và chuẩn số Schmidt.....	191
3.6.3. Chuẩn số Nusselt	193
3.6.4. Chuẩn số Sherwood	194
3.7. Phân tích thứ nguyên.....	199
3.7.1. Nguyên lý tương tự và đồng nhất thứ nguyên	199
3.7.2. Thiết lập các chuẩn số – Định lý Pi	200
3.7.3. Mô hình hóa vật lý – Chuyển quy mô	204
Tài liệu tham khảo.....	210
Chương 4. VẬN CHUYỂN KHỐI TRONG LỚP BIÊN CHẢY TẮNG.....	211
4.1. Lớp biên tốc độ	211
4.1.1. Phương trình lớp biên	211
4.1.2. Biến đổi đồng dạng.....	213
4.1.3. Dạng tích phân của phương trình lớp biên.....	214
4.1.4. Hệ số ma sát.....	216
4.2. Lớp biên nhiệt độ và nồng độ.....	217
4.2.1. Phương trình lớp biên nhiệt độ và nồng độ.....	217
4.2.2. Dạng tích phân của phương trình lớp biên nhiệt độ và nồng độ.....	218
4.3. Giải gần đúng các phương trình lớp biên bằng phương pháp số	220
4.3.1. Phương pháp tựa tuyến tính	220
4.3.2. Phương trình vận chuyển nhiệt và vận chuyển khối.....	222
4.4. Vận chuyển nhiệt và vận chuyển khối trong những trường hợp giới hạn.....	224
4.4.1. Giải gần đúng phương trình vận chuyển khối cho trường hợp chuẩn số Schmidt có giá trị rất lớn.....	225
4.4.2. Nghiệm gần đúng của phương trình vận chuyển nhiệt trong trường hợp chuẩn số Prandtl có giá trị rất bé [6]	226
4.5. Ảnh hưởng của vùng không hoạt động tại cửa vào của dòng đến tốc độ vận chuyển khối	227
4.5.1. Gần đúng dạng đa thức của phân bố tốc độ và chiều dày của lớp biên tốc độ.....	227
4.5.2. Gần đúng dạng đa thức của phân bố nồng độ và chiều dày của lớp biên nồng độ	228

4.6. Hấp thụ khí trong màng lỏng rơi.....	230
4.6.1. Phân bố tốc độ theo Nusselt trong màng mỏng của lỏng rơi [9].....	230
4.6.2. Hấp thụ khí khi thời gian tiếp xúc lỏng – khí bé.....	231
4.6.3. Hấp thụ khí khi thời gian tiếp xúc pha lớn	232
4.7. Hòa tan chất rắn trong màng lỏng rơi.....	235
4.8. Ảnh hưởng của dòng khối cao trong vận chuyển nhiệt và vận chuyển khối trong lớp biên chảy màng.....	236
4.8.1. Hiệu ứng dòng khối cao.....	236
4.8.2. Mô hình màng của Mickley ứng dụng cho hiệu ứng dòng khối cao.....	237
4.8.3. Phương trình phản ánh ảnh hưởng của dòng khối cao đến vận chuyển nhiệt và vận chuyển khối.....	239
Tài liệu tham khảo.....	243
Chương 5. VẬN CHUYỂN NHIỆT VÀ VẬN CHUYỂN KHỐI Ở CHẾ ĐỘ CHẢY MÀNG BÊN TRONG ỐNG TRÒN.....	244
5.1. Phân bố tốc độ ở chế độ chảy màng bên trong ống tròn.....	244
5.2. Chuẩn số Graetz cho vận chuyển nhiệt và vận chuyển khối.....	245
5.2.1. Cân bằng năng lượng cho phân tổ thể tích của ống tròn.....	245
5.2.2. Cân bằng vật chất cho phân tổ thể tích của ống tròn	247
5.3. Vận chuyển nhiệt và vận chuyển khối ở vùng lân cận cửa vào của ống tròn	248
5.3.1. Vận chuyển nhiệt ở vùng lân cận cửa vào của ống tròn tại nhiệt độ tường không đổi ...	248
5.3.2. Vận chuyển khối ở vùng lân cận cửa vào của ống tròn tại nồng độ tường không đổi	249
5.4. Vận chuyển nhiệt và vận chuyển khối trong dòng chảy màng phát triển đầy đủ ở bên trong ống tròn.....	249
5.4.1. Vận chuyển nhiệt tại nhiệt độ tường không đổi.....	249
5.4.2. Vận chuyển khối tại nồng độ tường không đổi.....	251
5.5. Vận chuyển khối trong tháp màng loại thành thấm ướt	251
Tài liệu tham khảo.....	255
Chương 6. CHUYỂN ĐỘNG, VẬN CHUYỂN NHIỆT VÀ VẬN CHUYỂN KHỐI CỦA CÁC HẠT..	256
6.1. Dòng chuyển động chậm xung quanh hạt cầu	256
6.2. Chuyển động của hạt cầu trong lỏng.....	259
6.2.1. Nghiệm gần đúng của hệ số trở lực của hạt cầu trong vùng giá trị trung gian của chuẩn số Reynolds.....	259
6.2.2. Phương trình xác định hệ số trở lực của hạt cầu	260
6.2.3. Tốc độ lắng của hạt.....	261
6.3. Vận chuyển nhiệt và vận chuyển khối của hạt cầu trong môi trường lỏng ổn định.....	264

6.4. Vận chuyển nhiệt và vận chuyển khối của hạt cầu trong trường của dòng	265
6.4.1. Cách tiếp cận bằng phương pháp số đối với vận chuyển khối của hạt cầu trong dòng chảy màng.....	265
6.4.2. So sánh kết quả theo phương trình Ranz – Marshall với các số liệu tính bằng phương pháp số.....	267
6.4.3. Vận chuyển khối của hạt cầu trong pha lỏng ở chế độ dòng của Stokes	270
6.5. Hệ số trở lực, vận chuyển nhiệt và vận chuyển khối của giọt hình phỏng cầu	270
6.6. Vận chuyển nhiệt và vận chuyển khối trong lớp tầng sôi	272
6.6.1. Hàm rỗng	272
6.6.2. Tương tác giữa hai hạt cầu đồng trục cùng kích thước.....	272
6.6.3. Mô phỏng hàm rỗng	273
Tài liệu tham khảo	275
Chương 7. VẬN CHUYỂN KHỐI CỦA GIỌT VÀ CỦA BỘT	276
7.1. Hình dạng của giọt và của bột	276
7.2. Trở lực của giọt và của bột trong dòng chậm (dòng Hadamard)	277
7.2.1. Hàm dòng của Hahamard	277
7.2.2. Hệ số trở lực và tốc độ lắng của các giọt và các bột nhỏ [7,10]	279
7.2.3. Chuyển động của bột nhỏ trong lòng chứa vết của các tạp chất.....	280
7.3. Dòng xung quanh giọt bốc hơi	280
7.3.1. Ảnh hưởng của tiếp khối và hút khối đến dòng xung quanh của hạt cầu	280
7.3.2. Ảnh hưởng của tiếp khối và hút khối đến vận chuyển nhiệt và vận chuyển khối của hạt cầu	282
7.4. Bốc hơi giọt nhiên liệu do phun tạo thành	285
7.4.1. Hệ số trở lực, vận chuyển nhiệt và vận chuyển khối của giọt bốc hơi.....	285
7.4.2. Hành vi của giọt bốc hơi rơi tự do trong pha khí.....	286
7.5. Hấp thụ khí bằng các giọt lỏng do phun tạo ra	290
7.6. Vận chuyển khối của các bột hoặc giọt nhỏ trong lòng	294
7.6.1. Vận chuyển khối trong pha liên tục đối với các bột và giọt ở chế độ dòng Hadamard	294
7.6.2. Vận chuyển khối trong pha phân tán của các giọt ở chế độ dòng Hadamard	295
7.6.3. Vận chuyển khối của bột hoặc giọt có kích thước trung bình trong pha lỏng	295
Tài liệu tham khảo	297
Chương 8. CÁC HIỆN TƯỢNG VẬN CHUYỂN XOÁY	298
8.1. Một số kiến thức cơ bản về dòng xoáy	298
8.1.1. Dòng xoáy.....	298

8.1.2. Ứng suất Reynolds.....	299
8.1.3. Dòng nhiệt và dòng khuếch tán xoáy.....	300
8.1.4. Các tính chất của vận chuyển xoáy.....	301
8.1.5. Mô hình chiều dài khuấy trộn.....	302
8.2. Phân bố tốc độ trong dòng xoáy trong ống tròn và hệ số ma sát	304
8.2.1. Định luật mũ $1/n$	304
8.2.2. Định luật phân bố tốc độ vận năng cho dòng xoáy trong ống tròn.....	304
8.2.3. Hệ số ma sát cho dòng xoáy ở trong ống tròn nhẵn.....	307
8.3. Tương tự giữa mô men động lượng, vận chuyển nhiệt và vận chuyển khối	309
8.3.1. Tương tự Reynolds.....	310
8.3.2. Tương tự Chilton – Colburn.....	311
8.3.3. Tương tự von Karman.....	313
8.3.4. Tương tự Deissler.....	314
8.4. Hệ số ma sát, vận chuyển nhiệt và vận chuyển khối trong lớp biên xoáy	320
8.4.1. Phân bố tốc độ trong lớp biên xoáy.....	320
8.4.2. Hệ số ma sát.....	321
8.4.3. Vận chuyển nhiệt và vận chuyển khối trong lớp biên xoáy.....	322
8.5. Lớp biên xoáy có tiếp khối và hút khối	323
Tài liệu tham khảo	327
Chương 9. BỐC HƠI VÀ NGỪNG TỤ	328
9.1. Các đặc trưng của quá trình vận chuyển khối và vận chuyển nhiệt đồng thời	328
9.1.1. Vận chuyển khối trong quá trình chuyển pha.....	328
9.1.2. Nhiệt độ bề mặt phân chia pha trong quá trình vận chuyển nhiệt và vận chuyển khối đồng thời.....	329
9.2. Nhiệt độ bầu ướt và tỷ số ẩm kế	330
9.3. Ngưng tụ màng hơi tinh khiết.....	334
9.3.1. Mô hình Nusselt cho ngưng tụ màng hơi tinh khiết	334
9.3.2. Ảnh hưởng của thay đổi các tính chất vật lý.....	337
9.4. Ngưng tụ hỗn hợp hơi hai cấu tử	339
9.4.1. Ngưng tụ toàn phần và một phần.....	339
9.4.2. Đặc trưng của ngưng tụ toàn phần hỗn hợp hơi hai cấu tử.....	340
9.4.3. Tốc độ ngưng tụ toàn phần của hỗn hợp hơi hai cấu tử.....	341
9.5. Ngưng tụ hơi khi có sự hiện diện của khí không ngưng	342
9.5.1. Tích tụ khí không ngưng ở vùng lân cận bề mặt phân chia pha	342
9.5.2. Tính toán vận chuyển nhiệt và vận chuyển khối.....	343
9.5.3. Nghiên cứu ảnh hưởng của khí không ngưng bằng phương pháp thực nghiệm	344

9.6. Ngưng tụ hơi trên bề mặt của ống tròn	351
9.6.1. Ngưng tụ hơi tinh khiết trên bề mặt ống tròn nằm ngang.....	351
9.6.2. Vận chuyển nhiệt và vận chuyển khối trong trường hợp ngưng tụ trên ống tròn có tiếp khối hoặc hút khối.....	351
9.6.3. Tính tốc độ ngưng tụ của hơi trên ống tròn nằm ngang khi có sự hiện diện của khí không ngưng	353
Tài liệu tham khảo	359
Chương 10. CHUYỂN KHỐI TRONG QUÁ TRÌNH CHUNG CẤT.....	360
10.1. Cách tiếp cận kinh điển với quá trình chưng cất và những nghịch lý của cách tiếp cận này... 360	
10.1.1. Tháp loại đĩa và tháp loại đệm.....	360
10.1.2. Hiệu suất của đĩa trong quá trình chưng cất	360
10.1.3. Xác định hiệu suất đĩa.....	367
10.1.4. Chiều cao đơn vị chuyển khối – Thước đo vận chuyển khối trong tháp chưng cất loại đệm.....	382
10.1.5. Sự bất thường của hiệu suất đĩa và của chiều cao đơn vị chuyển khối trong quá trình chưng cất	383
10.2. Các đặc trưng của vận chuyển nhiệt và vận chuyển khối trong quá trình chưng cất	386
10.2.1. Bức tranh vật lý của vận chuyển nhiệt và vận chuyển khối trong quá trình chưng cất	386
10.2.2. Quá trình quyết định tốc độ của chưng cất	388
10.2.3. Ảnh hưởng của quá trình ngưng tụ một phần hơi đến tốc độ vận chuyển khối trong chưng cất hệ hai cấu tử.....	389
10.2.4. Sự khác nhau của vận chuyển khối trong hấp thụ khí và trong chưng cất.....	391
10.3. Mô hình vận chuyển nhiệt và vận chuyển khối đồng thời trong tháp chưng cất loại đệm.. 396	
10.3.1. Bề mặt thấm ướt của đệm	396
10.3.2. Hiệu ứng thành thiết bị	398
10.3.3. Phương trình xác định các dòng khuếch tán trong pha hơi trong chưng cất hệ hai cấu tử.....	400
10.3.4. Phương trình xác định dòng khuếch tán trong pha hơi trong chưng cất hệ ba cấu tử	402
10.3.5. Mô phỏng quá trình tách hỗn hợp ba cấu tử bằng phương pháp chưng cất trong tháp loại đệm ở chế độ hồi lưu toàn phần.....	403
10.4. Tính chưng cất của hệ ba cấu tử ở chế độ hồi lưu hữu hạn.....	412
10.4.1. Cân bằng vật chất của tháp chưng cất.....	412
10.4.2. Giải cân bằng vật chất của tháp chưng cất – phương pháp hội tụ θ	415
10.5. Chưng cất hỗn hợp không khí đã hóa lỏng ở nhiệt độ thấp ở trong tháp loại đệm.....	422
10.5.1. Nhà máy tách hỗn hợp không khí đã hóa lỏng sử dụng quá trình Linde	422

10.5.2. Dòng khuếch tán và dòng khối trong chưng cất ở nhiệt độ thâm lạnh	423
10.5.3. Mô phỏng quá trình tách hỗn hợp không khí đã hóa lỏng trong tháp chưng cất loại đệm quy mô bán sản xuất	425
10.6. Tách oxy-18 ở quy mô công nghiệp bằng chưng cất ở điều kiện lạnh thâm độ	426
10.6.1. Sử dụng đồng vị oxy-18 làm vật liệu thô trong chuẩn đoán ung thư	426
10.6.2. Quá trình mới dùng để tách trực tiếp oxy-18 từ oxy tự nhiên	427
10.6.3. Xây dựng và hoạt động của xưởng sản xuất oxy-18	429
10.7. Hiệu suất đĩa trong hấp thụ	431
Tài liệu tham khảo	434
Chương 11. THÁP CHUYỂN KHỐI LOẠI ĐỆM	436
11.1. Một số thông tin chung về tháp loại đệm	436
11.2. Lịch sử phát triển của tháp loại đệm và tầm quan trọng của tháp loại đệm trong kỹ thuật chưng cất và hấp thụ	438
11.3. Thủy động lực học của các tháp loại đệm ngẫu nhiên	442
11.3.1. Khoảng làm việc của tháp	442
11.3.2. Trạng thái sắc của tháp loại đệm ngẫu nhiên	446
11.3.3. Giảm độ các đường sắc – phương pháp đồ thị	447
11.3.4. Xác định tốc độ pha khí tại điểm sắc – các phương pháp giải tích	450
11.3.5. Lượng lỏng bị giữ lại trong tháp loại đệm tại điểm sắc	452
11.3.6. Trở lực của tháp loại đệm	453
11.3.7. Lượng lỏng bị giữ lại trong tháp ở điều kiện làm việc	462
11.3.8. Xác định trở lực của tháp loại đệm ngẫu nhiên và đệm cấu trúc dựa vào định luật trở lực của dòng hai pha	465
11.3.9. Định luật trở lực của dòng hai pha cho tháp loại đệm	465
11.4. Chuyển khối trong tháp loại đệm ngẫu nhiên	483
11.4.1. Tính toán chuyển khối theo mô hình	483
11.4.2. Xác định hiệu suất tách của đệm ngẫu nhiên	485
11.5. Phân bố không đồng đều của dòng trong lớp đệm ngẫu nhiên	500
11.6. Đánh giá các thông số của mô hình cho đệm ngẫu nhiên	505
11.7. Các chương trình máy tính cho thiết kế tháp loại đệm	506
11.8. Tổng kết và kết luận	507
Tài liệu tham khảo	509
PHỤ LỤC	517
CHỈ MỤC	525