



دستگاه های انتقال جرم

مدرس: علیرضا همّتی

Alireza_hemmati@iust.ac.ir 1



تجهیزات تماس دهنده گاز-مایع

- عمده عملیات گاز-مایع شامل جذب و جداسازی، تقطیر، مرطوب‌سازی و رطوبت‌زدایی است.
- این عملیات شامل انتقال جرم بین فازهای است و نیاز به تماس نزدیک بین فازها دارد. هدف اصلی تجهیزات برای انتقال جرم بین فازهای ایجاد تماس نزدیک فازهای غیر قابل امتزاج (immiscible phases) است.
- در بسیاری از کاربردها، دستگاه‌های انتقال جرم به صورت continuous کار می‌کنند.
- تماس batch برای ظرفیت‌های پردازش پایین یا در واحدهای تولیدی کوچک استفاده می‌شود.
- تجهیزات انتقال انبوه عمدتاً به صورت سفارشی ساخته می‌شوند (یعنی مطابق با نیاز مشتری طراحی و ساخته می‌شوند؛ این نوع تجهیزات را نمی‌توان به راحتی از بازار به عنوان اقلامی مانند پمپ‌ها، شیرها، دمنده‌ها، تهویه هوا و غیره خریداری کرد).



تجهیزات تماس دهنده گاز - مایع

▪ تجهیزات تماس دهنده گاز-مایع حداکثر سطح تماس را بین دو فاز گاز و مایع ایجاد می نمایند.

الف) تجهیزات **Gas dispersed** ← پراکنده ساختن فاز گاز درون فاز مایع

۱- برج های سینی دار - **Tray tower یا Plate columns**

۲- برج های حبابی - **bubble column**

۳- مخازن همزن دار - **agitated vessel**

۴- تماس دهنده های گریز از مرکز - **centrifugal contactor**

3



تجهیزات تماس دهنده گاز - مایع

ب) تجهیزات **Liquid dispersed** ← پراکنده ساختن فاز مایع درون فاز گاز

۱- برج های پر شده - **packed tower**

۲- برج دیوار مرطوب - **wetted wall column**

۳- برج های پاششی - **spray tower**

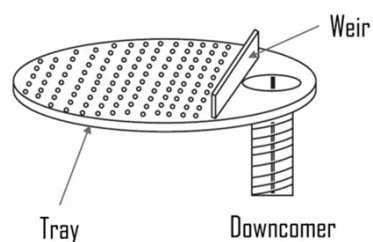
4



برج های سینی دار – tray tower

Tray or plate column

- برج های سینی دار برج های عمودی هستند که در آنها مایع و گاز به صورت مرحله ای، بر روی سینی های برج تماس حاصل می کنند. در برج های سینی دار، فیلمی از مایع بر روی سینی جمع می شود و فاز گاز به صورت حباب از بین فیلم مایع عبور می کند.



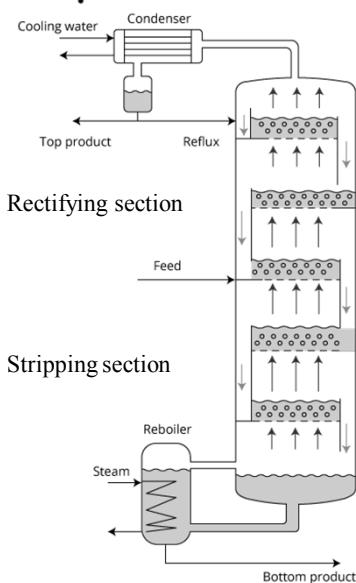
اجزای اصلی برج های سینی دار:

- (1) انواع مختلف سینی ها
- (2) Weirs - سرریز
- (3) Downcomers - ناودان

5



برج های سینی دار – tray tower



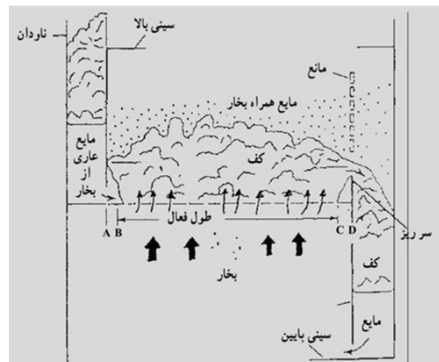
- ✓ عملیات انتقال جرم فقط بر روی سینی ها انجام میشود و بین سینی ها انتقال جرم نداریم.
- ✓ بر اساس انواع سینی ها، محل عبور گاز به صورت های مختلفی می باشد.
- ✓ خوراک ورودی در اثر تماس های متوالی مایع و بخار روی سینی ها، به دو محصول سبک و سنگین تبدیل می شود.



برج های سینی دار – tray tower

ایجاد تماس موثر بین دو فاز مایع و بخار به منظور افزایش میزان انتقال جرم

نقش سینی در برج تقطیر



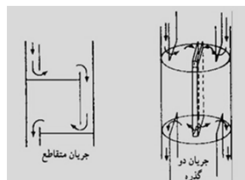
7



برج های سینی دار – tray tower

نحوه جریان مایع بر روی سینی:

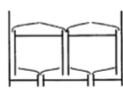
- بستگی به نسبت میزان جریان مایع به میزان جریان بخار دارد.
- دو نوع جریان متداول عبارتند از: جریان متقاطع و جریان دو یا چند گذره
- جریان چند گذره برای برج ها با قطر بزرگ و با میزان جریان مایع بالا استفاده می شود. در جریان دو گذره، به منظور کاهش بار ناودان به دو قسمت تقسیم می شود.



TWO PASS



THREE PASS



FOUR PASS



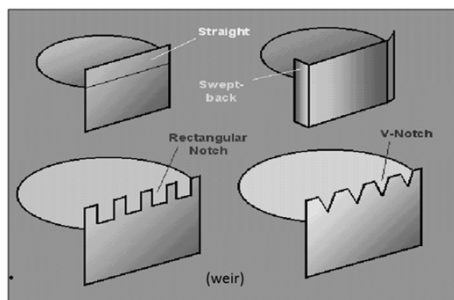
FIVE PASS

8



سرریز Weir

- ❑ اهمیت سرریز در حفظ سطح مایع مطلوب در سینی است.
- ❑ ارتفاع سرریز معمولی بین ۲ تا ۴ اینچ است. سرریزهای کوتاه اغلب در ستون کم فشار یا وکیوم استفاده می شوند.
- ❑ سطح مایع بالاتر به معنی نگهداری بیشتر مایع در سینی است که اگر مایع سمی یا خطرناک باشد ممکن است نامطلوب باشد.

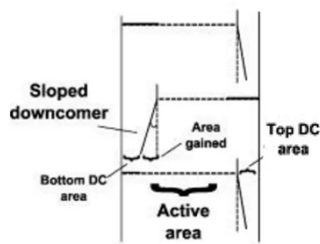


9



ناودان Downcomer

- صفحه ناودان ممکن است مستقیم یا شیب دار باشد.
- ✓ مستقیم: به طور گسترده مورد استفاده قرار می گیرد و مزیت هزینه و سادگی دارد.
- ✓ شیب دار: اگر جداسازی بخار و مایع دشوار است (مثلاً به دلیل کف کردن) قابل استفاده است و همچنین یک ناحیه فعال کمی بزرگتر برای تماس بخار و مایع فراهم می کند، اما همچنین گران تر است.



10



انواع سینی ها

- مهم ترین سینی ها
- ۱- سینی های غربالی - Sieve tray
 - ۲- سینی های کلاهک دار - Bubble cap tray
 - ۳- سینی های دریچه ای - Valve tray



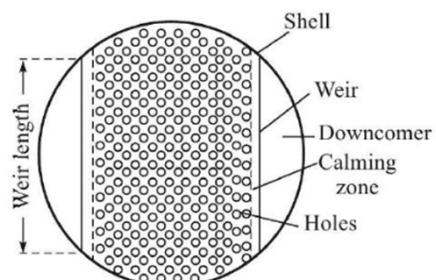
11



سینی غربالی Sieve tray

□ سینی های غربالی

- ساده ترین نوع سینی
- قطر حفره ها ۱ تا ۰.۱۲۵ اینچ و فاصله ی بین منافذ ۲.۵ تا ۵ اینچ
- حفره های کوچک تر باعث افزایش ظرفیت سینی و انتقال جرم بهتر می شوند.



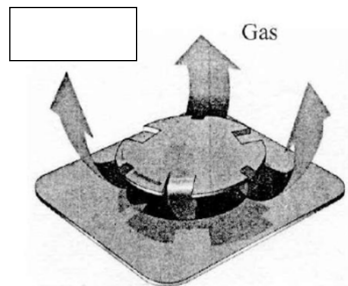
12



سینی دریچه ای Valve tray

□ سینی های دریچه ای

- قطر سوراخ ها ۱.۵ تا ۶ اینچ و فاصله ی بین سوراخ ها ۳ تا ۶ اینچ
- این نوع سینی، بسته به نرخ جریان یا «خروجی» منطقه متغیری را برای جریان گاز یا بخار فراهم می کند.
- یک سینی معمولی دارای سوراخ های پانچ شده به اندازه کافی بزرگ بر روی کف سینی است که هر کدام دارای یک دیسک متحرک است که عموماً دایره ای شکل است.

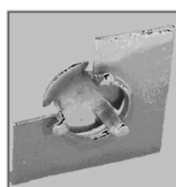
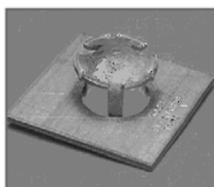
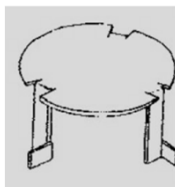


13

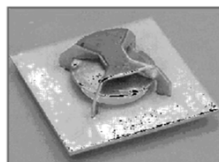
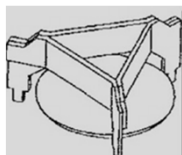


سینی دریچه ای Valve tray

دو نوع مختلف دریچه ها:



۱- پایه متصل به دریچه



۲- پایه متصل به سینی

14



سینی دریچه ای Valve tray

معایب:

- سایش مکانیکی و خوردگی به دلیل حرکت مداوم پایه های دریچه
- چسبیدن دیسک روی سینی در صورت وجود رسوب چسبنده روی سینی و قابلیت بسته شدن منافذ توسط مایعات رسوب دهنده
- گران تر بودن نسبت به سینی های غربالی



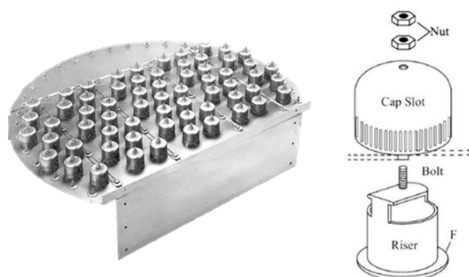
15



سینی های کلاهک دار Bubble cap tray

سینی کلاهکی

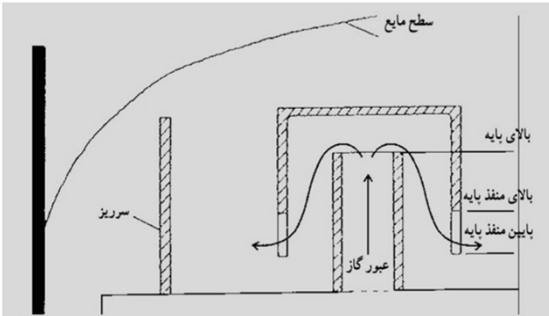
- شامل دو جزء: ۱- cap به شکل bell و ۲- riser
- شکل شکاف ها ممکن است مستطیلی، مثلثی، دوزنقه ای یا از نوع دندانه ای باشد.
- تعداد شکاف ها: ۱۲ تا ۷۰
- قطر: ۱-۶ اینچ
- معایب: تشکیل کک و پلیمر، جرم گرفتگی، ۴ برابر گران تر از سینی های دریچه ای
- عدم انعطاف در برابر تغییر میزان جریان خوراک



16



سینی های کلاهک دار
Bubble cap tray

17



مقایسه سینی ها

Bubble cap > valve > sieve در جنس یکسان

قیمت:

Sieve > valve > bubble cap

ظرفیت:

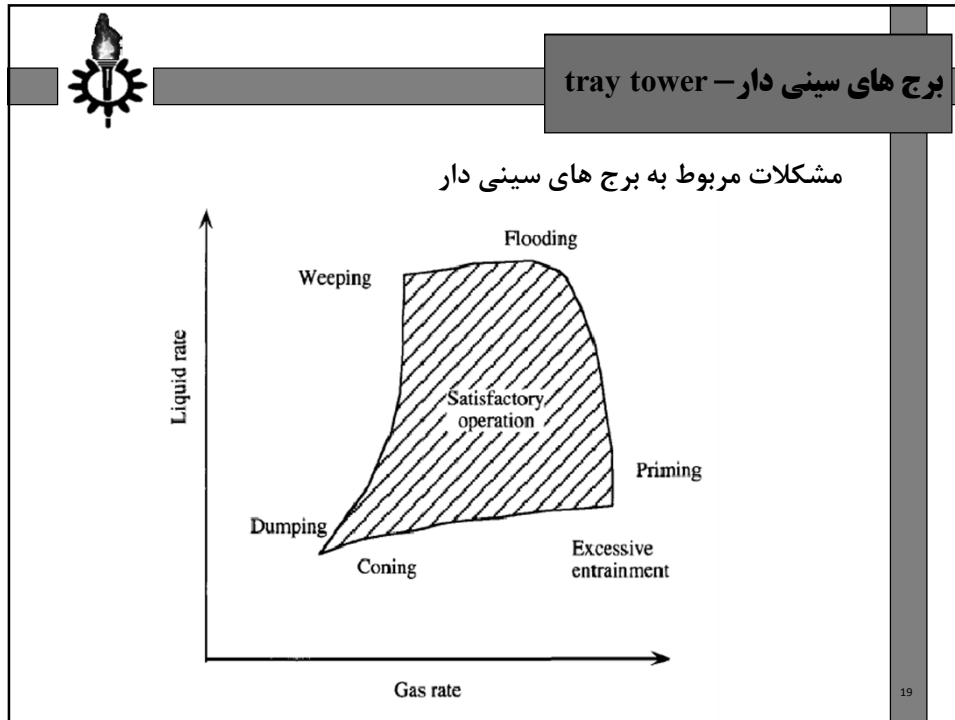
در شرایط عملیاتی مساوی تقریباً یکسان هستند.

راندمان:

Bubble cap > valve > sieve به پارامترهای زیادی بستگی دارد

افت فشار:

18



برج های سینی دار – tray tower

۱. پدیده ماندگی – Entrainment

اگر دبی مایع کم باشد و دبی گاز زیاد باشد، باعث می شود قطرات ریز از مایع در گاز به طرف سینی بالاتر حرکت کند. با این کار مایع سینی زیرین با مایع سینی بالا مخلوط شده و نیروی محرکه انتقال جرم در سینی بالایی کاهش می یابد. در نتیجه راندمان کم می شود. بنابراین افزایش سرعت گاز تا حدی که سبب افت بازده در اثر پدیده ماندگی نگردد، قابل قبول خواهد بود.

۲. طغیان – Flooding

عامل این پدیده افت فشار زیاد برج است. با زیاد شدن اختلاف فشار بین دو سینی، گاز از ورود مایع سینی بالاتر به سینی پایین تر ممانعت کرده و با گذشت زمان فضای بین سینی های بالای برج پر از مایع می شود. در این صورت پدیده طغیان بوجود می آید. جریان گاز از حالت عادی خارج شده و مایع نیز ممکن است از لوله خروجی بالای برج خارج گردد.

20



برج های سینی دار – tray tower

۳. انسداد – Priming

در مواردی که اختلاط گاز و مایع کف فراوان تولید می کند، سرعت زیاد گاز سبب ایجاد کف در فضای بین سینی ها شده و مقدار زیادی از مایع توسط گاز از یک سینی به سینی بالاتر حمل می شود. این حالت یک نمونه بسیار حد از پدیده ماندگی است. مایعی که بدین ترتیب حمل می شود بین سینی ها گردش کرده و موجب افزایش شدت جریان بین سینی ها می شود، لذا افت فشار گاز افزایش یافته و سرانجام منجر به وضعیت طغیان خواهد گردید.

۴. مخروطی شدن – Coning

اگر ضخامت مایع روی سینی ها کم باشد و گاز با دبی نسبتاً بالا وارد شود، مایع به شکل مخروط به بالا می پاشد. در این حالت تماس گاز و مایع بسیار ضعیف خواهد بود.

21



برج های سینی دار – tray tower

۵. چکه کردن – Weeping

در صورتی که شدت گاز خیلی کم باشد، قسمت بیشتر مایع ممکن است از منافذ سینی به پایین چکه کند و لذا جریان کاملی از مایع در سراسر سینی وجود نخواهد داشت. پدیده چکه کردن، اصولاً در سینی های دریچه ای بوجود نمی آید، حتی اگر دبی گاز خیلی کم شود، دریچه ها بسته شده و مانع از ریزش مایع به پایین می گردد. ولی در سینی های مشبک اگر قطر سوراخ ها بزرگتر از حد لازم انتخاب گردد پدیده Weeping بیشتر صورت خواهد گرفت.

۶. Dumping

هرگاه شدت گاز فوق العاده کم باشد، کل مایع روی سینی از منافذ به پایین می ریزد و مایعی به محل ریزش نمی رسد (ناودان ها)، که به این پدیده Dumping گفته می شود.

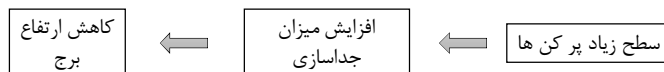
22



برج های پر شده – packed tower

Packed towers

- در فرآیندهای شیمیایی، بستر پر شده یک لوله یا مخزن تو خالی است که با مواد packing پر شده است. این پرکن ها می تواند رندوم با اشیاء کوچک مانند rasching ring باشد و هم می تواند structured packing باشد.
- هدف یک بستر پر شده معمولاً بهبود تماس بین دو فاز در یک فرآیند شیمیایی یا مشابه است. بستریهای پر شده را می توان در راکتورهای شیمیایی، فرآیند تقطیر یا جذب استفاده کرد.
- در مقایسه با برج های سینی دار:



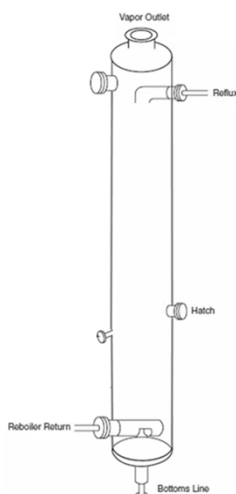
23



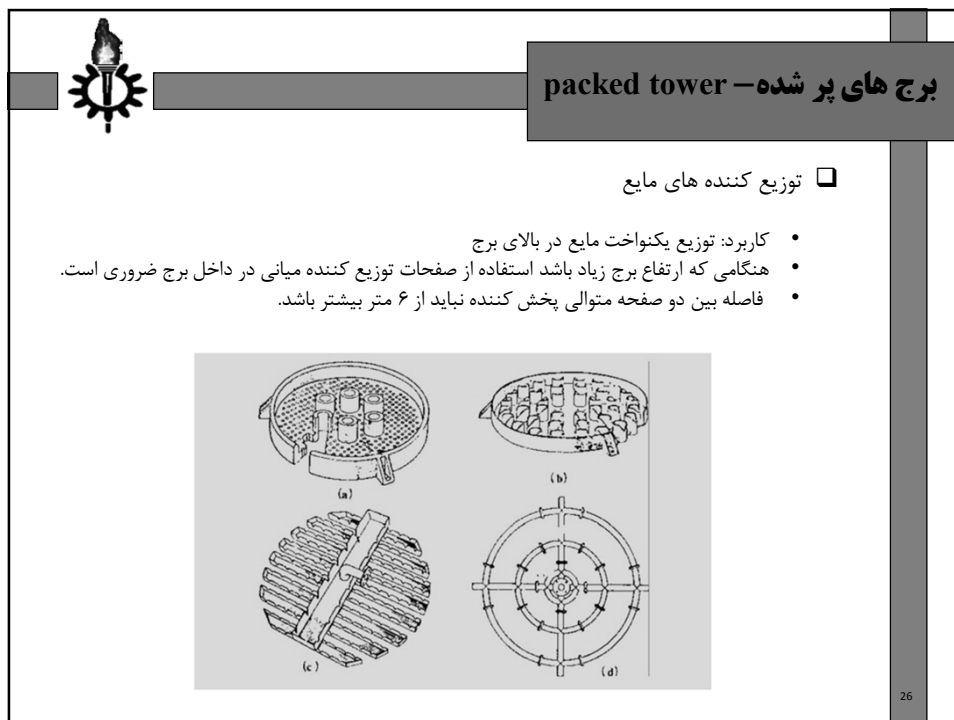
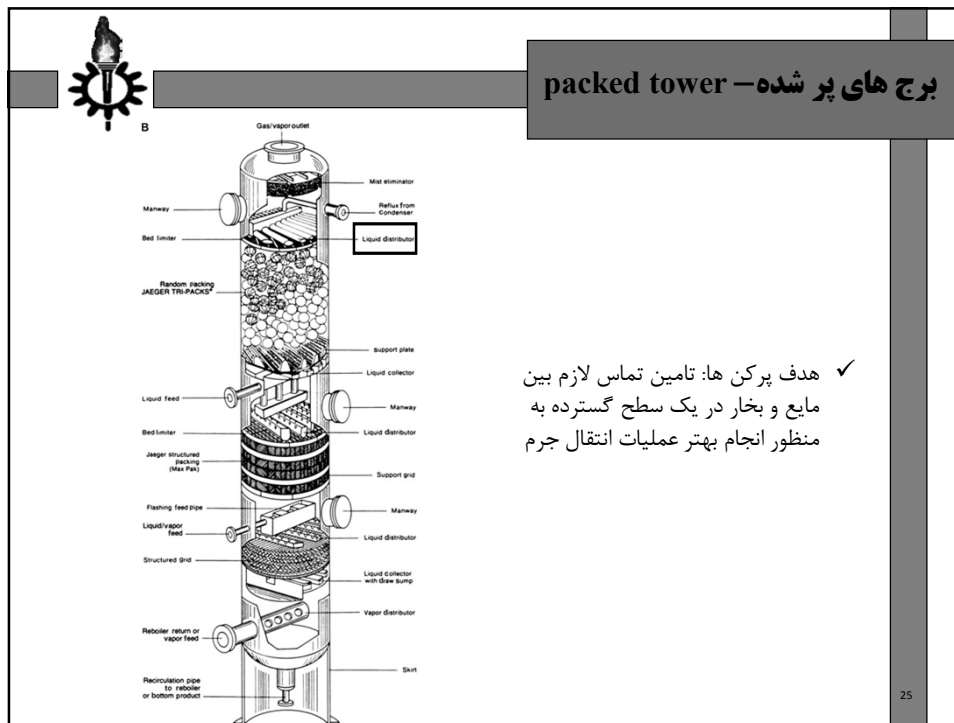
برج های پر شده – packed tower

بدنه برج:

- پوسته استوانه ای ستون تقطیر معمولاً فلزی، فولاد کربنی، فولاد ضد زنگ، آلیاژی خاص یا غیر آهنی است. ستون ها همچنین می توانند از شیشه، سرامیک، پلاستیک یا چوب تشکیل شده باشند.
- نوع مواد شیمیایی که در ستون تقطیر استفاده خواهد شد، مواد طراحی، مشخصات پوشش، ضخامت دیواره و درجه فشار و درجه حرارت را تعیین می کند.

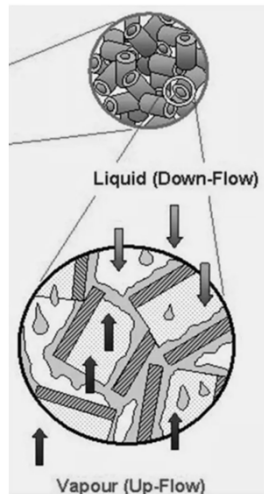


24





برج های پر شده – packed tower



خصوصیات آکنه مناسب:

- سطح زیاد و قابل دسترس
- وزن کم
- مقاومت مکانیکی بالا
- مقاومت شیمیایی بالا
- مقاوم در برابر خوردگی
- ایجاد افت فشار کم
- قیمت مناسب

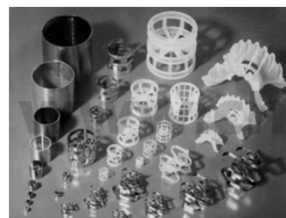
27



انواع آکنه ها

Types of packing

- 1) Random Packing- آکنه نامنظم
- 2) Regular or Structured Packing- آکنه منظم

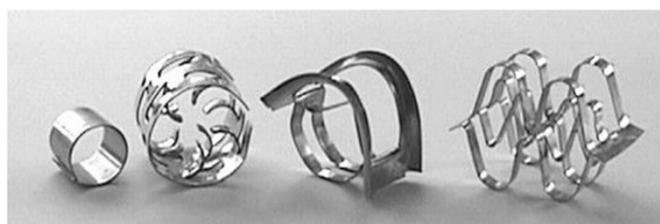


28



پرکن نامنظم – Random packing

- رایج ترین و پرکاربردترین نوع آکنه، آکنه های نامنظم هستند، که ممکن است به جهت محدودیت مالی از ضایعات برخی کارخانه ها تهیه شوند یا در شکل های مختلف با طراحی های حساب شده از نظر میزان و سطح تماس و افت فشار، ساخته شوند که طبعا قیمت بالاتری خواهند داشت.
- معمولا نحوه چیدمان این نوع آکنه ها در برج، نامنظم است.
- اندازه آکنه ها معمولا کمتر از ۵۰ میلی متر است.



29



پرکن نامنظم – Random packing

✓ دسته بندی آکنه ها از نظر جنس: سرامیکی، فلزی و پلاستیکی

آکنه های نامنظم سرامیکی:

- مقاوم در برابر خوردگی (قابل استفاده در محیط های قلیایی و اسیدی)
- مقاومت مکانیکی پایین (شکننده)
- مقاومت شیمیایی بالا
- قابلیت ترشوندگی مناسب
- قابل استفاده در دماهای بالا
- نسبتا ارزان اما سنگین



30



پرکن نامنظم – Random packing

آکنه های نامنظم فلزی:



- مقاومت مکانیکی بالا
- قابل استفاده در دماهای بالا
- قابلیت تر شوندگی بالا
- غیر قابل استفاده در محیط های خورنده

31



پرکن نامنظم – Random packing

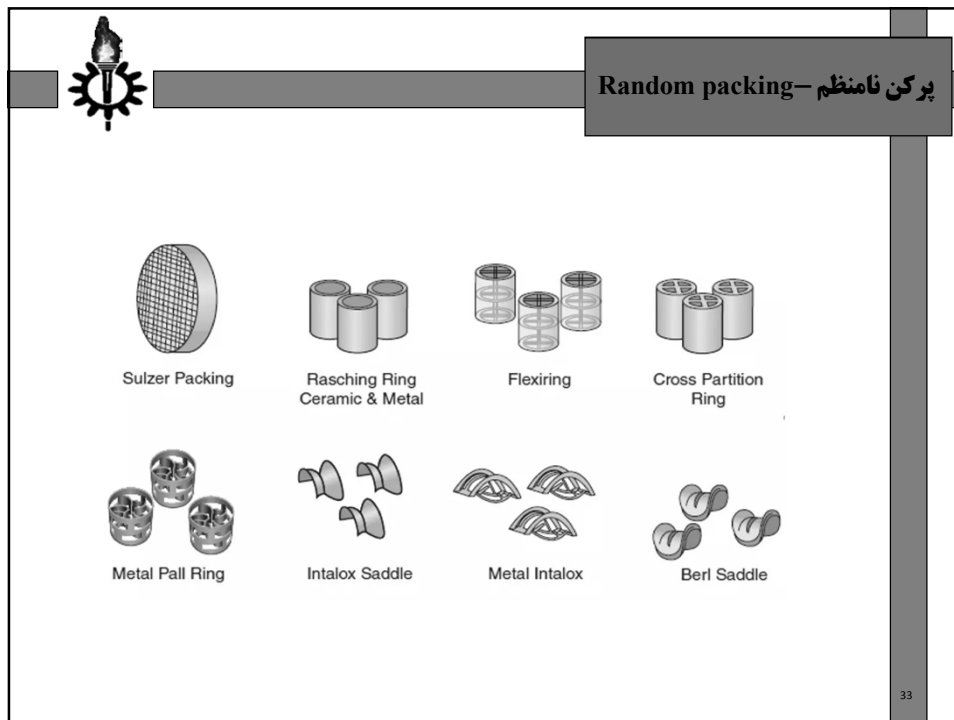
آکنه های نامنظم پلاستیکی:

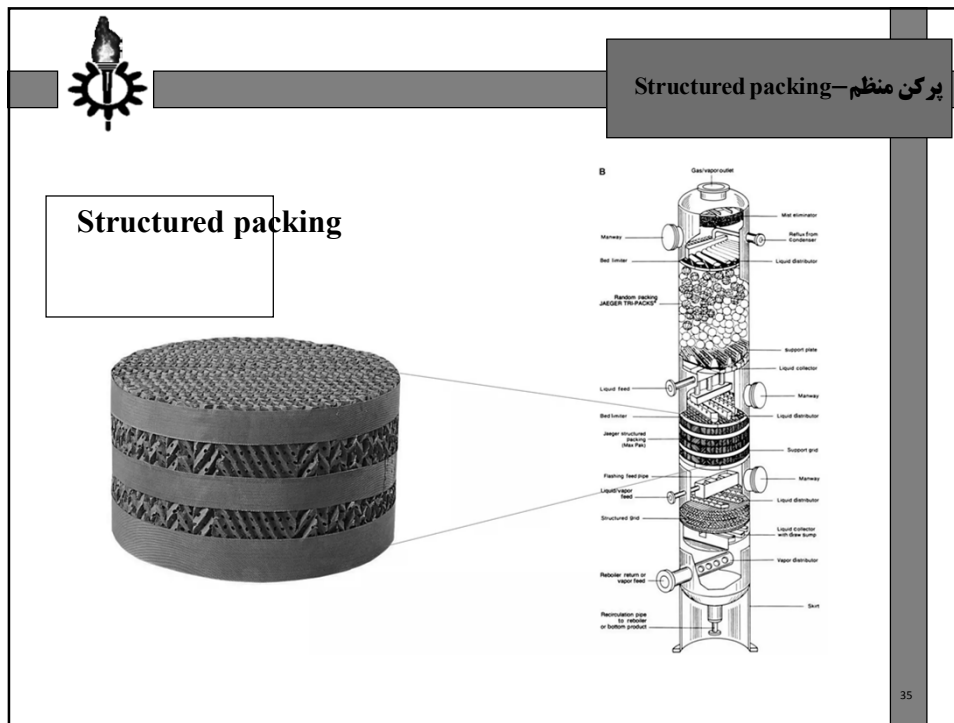


- مقاومت مکانیکی مناسب
- شکل پذیری بالا
- محدودیت استفاده در دماهای بالا
- قابلیت تر شوندگی محدود

➤ معمولاً استفاده از آکنه های فلزی و پلاستیکی رایج تر است. در صورت انتخاب آکنه فلزی، آلیاژی انتخاب می شود که مقاومت لازم در محیط های خورنده را داشته باشد.

32





مقایسه برج های سینی دار و پرشده

Comparison	Tray Column	Packed Column
Capacity	Higher	Lower
Diameter	Larger	Smaller
Cost	Less Expensive	More Expensive
Maintenance	Easier	More Difficult
Vapour Liquid Contact	Less	More
Side Stream	Available	Not Available
Corrosive Materials	Not Recommended	Appropriate
Side Stream	Wide range	Not recommended for low rate

36



مقایسه برج های سینی دار و پر شده

Comparison	Tray Column	Packed Column
Pressure Drop	Higher	Lower
Max Temperature	Higher	Lower
Toxic And Flammable Liquids	Not safe	Appropriate
Fouling Liquids	Appropriate	Not recommended
Foaming Systems	Not Recommended	Appropriate

37



مقایسه برج های سینی دار و پر شده

۱- افت فشار:

مساحت منافذ نسبت به مساحت کل برج در برج های سینی دار کمتر از برج های پر شده است. به عبارت دیگر سطح در اختیار فاز گاز در برج پر شده بزرگتر از برج سینی دار است. در نتیجه میزان افت فشار برج های سینی دار بیشتر از برج های پر شده است.

$$(\Delta P)_{Bubble\ cap} > (\Delta P)_{Valve\ tray} > (\Delta P)_{Sieve\ tray} > (\Delta P)_{Packed\ random}$$

۲- قطر برج:

در یک سطح مقطع ثابت، سطح در اختیار فاز گاز در برج پر شده بیشتر از برج سینی دار است. در یک افت فشار ثابت، سطح در اختیار فاز گاز در برج پر شده کمتر از برج سینی دار است.

38



مقایسه برج های سینی دار و پر شده

۳- نسبت گاز به مایع:

اگر بخواهیم نسبت گاز به مایع تا حد امکان کم باشد بهتر است از برج سینی دار استفاده کنیم. وقتی موجودی کم مایع مطلوب باشد برج آکنده (پر شده) بهتر است.

۴- مواد خورنده:

از نظر خوردگی برج پر شده خوردگی کمتری نسبت به برج سینی دار دارد. تنوع در انتخاب جنس پرکن ها میتواند مقاومت در برابر خوردگی را افزایش دهد. در نتیجه برای انتقال جرم مواد خورنده برج پر شده بهتر است.

۵- گرفتن جریان جانبی:

گرفتن جریان جانبی در برج سینی دار آسان تر از برج پر شده است.

۶- افزایش و کاهش دمای برج:

افزایش و کاهش دما در برج های سینی دار آسان تر از برج پر شده است.

39



مقایسه برج های سینی دار و پر شده

۷- جریان های حاوی ذرات جامد:

هیچ کدام مناسب نیستند و باید در ورودی برج جامد زدایی داشته باشیم.

۸- کف:

کف در برج سینی دار بیشتر از برج پر شده است چون در برج سینی دار گاز به شکل حباب در می آید و کف زیاد ایجاد میشود.

۹- نوسانات شدید دمایی:

بهتر است از برج سینی دار یا برج پر شده با پرکن فلزی استفاده کنیم. چون پرکن سرامیکی می شکند و پرکن پلاستیکی تغییر شکل می دهد.

۱۰- وزن برج:

برج پر شده با آکنه های پلاستیکی سبک تر از برج سینی دار است. اما برج پر شده با آکنه های فلزی و سرامیکی سنگین تر از برج سینی دار است.

40



طراحی برج های سینی دار

هلد آپ - hold-up: کسر حجمی بستر گاز-مایع که توسط حباب های گاز اشغال شده است.

حجم فاز پراکنده به حجم کل در داخل ستون ←

$$\varphi = \frac{V_d}{V_d + V_c}$$

41



طراحی برج های سینی دار

انواع سرعت:

✓ سرعت پیستونی: دبی حجمی فاز بر سطح مقطع ستون

$$\text{سرعت پیستونی فاز گاز} = \frac{\text{دبی حجمی گاز}}{\text{سطح مقطع}} = V_G \quad \Rightarrow \quad \text{سرعت واقعی گاز} = \frac{V_G}{\varphi}$$

$$\text{سرعت پیستونی فاز مایع} = \frac{\text{دبی حجمی مایع}}{\text{سطح مقطع}} = V_L \quad \Rightarrow \quad \text{سرعت واقعی مایع} = \frac{V_L}{1 - \varphi}$$

42



طراحی برج های سینی دار

✓ سرعت لغزشی: به نوعی مفهوم سرعت نسبی را دارد.

در سیستم موازی و غیرهمسو
$$V_s = \frac{V_G}{\phi_G} + \frac{V_L}{1 - \phi_G}$$

در سیستم موازی و همسو
$$V_s = \frac{V_G}{\phi_G} - \frac{V_L}{1 - \phi_G}$$

✓ سرعت نهایی: سرعتی که در لحظه تعادل بین نیروی شناوری و نیروی درگ وارد بر قطره بدست می آید.

43



طراحی برج های سینی دار

سطح ویژه:
$$a = \frac{\text{سطح تماس}}{\text{حجم کل بستر}}$$

$$\phi = \frac{\text{حجم گاز}}{\text{حجم کل بستر}} = \frac{\text{حجم حباب}}{\text{حجم کل بستر}} = \frac{\text{حجم حباب}}{\text{سطح تماس} \times a} = \frac{ad}{6}$$



$$a = \frac{6\phi}{d}$$

44