بعضی از مشخصه‌های پکینگ‌ها

ضخامت دیواره – کـه در طراحـی مکـانیکی و انتخـاب نگهدارنـدهٔ مناسـب (تحمـل وزن پکینگ‌ها) و نیز در دبی بالای فاز گاز و به منظور اطمینان از عدم تغییر شکل یا شکنندگی پکینـگ باید مدنظر قرار گیرد.

فاکتور F_P یا C_f– یکی از مشخصه‌های پکینگ‌هاست که در دستیابی به افت فشار بستر دو فازی یا دستیابی به قطر ستون مورد استفاده قرار می‌گیرد

این مشخصه به صورت تجربی و با بررسی افت فشار گاز در بستر حاوی پکینـگ که فاز مایع نیز در آن در جریان است بدست می‌آید.

فاکتور C_D – که در دستیابی به افت فشار در بستر تک فازی (عبور سـیال گـاز یـا مـایع) در ستونی حاوی پکینگ قابل استفاده است. این مشخصه به صورت تجربی قابل دستیابی است.

بعضی از مشخصه‌های پکینگ‌ها

فاکتور ε – نسبت فضای خالی در بستر حاوی پکینگ به کل حجم بستر (که محل تماس دو فاز است) می‌باشد که به صورت تجربی قابل دستیابی است.

فاکتور a_p – سطح تماس در دسترس به ازاء واحد حجم بستر می‌باشد. هر چقدر پکینگ کوچکتر باشد، a_p آن بیشتر خواهد بود و بر عکس.

مشخصه‌های پکینگ‌ها توسط تولید کنندگان آنها ارائه می‌شوند.

جدول ۸- ۱ مشخصات پکینگ‌های نامنظم

Packing	Nominal size, mm (in)									
	6 ($\frac{1}{4}$)	9.5 ($\frac{3}{8}$)	13 ($\frac{1}{2}$)	16 ($\frac{5}{8}$)	19 ($\frac{3}{4}$)	25 (1)	32 (1$\frac{1}{4}$)	38 (1$\frac{1}{2}$)	50 (2)	76 (3)
	Raschig ring									
Ceramic:										
Wall thickness, mm	0.8	1.6	2.4	2.4	2.4	3	4.8	4.8	6	9.5
C_f	1600	1000	580	380	255	155	125	95	65	37
C_p			909	749	457	301		181.8	135.6	
ε	0.73	0.68	0.63	0.68	0.73	0.73	0.74	0.71	0.74	0.78
a_p, m^2/m^3 (ft^2/ft^3)	787 (240)	508 (155)	364 (111)	328 (100)	262 (80)	190 (58)	148 (45)	125 (38)	92 (28)	62 (19)
Metal:										
0.8-mm wall:										
C_f	700	390	300	170	155	115				
ε	0.69		0.84		0.88	0.92				
a_p, m^2/m^3 (ft^2/ft^3)	774 (236)		420 (128)		274 (83.5)	206 (62.7)				
1.6-mm wall:										
C_f			410	290	220	137	110	83	57	32
C_p			688	431	485	304		172.9	133.5	
ε			0.73		0.78	0.85	0.87	0.90	0.92	0.95
a_p, m^2/m^3 (ft^2/ft^3)			387 (118)		236 (71.8)	186 (56.7)	162 (49.3)	135 (41.2)	103 (31.4)	68 (20.6)

اندازه پکینگ‌ها

اندازهٔ پکینگ‌ها یک اندازهٔ اسمی است که ممکن است در ارتباط با یکی از ابعاد پکینگ باشد که توسط تولید کنندگان پکینگ‌ها ارائه می‌شود. اندازهٔ اسمی پکینگ می‌تواند با قطر معادل پکینگ (قطر کره‌ای که نسبت سطح به حجم آن برابر نسبت سطح به حجم پکینگ باشد) که با توجه به مشخصه ε و a_p قابل دستیابی است متفاوت باشد.

$$d_p = \text{قطر معادل} = \frac{۶(۱-\varepsilon)}{a_p}$$

پکینگ‌ها به اندازه‌های مختلف ساخته شده‌اند. هر چقدر قطر ستون بزرگتر باشد پکینگ بزرگتری استفاده می‌شود و برعکس.

سرعت خیس شدن پکینگ

سرعت خیس شدن پکینگ به صورت زیر تعریف شده است:

$$\text{سرعت خیس شدن} = \frac{Q_L/A_C}{a}$$

سرعت خیس شدن = سطح پکینگ به ازای واحد حجم / دبی حجمی مایع به ازای سطح مقطع ستون

در واقع سطحی از پکینگ است که در واحد زمان توسط سیال مایع خیس می‌شود.

سرعت خیس شدن پارامتری است که توسط تولید کنندگان پکینگ ها ارائه خواهد شد. بنابراین باید سرعت خیس شدن پکینگ ها محاسبه شده و با مقدار ارائه شده توسط تولید کنندگات مقایسه شود. اگر سرعت خیس شدن محاسبه شده کمتر از مقدار توصیه شده باشد باید در این صورت قطر ستون را کاهش داد. Norman برای اطمینان از خیس شدن پکینگ ها در ستون های جذب، فلاکس جرمی بالاتر از $2.7\ \frac{\text{kg}}{m^2.s}$ را توصیه نموده است.

مراحل طراحی یک ستون پرشده

با توجه به مطالب ارائه شده مراحل طراحی یک ستون پر شده به شرح ذیل می‌باشد.

انتخاب نوع و اندازه‌ی پکینگ

دستیابی به قطر ستون با توجه به دبی مشخصی از فاز ها(گاز و مایع)

دستیابی به ارتفاع ستون برای جداسازی خاص

بررسی و انتخاب تجهیزات داخلی، متوقف کننده، توزیع کننده‌ی مایع، توزیع کننده‌ی مجدد و نگهدارنده

انتخاب نوع پکینگ با توجه به پارامتر های مهم در انتخاب پکینگ و اندازه پکینگ با توجه به اندازه‌ی احتمالی قطر ستون قابل پیش‌بینی است

دستیابی به قطر ستون

برای پکینگ های نامنظم، افت فشار گاز به ازای هر متر پکینگ معمولا از (واحد) تجاوز نمی‌نماید. این مقدار افت فشار گاز در حدود ۸۰ درصد سرعت طغیان است. توصیه های تجربی زیر برای افت فشار گاز در ستون های جذب، دفع و تقطیر ارائه شده است.

افت بشار به ازای یک متر پکینگ $(200-400)\frac{N}{m^2}$

در ستون تقطیر در فشار اتمسفر :

افت بشار به ازای یک متر پکینگ $(400-600)\frac{N}{m^2}$

در ستون تقطیر در فشار خلاء :

افت بشار به ازای یک متر پکینگ $(8-40)\frac{N}{m^2}$

در صورتی که سیستم شیمیایی کف زا باشد مقادیر توصیه شده فوق باید نصف شود.

$$\frac{L'}{G'}=\frac{L/A_C}{G/A_C}=\frac{L}{G}$$

فاکتور جریان $F_{LV}=\frac{L'}{G'}\left(\frac{\rho_G}{\rho_L-\rho_G}\right)^{\frac{1}{2}}$

دستیابی به ارتفاع ستون

نشان داده است که در تقطیر HEPT برای نوع و اندازه خاصی از پکینگ ثابت و مستقل از خصوصیات فیزیکی سیستم شیمیایی است به شرط آنکه توزیع مایع به خوبی صورت گیرد و حداقل افت فشار گاز توصیه شده برای هر پکینگ خاص ایجاد شود.

اگر حداقل افت فشار گاز برای پکینگ Pall ring، ۱۷mmH_2O به ازای یک متر مربع پکینگ باشد آنگاه :

HEPT (m)	(mm)
0.4 - 0.5	25
0.6 - 0.75	38
0.75 – 1.0	50

مقادیر HEPT توصیه شده فوق برای پکینگ های Saddless ، تقریباً قابل استفاده است اگر حداقل افت فشار ایجاد شده ۲۹ mmH_2O باشد و در حالتی که از پکینگ Rasching استفاده شود مقادیر فوق در صورتی که افت فشار در حدود ۴۲ mmH_2O به ازای یک متر پکینگ باشد قابل استفاده خواهد بود.

مقایسه ستون های سینی دار و پر شده

اگر چه بررسی اقتصادی در انتخاب ستون پر شده یا سینی دار، نقش تعیین کننده ای دارد لیکن با توجه به موارد ذیل نیز می تواند در انتخاب نوع واحد بسیار موثر باشد.

ستون های پر شده برای دبی مایع خیلی کم مناسب نمی باشد. (عدم خیس شدن کامل پکینگ ها)

ستون های سینی دار دامنه وسیعی از دبی فاز گاز و مایع را در مقایسه با ستون پر شده در بر میگیرد.

ستونهای سینی دار با اطمینان بیشتری نسبت به ستون های پر شده قابل طراحی هستند.

ایجاد جریان های جانبی در ستون های سینی دار به مراتب از ستونهای پرشده راحت تر است.

اگر مایع سیستم شیمیایی حاوی ذرات آلوده کننده باشد و نیاز به تمیز کردن ستون باشد ، تمیز کردن ستون های سینی دار با قطر بزرگ و تعبیه دریچه ها برای عبور فرد یک سینی به سینی دیگر به راحتی صورت می گیرد.

افت فشار در ستون های پرشده:

بستر تک فازی – رابطه Ergun برای دستیابی به افت فشار (گاز یا مایع) از درون ستون پرشده از مواد جامد کروی، استوانه ای و ... ارائه شده است.

$$\frac{\Delta P}{Z} \times \frac{g_c . \varepsilon^2 . d_p . g_c}{(1-\varepsilon) G'^2} = \frac{150(1-\varepsilon)}{Re} + 1.75$$

ترم مربوط به جریان متلاطم ترم مربوط به جریان آرام

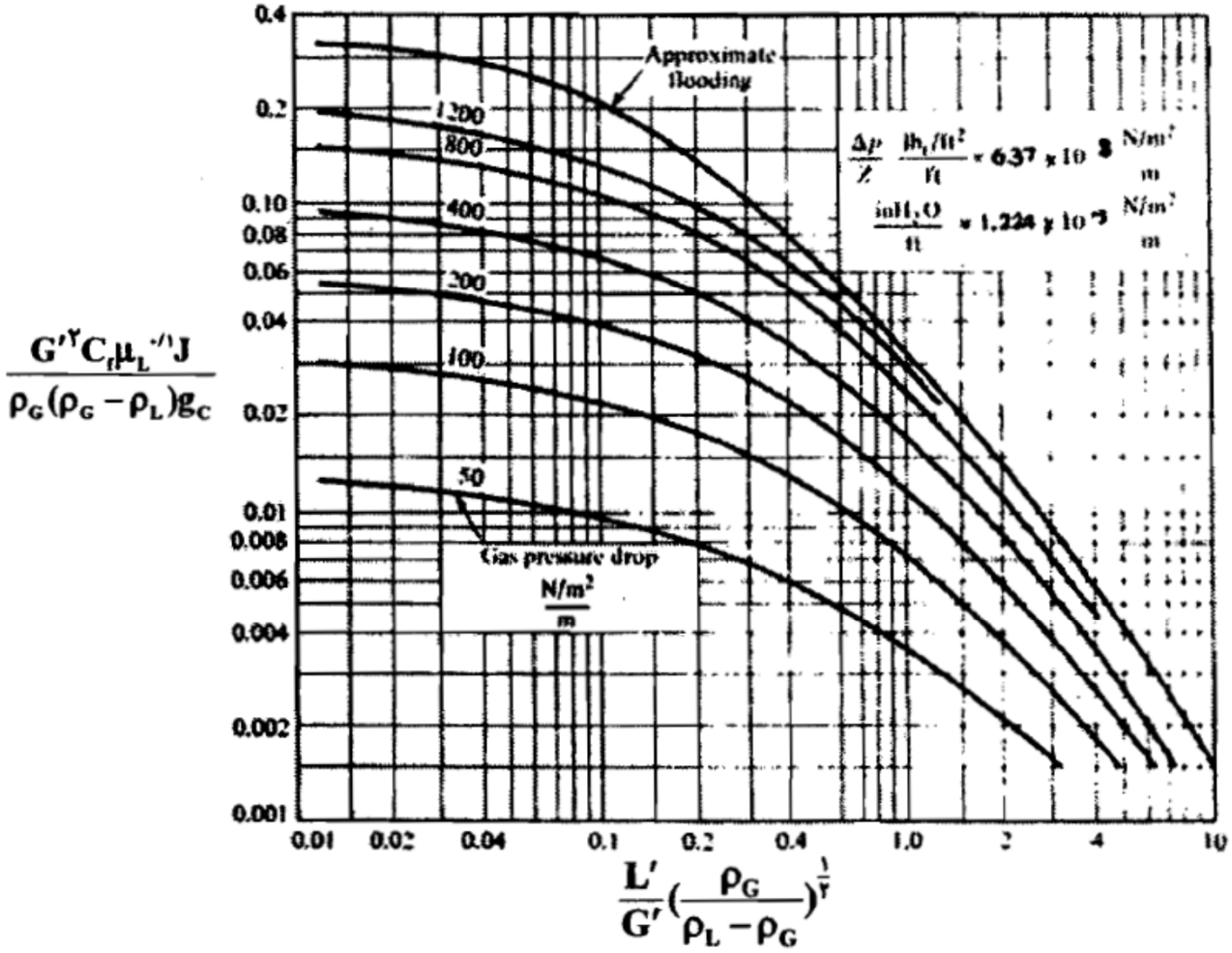
$Re = \frac{d_p . G'}{\mu}$ $G' : \frac{kg}{m^2 . s}$ فلاکس جرمی سیال

$d_p : \frac{6(1-\varepsilon)}{a_p}$ قطر معادل پکینگ

برای جریان گاز $G' > 0.7 \frac{kg}{m^2 . s}$ ترم مربوط به جریان آرام قابل صرف نظر کردن است.

$$\frac{\Delta P}{Z} = C_D . \frac{G'^2}{\rho_G}$$

منحنی طغیان و افت فشار ستونهای پرشده
با پکینگ نامنظم (بستر دو فازی)



مقایسه ستون های سینی دار و پر شده

اگر مایع نقش حلال داشته باشد، اشتغال‌زا و سمی باشد، با توجه به هلد آپ مایع کم در ستونهای پر شده و مسئله نگهداری این گونه حلال‌ها استفاده از ستون پر شده مناسب تر خواهد بود.

اگر مایع خورنده باشد معمولاً ستون های پر شده در مقایسه با ستون‌های سینی دار ارزانتر خواهد بود.

افت فشار گاز در ستونهای پر شده به ازای ارتفاع معادل یک مرحله در مقایسه با افت فشار در یک سینی در یک ستون سینی دار کمتر است.

معمولاً ساخت ستونهای با قطر کم (کمتر از ۰/۶ متر) از ستون‌های پر شده استفاده می شود زیرا ساخت سینی ها در چنین شرایطی نسبتاً مشکل و گران خواهد بود.

در صورتی که نوسانات دما یا تغییرات دما خیلی زیاد باشد پکینگ های سرامیکی توصیه نمی شود در چنین شرایطی ستون سینی دار یا پکینگ فلزی توصیه می شود.

مثال: ستون پرشده ای از پکینگ راشینگ ۱ اینچ سرامیکی پر شده است. این ستون در فلاکس مایع $6.7\ \frac{kg}{m^2.s}$ طغیان می کند، می خواهیم مشکل این ستون را با تغییر پکینگ حل نماییم. اگر از پکینگ نوع Intalox Saddles ۱ اینچ و سرامیکی استفاده شود آیا باز هم طغیان ایجاد خواهد شد؟ به اندازه ای از پکینگ توصیه می شود؟ فشار در ستون اتمسفر، ستون برای جذب و خصوصیات فیطیکی در شرایط پایین ستون موجود است :

$$\rho_L = 1000\ \frac{kg}{m^3} \quad , \quad \mu_L = 1.8 \times 10^{-3}\ \frac{kg}{m.s} \quad , \quad \rho_G = 1.3\ \frac{kg}{m^3}$$

حل: مقدار G' را حدس می زنیم:

$$G' = 2\ \frac{kg}{m^2.s}$$

$$\text{مقدار محور } x \text{ ها} = \frac{L'}{G'}\left(\frac{\rho_G}{\rho_L - \rho_G}\right)^{\frac{1}{2}} = \frac{6.7}{2}\left(\frac{1.3}{1000 - 1.3}\right)^{\frac{1}{2}} = 0.121$$

$$\frac{G'^2.C_f.{\mu_L}^{0.1}.J}{\rho_G\,(\rho_L - \rho_G).g_c} = 0.19$$

با توجه به منحنی طغیان

$$\text{مقدار محور } y \text{ ها} = 0.19$$

با توجه به جدول مشخصات پکینگ ها:

$$C_f = 155$$

$$\frac{G'^2.(155).(1.8\times10^{-3})^{0.1}\times1}{1.3\,(\,1000-1.3\,)\times1}=0.19 \qquad \rightarrow \quad G'=1.73$$

مقدار محور x ها $=0.146$ $\rightarrow$ مقدار محور y ها $=\ 0.172$ $\rightarrow$ $G'=1.64$

$G'=1.64$ $\rightarrow$ قابل قبول

نوع پکینگ $1"$ ، سرامیکی، اینتالکس وبا توجه به جدول مشخصات پکینگ ها: $C_{f.}=155$

$$\text{مقدار محور } x \text{ ها} = \frac{6.7}{1.65}\left(\frac{1.3}{1000-1.3}\right)^{\frac{1}{2}}=0.146$$

$$\text{مقدار محور } y \text{ ها} = \frac{G(\,1.65)^2.(98).(1.8\times10^{-3})^{0.1}\times1}{1.3\,(\,1000-1.3\,)\times1}=0.1092$$

مثال: از یک ستون پر شده برای جذب بنزن موجود در مخلوط گازی شامل بنزن و نیتروژن، با جریان نا همسو جهت جداسازی بنزن استفاده می شود. مشخصات هر یک از جریانها به قرار زیر است : دبی حلال خالص $۵\frac{kg}{s}$ و از بالای ستون وارد می شود. دانسیته آن $۸۰۰\frac{kg}{m^3}$ و ویسکوزیته آن $۰/۰۰۲\ \frac{kg}{m.s}$ است. از پایین ستون مخلوط گازی با دبی حجمی $۲\frac{m^3}{s}$ وجز مولی ۵٪ بنزن در دمای $۲۵\ ^oC$ وارد می شود. فشار کل اتمسفر ، نوع پکینگ مورد استفاده Pall Ring فلزی و با قطر اسمی ۳۸ mm می باشد. اگر افت فشار به ازای واحد طول این پکینگ $۲۰۰\frac{N}{m^2}$ توصیه شده باشد، قطر ستون را بدست آورید.

حل:

در پایین ستون:

$$\text{فاکتور جریان} = \frac{L'}{G'}\left(\frac{\rho_G}{\rho_L - \rho_G}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{دبی جرمی گاز} = \dot{m} = \frac{P.V.M}{RT}$$

$$M = \sum_{i=A}^{n} y_i M_i = 0.05 \times 78 + 0.95 \times 28 = 30.5$$

$$\dot{m} = \dot{G} = \frac{1.1 \times 10^5 \times 1.5 \times 30.5}{8314 \times (273 + 25)} = 2.03 \ \frac{kg}{s}$$

$$\rho_G = \frac{P.M}{RT} = \frac{1.1 \times 10^5 \times 30.5}{8314 \times (273 + 25)} = 1.354 \ \frac{kg}{m^3}$$

کل بنزن انتقالی به مایع + دبی جرمی مایع ورودی= دبی جرمی مایع در پایین ستون

کل بنزن انتقالی به مایع + دبی جرمی مایع ورودی= دبی جرمی مایع در پایین ستون

کل بنزن ورودی = 0.128+2.03= 0.26 $\frac{kg}{s}$

دبی جرمی مایع در پایین =4+0.26= 4.26 $\frac{kg}{s}$

فاکتور جریان $= \frac{4.26}{2.03} \left(\frac{1.354}{800-1.354}\right)^{\frac{1}{2}}=0.086$

$\frac{\Delta P}{Z} = 400 \frac{N/m^2}{m}$ → مقدار محور y ها $= 0.07$

$$\frac{G'^2 . C_{f.} {\mu_L}^{0.1} . J}{\rho_G \left(\rho_L - \rho_G\right) . g_c} = 0.07$$

با توجه به جدول مشخصات پکینگ ها: 50 mm Pall ring فلزی $C_{f.} = 20$

$$\frac{G'^2.(20).(0.0023)^{0.1}\times 1}{1.354\ (1000-1.354)\times 1} = 0.07 \quad \longrightarrow \quad G' = 2.635 \ \frac{kg}{m^2.s}$$

سطح مقطع ستون $= \frac{G}{G'} = \frac{2.03}{2.625} = 0.77\ m^2$

$$\frac{\pi {D_C}^2}{4} = 0.77 \qquad \longrightarrow \qquad D_C = 0.99\ m = 1\ m$$

دبی جرمی مایع در بالا $= 4.0\ \frac{kg}{s}$

دبی جرمی گاز در بالا $= 2.03 - 0.26 = 1.77\ \frac{kg}{s}$

$$\rho_G = \frac{P.M}{RT} = \frac{1.1 \times 10^5 \times 28}{8314 \times (273 + 25)} = 1.243\ \frac{kg}{m^3}$$

فاکتور جریان $= \frac{L'}{G'} \left(\frac{\rho_G}{\rho_L - \rho_G}\right)^{\frac{1}{2}} = \frac{4.0}{1.77} \left(\frac{1.354}{800 - 1.354}\right)^{\frac{1}{2}} = 0.089$

باتوجه به اینکه تغییرات قطر کمتر از ۲۰٪ می باشد ستون را با قطر واحد و با اندازه بزرگتر مد نظر قرار دهیم

$\frac{\Delta P}{Z} = 400\ \frac{N/m^2}{m}$ → مقدار محور y ها $= 0.068$

$G' = 2.635\ \frac{kg}{m^2.s}$

ستون مقطع سطح $= 0.71\ m^2$ $\frac{\pi {D_C}^2}{4} = 0.71$ → $D_C = 0.95\ m$

مثال:

گاز SO_2در هوا توسط محلول آمونیاک جدا می شود. پکینگ مورد استفاده سرامیکی با اندازه اسمی 25 mm ، C_f=98، C_D=241.5، a_p=256 و میزان تخلخل 0.775 می باشد. دبی گاز 0.8 m^3/s ، دما 30 ^oC و فشار اتمسفر است. مقدار SO_2 در هوای ورودی 7 درصد مولی و تقریبا تمامی SO_2جدا می شود. مایع با دبی 3.8 kg/s و دانسیته 1235 kg/m^3 و ویسکوزیته $2.5*10^{-3}$ kg/m.s استفاده شده است. مطلوب است:

الف- محاسبه قطر ستون با فرض این که $\frac{\Delta P}{Z}=400\ \frac{N/m^2}{m}$ باشد.

ب- اگر ارتفاع ستون پر شده 6متر و بستر تک فازی 1 متر باشد، قدرت فن مورد نیاز برای تامین افت فشار چقدر خواهد بود.

ج- آیا اندازه پکینگ مناسب است؟ $\frac{\Delta P}{Z}=C_D\frac{G'^2}{\rho_G}$ بستر خشک

حل: با توجه به آنکه عملیات جذب صورت می‌گیرد، بر مبنای اطلاعات پائین ستون طراحی می‌شود.

$$\dot{G}_1 = m = \text{دبی جرمی گاز از پائین} = \frac{PVM}{RT}$$

$$V = ۰/۸\frac{m^۳}{s} \quad , \quad R = ۸۳۱۴(SI) \quad , \quad T = (۲۷۳ + ۳۰)K$$

$$P = ۱\ bar = ۰/۹۸۷\ atm$$

$$M = \sum y_i M_i = ۰/۰۷ \times ۶۴ + ۰/۹۳ \times ۲۹/۰۲ = ۳۱/۴۷$$

$$\dot{G}_1 = \frac{۱۰۱۳۳۰ \times ۰/۹۸۷ \times ۰/۸ \times ۳۱/۴۷}{۸۳۱۴(۲۷۳ + ۳۰)} = ۰/۹۹۹\ \frac{kg}{s}$$

$$= \frac{۰/۹۹۹}{۳۱/۴۷} = ۰/۰۳۱۷ \ \frac{\text{kmol}}{\text{s}}$$

مقدار SO_2 ورودی $= ۰/۰۳۱۷ \times ۰/۰۷ = ۲/۲۲ \times ۱۰^{-۳} \ \frac{\text{kmol}}{\text{s}}$

دبی جرمی گاز در بالا $= \left(۰/۰۳۱۷ - ۲/۲۲ \times ۱۰^{-۳}\right) \times ۲۹/۰۲ = ۰/۸۵۶ \ \frac{\text{kg}}{\text{s}}$

کل SO_2 انتقالی به مایع + دبی جرمی ورودی مایع $= \dot{L}_1 =$ دبی جرمی مایع در پائین

$$= ۳/۸ + ۲/۲۲ \times ۱۰^{-۳} \times ۶۴ = ۳/۹۴ \ \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

فاکتور جریان در پائین $= \frac{L'}{G'}\left(\frac{\rho_G}{\rho_L-\rho_G}\right)^{\frac{1}{2}}$

$\frac{L'}{G'}=\frac{\dot{L}_1}{\dot{G}_1}=\frac{۳/۹۴}{۰/۹۹۹}=۳/۹۴$

$\rho_G=\frac{PM}{RT}=\frac{۰/۹۸۷\times۱۰۱۳۳۰\times۳۱/۴۷}{۸۳۱۴(۲۷۳+۳۰)}=۱/۲۵$

فاکتور جریان $=۳/۹۴\left(\frac{۱/۲۵}{۱۲۳۵-۱/۲۵}\right)^{\frac{1}{2}}=۰/۱۲۵$

$\frac{\Delta P}{Z}=۴۰۰\frac{N}{m^2 m}$ ∴ مقدار محور yها = ۰/۰۶۱

مشخصات پکینگ : Intalox Saddles ، ۲۵″ و سرامیکی ∴ $C_f=۹۸$

$C_D=۲۴۱/۵$

$\varepsilon=۰/۷۷۵$

$a_p=۲۵۶\ \frac{m^2}{m^3}$

$$\frac{G'^{2}\times 98\times\left(2/5\times 10^{-2}\right)^{0/1}\times 1}{1/25\left(1235-1/25\right)\times 1}=0/061 \qquad \therefore \qquad G'=1/322\,\frac{kg}{m^{2}s}$$

$$A_C = \text{سطح مقطع} = \frac{\dot{G}_1}{G'} = \frac{0/999}{1/322} = 0/756 \ m^2$$

$$\therefore \qquad D_C = 0/981\ m = 1\ m \qquad \text{بنابراین} \quad A_C = \frac{\pi}{4}(1)^2 = 0/785 m^2$$

بررسی افت فشار– افت فشار تر، در بستر دو فازی:

$$\text{افت فشار تر} = 400\times 8 = 3200\,\frac{N}{m^2}$$

افت فشار خشک:

$$G' = \rho U = \frac{\text{دبی جرمی } SO_2 - \text{دبی جرمی گاز ورودی}}{\text{سطح مقطع}}$$

$$= \frac{\text{دبی جرمی گاز ورودی به بستر خشک}}{\text{سطح مقطع}}$$

$$G' = \frac{۰/۹۹۹ - ۲/۲۲ \times ۱۰^{-۳} \times ۶۴}{۰/۷۸۵} = \frac{۰/۸۵۸}{۰/۷۸۵} = ۱/۰۹۲ > ۰/۷$$

لذا افت فشار از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$\frac{\Delta P}{Z} = C_D \frac{G'^2}{\rho_G}$$

افت فشار تر – فشار در پائین = فشار گاز در نقطه ورودی به بستر خشک

$$= ۰/۹۸۷ \times ۱۰۱۳۳۰ - ۳۲۰۰ = ۹۶۸۱۲ \frac{N}{m^2}$$

$$\rho_G = \frac{PM}{RT} = \frac{۹۶۸۱۲ \times ۲۹/۰۲}{۸۳۱۴ \times (۲۷۳ + ۳۰)} = ۱/۱۱۵ \ \frac{kg}{m^۳}$$

$$\frac{\Delta P}{Z} = ۲۴۱/۵ \times \frac{(۱/۰۹۲)^۲}{۱/۱۱۵} = ۲۵۸/۲ \ \frac{N}{m^۲ m}$$

$$\Delta P = ۳۲۰۰ + ۲۵۸/۲ = ۳۴۵۸ \ \frac{N}{m^۲}$$

$$\text{قدرت فن} = P_{\text{فن}} = \frac{\Delta P \dot{m}}{\rho_g} \times \frac{۱}{\text{راندمان فن}} = \frac{(۳۴۵۸) \times ۱/۰۲ \times ۰/۸۵۸}{۱/۱۱۵} \times \frac{۱}{۰/۶} \times \frac{۱}{۱۰۰۰} = ۴/۵ \ kW$$

توجه: نسبت $\frac{d_P}{D_c}$ (نسبت اندازه پکینگ به قطر ستون حدود $\frac{۱}{۴۰} \approx \frac{۲۵}{۱۰۰۰}$) بسیار کوچک و لذا افت ایجاد شده نسبتاً بالا خواهد بود. بهتر است اندازهٔ پکینگ برای چنین ستونی کمی بزرگتر انتخاب شود. از طرفی براساس توصیه‌های تجربی برای دبی گاز $۰/۸ \ m^۳/s$، چنین پکینگی نسبتاً کوچک است.

مراحل طراحی دقیق یک ستون پر شده گاز – مایع: