

بررسی هیدرودینامیکی جریان دوفازی گاز- مایع در برج‌های پرشده با آکنه‌های ساختار یافته

حامد نظیری¹، مریم سلیمی²، فرهاد صابونچی³

¹مدیر R&D، شرکت آذر انرژی تبریز؛ info@azarenergy.com

²کارشناس ارشد فرآیند، شرکت آذر انرژی تبریز؛ maryamsalimi_2000@yahoo.com

³کارشناس ارشد فرآیند، شرکت آذر انرژی تبریز؛ Saboonchi.farhad@gmail.com

چکیده

در این کار رفتار هیدرودینامیکی جریان گاز- مایع در برج‌های پرشده با آکنه‌های ساختاریافته به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی‌های صورت گرفته شامل اندازه‌گیری افت فشار و انباشتگی مایع در دو نوع آکنه می‌باشد. نتیجه حاصل از آزمایش‌ها نشان‌دهنده رفتار هیدرودینامیکی بهبود یافته در آکنه‌های ملاپک پلاس¹ نسبت به ملاپک² می‌باشد. آزمایشات در بخش تحقیق و توسعه شرکت آذر انرژی تبریز، داخل دو برج پرشده صورت گرفته است. جریان مورد بررسی آب و هوا بوده و در شرایط عملیاتی یکسان مقایسه‌ها صورت گرفته است.

کلمات کلیدی

آکنه‌های ساختاریافته، رفتار هیدرودینامیکی، برج‌های پرشده، افت فشار، ماندگی

Hydrodynamic investigation of gas liquid two phase flow in structured packing towers

Hamed Naziri, Maryam Salimi, Farhad Saboonchi

ABSTRACT

In this study, hydrodynamics of gas-liquid flow in structured packed towers has been investigated experimentally. Pressure drop and hold up in two types of structured packings have been investigated. Results show that hydrodynamic of Mellapak Plus is improved compared to conventional Mellapak structured packing. Experiments and investigations are performed in R&D unit of Azarenergy Tabriz Company in two packed towers. Water and air were chosen as liquid and gas streams and comparisons are in the same operational conditions.

KEYWORDS

Structured Packing, Hydrodynamics, Packed Tower, Pressure Drop, Hold up

¹ حامد نظیری، تبریز، میدان جهاد، کوی تبریز نو، بن بست مقدم، پلاک 3، تلفن: 04134414533، نمابر: 04134414532

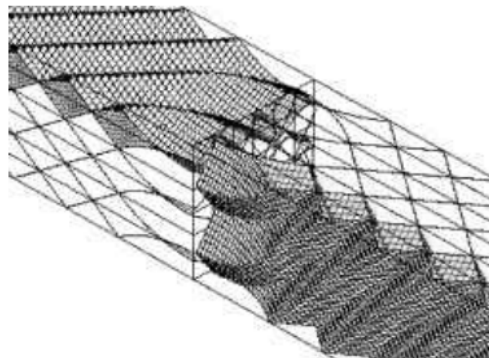
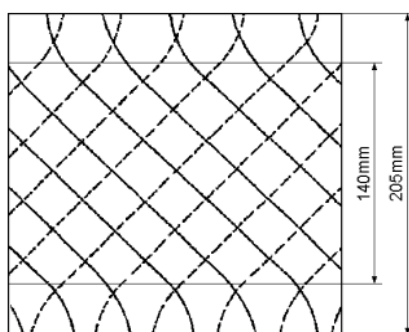
1- مقدمه

دقیقا" برابر با درصد کاهش انتقال جرم بود [6]. با بررسی‌ها صورت گرفته در سال‌های اخیر نوع جدیدی از آکنه‌های ساختار یافته تولید شده است که هم دارای بازده آکنه‌های ساختار یافته با زاویه 45 درجه بوده و هم ظرفیت آنها در حد آکنه‌های ساختار یافته با زاویه 60 درجه می‌باشد [4]. مطالعات آزمایشگاهی بر روی ملاپک [7، 8] و [9] حاکی از اینست که در بارگذاری‌های بالای گاز، مایع در فصل مشترک المان‌های پرکن تجمع می‌نماید. سوئس [7] و همکاران نشان داده‌اند که طغیان در داخل ملاپک از مناطقی شروع می‌شود که لایه-های پرکن روی همدیگر قرار می‌گیرند. برونازی [9] و همکاران مقدار ماندگی مایع را در ملاپک 250 Y اندازه‌گیری کردند و به این نتیجه رسیدند که دلیل اصلی ماندگی مایع در بارگذاری‌های بالا، افت فشار در اثر تغییر جهت جریان گاز در ناحیه مابین لایه‌های مجاور می‌باشد.

در بسترهای پر شده با پرکن‌های ساختاریافته معمولاً با زاویه چرخشی 90 درجه نسبت به هم، بر روی یکدیگر انباشته شده‌اند. این بدین معناست که گاز بالارونده مجبور به تغییر آبی جهت جریان در حین انتقال از لایه ای به لایه دیگر می‌شود [10] و همین امر منجر به افزایش افت فشار می‌گردد. به منظور اصلاح این مشکل شرکت Koch-Glitsch اقدام به ارائه Flexipac-HC نمود [11]. تفاوت اصلی این نوع پرکن‌ها با Flexipac های اورجینال، بخش انتهایی صفحات موج دار هر لایه بود که به منظور افزایش قطر هیدرولیکی و تغییر جهت جریان گاز به صورت نرم‌تر، مسطح تر شده بودند. به طور مشابه شرکت Montz نیز با ایجاد تغییرات در سری Montz B1، اقدام به تولید Montz B1-M نموده است. مشخصه اصلی خمیدگی نرم تر و بلند تر در بخش انتهایی آن همراه با افزایش مستمر پهنای موج می‌باشد [6]. شرکت سولزر نیز پرکن ملاپک پلاس را ارائه کرده که تفاوت آن با مدل‌های مرسوم ملاپک، ساختار انتهایی بالا و پایین لایه‌های پرکن می‌باشد. به‌طوریکه در بالا و پایین هر لایه صفحات موج‌دار به سمت محور عمودی متمایل می‌گردند (شکل 1).

امروزه برج‌های پر شده با جریان متقابل گاز مایع کاربرد فراوانی در فرایندهای مختلف عملیاتی از جمله تقطیر، جذب، استخراج و ... پیدا کرده‌اند. به‌طوریکه وجود رقابت در بازار جهانی محققین و سازندگان را مجبور به جستجوی راهکارهای جدید جهت بهبود طراحی اجزای داخلی برج‌ها نموده است. در میان این اجزا، آکنه‌های ساختار یافته به دلیل کارایی بالا، بیشترین توجه را به خود جلب نموده‌اند [1]. استفاده از این آکنه‌ها به جای آکنه‌های نامنظم موجب کاهش مصرف انرژی و کاهش قطر برج به دلیل افزایش بازده انتقال جرم می‌گردد. علاوه بر این آکنه‌های ساختار یافته در برخی شرایط مانند تقطیر در خلاء به سینی‌های با هزینه ساخت کمتر ترجیح داده می‌شوند زیرا این آکنه‌ها هزینه عملیاتی را به دلیل کم کردن افت فشار در هر مرحله تعادلی به شدت کاهش می‌دهند [2 و 3]. آکنه‌های ساختار یافته استاندارد از صفحات موج‌داری تشکیل شده‌اند که به صورت ردیف‌های موازی با زاویه 45 تا 60 درجه نسبت به افق قرار گرفته اند. چنین ساختاری باعث ایجاد سطح ویژه بسیار بالایی ($250-500 \text{ m}^2/\text{m}^3$) همراه با تخلخل تقریبی 98٪ می‌گردد. اولین آکنه‌های ساختار یافته از جنس تنزیب بودند که چهل سال پیش توسط سولزر ارائه شد و پس از آن در اواخر دهه هفتاد پرکن‌های فلزی ملاپک 250 Y روی کار آمدند. این پرکن‌ها در واقع نسل اولیه برخی از پرکن‌های ساختار یافته امروزی مانند Montz B1 & C1 (ساخته شده توسط شرکت Glitsch)، Ralupak (ساخته شده توسط شرکت راشینگ)، Flexipak (ساخته شده توسط شرکت کوچ) می‌باشد [4]

با گذشت زمان تقاضای بازار جهت افزایش ظرفیت و بازده محققین را بر آن داشت که به بهبود ساختار هندسی آکنه‌ها بپردازند. در گام اول آکنه‌ها با صفحات فلزی استاندارد تحت عنوان ملاپک نوع X که در آنها زاویه ورقه‌های موج‌دار از 45 به 60 درجه افزایش پیدا کرده بود، توسط سولزر ارائه گردید. اگرچه این آکنه‌ها افزایش قابل توجهی در ظرفیت برج ایجاد کردند [5]، ولی درصد افزایش ظرفیت



شکل (1) شماتیک کلی ملاپک پلاس [12]

پمپ نیز جریان مایع را در یک سیکل بسته به صورت ناهمسو با جریان گاز از بالا تا پایین برج با دبی $46 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{hr}$ به گردش در می‌آورد. توزیع جریان مایع ورودی از بالای برج توسط توزیع کننده مایع صورت می‌گیرد و پس از عبور از داخل آکنه‌ها به داخل مخزن ذخیره ریخته شده و مجدداً پمپ می‌شود. سیال مایع و گاز استفاده شده در این آزمایش آب و هوا می‌باشد و کلیه آزمایش‌ها در شرایط اتمسفریک انجام شده‌اند.

افت فشار بستر در دو حالت بستر خشک و تر اندازه‌گیری شده است که در حالت تر برای جلوگیری از تاثیر فشار مویینگی، آزمایش‌ها در شرایطی انجام شده‌اند که آکنه‌ها قبلاً" به طور کامل خیس شده و جریان گاز و مایع از همان ابتدا از بستر خیس عبور می‌کنند. بدین منظور قبل از آزمایش جریان مایع در داخل بستر به گردش در می‌آید و پس از اطمینان از خیس شدن کامل تمام آکنه‌ها، جریان قطع شده و اجازه تخلیه کامل مایع به بستر داده می‌شود. سپس دبی مایع در مقدار معین تنظیم شده و دبی گاز به تدریج افزایش داده می‌شود و در دبی‌های مختلف گاز مقدار افت فشار و مایع جمع شده در داخل مخزن (جهت اندازه‌گیری مقدار ماندگی مایع) گزارش می‌گردد. افزایش دبی گاز تا رسیدن تا به شرایط طغیان ادامه می‌یابد. افت فشار داخل بستر در تمامی حالات با استفاده از مانومتر تعبیه شده در بدنه برج‌ها اندازه‌گیری می‌گردد. ماندگی دینامیکی مایع نیز به وسیله اندازه‌گیری بالانس حجمی تعیین می‌گردد [14]. بطوریکه مقدار کاهش سطح مایع در مخزن معادل خواهد بود با ماندگی مایع در داخل بستر.

بدین ترتیب در بخش اصلی برج پر شده، فاز گاز تحت زاویه 45 درجه جریان می‌یابد و در انتهای بالایی و پایینی که همان محل تلاقی لایه‌های پرکن با یکدیگر می‌باشد، جریان به صورت عمودی بوده و همین امر منجر به کاهش سرعت گاز به میزان 25٪ می‌گردد. در واقع تغییر جهت جریان در پرکن‌های ملاپک پلاس به صورت ملایم و پایدار رخ می‌دهد. تحقیقات انجام شده در این زمینه [13] حاکی از اینست که اصلاحات انجام شده موجب افزایش ظرفیت بدون تاثیر در بازده جداسازی می‌گردد.

در این تحقیق جهت رسیدن به بینش کافی و پیدا کردن دانش آزمایشگاهی بیشتر در راستای تسلط و جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز برای شناخت بیشتر و بهتر هیدرودینامیک بسترهای پر شده با آکنه-های ساختار یافته، به بررسی رفتار جریان و افت فشار بستر در شرایط خشک و تر در دو برج آکنده با ساختار مشابه در دو حالت پر شده با ملاپک 250.Y و ملاپک پلاس 252.Y، که به صورت پایلوت توسط شرکت آذر انرژی ساخته شده، پرداخته می‌شود.

2- سیستم آزمایش

کلیه آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق، در بخش تحقیق و توسعه شرکت آذر انرژی تبریز، صورت گرفته است. پایلوت ساخته شده شامل دو برج مشابه با قطر داخلی 1 متر می‌باشد که داخل آنها آکنه‌های ساختار یافته ملاپک 250.Y و ملاپک پلاس 252.Y به ارتفاع 1 متر چیده شده‌اند. در شکل (2) شمای کلی هر دو بستر پر شده نشان داده شده است.

جریان گاز توسط فن با حداکثر دبی $5000 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ ، که توسط اورفیس متر اندازه‌گیری می‌شود، از پایین برج‌ها وارد می‌شود. یک



(a)



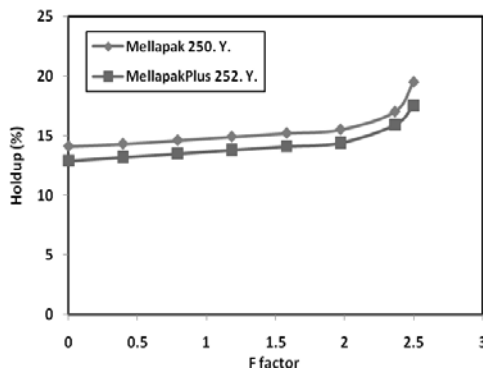
(b)

شکل (2) بسترهای پر شده با آکنه‌های ساختار یافته در دو حالت (a) ملاپک 250.Y و (b) ملاپک پلاس 252.Y

3-2- اندازه گیری و مقایسه انباشتگی^۴ (ماندگی) مایع

انباشتگی (ماندگی) مایع در برج‌های پر شده یکی از مهمترین پارامترهای هیدرودینامیکی آنها می‌باشد. هنگامی که جریان‌های گاز و مایع قطع می‌شوند، میزان مایعی که از بستر خارج می‌شود، انباشتگی دینامیکی مایع بوده و تابع عوامل مختلفی مانند دبی جریان گاز و مایع، شکل، اندازه و نحوه پر کردن کاتالیست‌ها در راکتور می‌باشد. علاوه بر این پس از قطع جریان گاز و مایع و تخلیه آن، مقداری از مایع در سطح آکنه‌ها و فضای مرده بستر باقی خواهد ماند. این میزان حجم مایع را انباشتگی استاتیکی فاز مایع می‌گویند که تنها وابسته به خصوصیات فیزیکی بستر و فاز مایع بوده و به دبی جریان‌های گاز و مایع مرتبط نیست. مجموع تجمع استاتیکی و دینامیکی مایع، انباشتگی کلی مایع بوده و برابر با کل میزان حجم مایع درون راکتور در حالت پایا می‌باشد.

با توجه به مطالب فوق، ساده‌ترین روش برای بدست آوردن میزان ماندگی کلی فاز مایع در راکتور، اندازه‌گیری بالانس حجمی می‌باشد. بطوریکه مقدار کاهش سطح مایع در مخزن معادل خواهد بود با ماندگی مایع در داخل بستر. در شکل ۵، انباشتگی مایع در دو بستر ملاپک پلاس و ملاپک در در دبی‌های مختلف گاز، اندازه‌گیری شده است. همانطور که در این شکل ملاحظه می‌گردد با افزایش سرعت گاز ورودی، کسر حجمی فاز مایع درون بستر نیز افزایش یافته است که این عامل باعث افزایش افت فشار درون بستر به علت افزایش برهمکنش بین فازی گاز- مایع می‌گردد. علاوه بر این از با افزایش تدریجی دبی گاز، در ابتدا تغییرات ماندگی ناچیز بوده ولی در یک بازه جریان، انباشتگی مایع افزایش ناگهانی پیدا می‌کند که این بازه برای پیش بینی نقطه طغیان به کار می‌رود.



شکل (5) اندازه گیری ماندگی مایع در بستر (شدت جریان مایع 46 m³/m².hr)

روشن است که انباشتگی مایع در ملاپک پلاس بیشتر از ملاپک می‌باشد که دلیل آن را می‌توان بیشتر بودن ظرفیت هیدرولیکی در این نوع آکنه‌ها و در نتیجه افزایش میزان حجم مایع دانست.

3- نتایج آزمایش

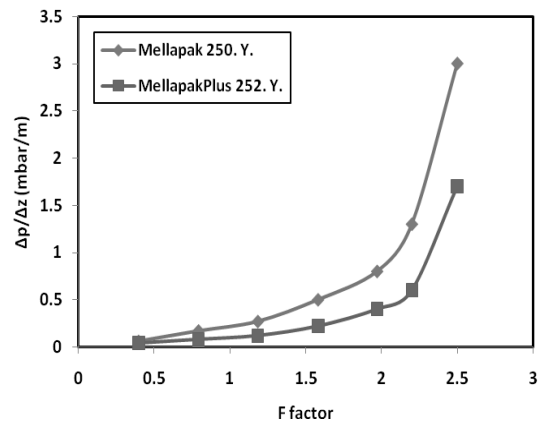
3-1- اندازه گیری و مقایسه افت فشار

در شکل 3 و 4 افت فشار در واحد طول بستر در دو حالت خشک (شدت جریان مایع صفر) و تر (شدت جریان مایع 46 m³/m².hr) و در دبی‌های مختلف گاز نشان داده شده است. محور افقی در نمودارها فاکتور F بوده و بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

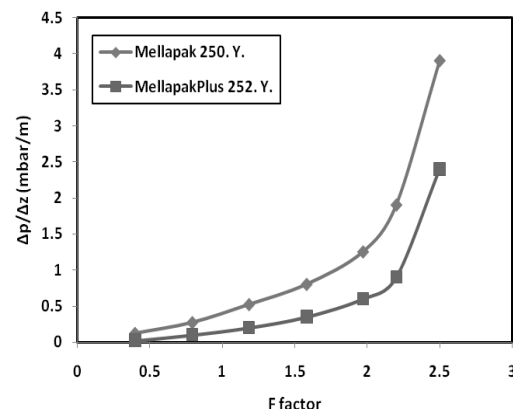
$$F = U_g \sqrt{\rho_g} \quad (1)$$

که در آن که در آن U_g سرعت ظاهری گاز و ρ_g چگالی گاز است.

مطابق شکل‌های 3 و 4، در دبی‌های یکسان فاز مایع با افزایش تدریجی دبی گاز، ملاپک پلاس در مقایسه با ملاپک افت فشار کمتری را ایجاد می‌کند. همچنین نقطه طغیان^۲ را به فاکتور F بالاتر (دبی بالاتر فاز گاز) انتقال می‌دهد.



شکل (3) افت فشار در واحد طول بستر در حالت خشک



شکل (4) افت فشار در واحد طول بستر در حالت تر (شدت جریان مایع 46 m³/m².hr)

4- نتیجه و جمع بندی

دلیل اهمیت زیاد افت فشار در فرآیندهای جداسازی بخصوص برج-های تقطیر در خلاء، استفاده از ملاپک پلاس 252.Y به جای ملاپک 250.Y پیشنهاد می گردد.

فهرست علائم

U_g	سرعت ظاهری گاز، m/s
F	فاکتور جریان، $m/s(kg/m^3)$
	علائم یونانی
ρ	چگالی، kg/m^3
	زیرنویس
f	سیال

در این تحقیق رفتار هیدرودینامیکی جریان دوفازی گاز-مایع در برج های پر شده با آکنه های ساختار یافته ملاپک 250.Y و ملاپک پلاس 252.Y مورد بررسی قرار گرفته است. ساختار هندسی در ملاپک پلاس 252.Y به نحوی است که گرایش هر شیار به تدریج به سمت محور عمودی بوده و تغییر مسیر جریان بخار در سطوح بین آکنه ها به نرمی صورت می گیرد و این عامل موجب کاهش افت فشار و نیروی برش می گردد. به طور کلی از لحاظ اجزای داخلی، ویژگی های هندسی ملاپک 250.Y و ملاپک پلاس 252.Y یکسان و از این رو بازده جداسازی مشابه می باشد. ولی ظرفیت به طور چشم گیری افزایش یافته و افت فشار نیز کاهش می یابد. از لحاظ پروسه نصب و مقاومت در برابر خوردگی هر دو آکنه مشابه بوده و مقاومت مکانیکی ملاپک پلاس 252.Y به مراتب بیشتر می باشد. بنابراین با توجه به نتایج حاصله و بررسی های صورت گرفته و به

5- مراجع

- | | |
|---|---|
| E. Brunazzi, A. Paglianti, AIChE J., 43, pp. 317-327, 1997. [10] | J.G. Stichlmair, J.R. Fair, "Distillation, Design and Practice", Wiley VCH, New York, 1998. [1] |
| J. F. Billingham, M. J. Lockett, Trans. Inst. Chem. Eng., 77 (Part A), pp. 583-587, 1999. [11] | E. Brunazzi, G. Nardini and A. Paglianti, "Interfacial area of mellapak packing: Absorption of 1,1,1-trichloroethane by Genosorb 300", Chem. Engineering Technology, 18, pp. 248-255, 1995. [2] |
| F. Moser, A. Kessler, "Increased capacity thanks to improved geometry", Sulzer tech. Rev. 3, 24, 1999. [12] | G. Parkison and G. Ondrey, "Packing towers", Chem. Eng., pp. 39-43, 1999. [3] |
| Sulzer, Mellapakplus. Anew generation of structured packings, Publ. No. 22.09.06.40; Sulzer, Winterthur. [13] | E. Brunazzi, A. Paglianti and L. Spiegel and F. Tolaini, "Hydrodynamics of a gas-Liquid column Equipped with Mellapakplus packing", University of Pisa, Italy, 2002. [4] |
| V. Engel, J. Stichlmair and W. Geipel, Inst. Chem. Eng. Symp. Ser., 142, pp. 939-947, 1997. [14] | L. Spiegel and W. Meier, AIChE Spring National Meeting, Paper 91C, 1994. [5] |
| F. Tolaini, "Experimental Analysis and Fluid-dynamic Modelling of Mellapakplus Packing", M. Sc. Thesis, University of Pisa, Italy, 2001. [15] | Z. Olujic, H. Jansen, B. Kaibel, T. Rietfort, E. Zich, Ind. Eng. Chem. Res., 40, pp. 6172-6180, 2001. [6] |
| W. Meier, R. Hunkeler and W. D. Stoker, Chem. Ing. Tech., 51, pp. 119-122, 1979. [16] | P. Suess and L. Spiegel, Chem. Eng. Processing, 31, pp. 119-124, 1992. [7] |
| H.K. Kister, "Distillation Design", McGraw Hill, 1992. [17] | P. Marchot, D. Toye, A-M. Pelsser, M. Crine, G. L'Homme and Z. Olujic, AIChE J., 47, pp. 1471-1476, 2001. [8] |
| Sulpak, Sulzer's column design tool, at http://www.sulzerchemtech.com [18] | E. Brunazzi, A. Paglianti and S. Pintus, Ind. Eng. Chem. Res., 40, pp. 1205-1212, 2001. [9] |
| J.A. Rocha, J. L. Bravo and J. R. Fair, Ind. Eng. Chem. Res., 32, 641-651, 1993. [19] | |
| M. G. Shi and A. Mersmann, //ger. Chem. Eng., 8, 87-96, 1985. [20] | |

زیرنویس ها

- ¹ MellapakPlus
- ² Mellapak
- ³ Flooding Point
- ⁴ Hold Up