

اثر کشش سطحی بر ماندگی فاز گاز و توزیع اندازه حباب در رژیم جریان همگن ستون های حباب کار با مقطع مستطیل

داریوش باستانی^۱، علی حسینیⁱⁱ

چکیده

ستون های حباب کار در فرایندهای مختلف شیمیایی، بیوشیمیایی، داروسازی و بیوتکنولوژی مورد استفاده قرار می گیرند. ماندگی فاز گاز (hold-up) و اندازه حبابها دو پارامتر هیدرودینامیکی بسیار مهم در طراحی این ستونها هستند.

در این پژوهش، تلاش گردیده که با راه اندازی یک دستگاه حباب کار در مقیاس آزمایشگاهی با مقطع مستطیل، به بررسی تاثیر مقدار کشش سطحی و سرعت خطی جریان گاز بر روی پارامترهای ماندگی فاز گاز و توزیع اندازه حبابها پرداخته شود. سیستم مورد استفاده در این مطالعه، آب و هوا بوده و برای تغییر کشش سطحی آب، از اتانل و نمک طعام استفاده شده است. آزمایشات در غلظت های مختلف اتانل و نمک در آب و با سرعتهای ظاهری مختلف، برای ماندگی فاز گاز (hold-up) کمتر از ۲/۵٪ بصورت تجربی انجام شده است. با استفاده از روش عکس برداری و پردازش عکس ها توسط رایانه مقادیر ماندگی فاز گاز و توزیع اندازه حبابها بدست آمده اند. مقادیر بدست آمده برای ماندگی فاز گاز با مقادیر پیش بینی شده توسط رابطه Hikita مقایسه و رابطه جدیدی برای پیش بینی ماندگی فاز گاز بدست آمد. مشاهده گردید که ماندگی گاز با سرعت ظاهری، نسبت مستقیم و با کشش سطحی نسبت عکس دارد. اندازه حبابها در آب خالص بیشترین مقدار را داشته و با افزایش و کاهش کشش سطحی کاهش می یابد.

کلمات کلیدی

ستون حباب کار، کشش سطحی، سرعت ظاهری گاز، ماندگی گاز، اندازه حبابها

Effect of Surface tension on gas hold up and bubble size distribution in bubbly flow regime in Rectangular Bubble Column

D. Bastani, A. Hasani

ABSTRACT

Bubble columns are widely used in different chemical processes. Gas hold-up and bubble size are two important hydrodynamic parameters in the design and operation of these columns. In this study, a rectangular bubble column is designed, constructed and operated with solutions of different surface tension. The effects of surface active substances on the bubble size and gas hold-up were studied through some experiments in the bubble column. A number of experiments using air-water solutions at different superficial velocity were measured. These measurements were through taking and analyzing photographs from the bubble column interiors. Using the data obtained for both system in this work, Hikita correlation was modified.

KEYWORDS

Bubble column, Interfacial tension, Gas superficial velocity, Gas hold-up, Bubble size

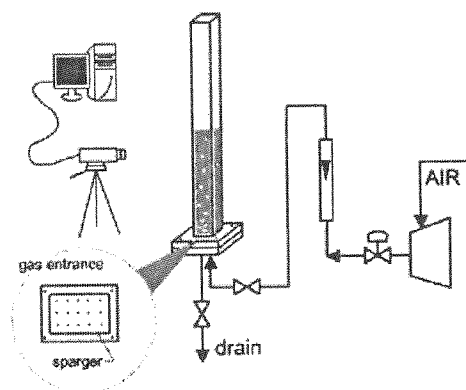
ⁱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی و نفت دانشگاه صنعتی شریف: Email: bastani@sharif.edu

ⁱⁱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی دانشگاه صنعتی شریف: Email: alihassani2004@yahoo.com

فاز گاز و توزیع اندازه حباب بررسی می‌شود. مقادیر ماندگی فاز گاز و توزیع اندازه حباب از آنالیز و تحلیل تصاویر برداشته شده، بدست آمده اند.

۲- دستگاه و روش آزمایش

دستگاه از یک ستون مکعب مستطیل شکل عمودی با ابعاد ۲۰×۴۰×۱۲۰ سانتیمتر از جنس شیشه سکوریت مطابق شکل (۱) تشکیل شده است.



شکل (۱): شماتیک ستون حباب کار و ضمايم آن.

انتخاب شکل مکعب مستطیلی به این دلیل است که در استفاده از روشهای اندازه گیری بینایی (اپتیکال) بوسیله به حداقل رساندن انحراف اپتیکال و نیز هزینه اندک در ساخت نسبت به شکل استوانه ای ترجیح داده شده است [۵]. جهت تزریق و توزیع یکنواخت فاز گاز، یک توزیع کننده گاز (اسپارژر) از جنس استیل ضد زنگ ۳۱۴L به ضخامت ۴ میلیمتر دارای ۹۰ سوراخ به قطرهای ۵۰۰ میکرون و با فاصله پیچ ۲ سانتیمتر، در مرکز سطح مقطع ستون حباب استفاده شد. آزمایشات در غلظت‌های مختلف ماده تاثیر گذار بر کشش سطحی و مقادیر مختلف شدت جریان هوای ورودی به ستون انجام شدند. در سری اول آزمایشات مقادیر متفاوت از نمک طعام تصفیه شده و در سری بعدی اتانل به آب اضافه شد. مقدار دبی حجمی گاز توسط شیر سوزنی تنظیم و با روتامتر موجود کنترل می‌شد. در مراحل مختلف آزمایش ماندگی فاز گاز و توزیع اندازه حباب ها بصورت تجربی در جریان همگن (ماندگی فاز گاز کمتر از ۲/۵٪)، با استفاده از تجزیه و تحلیل تصاویر گرفته شده بوسیله یک دوربین عکاسی پر سرعت دیجیتال، توسط نرم افزار GSA Image Analyzer اندازه گیری شدند. برای هریک از نمونه ها کشش سطحی با دستگاه IFTV۰۰ و استفاده از فن آوری VINCI اندازه گیری شد.

ستون های حباب به عنوان contactor های چند فازی و راکتورها در صنایع شیمیایی و پتروشیمی و صنایع بیوشیمیایی بطور گسترده استفاده می‌شوند. این ستون ها دارای برتری هایی از قبیل بالا بودن میزان انتقال جرم و حرارت و پایین بودن هزینه های نگهداری و عملیاتی می‌باشند. هیدرودینامیک اینگونه راکتورها بوسیله جریان گاز کنترل می‌شود. ماندگی فاز گاز (hold-up) و اندازه حباب‌ها دو پارامتر هیدرودینامیکی بسیار مهم در طراحی و عملکرد این ستون‌ها هستند. این دو پارامتر توسط رابطه $a = 6\varepsilon_g / d$ سطح ویژه انتقال جرم را تعیین می‌کنند. هر چه این مقدار بیشتر باشد به ستون با اندازه‌های کوچکتر نیاز بوده و یا میزان انتقال جرم در ستون با اندازه ثابت، بیشتر می‌شود. برای مدلسازی طراحی و ساخت هرچه دقیق تر راکتورهای ستون حباب به شناخت بهتر رژیم جریان در این راکتورها نیاز است و این مهم به آگاهی کامل تر از ماندگی کلی فاز گاز در درون ستون نیازمند است [۱].

خواص فیزیکی فاز مایع (مانند جرم حجمی، ضریب چسبندگی و کشش سطحی) بر رژیم جریان و ماندگی فاز گاز اثر می‌گذارد.

تمرکز مواد تأثیر گذار بر خواص سطح مشترک دو فاز بر میزان کشش سطحی دو فاز و در نتیجه بر جریان فازهای جاری در ستون اثر می‌گذارد. بسیاری از محققان معادلاتی برای پیشگویی ماندگی فاز گاز در ستونهای حباب کار آزمایشگاهی و تجاری گزارش کرده اند. بیشتر این معادلات توسط Kantraci منتشر شده است [۲]. با این وجود هنوز عملکرد ستونهای حباب کار، به خوبی پیش بینی نشده و این موضوع اهمیت مطالعه تجربی در این خصوص را نشان می‌دهد.

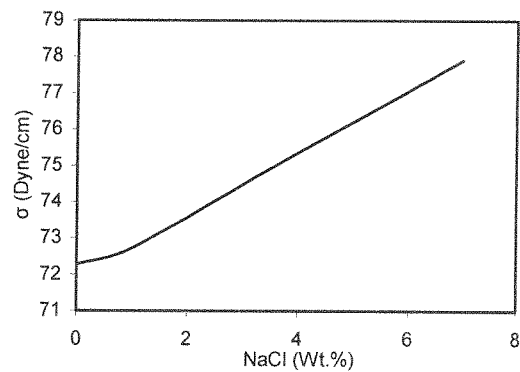
خواص فیزیکی فاز مایع اثر شدید بر آرایش و درهم آمیختگی حباب ها دارد. افزودن مقدار کمی ماده فعال کننده سطح (surfactant) بر مایع باعث کاهش کشش سطحی و افزودن الکترولیت به آن باعث افزایش کشش سطحی می‌شود [۳].

Zou [۴]، Hikita [۳] و تعداد زیادی از محققان گزارش کرده اند که ماندگی فاز گاز با افزایش کشش سطحی مایع کاهش و با کاهش کشش سطحی آن افزایش می‌یابد. در این مطالعه آزمایشاتی با محلول NaCl و اتانل در آب در سیستم آب- هوا در ستون حباب کار با مقطع مستطیل انجام شده و اثر کشش سطحی و سرعت ظاهری فاز گاز بر ماندگی

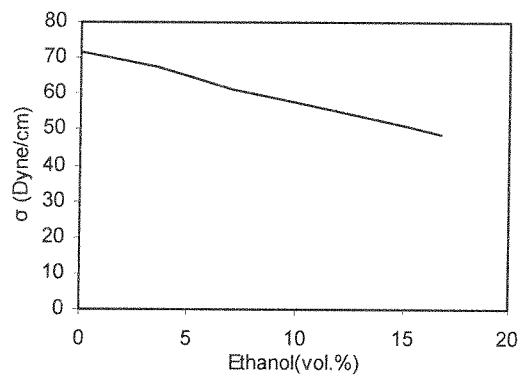
۳- بحث و نتایج

۳-۱- تغییرات کشش سطحی

ابتدا کشش سطحی محلولهای NaCl و اتانل در آب با درصد غلظتهای مختلف در دمای محیط (۲۸ °C) اندازه گیری شد. نمودار آنها در شکل‌های (۲) و (۳) به ترتیب نشان داده شده است. همانطور که در شکل‌ها مشاهده می‌شود افزایش غلظت NaCl در آب موجب افزایش کشش سطحی به میزان ۹٪ و افزایش غلظت اتانل در آب باعث کاهش کشش سطحی به میزان ۲۰٪ می‌شود.



شکل (۲): تغییرات کشش سطحی برای غلظتهای مختلف NaCl در آب.



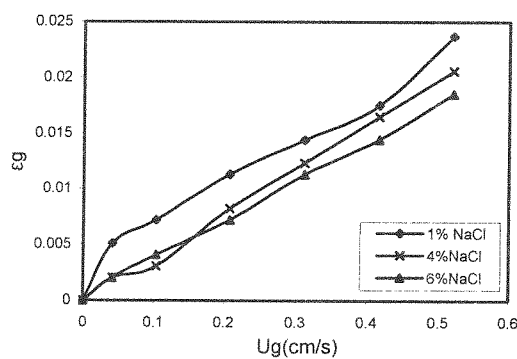
شکل (۳): تغییرات کشش سطحی برای غلظتهای مختلف اتانل در آب.

۳-۲- تغییرات ماندگی فاز گاز

در این پژوهش اثر کشش سطحی بر ماندگی فاز گاز در محدوده کشش سطحی (۴۸/۷۷-۷۷/۸۵ Dyne/cm) مورد بررسی قرار گرفته است. از آنجا که اکثر مطالعات انجام شده در گذشته [۳] تأثیر خواص فیزیکی به ویژه کشش سطحی را بر ماندگی فاز گاز در محدوده های باز مورد مطالعه قرار داده اند و از هیچ یک از سیستم های مورد نظر در این تحقیق (آب-

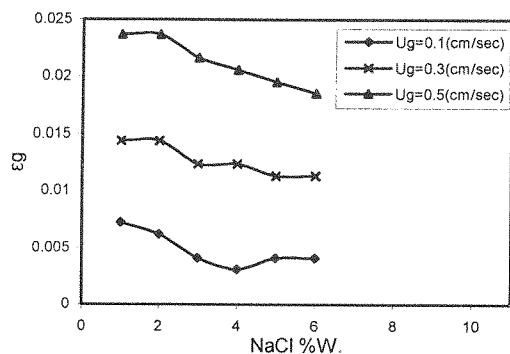
اتانل و آب - نمک) استفاده ننموده اند، در نظر گرفته شد که در کنار نتایج گذشته تأثیر کشش سطحی بر ماندگی فاز گاز در این دو سیستم نیز بررسی گردد.

شکل (۴) تغییرات ماندگی فاز گاز را بر حسب سرعت ظاهری آن در غلظت های وزنی مختلف NaCl در آب نشان می‌دهد. همانگونه که شکل نشان می‌دهد ماندگی فاز گاز با افزایش غلظت نمک کاهش می‌یابد که به دلیل حضور یک الکترولیت قوی در آب می‌باشد. از طرف دیگر ماندگی فاز گاز با افزایش سرعت ظاهری گاز افزایش می‌یابد. اگر برای نشان دادن این تغییرات از معادله ای به شکل $t_p = fU_p^n$ استفاده شود n ثابت نخواهد بود و بین ۰/۵ تا ۱ تغییر خواهد کرد. محققین مختلف این مقدار را در مقالات خود به صورت $n=۰/۵۷۸$ [۳]، $n=۰/۵۸$ [۴] و $n=۱$ [۶] گزارش کرده اند.



شکل (۴): تغییرات ماندگی فاز گاز بر حسب سرعت ظاهری گاز برای غلظت های مختلف NaCl.

در شکل ۵ منحنی تغییرات ماندگی گاز برای سرعت های ظاهری مختلف گاز بر حسب غلظت های وزنی مختلف NaCl در آب نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود با تغییر غلظت نمک در آب ماندگی فاز گاز کمی کاهش می‌یابد (حدود ۲۵٪) که این کاهش ناشی از افزایش کشش سطحی به واسطه افزایش غلظت نمک در آب است.



شکل (۵): تغییرات ماندگی فاز گاز بر حسب غلظت NaCl.

(single nozzle sparger) مورد بررسی قرار دادند. برای تغییر کشش سطحی آب، از متانل و ساکاروز در محدوده کشش سطحی $74/8 - 27/5$ Dyne/cm استفاده نمودند. آنان با استفاده از نتایج تجربی بدست آمده و به کار گیری آنالیز ابعادی، معادله (۱) را برای پیش بینی ماندگی فاز گاز در ستون های حباب پیشنهاد کردند.

$$\varepsilon_g = 0.505 u_G^{0.47} (72 / \sigma_L)^{2/3} (1 / \mu_L)^{0.05} \quad (1)$$

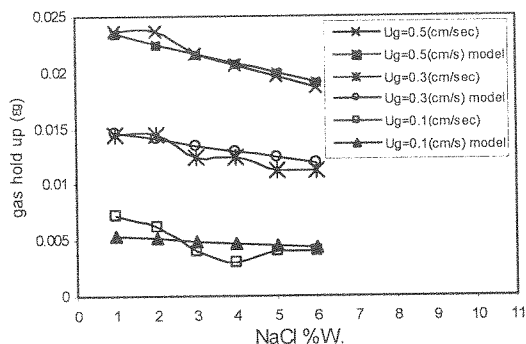
در معادله (۱) در صورتیکه از تغییرات ویسکوزیته صرفنظر شود معادله به صورت معادله (۲) ساده خواهد شد:

$$\varepsilon_g = 0.717 u_G^{0.47} (72 / \sigma_L)^{2/3} \quad (2)$$

با استفاده از روش کمترین مربعات چند جمله ایی ها، معادله (۲) برای داده های آزمایش به صورت معادله (۳) تغییر می کند:

$$\varepsilon_g = 3.2 u_G^{0.92} (72 / \sigma_L)^{3.70} \quad (3)$$

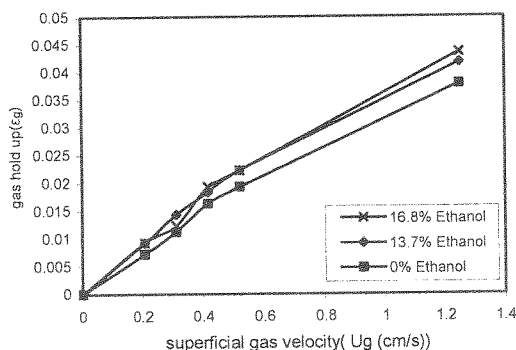
شکل (۸) مقادیر ماندگی فاز گاز که از اطلاعات آزمایشی و رابطه پیش بینی شده با معادله (۳) برای سرعت های ظاهری متفاوت گاز بر حسب غلظت محلول نمک در آب بدست آمده اند مقایسه شده اند. همانگونه که در شکل ملاحظه می شود مقدار تفاوت بسیار ناچیز است.



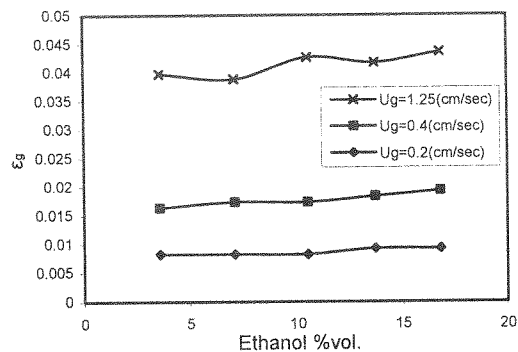
شکل ۸: مقایسه ماندگی فاز گاز پیش بینی توسط معادله (۳) و اطلاعات آزمایشی برای سرعت های ظاهری متفاوت گاز بر حسب غلظت NaCl در آب.

شکل (۹) مقایسه ماندگی فاز گاز پیش بینی شده توسط معادله Hikita [۲] و معادله (۳) را در سرعت های ظاهری متفاوت گاز بر حسب غلظت NaCl در آب را نشان می دهد. با توجه به شکل میزان ماندگی فاز گاز بدست آمده از آزمایش بطور میانگین ۷۳٪ کمتر از میزان ماندگی فاز گاز محاسبه شده از رابطه Hikita [۲] می باشد.

همه مراحل انجام شده برای محلول نمک در آب برای محلول های اتانل با غلظت های مختلف انجام گردید و ماندگی فاز گاز برای سرعت های ظاهری مختلف گاز بدست آمد. شکل های (۶) و (۷) تغییرات ماندگی را برای محلول های اتانل در آب نشان می دهند. در این سیستم نیز افزایش سرعت ظاهری موجب افزایش ماندگی فاز گاز می گردد ولی افزایش غلظت الکل تأثیر ناچیزی بر ماندگی فاز گاز می گذارد (حدود ۱/۲٪ افزایش می یابد). اثر کاهش کشش سطحی بوسیله افزودن اتانل در آب بر ماندگی فاز گاز، برای سرعت های ظاهری پایین تر گاز کمتر از سرعت های بالاتر گاز قابل مشاهده است. علاوه بر این افزایش مقدار ماده فعال سطحی (surfactant) مانند اتانل، کشش سطحی محلول را کاهش داده و باعث می شود حجم گاز کشیده شده به داخل فاز مایع افزایش یابد. این موضوع به سبب کوچک تر شدن اندازه حبابهاست. بنابراین سرعت بالا رفتن حبابها کاهش یافته و در نتیجه به افزایش ماندگی گاز منجر می شود.

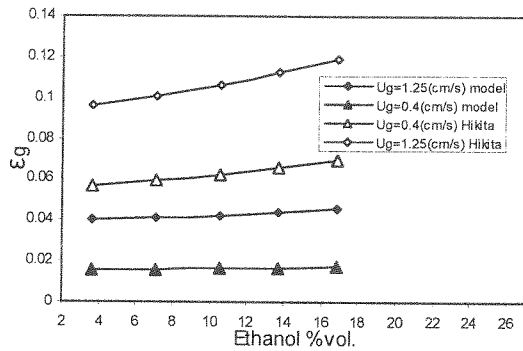


شکل (۶): تغییرات ماندگی فاز گاز بر حسب سرعت ظاهری فاز گاز برای غلظت های مختلف محلول اتانل.



شکل (۷): تغییرات ماندگی فاز گاز بر حسب غلظت اتانل.

Hikita و Kikukawa [۲] اثر خواص فیزیکی مایع را بر ماندگی فاز گاز، برای سیستم آب- هوا در ستون های حباب با شکل استوانه با قطرهای بین ۱۰-۱۹cm و ارتفاع های بین ۱۲۵-۶۰cm و به کار گیری توزیع کننده گاز از نوع



شکل (۱۱) : مقایسه ماندگی فاز گاز پیش بینی به کمک رابطه (۴) و معادله Hikita [۳] بر حسب بر حسب غلظت اتانل در آب.

یکی از دلایل این تفاوت ها می‌تواند نادیده گرفتن تغییرات ویسکوزیته در این دو سیستم باشد دلیل دیگر می‌تواند شکل هندسی ستون مورد استفاده در این تحقیق (با مقطع مستطیل) و با ستون های به کار گرفته شده در تحقیقات Hikita [۲] (با مقطع دایره) باشد. ضمناً تفاوت در شکل و نوع توزیع کننده های گاز می‌تواند عامل موثر دیگری بر این تفاوت ها باشد. با این حال مشاهده می‌شود سازگاری نتایج بدست آمده و مدل به هنگام استفاده از محلول اتانل- آب بیشتر از محلول آب- نمک می‌باشد و این ممکن است به دلیل وجود ناخالصی های موجود در نمک باشد.

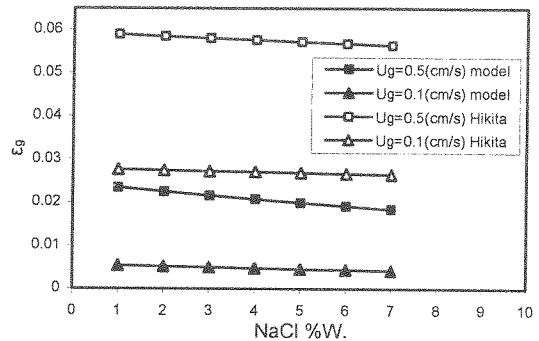
۳-۳- تغییرات اندازه حباب ها

جهت تعیین اندازه حبابها از روش عکسبرداری استفاده شد. برای این کار از یک دوربین دیجیتال ۱۰mpixel مدل Sony A-۱۰۰ با سرعت ۱/۲۰۰۰ ثانیه استفاده شد.

Grund, Schamp [۷] در مطالعات خود به این نتیجه رسیدند که برای سیستم آب- هوا هنگامی که سرعت ظاهری فاز گاز کمتر از ۵cm/s باشد، رژیم جریان همگن (حبابی) خواهد بود. در این طرح چون حداکثر سرعت ظاهری هوا ۱/۲۵cm/s است رژیم جریان در شرایط همگن قرار داشت. عکس های گرفته شده نیز بیانگر این مطلب است.

عکسهای گرفته شده نشان می‌دهند که با افزایش سرعت ظاهری فاز گاز توزیع اندازه حبابها عریض تر می‌شود و تأثیر آن بر ماندگی فاز گاز، افزایش مقادیر آن است.

در هر آزمایش اندازه و تعداد حبابها در فاصله ۰ تا ۱۰ میلیمتر با استفاده از نرم افزار GSA Image Analyzer بدست آمد و بر حسب جزء حجمی هر گروه رسم شد. نمونه هایی از این تغییرات برای آب خالص، محلول ۷٪ آب نمک و ۱۶٪ اتانل در آب در شکل (۱۲) نشان داده شده است.

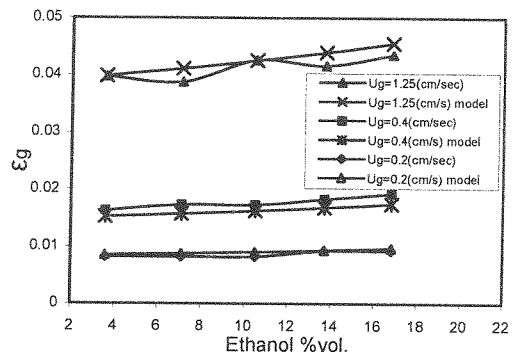


شکل (۹) : مقایسه ماندگی فاز گاز پیش بینی توسط رابطه (۳) و معادله Hikita [۳] در سرعتهای ظاهری متفاوت گاز بر حسب غلظت NaCl در آب.

بطور مشابه با استفاده از رابطه (۲) و روش تخمین کمترین مربعات چند جمله ایی ها، برای محلول اتانل در آب یک معادله به صورت معادله (۴) بدست آمد.

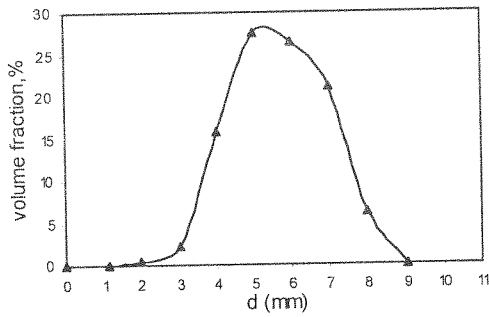
$$\varepsilon_g = 1.6u_G^{0.84} (72 / \sigma_L)^{0.42} \quad (4)$$

شکل (۱۰) مقایسه منحنی های بدست آمده از داده های آزمایشگاهی و معادله (۴) برای محلول اتانل در آب را نشان می‌دهد.

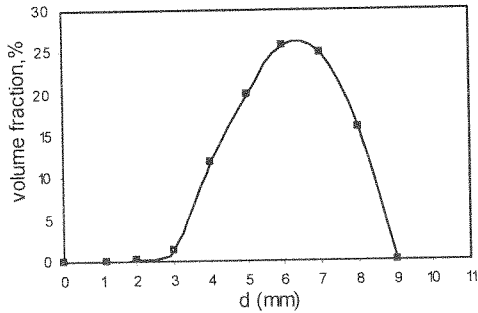


شکل (۱۰) : مقایسه ماندگی فاز گاز پیش بینی توسط معادله (۴) و اطلاعات آزمایشی برای سرعتهای ظاهری متفاوت گاز بر حسب غلظت اتانل در آب.

شکل (۱۱) مقایسه ماندگی فاز گاز پیش بینی با رابطه (۴) و معادله Hikita [۳] در سرعتهای ظاهری متفاوت گاز بر حسب غلظت اتانل در آب را نشان می‌دهد. میزان ماندگی فاز گاز بدست آمده از آزمایش بطور میانگین ۶۷٪ کمتر از میزان ماندگی فاز گاز محاسبه شده از رابطه Hikita [۳] می‌باشد.



ب

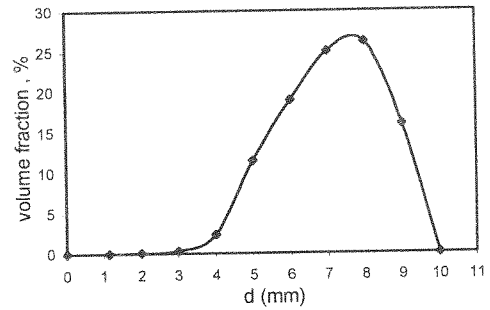


ج

شکل (۱۳) تغییرات قطر متوسط حباب (d_{32}) بر حسب کشش سطحی را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود با افزایش کشش سطحی برای محلول اتانل در آب (قسمت چپ منحنی) اندازه قطر متوسط (d_{32}) حبابها افزایش یافته (افزودن اتانل به آب باعث کوچک تر شدن اندازه حبابها می‌شود) و افزودن نمک به آب نیز باعث افزایش کشش سطحی و کاهش اندازه حبابها (قسمت راست منحنی) گردید و به بیان دیگر اندازه حباب زمانی که آب خالص باشد ماکزیم مقدار خود را دارا می‌باشد.

ع- نتایج:

ستون‌های حباب کار در فرآیندهای مختلف شیمیایی، بیوشیمیایی، داروسازی و بیوتکنولوژی مورد استفاده قرار می‌گیرند. شرایط عملیاتی بهینه ستون حباب این است که میزان انتقال جرم در آن زیاد باشد. این امر بوسیله زیاد کردن سطح تماس گاز-مایع نیز انجام می‌شود. ماندگی فاز گاز و نیز اندازه حباب‌ها دو پارامتر هیدرودینامیکی بسیار مهم در طراحی این ستون‌ها هستند که پارامتر سطح ویژه انتقال جرم را (توسط رابطه $a = 6\varepsilon_g / d_{32}$) تعیین می‌کنند. هرچه این مقدار بیشتر باشد نیاز به ستون‌هایی با اندازه‌های کوچکتر می‌باشد. لذا برای رسیدن به سطح ویژه انتقال جرم (a) بزرگ باید تا حد



الف

شکل (۱۲): جزء حجمی حباب‌ها بر حسب قطر حباب.

الف: آب خالص.

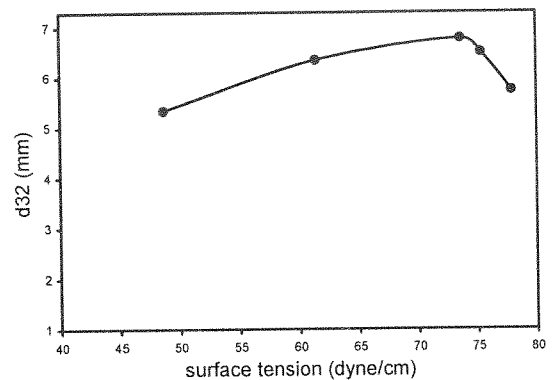
ب: محلول آب- اتانل با غلظت ۱۶/۸٪ حجمی.

ج: محلول آب-NaCl با غلظت ۷٪ وزنی.

d_{32} قطر متوسط (Sauter) حبابها است که در محاسبات مورد استفاده قرار می‌گیرد و در هر آزمایش با استفاده از توزیع‌های بدست آمده توسط رابطه (۶) محاسبه می‌گردد:

$$d_{32} = \frac{\sum_{i=1}^n N_i d_i^3}{\sum_{i=1}^n N_i d_i^2} \quad (6)$$

که در این رابطه d_i قطر حباب‌ها و N_i تعداد آنها در i امین دسته حباب‌ها و n تعداد کل دسته‌ها است [۸].



شکل (۱۳): تغییرات قطر متوسط حباب (d_{32})

بر حسب کشش سطحی

پس می‌توان نتیجه گرفت که برای رسیدن به انتقال جرم بیشتر باید ستون در سرعت‌های ظاهری بالا (با افزایش دبی جریان گاز) کار کند و با استفاده از مواد مناسب، کشش سطحی فاز مایع را تا جای ممکن کاهش داد. چرا که کاهش کشش سطحی از یک سو ماندگی فاز گاز را افزایش می‌دهد و از سوی دیگر اندازه متوسط حباب را کاهش می‌دهد.

در این مطالعه همچنین رابطه Hikita [۳] که برای پیش بینی ماندگی فاز گاز مورد استفاده قرار گرفت برای هر دو سیستم اصلاح گردید. میزان ماندگی فاز گاز بدست آمده از رابطه اصلاح شده خیلی کمتر از میزان ماندگی فاز گاز محاسبه شده از رابطه Hikita می باشد. این اختلاف ممکن است به علت صرفه نظرکردن از تغییرات ویسکوزیته در این مطالعه و یا به علت شکل هندسی ستون و توزیع کننده فاز گاز باشد که همه اینها از فاکتورهای مهم در رفتار هیدرودینامیکی ستون های حباب هستند.

امکان میزان ماندگی فاز گاز را افزایش داده و مقدار اندازه متوسط حباب را کاهش داد.

یکی از عوامل مهم مؤثر بر ماندگی فاز گاز سرعت ظاهری می‌باشد که با افزایش سرعت ظاهری، ماندگی گاز افزایش می‌یابد. افزایش سرعت ظاهری تأثیر چندانی بر اندازه متوسط حبابها در جریان همگن نمی‌گذارد. فقط توزیع حبابها در داخل ستون عریض تر می‌شود که این همان عاملی است که منجر به افزایش ماندگی فاز گاز می‌گردد.

کشش سطحی عامل مهم دیگری است که بر ماندگی فاز گاز اثر می‌گذارد بطوریکه با کاهش کشش سطحی ماندگی فاز گاز افزایش می‌یابد و بالعکس. کشش سطحی بر اندازه حبابها نیز اثر می‌گذارد با توجه به مشاهدات در این مطالعه اندازه حباب در آب خالص در بیشترین مقدار می‌باشد. با افزایش کشش سطحی بوسیله افزودن نمک در آب اندازه متوسط حبابها کاهش یافت و نیز با کاهش کشش سطحی بوسیله افزودن اتانل در آب اندازه حبابها کاهش یافت.

۵- مراجع:

- [۶] Koide K., Takazawa A., Komura M., Matsunga H.; "Gas holdup and volumetric liquid phase mass transfer coefficient in solid-suspended bubble column"; J Chem Eng Jpn, 17 (1984) 459.
- [۷] Schumpe A, Grund G. The gas disengagement technique for studying gas holdup structure in bubble columns. Can J Chem Eng 1986;64:891-6.
- [۸] Behkish AS, Lemoine RM, Sehabiague LR, Oukaci RCH, Morsi BI; " Gas holdup and bubble size behavior in a large-scale slurry bubble column reactor operating with an organic liquid under elevated pressures and temperatures". Chem Eng J.(2006).
- [۱] Deckwer WD.; "Bubble Column Reactors"; New York; Wiley; 1992
- [۲] Kantarci N., Borak F., Ulgen K.O.; "Bubble Column Reactors"; Process Biochemistry 40 (2005) 2263.
- [۳] Hikita H., Asal S., Tanigawa K., Segawa K., Kitao M.; "Gas holdup in bubble column"; Chem Eng J.; 20 (1980) 699.
- [۴] Zou R., Jiang X., Li B., Zu Y., Zhang L.; "Studies on gas holdup in a bubble column operated at elevated temperatures"; Ind Eng Chem Res 27 (1988) 1910.
- [۵] Mouza A.A, Dalakoglou G.K., Paras S.V.; "Effect of liquid properties on the performance of bubble column reactors with fine pore spargers"; Che Eng Sci 60(2005):1465-1475.