

الخلاصة

لاكتساب فهم ووصف متكامل لخصائص عمليات انتقال الحرارة في الأعمدة الفقاعية (Bubble Columns) ذات الطورين والتي تعمل تحت ظروف الجريان الاضطرابي ذات الاهمية العملية، تم البدء في برنامج بحثي شامل بالاعتماد على الطرق الهندسية الثلاثة المختلفة وهي تقريبات العملي، النظري والمحاكاة.

منظومة عملي صممت وتم تشغيلها لفحص خصائص انتقال الحرارة في الأعمدة الفقاعية ذات الفيض الحراري الثابت (Constant Heat Flux)، وتم التركيز على الأعمدة الفقاعية اسطوانية الشكل وذلك لانتشارها الواسع في الصناعة. التجارب نفذت في عمود زجاجي بقطر 0.45 m، ارتفاع 3.65 m والموزع الغازي (Gas Distributor) عبارة عن صفيحة مثقبة تتكون من 241 فتحة كل منها بقطر 3 mm ونسبة 1.09% المساحة المفتوحة. القياسات اخذت لمعامل انتقال الحرارة من Heat Transfer Probe متطور ذات فيض حراري ثابت تم وضعه في اربعة مستويات محورية من منطقة الموزع (Distributor Region) الى منطقة التشكيل التام وكذلك اربعة مواقع قطريه من المركز الى جدار العمود. تم استخدام الماء كسائل اختبار والهواء كوسط غازي بمدى واسع من السرعة تتراوح من 0.05 m/s الى 0.45 m/s لتغطية منطقة الجريان الفقاعي والاضطرابي، لجميع التجارب تم المحافظة على الارتفاع الديناميكي عند 3.2 m من موزع الغاز. توزيع درجة الحرارة تم قياسه محوريا وقطريا داخل العمود بمساعدة ثلاثة مزدوجات حرارية (Thermocouples) من نوع T مبروطة مباشرة الى جهاز الحاسوب من خلال نظام جمع البيانات Data Acquisition (DAQ) System. تأثير سرعة الغاز، الموقع القطري والمحوري، الحمل الحراري وقطر العمود تم اخذها بنظر الاعتبار. موديل رياضي جديد شامل تم اعداده نظريا بالاعتماد على المبادئ الأساسية للهيدروديناميك وانتقال الحرارة في الأعمدة الفقاعية ذات الطورين والتي تعمل تحت ظروف الجريان الاضطرابي ذات التشكيل التام ونمط الوجبات (Batch Mode).

الموديل الهيدروديناميكي يستند على موازنة الزخم في الاحداثيات الاسطوانية ويستعمل القانون الأسى للتوزيع القطري لنسبة احتجاز الغاز (Gas Holdup) لوصف سائل التدوير (Liquid Circulation) في الأعمدة الفقاعية كتوزيع للسرعة القطرية للسائل تم اشتقاقها في العلاقة التالية:

$$\frac{V_L(r)}{V_L(0)} = \left[1 - 4\left(\frac{r}{R}\right)^2 + 3\left(\frac{r}{R}\right)^4 \right]$$

تخمينات هذا الموديل اظهرت توافقا جيدا مع النتائج العملية لسرعة السائل.

بينما موديل انتقال الحرارة الذي يعتمد على مفهوم موازنة الطاقة في الاحداثيات الاسطوانية ويستعمل توزيع السرعة المحوري، تم اعداده تحليليا لوصف معدل انتقال الحرارة بين جهاز انتقال الحرارة ذو الفيض الحراري

$$\frac{h(r)}{h_c} = \left[1 - 3\left(\frac{r}{R}\right)^2 + 3\left(\frac{r}{R}\right)^4 - \left(\frac{r}{R}\right)^6 \right]^{-1}$$

معدل الخطأ، الانحراف القياسي ومعامل الارتباط عن النتائج العملية كانت 6%، 7% و 0.984 على التوالي. محاكاة Computational Fluid Dynamic (CFD) ثلاثية الأبعاد للحالة غير المستقرة (Transient) بالاعتماد على الموديل الاضطرابي (RNG) $k-\varepsilon$ Renormalization Group، تم تطويره لوصف المعاملات الهيدروديناميكية ومن ثم تم توسيعه لتخمين انتقال الحرارة للأعمدة الفقاعية ذات الطورين في الأحداثيات الأسطوانية المتناظرة محوريا. توافق ممتاز وجد بين النتائج العملية والموديل، حيث معدل الخطأ، الانحراف القياسي ومعامل الارتباط عن النتائج العملية كانت 9%، 8% و 0.976 على التوالي.

Abstract

To gain understanding of the characteristics of heat transfer process for two-phase bubble column operation with churn-turbulent flow regime of practical importance, a comprehensive program of research has been initiated which is based on three different engineering tools; experimental, theoretical and computational approaches.

An experimental facility was operated for investigating the heat transfer characteristics of bubble column of constant heat flux. Attention has been focused on cylindrical bubble columns because of the widespread applications in the industry. The experiments were carried out in Plexiglas column of 0.45 m diameter and 3.65 m height; a perforated plate was used as a gas distributor having 241 holes of 3 mm diameter and 1.09% opening area. Tap water was used as a testing liquid phase and air was used as the gas phase with superficial gas velocities range from 0.05 to 0.45 m/s to cover both bubbly and churn-turbulent flow regimes, for all sets of experiments the hydrodynamic height of liquid phase was maintained constant at 3.2 m from gas distributor. Temperature distributions were measured axially and radially in the column with the aid of three thermocouples of type T sensors connected on-line to computer through a data acquisition (DAQ) system. The effects of superficial gas velocity, axial/radial location of heat probe, heat load, and column diameter were considered. The results of average heat transfer coefficients between heat transfer probe and two-phase dispersion are compared with the available correlations and models.

A comprehensive mathematical model based on fundamental principles was developed analytically for hydrodynamics and heat transfer in two-phase bubble column for fully developed churn-turbulent flow regime and semi-batch mode of operation.

A hydrodynamic model is based on a momentum balance in cylindrical coordinates and power-law radial gas holdup profile is used to describe the liquid recirculation in bubble column as a radial profile of liquid velocity in the following relation:

$$\frac{V_L(r)}{V_L(0)} = \left[1 - 4\left(\frac{r}{R}\right)^2 + 3\left(\frac{r}{R}\right)^4 \right]$$

The predictions of the model are in reasonably good agreement with experimental data of liquid velocity.

While heat transfer model based on concepts of energy balance in cylindrical coordinates and using axial liquid profiles was proposed analytically to describe heat transfer coefficients between coaxially mounted heat transfer probe of constant heat flux and two-phase, as:

$$\frac{h(r)}{h_c} = \left[1 - 3\left(\frac{r}{R}\right)^2 + 3\left(\frac{r}{R}\right)^4 - \left(\frac{r}{R}\right)^6 \right]^{-1}$$

The average relative error, standard deviation and correction coefficient from experimental data were 6%, 7% and 0.984, respectively.

Transient 3D computational fluid dynamic (CFD) simulations, based on RNG $k-\varepsilon$ turbulence model, was developed for descriptions of hydrodynamic parameters and then extended for the prediction of heat transfer for two-phase-gas-liquid flow in axi-symmetry cylindrical bubble column. An excellent agreement has been founded between the predicted and experiential data. The average relative error, standard deviation and correction coefficient from experimental data were 9%, 8% and 0.976, respectively.