

# HYDRODYNAMIC CHARACTERISTICS OF MIXING IN A THREE-PHASE SYSTEM (GAS-LIQUID-SOLID)

By

Ra'id Tarik Hady

Supervised by

Prof. Dr. Abbas H. Sulaymon

Ass. Prof. Dr. Thamer J. Mohammed

An investigation was conducted on the critical gas velocity and applied power for complete suspension of solid particles in QVF hemispherical bottom gas sparged vessel of 0.46 m inside diameter and 1m height.

The operating conditions used are; particle size ( $d_p$ ), of 63-90, 90-125, 125-180 and 180-250  $\mu\text{m}$ , height of liquid level to vessel diameter ratio ( $L/D$ ) of 0.7, 0.9, 1.1 and 1.3, weight of solids ( $W_s$ ) of 0.4, 0.8, 1.2 and 1.6 kg. Single ring sparger with size of holes ( $d_o$ ) equal to 1 mm, different gases (air, helium, argon and carbon dioxide), Newtonian liquids (water and kerosene) and non-Newtonian liquids (four concentrations of carboxy methyl cellulose solutions).

The critical gas velocity and total applied power were found to increase with increasing particle size, solid concentration and gas density and with decreasing  $L/D$  ratio and liquid viscosity.

A comparison between experimentally gas sparging and theoretically mechanical agitation shown that the first system is less efficient (larger power) in most cases. However, sometimes, gas sparging fills a real need in applications involving aggressive gases as well as in high temperature and pressure operation.

Empirical correlation for critical gas velocity has been found as follows:

$$\frac{V_{GC}}{V_s} = 12.748(Re)^{-0.052}(Fr)^{0.618}(We)^{0.108}\left(\frac{d_p}{L}\right)^{0.100}\left(\frac{\Delta\rho}{\rho_L}\right)^{-0.206}\left(\frac{\rho_G}{\rho_L}\right)^{0.005}\left(\frac{C_w}{\rho_L}\right)^{0.205}$$

Statistical analysis shows that the average absolute error and correlation coefficient are 1.42 % and 0.9947, respectively.

Bubble monitoring and analyzing system (BMAS) technique consists of electro-resistivity probe, interface, visual basic program and personal computer (Pentium 3), was used in this work to measure the bubble rise velocity, bubble diameter, bubble frequency, number of bubbles and gas hold-up. The electro-resistivity probe consisted of two tips, which are aligned vertically and are 0.85 cm apart. The probe detects the difference in conductivity of gas and liquid.

Gas hold-up is correlated with the critical gas velocity and liquid and solid properties. The correlation obtained gives an average absolute error and correlation coefficient of 0.95 % and 0.9778, respectively.

$$\varepsilon_G = 1.157\left(\frac{g\mu_L^4}{\rho_L\sigma_L^3}\right)^{-0.075}\left(\frac{V_{GC}\mu_L}{\sigma_L}\right)^{0.143}\left(\frac{\rho_G}{\rho_L}\right)^{0.179}\left(\frac{\Delta\rho}{\rho_L}\right)^{-0.035}\left(\frac{C_w}{\rho_L}\right)^{0.143}\left(\frac{\mu_G}{\mu_L}\right)^{0.296}$$

The average liquid circulation velocity is calculated using empirical correlation presented by Zehner (1982). In addition, the mixing time

(using pulse technique) and intensity of mixing, have been measured in the present study.

The optimum operating conditions are obtained by calculating the intensity of mixing for the different experimental conditions. It was noticed that mixing intensity is maximum for particle size in the range of 180 to 250  $\mu\text{m}$ ,  $L/D = 1.1$  and  $W_s = 1.6$  kg.

An analytical model was derived to estimate the liquid velocity in three phase system using forces balance and  $L/D = 0.7-1.3$ ,  $d_p = 63-250 \mu\text{m}$  and  $W_s = 0.4-1.6$  kg. The model derived is:

$$V_L = \left[ \frac{\frac{2}{3} d_b^2 g (\rho_L - \rho_G) - \frac{1}{2} d_b V_b^2 (\varepsilon_s \rho_s + 0.44 \rho_L) - 4 \sigma_L}{\frac{1}{2} d_b \rho_s \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_L^2} (1 + 2 \varepsilon_L \frac{V_b}{V_L})} \right]^{1/2}$$

Results of comparison between the analytical correlation and two empirical correlations presented by other investigators show that the average absolute error is equal to 21.4 % and 11.7 %, respectively.

The particle settling velocity of three phase systems is estimated by a modified forces balance. The empirical correlation obtained gives low error at particle size in the range of 125 to 250  $\mu\text{m}$ .

$$V_S = \left[ \frac{d_p g (\rho_s - \rho_L) + 2 \rho_s V_{br}^2}{\frac{3}{4} C_D \rho_L} \right]^{1/2}$$

# الخواص الهيدروديناميكية للخلط في الانظمة ثلاثية الطور (غاز-سائل-صلب)

اعداد

رائد طارق هادي

اشراف

الاستاذ الدكتور عباس حميد سليمون

الاستاذ المساعد الدكتور ثامر جاسم المشهداني

يتضمن البحث دراسة السرعة الحرجة للغاز المطلوبه لاكمال خلط الدقائق الصليه العالقه  
و القدره اللازمه لذلك , وقد تم استعمال خزان من نوع QVF ذو قعر نصف كروي وذات  
قطر داخلي ٠,٤٦ متر وارتفاع حوالي واحد متر.

تم استخدام الظروف التشغيليه التاليه : حجم الدقائق الصليه ( $d_p$ ) يتراوح بين ٦٣-  
٩٠ و ٩٠-١٢٥ و ١٢٥-١٨٠ و ١٨٠-٢٥٠ مايكرون ونسبه طول الخزان الى قطره  
( $L/D$ ) من ٠,٧ و ٠,٩ و ١,١ الى ١,٣ ووزن ماده الصليه ( $W_s$ ) ٠,٤ و ٠,٨ و ١,٢ و  
١,٦ كغم وموزع غاز بشكل حلقه دائريه منفرده قطر كل ثقب فيها حوالي (١) ملم وغازات  
مختلفه وهي الهواء و الهليوم و الاركون و ثاني اوكسيد الكربون و انواع مختلفه من السوائل  
النيوتونيه وغير النيوتونيه و هي الماء و النفط و محاليل مختلفه التراكيز من كاربوسكي مثيل

لقد وجد ازدياد كل من السرعة الحرجة للغاز و القدره المسلطه اللازمه لاكمال خلط الدقائق الصلبه العالقه مع زيادة كل من حجم الدقائق الصلبه و تركيز الماده الصلبه و كثافه الغاز و انخفاض كل من النسبه (L/D) ولزوجة السائل.

تم مقارنة النتائج المستحصله باستعمال عمود الفقاعات ثلاثي الطور مع تلك التي تم حسابها و المتعلقه بخزان الخلط الميكانيكي. و قد ظهر بأن عمود الفقاعات اقل كفاءه (اكثر طاقه مستهلكه) في معظم الحالات. ولكن يبقى استعمال جهاز الفقاعات ضروري في العمليات التي تحتوي على غاز خطر او في حالات التشغيل بضغط و درجات حراره عاليه.

تم التوصل الى معادلة تجريبية لاحتساب السرعة الحرجة للغاز المطلوبه لاكمال خلط الدقائق الصلبه ( $V_{GC}$ ) و بينت الحسابات الاحصائية ان معدل الخطأ المطلق ١,٤٢ % و معامل الارتباط ٠,٩٩٤٧ و قد كانت المعادلة كما يلي:

$$\frac{V_{GC}}{V_s} = 12.748(Re)^{-0.052}(Fr)^{0.618}(We)^{0.108}\left(\frac{dp}{L}\right)^{0.100}\left(\frac{\Delta\rho}{\rho_L}\right)^{0.206}\left(\frac{\rho_G}{\rho_L}\right)^{0.005}\left(\frac{C_w}{\rho_L}\right)^{0.205}$$

تم استخدام نظام تحليل و مراقبة الفقاعات (BMAS) و المتضمن مجلس تحسس الموصلية الكهربائيه (Electo-resistivity Probe), وحدة الملائمه (Interface) و برنامج معد بلغة Visual Basic وحاسوب شخصي. يتم في هذا النظام قياس كل من :

١. سرعة صعود الفقاعه (Bubble Rise Velocity)

٢. قطر الفقاعه (Bubble Diameter)

٣. تردد الفقاعه (Bubble Frequency)

## ٤. النسبة الحجميه للغاز (Gas Hold - up)

يتألف مجس الموصلية الكهربائيه من نتوين (Tow Tips) مثبتين بصورة عموديه وتفصل بينهما مسافه ثابتة قدرها ٠,٨٥ سم. يتحسس المجس الاختلاف في التوصيليه للغاز و السائل. تم تحليل النتائج أحصائياً وتم إيجاد معادله تجريبيه للنسبه الحجميه للغاز وبمعدل خطأ مطلق 0.95 % ومعامل الارتباط ٠,٩٧٧٨ وقد كانت المعادله كما يلي :

$$\varepsilon_G = 1.157 \left( \frac{g \mu_L^4}{\rho_L \sigma_L} \right)^{-0.075} \left( \frac{V_{GC} \mu_L}{\sigma_L} \right)^{0.143} \left( \frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{0.179} \left( \frac{\Delta \rho}{\rho_L} \right)^{-0.035} \left( \frac{C_w}{\rho_L} \right)^{0.143} \left( \frac{\mu_G}{\mu_L} \right)^{0.296}$$

تم حساب معدل سرعة دوران السائل ( $V_{CL}$ ) بأستخدام المعادله التي وضعها Zehner في سنة ١٩٨٢. كما تم قياس كل من وقت الخلط (Mixing Time) و ذلك بأستخدام اسلوب النبضة (Pulse Technique) و شدة الخلط (Intensity of Mixing). تم الوصول الى الظروف المثاليه من خلال احتساب شدة الخلط وقد بينت الحسابات الى أن شدة الخلط لحجم دقائق يتراوح بين ١٨٠-٢٥٠ مايكرون ونسبة طول الخزان الى قطره 1.1 و وزن ماده الصلبه ١,٦ كغم.

تم اشتقاق معادله لحساب سرعة السائل في الانظمه الثلاثية الطور بأستخدام موازنه القوى و عندما تكون نسبة  $L/D$  (٠,٧-١,٣) و حجم الدقائق الصلبه  $d_p$  (٦٣-٢٥٠ مايكرون و وزن ماده الصلبه (٠,٤ الى ١,٦) كغم. وقد كانت المعادله التي تم الحصول عليها كما يلي :

$$V_L = \left[ \frac{\frac{2}{3} d_b^2 g (\rho_L - \rho_G) - \frac{1}{2} d_b V_b^2 (\varepsilon_s \rho_s + 0.44 \rho_L) - 4 \sigma_L}{\frac{1}{2} d_b \rho_s \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_L^2} (1 + 2 \varepsilon_L \frac{V_b}{V_L})} \right]^{1/2}$$

وقد بينت نتائج المقارنة بين هذه المعادلة التحليلية و المعادلتين التي وضعها كل من

Zehner في سنة ١٩٨٢ و قاسم سنة ٢٠٠٢ ان النسبة المتوية للخطأ المطلق كانت ٢١,٤

% و ١١,٧ % على التوالي.

تم حساب سرعة سقوط الدقائق الصلبة ( $V_S$ ) في الانظمة الثلاثية الطور و ذلك بتطوير

موازنة القوى و قد بينت المعادلة التي تم الحصول عليها ان نسبة الخطأ قليلة عند استخدام دقائق

حجمها بين ١٢٥ الى ٢٥٠ مايكرون.

$$V_S = \left[ \frac{d_p g (\rho_s - \rho_L) + 2 \rho_s V_{br}^2}{\frac{3}{4} C_D \rho_L} \right]^{1/2}$$