

Sci. and Tech. note یادداشت علمی و فنی

اندازه گیری ضریب پراکندگی محوری فاز پیوسته در ستون استخراج ضربهای دیسک و دونات با استفادہ از مدل پر اکندگی با ردیاب پر توزا

یاسر یعقوبی کارنامی'، محسن طبسی*۲، محمد اتو کش'، میثم تراب مستعدی۲ ۱. دانشکده مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی شریف، صندوق پستی: ۸۳۳۹-۱۱۳۳۵، تهران ـ ایران ۲. پژوهشکدهی چرخهی سوخت هستهای، پژوهشگاه علوم و فنون هستهای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۸۵/۲-۱۳۲۵، تهران ـ ایران

چکید: کارایی بالا و فضای کم مورد نیاز برای ستون های ضربه ای، باعث شده است که با وجود احتمال بر تودهی و نیاز به حفاظت در برابر اشعه، به ویژه در صنایع هستهای مورد توجه و استفاده قرار گیرند. در این پژوهش، ضریب پراکندگی محوری فاز پیوسته در یک ستون استخراج ضربهای دیسک و دونات برای سیستم آب- نفت بی بو با استفاده از روش ردیاب پر توزا اندازه گیری شده است. پر اکندگی که توسط پارامتر بدون بُعد عدد یکلت مشخص می شود، با عکس ضرب پر اکندگی متناسب است. در روش ردیاب پر توزا از دو آشکار ساز گایگر – مولر در بالا و پایین ناحیه ی فعال ستون و نز از ردیاب پرتوزای ^{۹۹m}Tc به ترکیب شیمیایی NaTcO، استفاده می شود. عوامل مؤثر بر اختلاط محوری و ضریب پراکندگی شامل تغییرات دبی فازهای پیوسته و پراکنده، دامنه و بسامد ضربه مطالعه شدند. نتایج و مشاهدات تجربی نشان میدهد بـا افـزایش دبـی فـاز پیوسـته، ضـریب يراكندگي محوري فاز ييوسته كاهش مي يابد. هم چنين با افزايش دبي فاز يراكنده، دامنه و بسامد ضربه، ضريب يراكندگي فاز ييوسته افزايش مي يابند.

> کلیدواژه ها: ستون های ضربه ای دیسک و دونات، ردیاب پرتوزا، پراکندگی محوری

Measurement of Axial Dispersion Coefficient of the Continuous Phase in a Pulsed **Disc and Doughnut Column Using Dispersion Model with Radiotracer Technique**

Y. Yaghoubi¹, M. Tabasi^{*2}, M. Outokesh¹, M. Torab-Mostaedi² 1. Department of Energy Engineering, Sharif University of Technology, P.O.Box: 11365-8639, Tehran – Iran 2. Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 11365-8486, Tehran - Iran

Abstract: High efficiency and low required area for the pulsed columns are interesting and useful especially in nuclear industries in spite of exposure and radiation protection requirements. In this research, dispersion coefficient in a typical disc and doughnut pulsed column in a two phase system (water and kerosene) was determined via radiotracer technique. In the radiotracer method, two Geiger-Mueller detectors at the top and bottom of the active section of the pulsed column and ^{99m}Tc in the form of NaTcO₄ as radiotracer are used. Dispersion is introduced by Pecletdimensionless number which is inversely propotional to the dispersion coefficient. The continuous and dispersed phase flow rate, amplitude and frequency of pulse as the effective parameters on axial mixing and dispersion coefficient magnitude have been studied. Experimental results indicate that by increasing the continuous phase flow rate, the dispersion coefficient decreases. Also, by increasing the dispersion phase flow rate as well as the amplitude and frequency of the pulse, the dispersion coefficient will increase.

Keywords: Pulsed Disc and Doughnut Columns, Radiotracer, Axial Dispersion

^{*}email: mtabasi@aeoi.org.ir

۱. مقدمه

استخراج مایع – مایع فرایندی است که در آن اجزای یک مایع به وسیلهی تماس با یک مایع غیرقابل امتزاج دیگر از هم جدا میشوند. این فرایند کاربرد وسیعی در صنایع شیمیایی، بیوشیمیایی، معدنی، پتروشیمی، نفت، محیط زیست، صنایع غذایی و هستهای دارد [۱، ۲، ۳].

ستونهای ضربهای، اولین بار به توسط وزدیجک در سال ۱۹۳۵ معرفی شدهاند [۴]. از آنجا که در ستون ضربهای، اجزای متحرک وجود ندارد و ستون به صورت یکپارچه است، به تعمیر و نگهداری کم تری نیاز دارد، در نتیجه برای کار با مواد خورنده یا پرتوزا قابل استفاده است [۵].

توزیع زمان اقامت ^(۱) (RTD) روش مناسبی برای مطالعهی الگوی جریان و تخمین پراکندگی محوری است که توسط دانکورت در سال ۱۹۵۳ مطرح شده است [۶]. افزایش پراکندگی محوری موجب کاهش کارایی ستون استخراج می شود، بنابراین پیش بینی ضریب پراکندگی محوری ضروری است. چندین رابطهی تجربی برای پیش بینی ضریب پراکندگی فاز پیوسته در ستونهای استخراج گوناگون گزارش شده است انجام نشده است.

۲. مشخصات سیستم

طبق شکلهای ۱ و ۲، دستگاه مورد استفاده در آزمایش ها، یک ستون استخراج ضربهای دیسک و دونات در مقیاس نیمهصنعتی است که قسمتهای مختلف آن به شرح زیر میباشند:

قسمت فعال ستون از جنس شیشه به طول ۷۲cm و قطر داخلی ۳۳ ۷۹ است. ۳۰ جفت دیسک و دونات به صورت متوالی (یک در میان) در ستون قرار گرفته اند که فاصلهی بین دیسک و دونات ۳۳ ۱۰ است. قطر دیسک ۳m ۶۷ و قطر سوراخ دونات ۳۳ ۳۳ است. دو تهنشین کننده به قطر ۳۱۲ ۱۱۲ به منظور جداسازی دو فاز در بالا و پایین قسمت فعال ستون قرار گرفته اند. آب به صورت فاز پیوسته از بالا و نفت بی.بو^(۲) به صورت فاز پراکنده از پایین وارد ستون می شوند. فاز سبک در اثر پالس پراکنده شده و از لابه لای دیسک و دونات عبور کرده، به سمت بالای ستون حرکت می کند. قطرات فاز پراکنده در ته نشین کنندهی بالایی به هم می پیوندند و با سرریز شدن، ستون را

ترک می کنند. یک سطح جدایش بین دو فاز در تهنشین کننده ی بالایی در نظر گرفته شده است که به وسیلهی یک حس گر نوری کنترل می شود. از دو دبی سنج^(۳) برای اندازه گیری دبی فاز پیوسته و پراکنده استفاده شده است.



شکل ۱. نمایی طرحوار از ستون استخراج مایع-مایع ضربهای دیسک و دونات.

۱) مخازن ورودی و خروجی فاز پیوسته ۲) مخازن ورودی و خروجی فاز پراکنده ۳) دبیسنجها ۴) دو دستگاه پمپ جهت انتقال فاز پیوسته و پراکنده به بالا و پایین ستون ۵) ایجادکننده ی ضربه ۶) حس گر نوری نصب شده در ناحیه ی تهنشین کننده ی بالایی ۷) دو آشکارساز گاما از نوع گایگر – مولر در بالا و پایین قسمت فعال ستون ۸) محل تزریق ردیاب پرتوزا



شکل ۲. نمایی از ستون ضربهای دیسک و دونات.

سیستم مورد استفاده برای آزمایش ها، آب/ نفت بی بو است که آب، فاز پیوسته و نفت بی بو، فاز پراکنده را تشکیل می دهند. تمام آزمایش ها بدون انتقال جرم انجام شد. در آزمایش ها از نوع ردیابی استفاده می شود که دارای نیمه عمر و انرژی تابش مناسبی برخوردار باشد. هم چنین باید خواص فیزیکی مشابه با مخلوط داشته باشد، به طور کامل در فاز مورد نظر حل شود و در طول فرایند اختلاط دو فاز در ستون، به فاز دیگر منتقل نشود. ^{۹۹۳} ردیاب پر توزای مناسب است که به صورت ترکیب سدیم پر تکنتات استفاده می شود. تکنسیم از دوشیدن ژنراتور ا^{۹۹۳} Tc و نیمه عمر آن ۴۰۰۲ است ای انرژی گامای آن ۴۰٫۵ KeV

۳. روش انجام آزمایش

ابتدا پمپ فاز پیوسته، روشن و دبی آن تنظیم و ستون تا نزدیک فصل مشترک دو فاز، از فاز پیوستهی (آب) پر می شود. سپس با تنظیم فرکانس و دامنه، سیستم ضربه راهاندازی می شود. با روشن کردن پمپ فاز پراکنده، دبی آن تنظیم، و اجازه داده می شود از پایین وارد ستون شود و با عبور از میان فاز پیوسته روی سطح آن جمع و پس از سرریز، در جداکننده ی فاز بالایی ستون خارج شود.

بعد از رسیدن ستون به حالت پایا، حدود MBq ۱۸/۵ از ^{۹۹m}Tc در ورودی فاز پیوسته تزریق می شود که ردیاب تزریق شده به همراه فاز پیوسته به سمت پایین جریان می یابد. مقدار تزریق ردیاب به گونه ای است که تأثیری در جریان سیال عبوری ندارد. همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، دو آشکارساز گایگر – مولر تعبیه شده در دستگاه GR-130 که مجهز به موازی ساز پر تو هستند، در بالا و پایین قسمت فعال ستون قرار دارند و با عبور ردیاب پر توزا (فاز پیوسته) از مقابل آنها، اطلاعات TDT به صورت شمارش پر توهای گامای ردیاب در واحد زمان در آشکارسازها ثبت می شود. اطلاعات ثبت شده با استفاده از نرمافزار Specview به کرمیوتر انتقال می یابد. داده های ذخیره شده در دو آشکارساز از نظر زمان مرده، شمارش زمینه، واپاشی پر توزا و نرمالیزاسیون نسبت به پر توزایی تصحیح، و سپس پردازش می شوند.

زمان مرده یا قدرت تفکیک یک شمارنده عبارت است از زمان کمینهای که باید بین ورود پی در پی دو ذره به آشکارساز سپری شود تا دو تپ متمایز تولید شوند. به عبارتی دیگر، زمان لازم بین لحظهی برخورد ذره به آشکارساز و لحظهای است که تپ ولتاژ به درون شمارشگر می رود. مقدار تابش تصحیح شده از رابطهی (۱) به دست می آید، که در آن، $n_{\rm m}$ تابش اندازه گیری شده، $t_{\rm d}$ زمان مرده و (1).

$$n_{c1}(t) = \frac{n_m(t)}{1 - t_d \cdot n_m(t)}$$
(1)

چون در هر محیطی، تابش زمینه از اشعهی گاما وجود دارد، بنابراین نیاز است پس از انجام آزمایش ها، مقدار آن اندازه گیری شود. سپس مقدار اشعهی گامای اندازه گیری شده در آزمایش ها از آن مقدار زمینه کم شود. شکل ۳ نمونهای از منحنی های تابش را قبل و بعد از اصلاح تابش زمینه نشان می دهد.

از آنجا که ردیاب پرتوزا به صورت تابع نمایی با زمان واپاشی می کند، ضروری است که مقدار تابش های به دست آمده از آزمایش ها تصحیح شوند. مقدار تابش تصحیح شده ناشی از $n_{c1}(t)$ از رابطهی (۲) به دست می آید، که در آن، $n_{c1}(t)$ شمارش تصحیح شده از رابطهی (۱)، Λ ثابت واپاشی ردیاب Tc

$$n_{cv}(t) = n_{cv}(t).\exp(\lambda t)$$



شکل ۳. منحنی تابش قبل و بعد از اصلاح تابش زمینه (خام).

(٢)

در آزمایش ها، برای بررسی هر یک از پارامترها، سـه پـارامتر دیگر ثابت نگه داشته، و فقط پارامتر مورد نظر تغییر داده می شود.

RTD با تزریق ضربهای ردیاب در ورودی رآکتور در زمان =t و اندازه گیری غلظت ردیاب در جریان خروجی بـه صـورت تابعی از زمان، قابل محاسبه است.

تابع توزیع زمان اقامت E(t) طبق رابطهی (۳) تعریف می شود:

(٣)

$$E(t) = \frac{n(t)}{\int n(t)dt}$$

که در آن، (*n*(t نرخ شمارش و (*E*(t تابع توزیع نرمال شده است.

در ستون استخراج واقعی، به علت وجود ورودی ناودانی، و نیز پالس و نوع ستون که دیسک و دونات است، جریان از الگوی غیریکنواخت^(۴) پیروی می کند که از جریان لولهای انحراف دارد و باعث ایجاد پراکندگی در جریان می شود. پراکندگی فاز پیوسته توسط پارامتر بدون بُعد عدد پکلت^(۵) مشخص می شود که با رابطهی (۴) قابل محاسبه است:

$$Pe = \frac{UL}{D} \tag{(f)}$$

در اینجا، L طول ستون، U سرعت فاز و D ضریب پراکندگی محوری برحسب (m^۲/s) است.

$$\frac{\partial c}{\partial \theta} = \frac{1}{Pe} \frac{\partial^{2} c}{\partial z^{*}} - \frac{\partial c}{\partial z}$$
 (b)

 $Z = \frac{x}{L}$ خدر آن، $\frac{c(t)}{c(0)} = C$ غلظت بدون بُعد ردیاب، $Z = \frac{x}{L}$ مختصات محوری بدون بُعد، و $\frac{t}{\tau} = \theta$ بدون بُعد، (t) غلظت مختصات محوری بدون بُعد، و $\frac{t}{\tau} = \theta$ بدون بُعد، (t) غلظت ردیاب در زمان t، و (\circ) غلظت اولیهی ردیاب تزریقی است. معادلهی (دیفرانسیل) در شرایط مرزی باز^(*) به صورت معادلات (۴) و (۷) توسط لون اشپیل و اسمیت در سال ۱۹۵۷ استنتاج شدهاند [۱۴]:

$$E(t) = \frac{u}{\sqrt{\epsilon \pi D t}} e^{\frac{-(L-Ut)^{2}}{\epsilon D t}}$$
(9)

$$E(\theta) = \frac{1}{\mathbf{v}} \left(\frac{pe}{\pi\theta}\right)^{\frac{1}{\mathbf{v}}} e^{\frac{-pe(\mathbf{v}-\theta)^{\mathbf{v}}}{\mathbf{v}\theta}} \tag{v}$$

هنگامی که یک تزریق آنی در ورودی سیستم انجام شود، غلظت ورودی ردیاب (Cin) پس از عبور از درون سیستم، به غلظت خروجی (Cout) تبدیل میشود. تبدیل منحنی، به وسیلهی تابع تبدیل (پاسخ) صورت می گیرد که به صورت معادلهی (۸) تعریف می شود و به انتگرال پیچش^(۷) معروف است:

$$C_{out}(t) = \int_{0}^{t} C_{in}(t - t') \cdot E(t') dt'$$

اگر غلظت ورودی C_{in} و تابع پاسخ E(t) مشخص باشند، تابع خروجی با رابطهی (۹) قابل محاسبه است. در این رابطه، t_i و t_i زمانهای لحظهای مجزا و Δt فاصلهی زمانی بین دو اندازه گیری متوالی است:

$$C_{\text{out}}(t_{i}) = \Delta t \cdot \sum_{j=1}^{i-1} c_{in}(t_{i,j}) \cdot E(t_{j})$$
(9)

با جای گذاری منحنی غلظت ورودی C_{in} که در تمام آزمایش ها مشخص است و معادلهی (۷) مربوط به منحنی *E* در معادلهی (۹)، می توان منحنی خروجی مدل شده را به دست آورد. منحنی خروجی مدل شده با منحنی خروجی آزمایشگاهی مقایسه می شود و اختلاف این دو منحنی با بهینه کردن عدد پکلت و به روش کمینه مجذور مربع های خطا، کمینه می شود. مدل سازی با استفاده از نرمافزار متلب^(۸) انجام شده است.



شکل ۴. منحنی نرمال شدهی غلظت ورودی C_{in} و خروجی C_{out}، همراه با منحنی مدل شدهی خروجی C_{out-model} و منحنی E برای فاز پیوسته.



شکل 0. اثر افزایش دبی فاز پیوسته بر (الف) منحنی تـابع تبـدیل و (ب) عـدد پکلت.



در شکل ۴، منحنی نرمال شدهی ورودی و خروجی، همراه با منحنی مدل شده و منحنی *E* برای فاز پیوسته نشان داده شده است. همان طور که در شکل مشاهده می شود، سازگاری خوبی بین منحنی خروجی آزمایشگاهی با منحنی مدل شده توسط مدل پراکندگی وجود دارد.

٤. نتايج و بحث

شکل های ۵ الف و ب اثر افزایش دبی فاز پیوسته بر پراکندگی محوری و عدد پکلت را در شرایطی که دبی فاز پراکنده، دامنه و بسامد پالس ثابت نگه داشته شدهاند نشان می دهند. مشاهده می شود با افزایش دبی فاز پیوسته، از پهنای منحنی های تابع تبدیل (Θ) کاسته می شود، که نشان دهنده ی کاهش پراکندگی فاز پیوسته است. (شکل ۵- الف). هم چنین شکل (۵- ب) نشان می دهد با افزایش دبی فاز پیوسته، عدد پکلت افزایش، و به عبارتی ضریب اختلاط محوری کاهش می یابد. این به علت آن است که با توجه به ثابت بودن شدت جریان فاز پراکنده، با افزایش دبی فاز پیوسته، نیرویی که توسط فاز پراکنده بر واحد حجم فاز پیوسته وارد می شود کاهش، و در نتیجه پراکندگی فاز پیوسته کاهش و عدد پکلت افزایش می یابد.

اثر افزایش دبی فاز پراکنده بر پراکندگی محوری فاز پیوسته در شکلهای ۶- الف و ب نشان داده شدهاند. مشاهده می شود با افزایش دبی فاز پراکنده، منحنیهای تابع تبدیل پهن تر شدهاند و به عبارتی پراکندگی فاز پیوسته افزایش یافته است. علاوه بر این، در شکل ۶- ب مشاهده می شود افزایش دبی فاز پراکنده موجب کاهش عدد پکلت شده است. با افزایش شدت جریان فاز پراکنده و ثابت بودن شدت جریان فاز پیوسته، نیرویی که به افزایش می یابد، در نتیجه پراکندگی فاز پیوسته بیش تر می شود و عدد پکلت کاهش می یابد.



شکل ٦. اثر افزایش دبی فاز پراکنده بر (الف) منحنی تابع تبـدیل و (ب) عـدد پکلت.

شکل های ۷- الف و ب اثر افزایش دامنه ی ضربه بر پراکندگی محوری و عدد پکلت در شرایطی که دبی فازهای پیوسته و پراکنده، و بسامد پالس ثابت نگه داشته شده است را نشان می دهند. مشاهده می شود با افزایش دامنه ی ضربه، پهنای منحنی های تابع تبدیل (G) افزایش می یابد، که نشان دهنده ی افزایش پراکندگی فاز پیوسته است (شکل ۷- الف). هم چنین شکل ۷- ب نشان می دهد با افزایش دامنه ی ضربه، عدد پکلت کاهش و به عبارتی ضریب اختلاط محوری افزایش می یابد. علت سیستم ضربه به فاز پیوسته وارد می شود افزایش می یابد و در سیستم ضربه به فاز پیوسته وارد می شود افزایش می یابد و در می یابد که این کار باعث کاهش عدد پکلت و پهن تر شدن می یابد که این کار باعث کاهش عدد پکلت و پهن تر شدن



 $Qc=1\delta(L/h); Qd=1\delta(L/h); f=1(1/s)$

شکل ۲. اثر افزایش دامنهی ضربه بـر (الـف) منحنـی تـابع تبـدیل و (ب) عـدد کملت.

اثر افزایش بسامد ضربه بر پراکندگی محوری فاز پیوسته و عدد پکلت در شکل های ۸- الف و ب نشان داده شده اند. مشاهده می شود با افزایش بسامد ضربه، منحنی های تابع تبدیل پهن تر شده اند، به عبارتی پراکندگی فاز پیوسته افزایش یافته است (شکل ۸- الف). علاوه بر این، در شکل ۸- ب مشاهده می شود افزایش بسامد ضربه موجب کاهش عدد پکلت شده است. این به آن علت است که با افزایش بسامد ضربه، نیرویی که تو سط سیستم ضربه به فاز پیوسته وارد می شود افزایش می یابد، که این عامل باعث می شود پراکندگی آن بیش تر شود و ضریب پراکندگی افزایش یابد. در نتیجه عدد پکلت کاهش می یابد و





شکل ۸ اثر افزایش بسامد بر (الف) منحنی تابع تبدیل و (ب) عدد پکلت.

٥. نتيجه گيري

آنچه از آزمایش ها و محاسبات در این پژوهش به عنوان نتیجه گیری می توان ارائه داد به قرار زیر است: ۱) منحنی مدل شده توافق خوبی با منحنی خروجی آزمایشگاهی دارد، در نتیجه مدل پیشنهادی برای محاسبه ی پراکندگی در ستونهای استخراج مناسب است. ۲) در یک روند کلی، با افزایش دبی فاز پیوسته، ضریب پراکندگی فاز پیوسته کاهش می یابد، در حالی که با افزایش دبی افز پراکندگی فاز پیوسته کاهش می یابد، در حالی که با افزایش دبی افزایش می یابند. ۳) مدل پراکندگی، مدل مناسبی برای توصیف هیدرودینامیک فاز پیوسته در ستون استخراج دیسک و دونات است. ۴) علاوه بر نتایج مستقیمی که از فعالیت حاضر گرفته شد و با توجه به بالا بودن خطرات ناشی از پرتودهی در صنایع هسته ی، می توان روش ردیاب پر توزا را به علت سهولت، حساسیت، دقت

بالا و امکان اندازه گیری پارامترها، بدون نیاز به سایر روشها استفاده کرد. ۵) به دلیل نیمه عمر کوتاه و انرژی کم تکنسیم و با توجه به مدت زمان کوتاه آزمایشهای انجام شده، به علاوهی عدم انتقال آن با

ترکیب شیمیایی ،NaTcO از فاز آبی به آلی در این فعالیت، می توان با انجام تصحیحهایی در محاسبات، از پاسخ آشکارساز ناشی از اندازه گیری فعالیت تکنسیم استفاده کرد.



- 1. Residence Time Distribution
- 2. Kerosene
- 3. Rotameter
- 4. Non Uniform Pattern Flow
- 5. Peclet Number
- 6. Open-Open Vessel Boundary Condition
- 7. Convolution Integral
- 8. Matlab



- P.J. Bailes, A. Winward, Progress in Liquid-Liquid Extraction, *Trans. Inst. Chem. Eng.*, 3 (1972) 240.
- [2] C. Hanson, Solvent Extraction: The Current Position, in Recent Advances in Liquid-Liquid Extraction, C Hanson, Ed., Pergamon Press, Oxford, (1971).
- [3] R.E. Treybal, Liquid Extraction, 2nd ed., McGraw-HillBook Co., *Inc.*, New York, (1963).
- [4] W.J.D. VAN DIJCK, Process and apparatus for intimately contacting fluids, U.S. Patent., US 2011186 (August 1935).
- [5] A.A. Hussain, T.-B. Liang, M.J. Slater, Characteristic velocity of drops in a liquidliquid extraction pulsed sieve plate column, *Chem. Eng. Res. Des.*, 66 (6) (1988) 541-554.
- [6] P.V. Danckwerts, Continuous flow systems, distribution of residence times, *Chem. Eng. Sci.* 2 (1) (1953) 1–13.
- [7] J.C. Godfrey, M.J. Slater, Liquid-Liquid Extraction Equipment, John Wiley & Sons, Chichester, England (1994).
- [8] A. Kumar, S. Hartland, Prediction of Axial Mixing Coefficients in Rotating Disc Extraction Columns, Can. J. Chem. Eng. 70 (1992) 77-87.

- [9] J. Breysse, U. Buhlmann, J.C. Godfrey, Axial Mixing Characteristics of industrial and Pilot Scale KUhni Column, AIChESymp. Ser., 80 (238) (1984) 94-101.
- [10] A. Kumar, S. Hartland, Prediction of Continuous Phase Axial Mixing Coefficients in Pulsed Perforated-Plate Extraction Column, *Ind. Eng. Chem. Res.* 28 (1989) 1507-1513.
- [11] D. Venkata Narasaiah, Y.B.G. Varma, Dispersed phase holdup and mass transfer in liquid pulsed column, *Bioprocess Eng.* 18 (2) (1998) 119–126.
- [12] International Atomic Energy Agency, Guidebook on radioisotope tracers in industry. *Technical* Report Series No. **316**. IAEA, Vienna, Austria. (1990).
- [13] International Atomic Energy Agency. Radiotracer Generators for Industrial Applications. *IAEA* Radiation Technology, Series No. 5. IAEA, Vienna, Austria. (2013).
- [14] O. Levenspiel, W.K. Smith, Notes on the diffusiontypemodel for the longitudinal mixing of fluids in flow, *Chem. Eng. Sci.* 8 (1957) 227-223.