

اثر شرایط عملیاتی (دوره‌همزن، دبی حجمی فاز سبک، دبی حجمی فاز سنگین و ماندگی) بر روی راندمان و ضرایب کلی حجمی انتقال جرم در استخراج کننده میکسر-ستلر

حسین بهمنیار

دانشیار گروه مهندسی شیمی - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

محمد علی موسویان

دانشیار گروه مهندسی شیمی - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

محمد قنادی مراغه

سازمان انرژی اتمی - معاونت تولید سوخت هسته ای

حسین ابوالقاسمی

دانشجوی دوره دکترای گروه مهندسی شیمی - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

محمدعلی سائلی

سازمان انرژی اتمی - آزمایشگاه‌های تحقیقاتی جابربن حیان

(تاریخ دریافت ۷۹/۳/۲۳، تاریخ تصویب ۷۹/۱۲/۲۰)

چکیده

در این تحقیق بمنظور تعیین راندمان و ضرایب کلی حجمی انتقال جرم آزمایش‌های متعددی با یک دستگاه میکسر-ستلر (مخلوط کننده-ته‌نشین کننده) مجهز ده مرحله‌ای انجام شد. با توجه به نتایج حاصله از آزمایش‌ها، می‌توان گفت که بطور کلی افزایش دور همزن در دبی حجمی ثابت فازها، باعث افزایش راندمان جداسازی^۱ خواهد شد. علاوه براین، مشاهده می‌شود که با افزایش دور همزن ضرایب کلی حجمی انتقال جرم در ابتدا افزایش و بعد از رسیدن به یک دور خاص، کاهش می‌یابند. همچنین افزایش دبی حجمی فاز پراکنده (فاز سبک یا فاز Raffinate) در یک دور ثابت و در دبی حجمی ثابت فاز پیوسته، باعث کاهش راندمان جداسازی و افزایش ضرایب کلی حجمی انتقال جرم خواهد شد. از طرف دیگر، افزایش دبی حجمی فاز پیوسته (فاز سنگین یا فاز Extract) در یک دور ثابت و در دبی حجمی ثابت فاز پراکنده، باعث افزایش راندمان جداسازی و افزایش ضرایب کلی حجمی انتقال جرم خواهد شد. همچنین مقاومت در برابر انتقال جرم در هر دو فاز قابل توجه بوده و عملاً نمیتوان از مقاومت هیچ‌یک از فازها صرف‌نظر نمود. علاوه براین، راندمان و ضرایب کلی حجمی انتقال جرم هر مرحله با توجه به نتایج بدست آمده به ماندگی^۲ نیز بستگی دارد. نتیجه کلی و مهم بدست آمده دیگر آن است که ضرایب کلی حجمی انتقال جرم مربوط به هر مرحله در مقایسه با مراحل دیگر تفاوت چندانی ندارد و از اینرو می‌توان یک ضریب کلی حجمی انتقال جرم متوسط برای تمام مراحل تعریف کرد و می‌توان از این ضریب کلی حجمی متوسط در محاسبات و طراحی استفاده نمود.

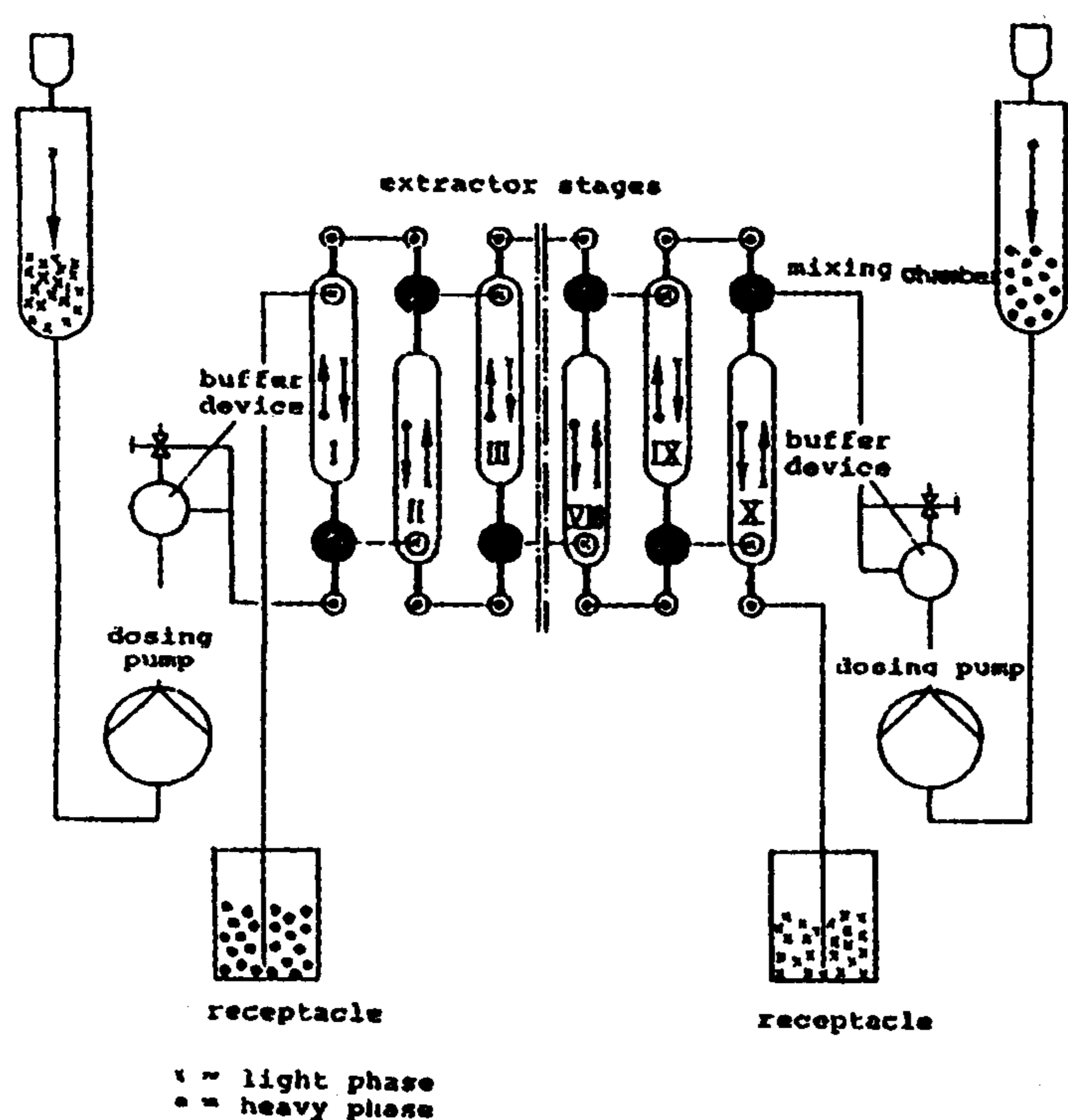
واژه های کلیدی: استخراج مایع-مایع^۳، میکسر^۴-ستلر، راندمان^۵، ضریب کلی حجمی انتقال جرم^۶

مقدمه

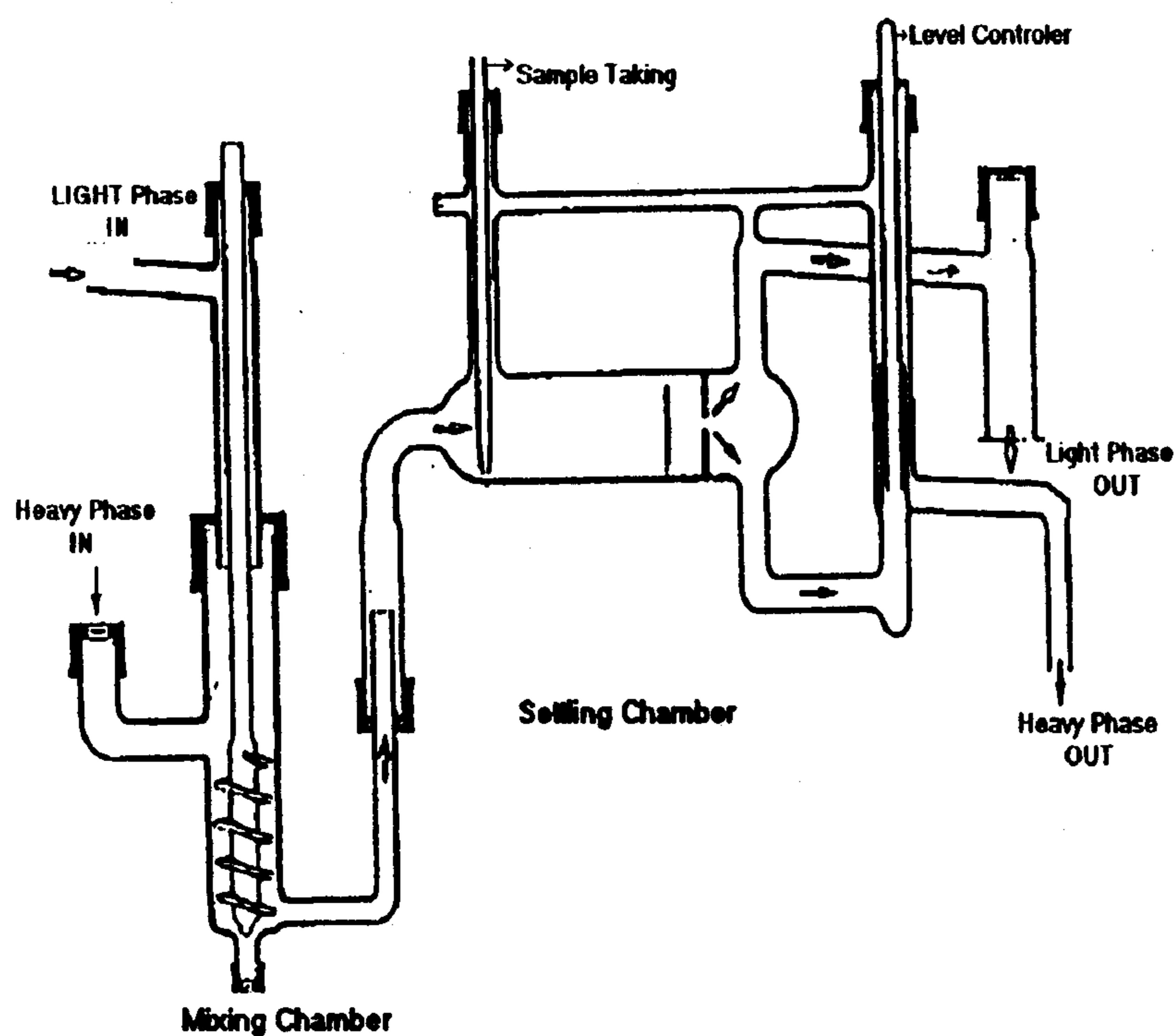
دستیابی به کارایی مناسب از دستگاه نایل شد. استخراج با حلال یا بعبارت دیگر استخراج مایع-مایع از مهمترین عملیاتی است که در صنایع مختلف کاربرد فراوان دارد. یکی از دستگاه‌های مهم برای استخراج با حلال، میکسر-ستلر می‌باشد که به دلیل انعطاف پذیری و ظرفیت و راندمان بالا، بطور گسترده ای در فرآیندهای

تعیین راندمان و ضرایب کلی حجمی انتقال جرم ($K.a$) و بررسی تأثیر پارامترهای عملیاتی مختلف بر روی آنها، دو پارامتر مهم در طراحی و انتخاب شرایط بهینه در دستگاه میکسر-ستلر می‌باشند. همچنین دانستن محدوده راندمان و ضرایب انتقال جرم کمک می‌کند تا بتوان به بهترین شرایط عملیاتی به منظور

تشکیل می‌گردد و سپس پراکنش تشکیل شده وارد قسمت ته‌نشین کننده (ستلر) می‌شود و بعد از جدا شدن دو فاز از یکدیگر، فازهای سبک و سنگین بترتیب از بالا و پایین ستلر خارج و به مراحل بعدی هدایت می‌شوند. طرح ساده‌ای از میکسرستلر افقی (میکسرستلر مورد استفاده در آزمایشها) و نمای یک مرحله از میکسرستلر بترتیب در شکل‌های (۱) و (۲) نشان داده شده است.



شکل ۱: شمای یک میکسر-ستلر افقی [۹].



شکل ۲: مشخصات یک مرحله از دستگاه میکسر-ستلر [۹].

مختلف از جمله صنایع شیمیایی، دارویی و هسته‌ای کاربرد دارد.

بطور کلی در یک طبقه بندی عمومی استخراج کننده های صنعتی به سه دسته اصلی تقسیم می‌شوند [۱]:

۱- استخراج کننده های ستونی

-ستونهای بدون همزن^۷

-ستونهای ضربه‌ای^۸

-ستونهای همزن‌دار مکانیکی^۹

۲- استخراج کننده های میکسر-ستلر (مخلوط کننده-ته‌نشین کننده)

۳- استخراج کننده های سانتریفوژی (گریز از مرکز)

مزیت انتخاب استخراج کننده میکسر-ستلر در مقایسه با دستگاه های دیگر، ظرفیت بالا و تعداد مراحل کم آن می‌باشد. میکسر-ستلر می‌تواند با میزان اختلاط بالا^{۱۰} بدون احتمال رخ دادن پدیده طغیان کار کند. همچنین امکان توقف و راه‌اندازی آسان درحین کار بدون زیان به مشخصات کیفی محلول را دارا می‌باشد [۲]. علیرغم این واقعیت که سالهای متمادی است میکسرستلرها مورد استفاده قرار گرفته‌اند، ولی هنوز برای طراحی آنها نیازمند به اطلاعات آزمایشگاهی بوده و دلیل آن نیز بخاطر رفتار پیچیده پراکنش‌های^{۱۱} مایع و فرآیندهای انتقال جرم می‌باشد.

میکسرستلرها در دو نوع افقی و عمودی طراحی

و ساخته می‌شوند. هر دستگاه میکسرستلر از یک سری محفظه‌های اختلاط (میکسرها) و ته‌نشین کننده‌ها (ستلرها) تشکیل شده است. پدیده‌های پیچیده‌ای در محفظه اختلاط بوقوع می‌پیوندد و مدل‌های مختلفی توسط محققین ارائه شده است و اساسا هدف در تمام کارهای انجام شده، ارائه یک مدل و طراحی مناسب می‌باشد که برای این منظور نیاز به اطلاعات هیدرودینامیکی و انتقال جرمی می‌باشد و بعضی از محققین به روشهای مختلف این پارامترها را مورد مطالعه قرار داده‌اند [۳، ۴، ۵]. اساس کار در دستگاه میکسرستلر اینگونه می‌باشد که فازهای سبک و سنگین با یکدیگر در میکسر مخلوط شده و یک پراکنش مایع-مایع در آن

همچنین، لازم به ذکر است که تعداد مراحل واقعی در این آزمایشها ثابت می‌باشد. بنابراین، افزایش راندمان کلی به مفهوم افزایش تعداد مراحل ایده‌آل و یا نزدیک شدن منحنی عملیاتی به منحنی تعادلی می‌باشد و این خود نیز به مفهوم کاهش کارایی دستگاه می‌باشد و در نتیجه می‌توان گفت که راندمان جداسازی کاهش می‌یابد.

ضریب کلی حجمی انتقال جرم [۶]

ضریب کلی حجمی انتقال جرم $(K.a)$ تابعی از ضریب کلی انتقال جرم (K) ، ماندگی فاز پراکنده (ε) و قطر متوسط ستر قطرات (d_{32}) می‌باشد زیرا که سطح تماس بصورت $a = \frac{6\varepsilon}{d_{32}}$ تعریف می‌شود و برای هر دو فاز Extract, Raffinate قابل استفاده می‌باشد. از طرفی چون هر یک از متغیرهای فوق به یکدیگر وابسته می‌باشند، تأثیر پارامترهای عملیاتی را بطور کلی بر روی ضریب کلی حجمی انتقال جرم بررسی کرده‌ایم.

ضریب کلی حجمی انتقال جرم در فاز Raffinate، $K_R.a$

ضریب کلی حجمی انتقال جرم در فاز Raffinate از طریق موازنه جرم برای هر مرحله و بر اساس غلظت‌های ورودی و خروجی فاز Raffinate تعیین می‌گردد.

$$\dot{m}_R(x_{in} - x_{out}) = K_R a.V.(C_{R_{out}} - C_R^*) \quad (4)$$

در رابطه فوق، غلظت‌ها بصورت جرمی تعریف شده‌اند. بنابراین می‌توان نوشت:

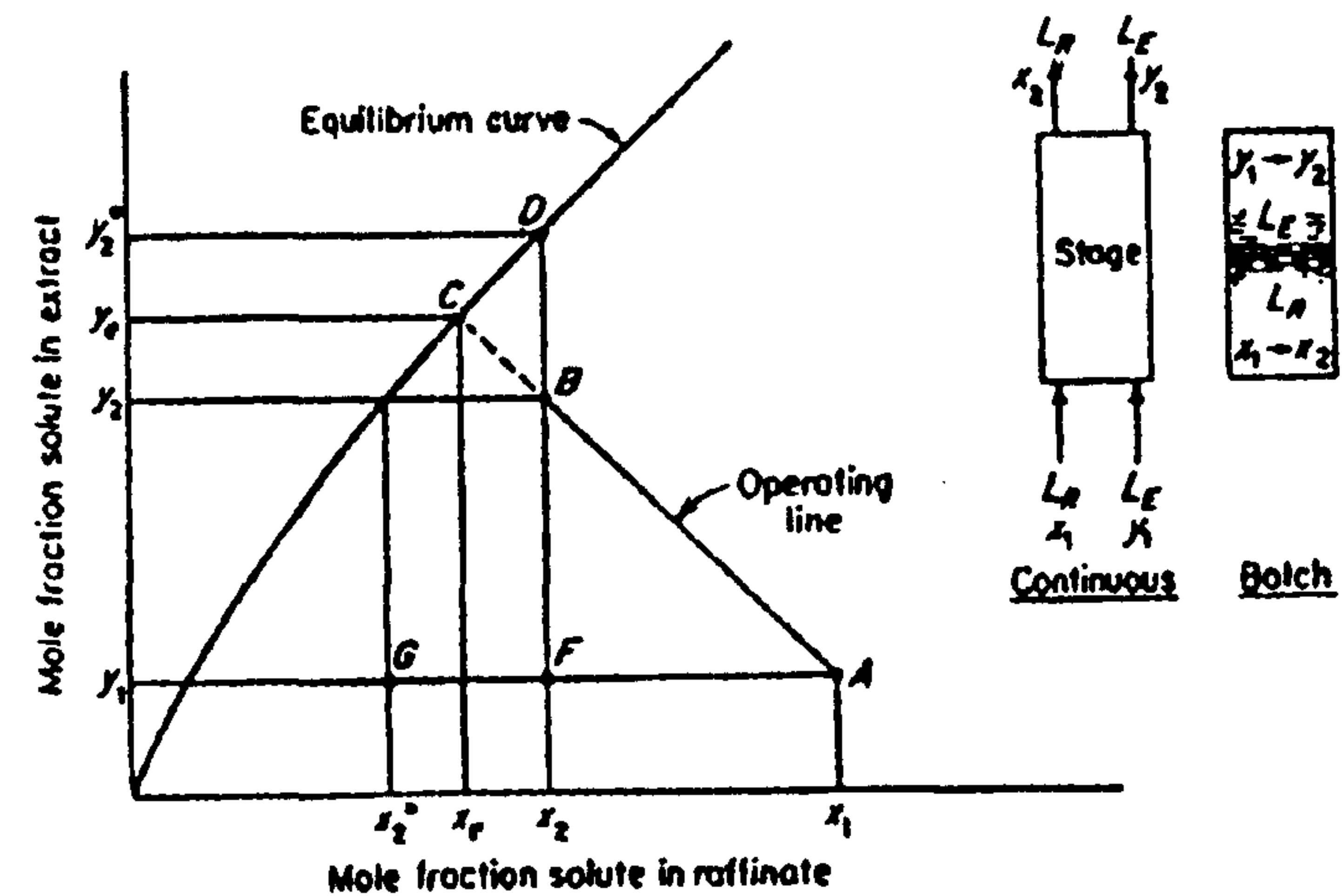
$$\dot{m}_R(x_{in} - x_{out}) = K_R a.V.\rho_{av}(x_{out} - x^*) \quad (5)$$

$$\rho_{av} = \sum \omega_i \cdot \rho_i$$

جائیکه

ضریب کلی حجمی انتقال جرم در فاز Extract، $K_E.a$ ضریب کلی حجمی انتقال جرم در فاز Extract از طریق موازنه جرم برای هر مرحله و بر اساس غلظت‌های ورودی و خروجی فاز Extract تعیین می‌گردد.

$$\dot{m}_E(y_{out} - y_{in}) = K_E a.V.(C_E^* - C_{E_{out}}) \quad (6)$$



شکل ۳: مشخصات یک مرحله بر روی منحنی تعادلی [۶].

راندمان

راندمان به پارامترهای مختلفی از جمله دور همزن، میزان حلال مصرفی و ماندگی بستگی دارد. در دستگاه میکسرستلر می‌توان راندمان جداسازی، راندمان مرحله‌ای^{۱۲} و راندمان کلی^{۱۳} را مورد بررسی قرار داد. شکل (۳) مشخصات یک مرحله^{۱۴} را نشان می‌دهد که در آن جهت جریان بصورت همسو بوده و پاره‌خط AB نشان دهنده خط عملیاتی آن مرحله می‌باشد و نقطه C محل تقاطع خط عملیاتی و منحنی تعادلی می‌باشد. البته این منحنی مربوط به سیستم‌های امتزاج‌ناپذیر می‌باشد و باید یادآوری نمود که سیستم مورد استفاده نیز دارای چنین شرایطی است (با حلالیت کمتر از یک درصد در یکدیگر) و برای اطمینان بیشتر در ابتدا دو فاز آب و تولوئن در یکدیگر کاملاً اشباع شده‌اند. روابط مورد نیاز برای اندازه‌گیری هر یک از راندمانها عبارتند از [۶]:

$$E_{ext} = \frac{X_{in} - X_{out}}{X_{in} - X^*} \quad (1)$$

$$E_{stage} = \frac{x_1 - x_2}{x_1 - x_e} = \frac{y_2 - y_1}{y_e - y_1} \quad (2)$$

$$E_o = \frac{N_{ideal}}{N_{actual}} \quad (3)$$

لازم به یادآوری است که برای تعیین راندمان کلی (E_o) از منحنی‌های تعادلی و عملیاتی استفاده می‌شود.

تنظیم می‌باشد و همچنین نمونه‌گیری‌های بر روی هر ستلر تعبیه شده است که میتوان براحتی از هر فاز در تمام ستلرها نمونه‌برداری کرد. دور موتور و درجه پمپ‌ها دیجیتالی بوده و براحتی قابل تنظیم می‌باشند. البته در ابتدا پمپ‌ها برای هر فاز کالیبره شده و منحنی کالیبراسیون بدست آمده است.

سیستم شیمیایی مورد استفاده آب/استن/تولون می‌باشد که آب بعنوان فاز پیوسته، تولون بعنوان فاز پراکنده و استن نیز جزء انتقال یابنده می‌باشد. البته در ابتدا آب و تولون از یکدیگر کاملاً اشباع شده و استن به فاز تولون (فاز Raffinate) با درصد جرمی مشخصی اضافه می‌شود. انتقال جرم از فاز سبک (تولون اشباع از آب بهمراه استن) به فاز سنگین (آب اشباع از تولون) صورت می‌گیرد. بطور خلاصه خواص فیزیکی سیستم مورد استفاده در جدول (۱) نشان داده شده است.

در رابطه فوق، غلظت‌ها بصورت جرمی تعریف شده‌اند. بنابراین می‌توان نوشت:

$$\dot{m}_E (y_{out} - y_{in}) = K_E a \cdot V \cdot \rho_{av} (y^* - y_{out}) \quad (7)$$

$$\rho_{av} = \sum \omega_i \cdot \rho_i$$

جاییکه

شرح دستگاه و مشخصات سیستم شیمیایی مورد استفاده

میکسر-ستلر مورد استفاده یک میکسرستلر افقی بوده و شامل ده مرحله می‌باشد و نوع میکسر آن به گونه‌ای است که عمل پمپ کردن بین مرحله‌ای را نیز انجام می‌دهد. جهت جریان فازها در هر مرحله بصورت همسو و در کل دستگاه بصورت ناهمسو^{۱۵} می‌باشد. تمام مراحل شیشه‌ای بوده و جریان فازها در آن براحتی قابل رویت می‌باشد. فصل مشترک دو فاز در ستلرها قابل

جدول ۱: خواص فیزیکی سیستم مورد استفاده.

System	μ_d cp	μ_c cp	ρ_d gr/cm ³	ρ_c gr/cm ³	σ dyn/cm
Toluene/Acetone/Water	0.574	1.08	0.864	0.994	27

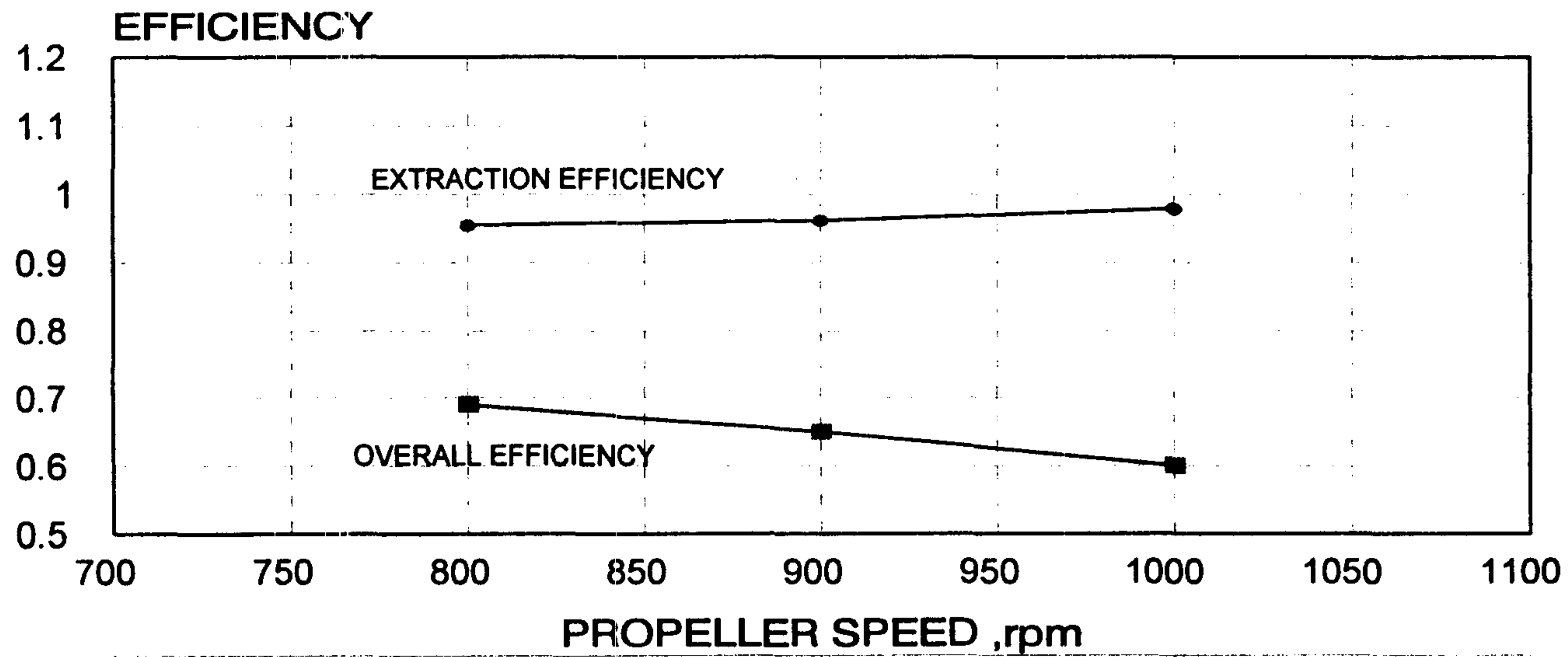
روش انجام آزمایشها

روشهای متعددی برای راه‌اندازی دستگاه میکسر-ستلر وجود دارد که انتخاب نوع روش، بستگی به امکانات دستگاه دارد و تأثیر آن بر روی مدت زمان راه‌اندازی دستگاه و زمان پایدار شدن فازها می‌باشد ولی در نهایت نتیجه کار یکسان خواهد بود. بمنظور انجام آزمایشها، ابتدا تمام مراحل را از دو فاز پر کرده و همزمان پمپ‌ها و میکسرها را روشن کرده و سپس با کنترل کردن سطح فصل مشترک^{۱۶} در هر ستلر، کل مراحل را پایدار^{۱۷} می‌کنیم. از طرف دیگر، برای اینکه نتایج بدست آمده کاملاً دقیق باشد به سیستم زمان کافی داده می‌شود تا کل دو فاز موجود در مراحل خارج شده و بعد از این زمان، شروع به نمونه‌برداری از هر دو فاز در تمام مراحل می‌کنیم. نمونه‌های گرفته شده سریعاً به ظروف مخصوص

منتقل می‌شوند و بعد از رقیق شدن به کمک ترازوهای دقیق دیجیتالی، بمنظور اندازه‌گیری غلظت استن در دو فاز به آزمایشگاه کروماتوگرافی گازی فرستاده می‌شوند. در پایان هر آزمایش، بمنظور بدست آوردن ماندگی هر مرحله، پمپ‌ها و میکسرها را بطور همزمان خاموش کرده و به کمک یک پمپ مکش دو فاز را از هر مرحله تخلیه کرده و حجم آنها را بدست می‌آوریم. بمنظور اطمینان از نتایج، بعضی از آزمایشها دو تا سه مرتبه تکرار شدند. همچنین باید یادآوری کرد که زمان انجام هر آزمایش بسته به شرایط عملیاتی بین سه تا پنج ساعت می‌باشد. البته لازم به ذکر می‌باشد که در هنگام اندازه‌گیری استن توسط دستگاه کروماتوگرافی گازی (G.C.) ممکن است مقداری خطا وجود داشته باشد که با توجه به نمونه‌های

Efficiency vs. propeller speed

Q(water)=47.05 ml/min ,Q(toluene)=52.9 ml/min



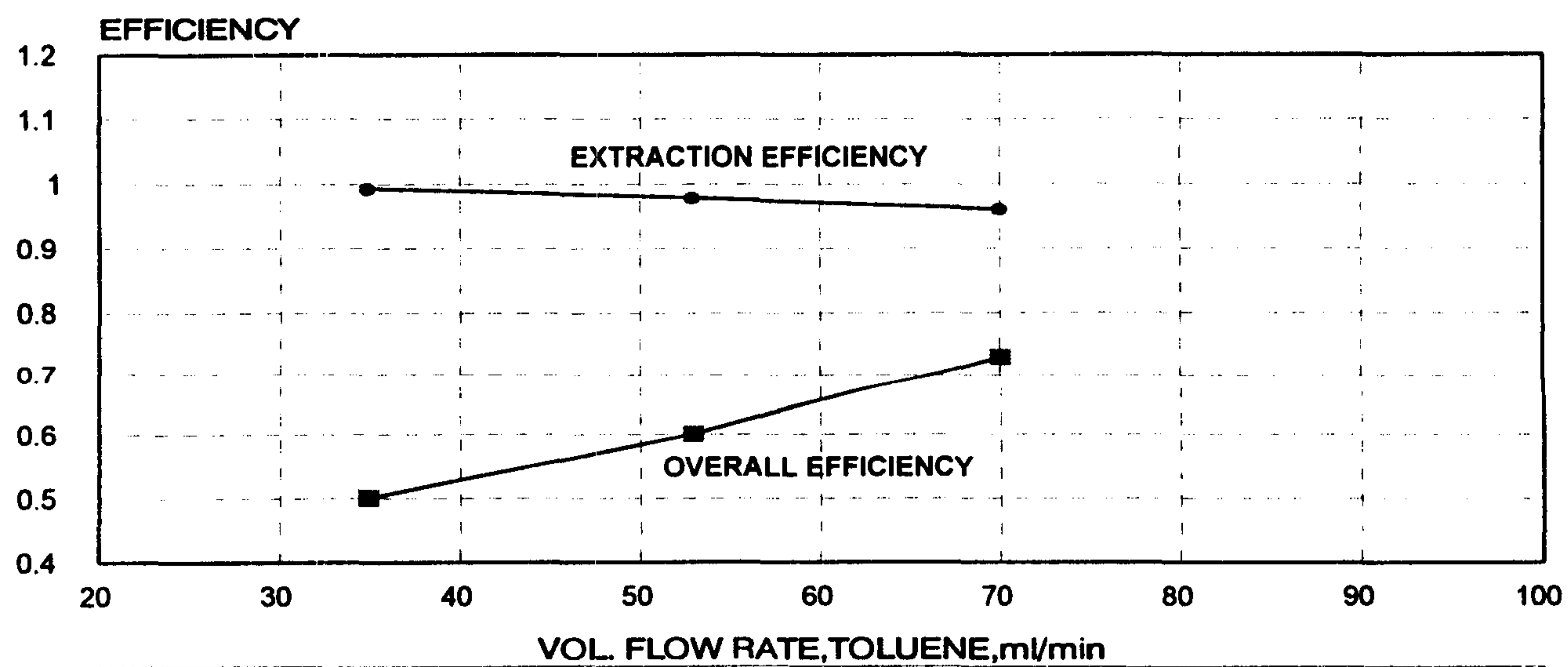
	800	900	1000
EXTRACTION EFF.	0.9547	0.9621	0.9791
OVERALL EFF.	0.69	0.65	0.6

● EXTRACTION EFF. ■ OVERALL EFF.

شکل ۴ : منحنی تغییرات راندمانهای جداسازی و کلی با دور همزن.

Efficiency vs. Vol.Flow Rate of Toluene

Q(water)=47.05 ml/min, N=1000 rpm



	34.85	52.9	70
EXTRACTION EFF.	0.9933	0.9791	0.9609
OVERALL EFF.	0.5	0.6	0.73

● EXTRACTION EFF. ■ OVERALL EFF.

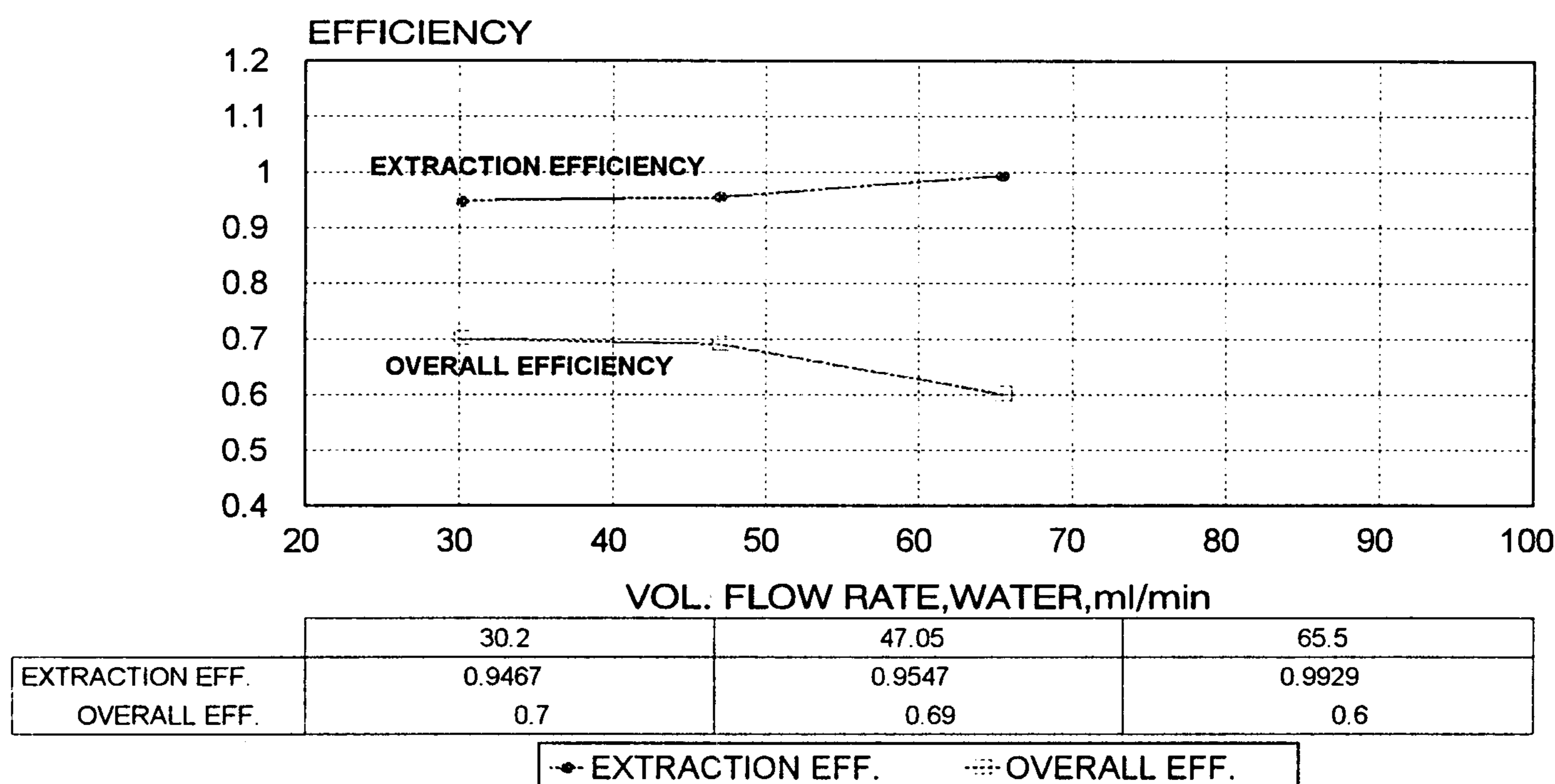
شکل ۵ : منحنی تغییرات راندمانهای جداسازی و کلی با دبی حجمی فاز سبک .

یکنواخت^{۱۸} تأثیر بگذارد ولی با گذشت کمتر از چند ثانیه سیستم به حالت اولیه برمی‌گردد. همچنین در هنگام تعیین تعداد مراحل ایده‌آل برای محاسبه راندمان کلی بر اساس منحنی‌های عملیاتی و تعادلی مقداری خطا وجود

استاندارد ساخته شده، این خطا کمتر از سه درصد می‌باشد. همچنین از آنجاییکه در هنگام نمونه برداری از مراحل، مقداری از دو فاز از سیستم خارج می‌شود ممکن است برای مدت زمان بسیار کوتاه بر روی شرایط حالت

Efficiency vs. Vol.Flow Rate of Water

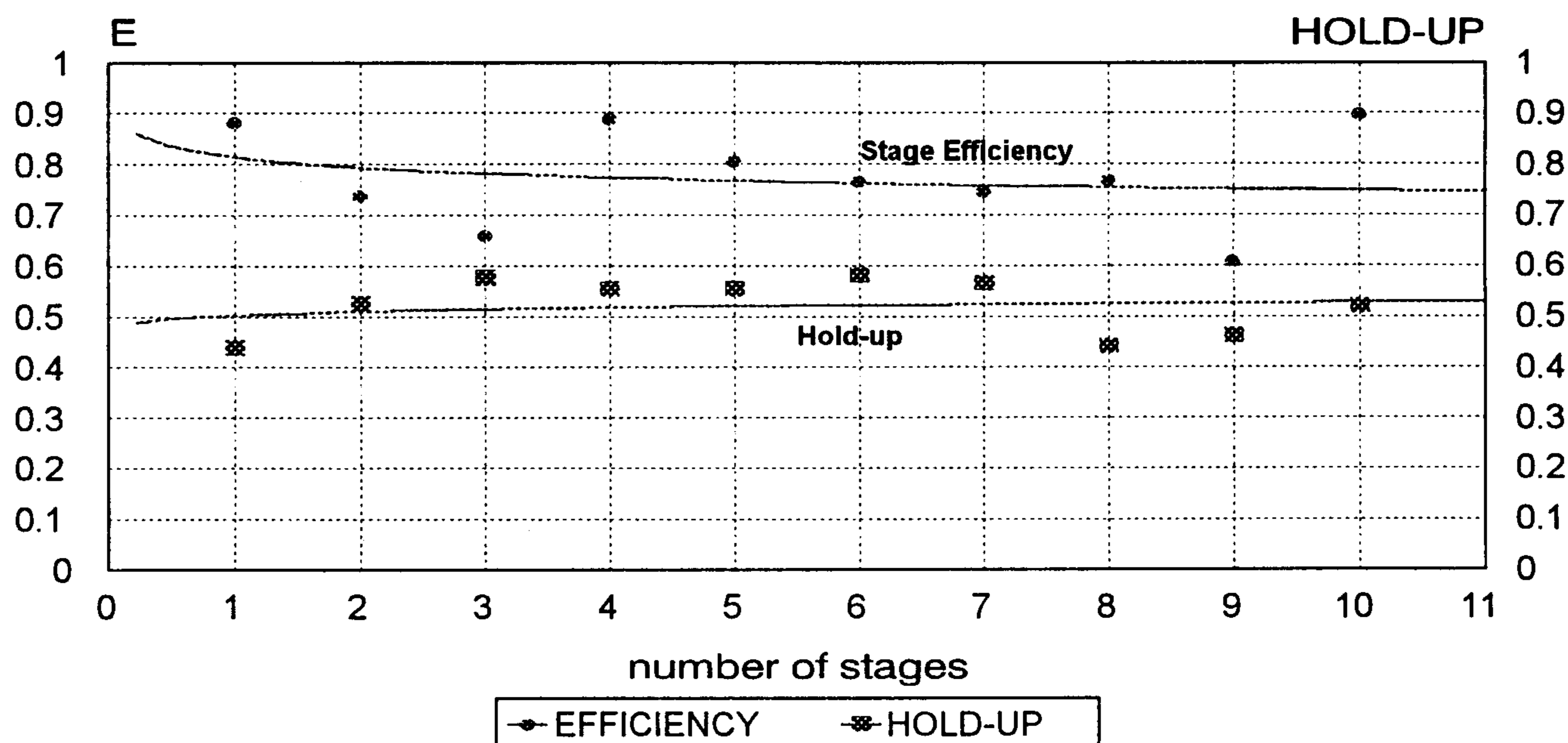
$Q(\text{toluene})=52.9 \text{ ml/min}$, $N=800 \text{ rpm}$



شکل ۶: منحنی تغییرات راندمانهای جداسازی و کلی با دبی حجمی فاز سنگین.

Stage Efficiency & Hold-up profile

$Q(\text{water})=47.05 \text{ ml/min}$, $Q(\text{toluene})=52.9 \text{ ml/min}$, $N=1000 \text{ rpm}$



شکل ۷: منحنی تغییرات راندمان مرحله ای و ماندگی در طول مراحل میکسر-ستلر.

در سری اول آزمایشها، در دبی حجمی مشخصی از دو فاز سبک و سنگین، و در سه دور مختلف (۸۰۰، ۹۰۰ و ۱۰۰۰ دور در دقیقه) با غلظت مشخصی از استن در تولوئن (حدوداً ۳٪ جرمی)، از هر مرحله دو نمونه بترتیب از فاز سبک (تولوئن) و فاز سنگین (آب) گرفته شد و

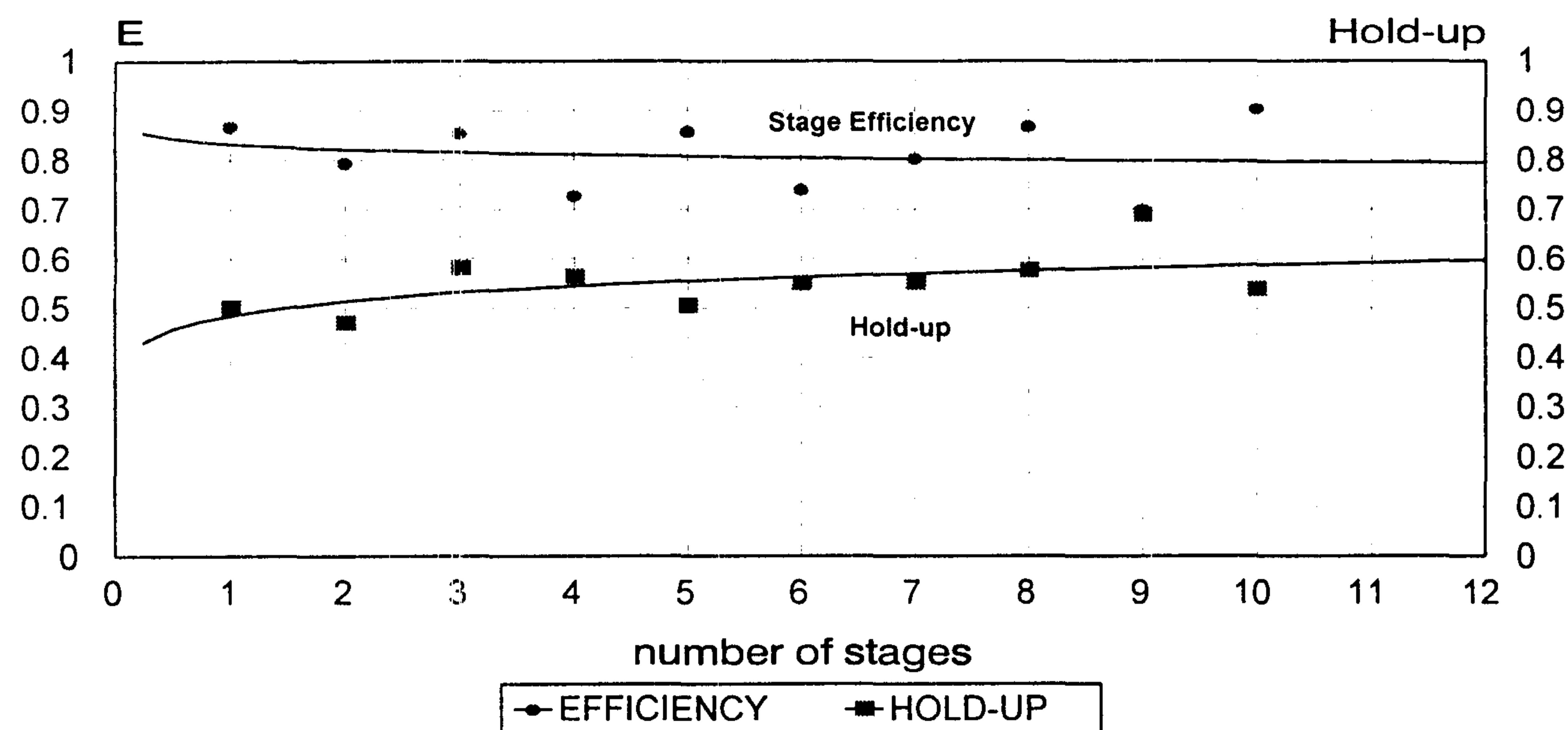
دارد. بطور کلی سه سری آزمایش بمنظور بررسی تأثیر دور همزن، دبی حجمی فاز پراکنده (فاز سبک) و دبی حجمی فاز پیوسته (فاز سنگین) برروی راندمان و ضرایب کلی حجمی انتقال جرم انجام شده است.

آورد. در این سری از آزمایشها اثر دور همزن بر روی راندمان و ضرایب کلی حجمی انتقال جرم بررسی شده است.

غلظت استن در دو فاز بدست آمد. با داشتن غلظتها و منحنی تعادلی و به کمک روابط (۷ و ۵،۳،۲،۱)، می توان راندمانها و ضرایب کلی حجمی انتقال جرم را بدست

Stage Efficiency & Hold-up profile

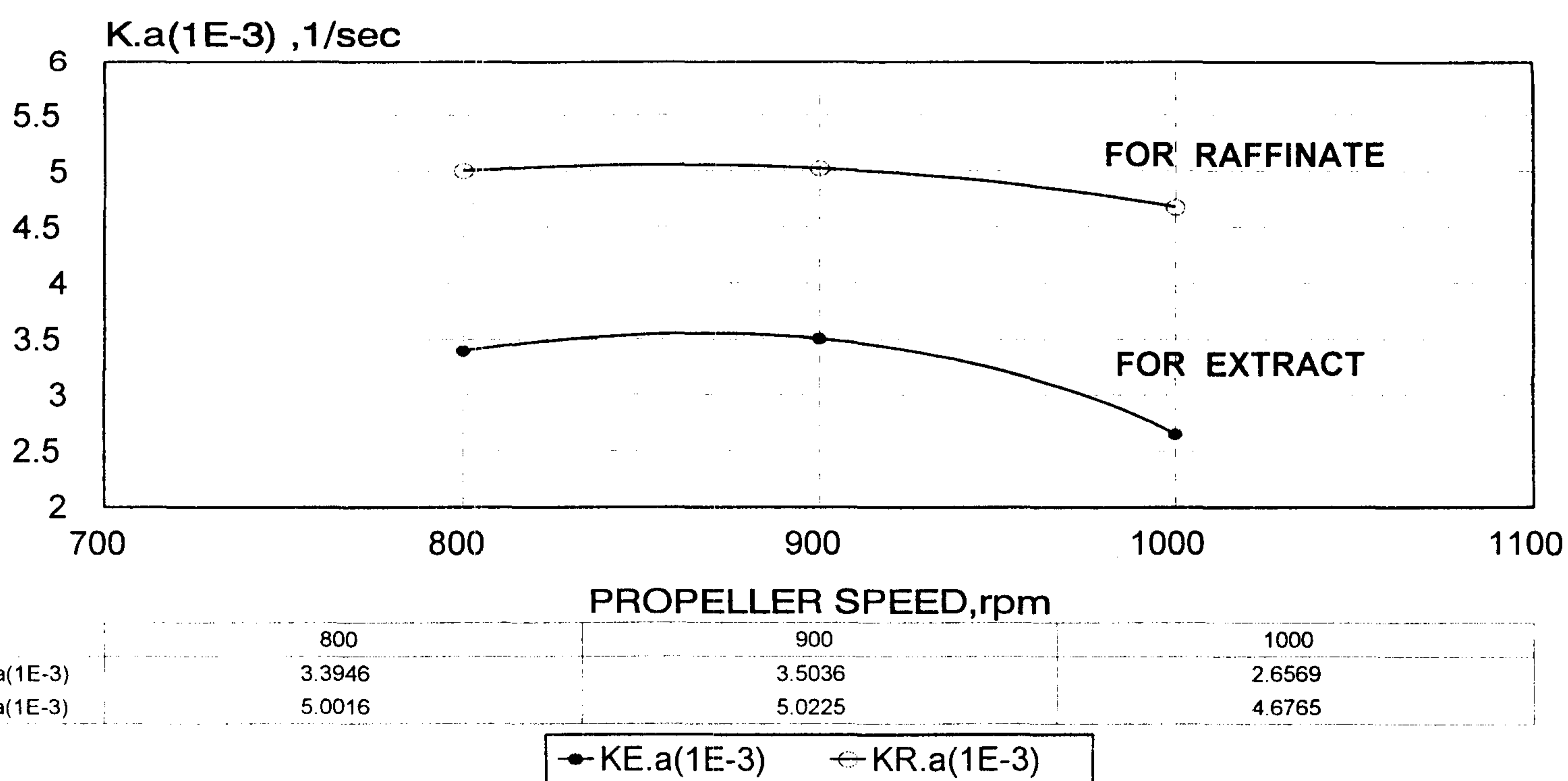
$Q(\text{water})=47.05\text{ml/min}$, $Q(\text{toluene})=70\text{ml/min}$, $N=1000\text{ rpm}$



شکل ۸ : منحنی تغییرات راندمان مرحله ای و ماندگی در طول مراحل میکسر-ستلر.

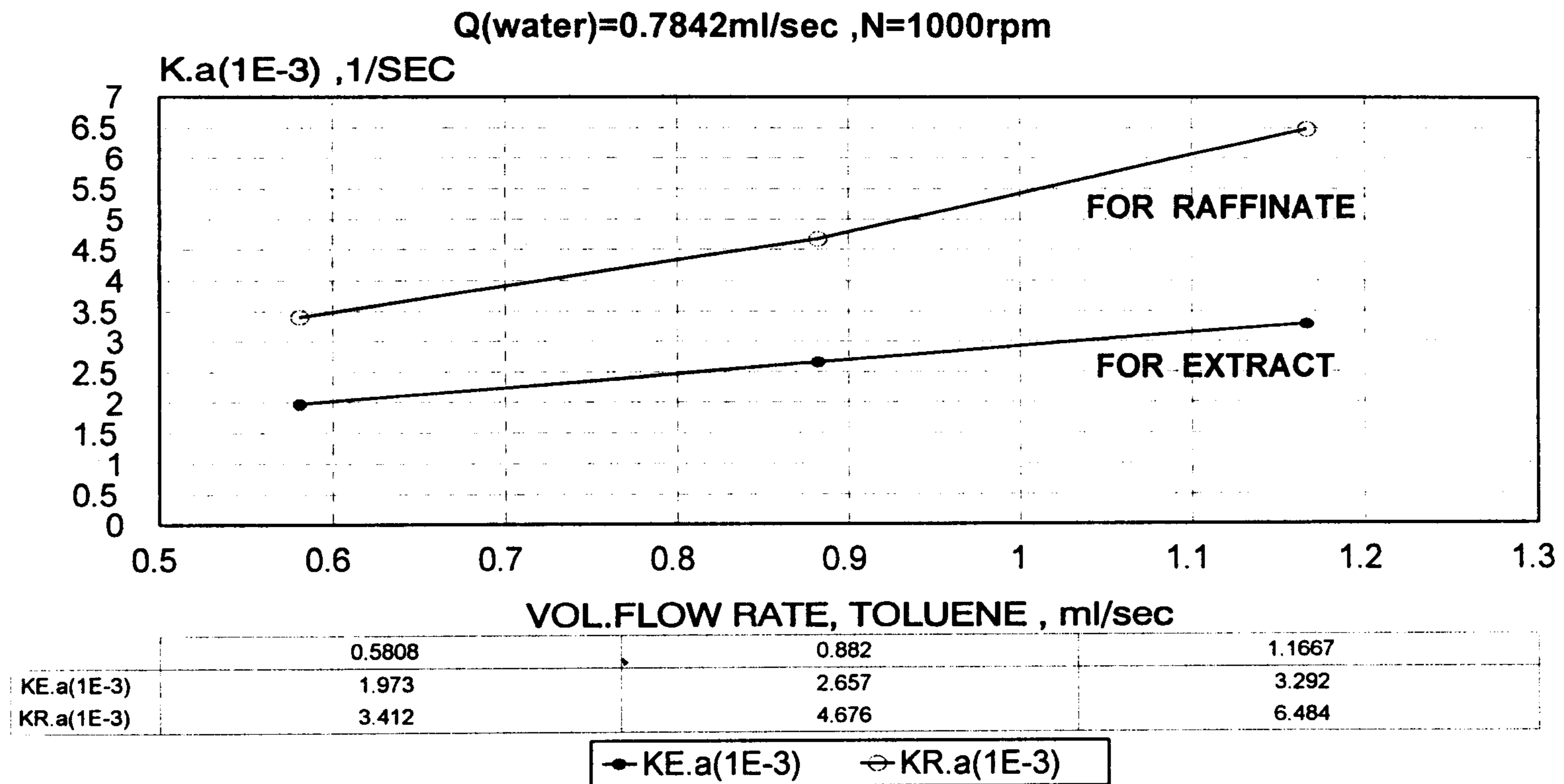
COMPARISON OF MASS TRANSFER COEFICIENTS VS. PROPELLER SPEED

$Q(\text{water})=0.7842\text{ml/sec}$, $Q(\text{toluene})=0.882\text{ml/sec}$



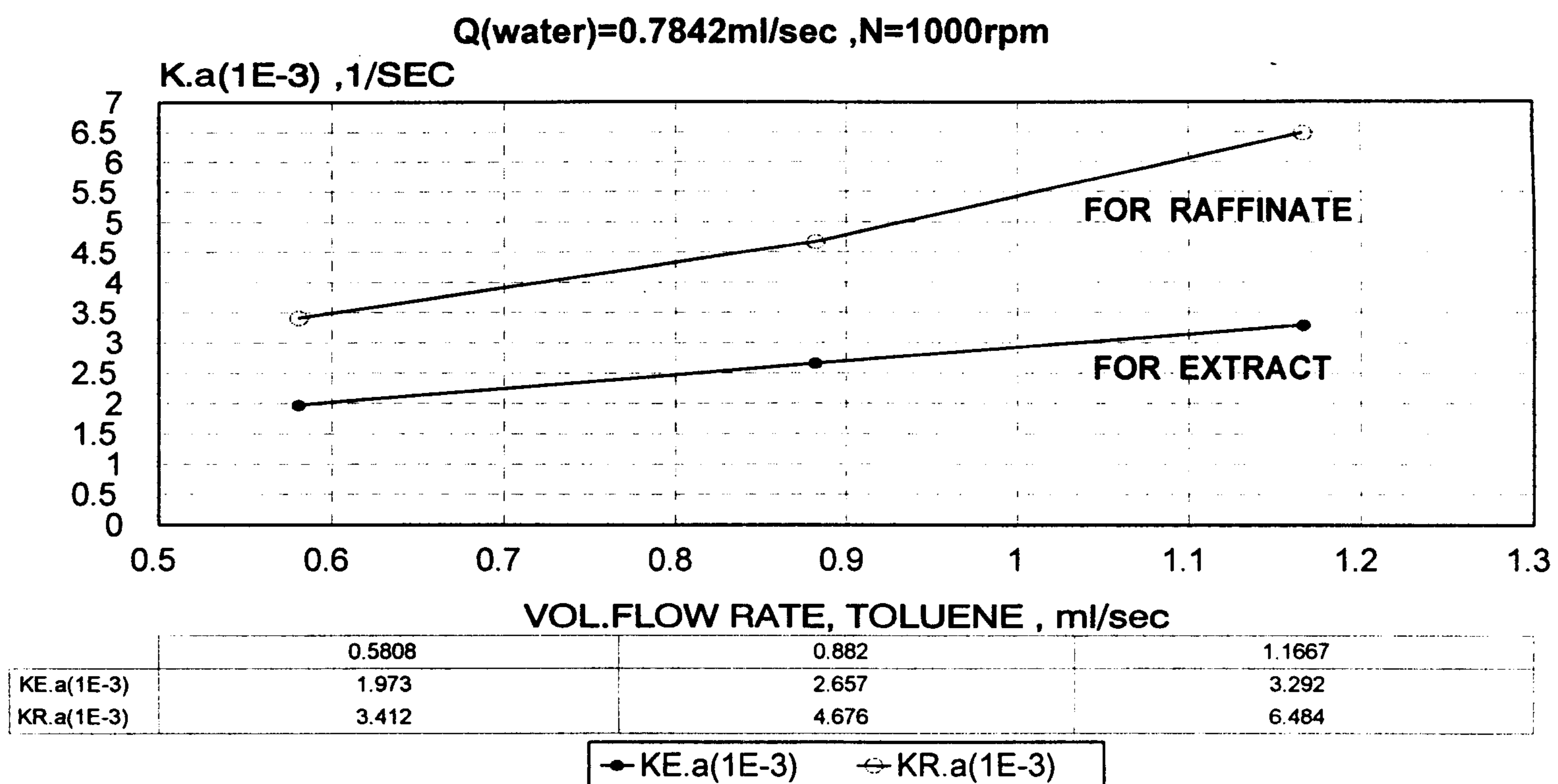
شکل ۹ : تاثیر دور همزن بر روی ضرایب کلی حجمی انتقال جرم در دو فاز Raffinate و Extract.

COMPARISON OF MASS TRANSFER COEFFICIENTS VS. VOL.FLOW RATE OF TOLUENE



شکل ۱۰ : تاثیر دبی حجمی فاز سبک بر روی ضرایب کلی حجمی انتقال جرم در دو فاز Extract و Raffinate.

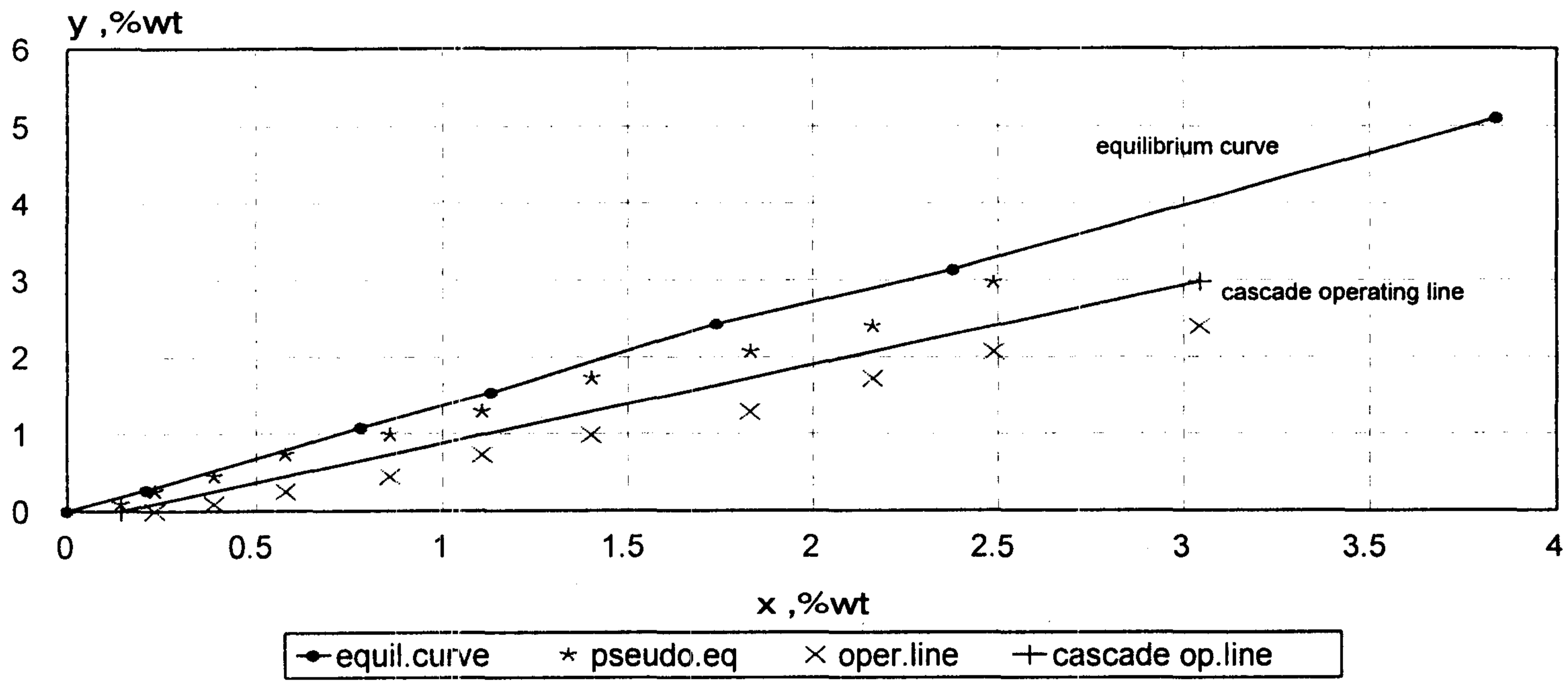
COMPARISON OF MASS TRANSFER COEFFICIENTS VS. VOL.FLOW RATE OF TOLUENE



شکل ۱۱ : تاثیر دبی حجمی فاز سنگین بر روی ضرایب کلی حجمی انتقال جرم در دو فاز Extract و Raffinate.

operating line

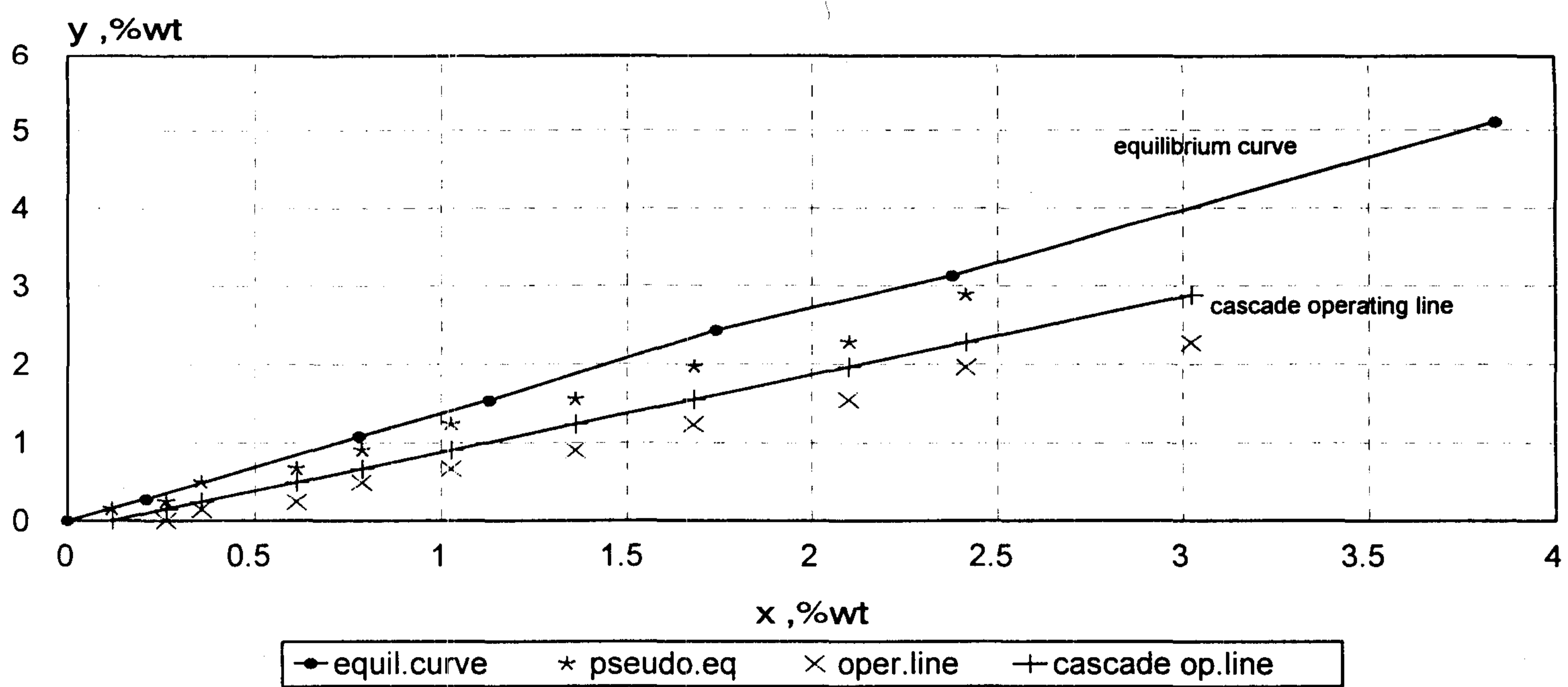
$Q(\text{water})=47.05\text{ml/min}$, $Q(\text{toluene})=52.9\text{ml/min}$, $N=800\text{rpm}$



شکل ۱۲ : منحنی عملیاتی دستگاه میکسر - ستلر.

operating line

$Q(\text{water})=47.05\text{ml/min}$, $Q(\text{toluene})=52.9\text{ml/min}$, $N=900\text{rpm}$



شکل ۱۳ : منحنی عملیاتی دستگاه میکسر - ستلر.

کلی کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، ماندگی هر یک از مراحل نیز بر روی راندمان مرحله‌ای مؤثر است و انتظار می‌رود که با افزایش ماندگی فاز پراکنده در هر مرحله، راندمان مرحله‌ای کاهش یابد (شکل‌های ۷ و ۸). البته باید یادآوری شود که علاوه بر ماندگی، زمان اقامت فازها نیز در ارتباط مستقیم با راندمان می‌باشد همانطوریکه نویسندگان قبلاً این را نشان داده‌اند [۷].

ب - با توجه به منحنی‌های تغییرات راندمان بر حسب دبی حجمی فازها در دور ثابت (شکل‌های ۵ و ۶)، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش دبی حجمی فاز پراکنده، میزان جداسازی یا بعبارت دیگر راندمان جداسازی کاهش می‌یابد. کاهش میزان جداسازی و میزان انتقال جرم به مفهوم نزدیک شدن منحنی عملیاتی به منحنی تعادلی (در شرایط یکسان) است (شکل‌های ۱۵، ۱۶ و ۱۷) و نتیجتاً راندمان کلی افزایش می‌یابد. همچنین از طرف دیگر، افزایش دبی حجمی فاز پیوسته باعث افزایش میزان جداسازی و راندمان جداسازی خواهد شد و این به معنای دور شدن منحنی عملیاتی از منحنی تعادلی (در شرایط یکسان) است (شکل‌های ۱۸، ۱۹ و ۲۰) و انتظار می‌رود که در شرایط یکسان راندمان کلی کاهش یابد همانطوریکه نویسندگان قبلاً این را نشان داده‌اند [۷].

ج - از منحنی تغییرات ضرایب کلی حجمی انتقال جرم بر حسب سرعت همزن (شکل ۹)، می‌توان دریافت که تا یک دور خاص، ضرایب کلی حجمی انتقال جرم افزایش یافته و بعد از آن کاهش می‌یابند.

د - از منحنی تغییرات ضرایب کلی حجمی انتقال جرم بر حسب دبی حجمی فاز پراکنده در دور ثابت (شکل ۱۰)، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش دبی حجمی فاز پراکنده، ضرایب کلی حجمی انتقال جرم افزایش می‌یابند. همچنین از منحنی تغییرات ضرایب کلی حجمی انتقال جرم بر حسب دبی حجمی فاز پیوسته در دور ثابت (شکل ۱۱)، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش دبی حجمی فاز پیوسته، میزان جداسازی و میزان انتقال جرم افزایش می‌یابد و انتظار می‌رود که ضرایب کلی حجمی انتقال جرم افزایش یابند.

در سری دوم آزمایشها، در یک دور ثابت (۱۰۰۰ دور در دقیقه) و در سه دبی حجمی مختلف برای فاز سبک و در یک دبی حجمی ثابت فاز سنگین، از هر مرحله دو نمونه گرفته شد و مقادیر غلظت استن در دو فاز برای تمام مراحل بدست آمد و در نتیجه با داشتن غلظت‌ها و منحنی تعادلی و به کمک روابط (۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۷)، می‌توان راندمان‌ها و ضرایب کلی حجمی انتقال جرم را بدست آورد. در این سری از آزمایشها اثر دبی حجمی فاز سبک مورد بررسی قرار گرفت.

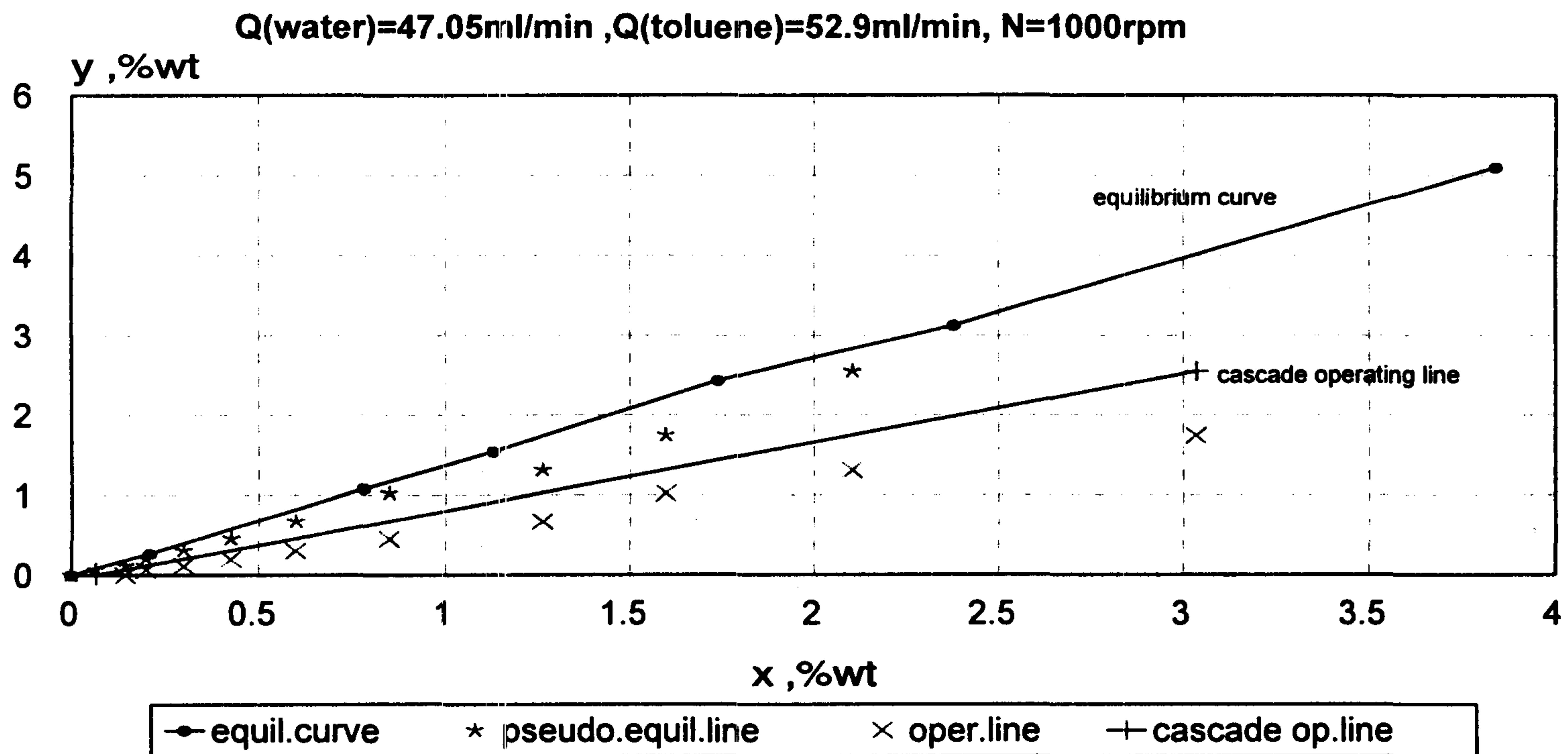
در سری سوم آزمایشها نیز در یک دور ثابت (۸۰۰ دور در دقیقه) و در سه دبی حجمی مختلف برای فاز سنگین و در یک دبی حجمی ثابت فاز سبک، از هر مرحله دو نمونه گرفته شد و مقادیر غلظت استن در دو فاز برای تمام مراحل بدست آمد و در نتیجه با داشتن غلظت‌ها و منحنی تعادلی و به کمک روابط (۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۷)، می‌توان راندمان‌ها و ضرایب کلی حجمی انتقال جرم را بدست آورد. در این سری از آزمایشها اثر دبی حجمی فاز سنگین مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج تجربی

شکل‌های (۴)، (۵) و (۶) بترتیب تأثیر دور همزن، دبی حجمی فاز سبک و دبی حجمی فاز سنگین را بر روی راندمان و شکل‌های (۷) و (۸) تغییرات ماندگی و راندمان مرحله‌ای را در طول مراحل میکسر-ستلر و شکل‌های (۹)، (۱۰) و (۱۱) بترتیب تأثیر دور همزن، دبی حجمی فاز سبک و دبی حجمی فاز سنگین را بر روی ضرایب کلی حجمی انتقال جرم در دو فاز نشان می‌دهند. از منحنی‌های حاصله می‌توان نتایج زیر را بدست آورد:

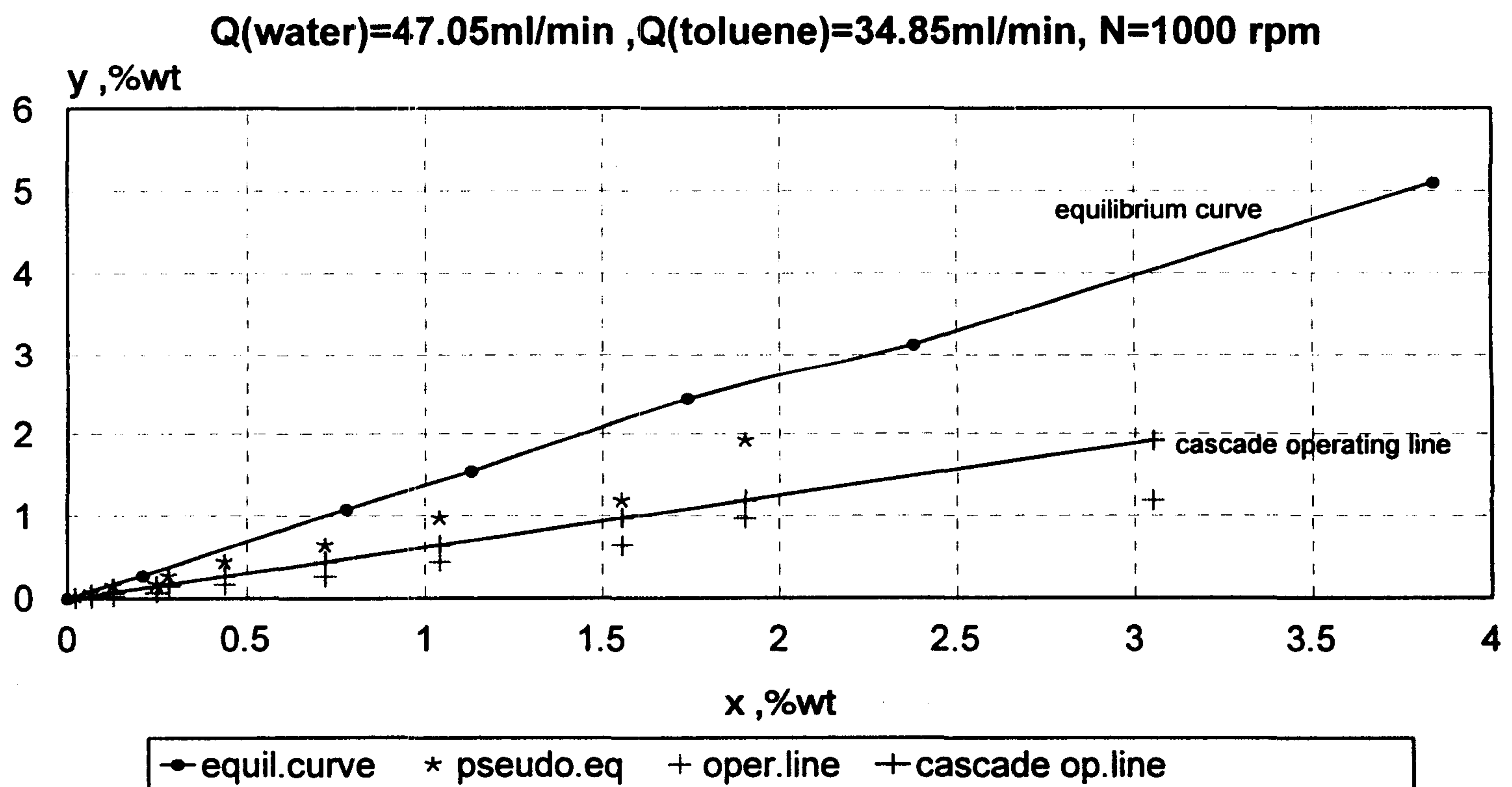
الف - از منحنی تغییرات راندمان بر حسب سرعت همزن (شکل ۴)، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش دور همزن، میزان انتقال جرم و راندمان جداسازی (راندمان استخراج) افزایش می‌یابد. از طرفی افزایش میزان انتقال جرم به مفهوم کارایی بهتر دستگاه می‌باشد و این به معنای دور شدن منحنی عملیاتی از منحنی تعادلی (در شرایط یکسان) است (شکل‌های ۱۲، ۱۳ و ۱۴) و بنابراین راندمان

operating line



شکل ۱۴: منحنی عملیاتی دستگاه میکسر - ستار.

operating line



شکل ۱۵: منحنی عملیاتی دستگاه میکسر - ستار.

جداسازی افزایش می‌یابند. از طرف دیگر، افزایش میزان انتقال جرم به مفهوم کارایی بهتر دستگاه می‌باشد و این خود به معنای دور شدن منحنی عملیاتی از منحنی تعادلی (در شرایط یکسان) می‌باشد و در نتیجه با توجه به

بحث و نتیجه‌گیری

۱- با افزایش دور همزن در دبی حجمی ثابت فازهای سبک و سنگین، بعلت افزایش تعداد قطرات، سطح تماس افزایش یافته و در نتیجه میزان انتقال جرم و راندمان

شرایط بوجود آمده، تعداد مراحل ایده‌آل کاهش یافته و نتیجتاً راندمان کلی کاهش می‌یابد.

۲- افزایش دبی حجمی فاز سبک (خوراک)، یا بعبارت دیگر کاهش میزان حلال نسبت به خوراک، باعث کاهش میزان استخراج شده و در نتیجه راندمان جداسازی کاهش می‌یابد و کاهش راندمان جداسازی به مفهوم کارایی نامناسب دستگاه می‌باشد و این خود به معنای نزدیک شدن منحنی عملیاتی به منحنی تعادلی می‌باشد و با توجه به شرایط بوجود آمده، تعداد مراحل ایده‌آل افزایش یافته و نتیجتاً راندمان کلی افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، افزایش دبی حجمی فاز سنگین به مفهوم افزایش حلال نسبت به خوراک می‌باشد و در نتیجه میزان جداسازی افزایش خواهد یافت و نتیجتاً راندمان جداسازی افزایش می‌یابد.

۳- با افزایش دور همزن در دبی حجمی ثابت دو فاز تا یک دور خاص، بعلاوه افزایش تعداد قطرات و در نتیجه افزایش سطح تماس، شدت انتقال جرم و ضرایب کلی حجمی انتقال جرم افزایش می‌یابند، ولی از یک دور خاص به بعد، بعلاوه کوچک شدن بیش از اندازه قطرات و افزایش زیاد تعداد قطرات، هم مکانیسم انتقال جرم تغییر یافته و هم وجود قطرات زیاد در اطراف هر قطره و تأثیر قطرات بر روی یکدیگر، باعث افزایش مقاومت در برابر انتقال جرم و کاهش عدد شروود خواهد شد [۸] و در نتیجه شدت انتقال جرم و ضرایب انتقال جرم کاهش می‌یابند و این نکته می‌تواند برای دستیابی به سرعت بحرانی در میکسرها بسیار مفید واقع گردد.

۴- افزایش دبی حجمی فاز سبک در یک دور ثابت برای تمام مراحل، باعث افزایش ضرایب انتقال جرم خواهد شد زیرا با افزایش دبی حجمی فاز پراکنده، تعداد قطرات و سطح تماس افزایش یافته و این خود باعث افزایش شدت انتقال جرم و افزایش ضرایب کلی حجمی انتقال جرم خواهد شد.

۵- افزایش دبی حجمی فاز سنگین در یک دور ثابت به مفهوم افزایش میزان حلال نسبت به خوراک می‌باشد و در نتیجه میزان جداسازی افزایش یافته و یا بعبارت دیگر باعث افزایش میزان شدت انتقال جرم شده و در نتیجه

ضرایب انتقال جرم افزایش خواهند یافت.

۶- با توجه به اطلاعات بدست آمده از آزمایشها، می‌توان نتیجه گرفت که در هر آزمایش ضرایب کلی حجمی انتقال جرم مربوط به هر مرحله در مقایسه با مراحل دیگر تفاوت چندانی ندارد و از اینرو می‌توان یک ضریب کلی حجمی انتقال جرم متوسط برای تمام مراحل تعریف کرد و می‌توان از این ضریب کلی حجمی متوسط، بعنوان مبنایی برای انجام محاسبات و طراحی استفاده نمود.

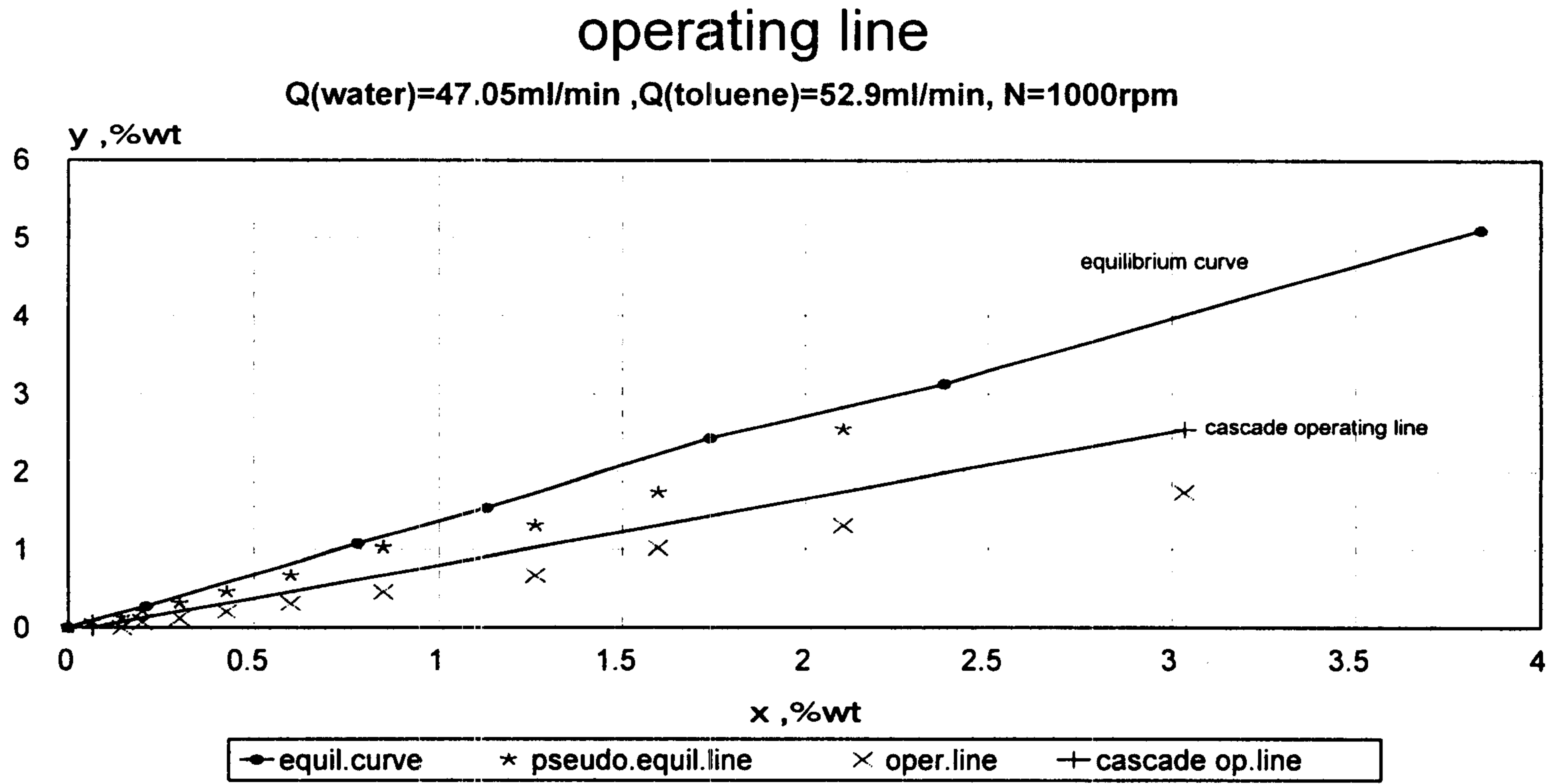
۷- بطور کلی از نتایج حاصله از این آزمایشها و برای این سیستم شیمیایی خاص، می‌توان دریافت که در دستگاههای استخراج کننده میکسر ستلر، مقاومت در برابر انتقال جرم در هر دو فاز قابل توجه بوده و نمی‌توان از مقاومت هیچ یک از فازها صرف‌نظر نمود.

۸- در هر یک از آزمایشهای انجام شده، مشاهده می‌شود که ماندگی هر مرحله و ماندگی متوسط تمام مراحل، تا حدودی بر روی راندمان تأثیر دارد. البته باید یادآور شد که ماندگی خود تابعی از دبی حجمی فازها و دور همزن می‌باشد.

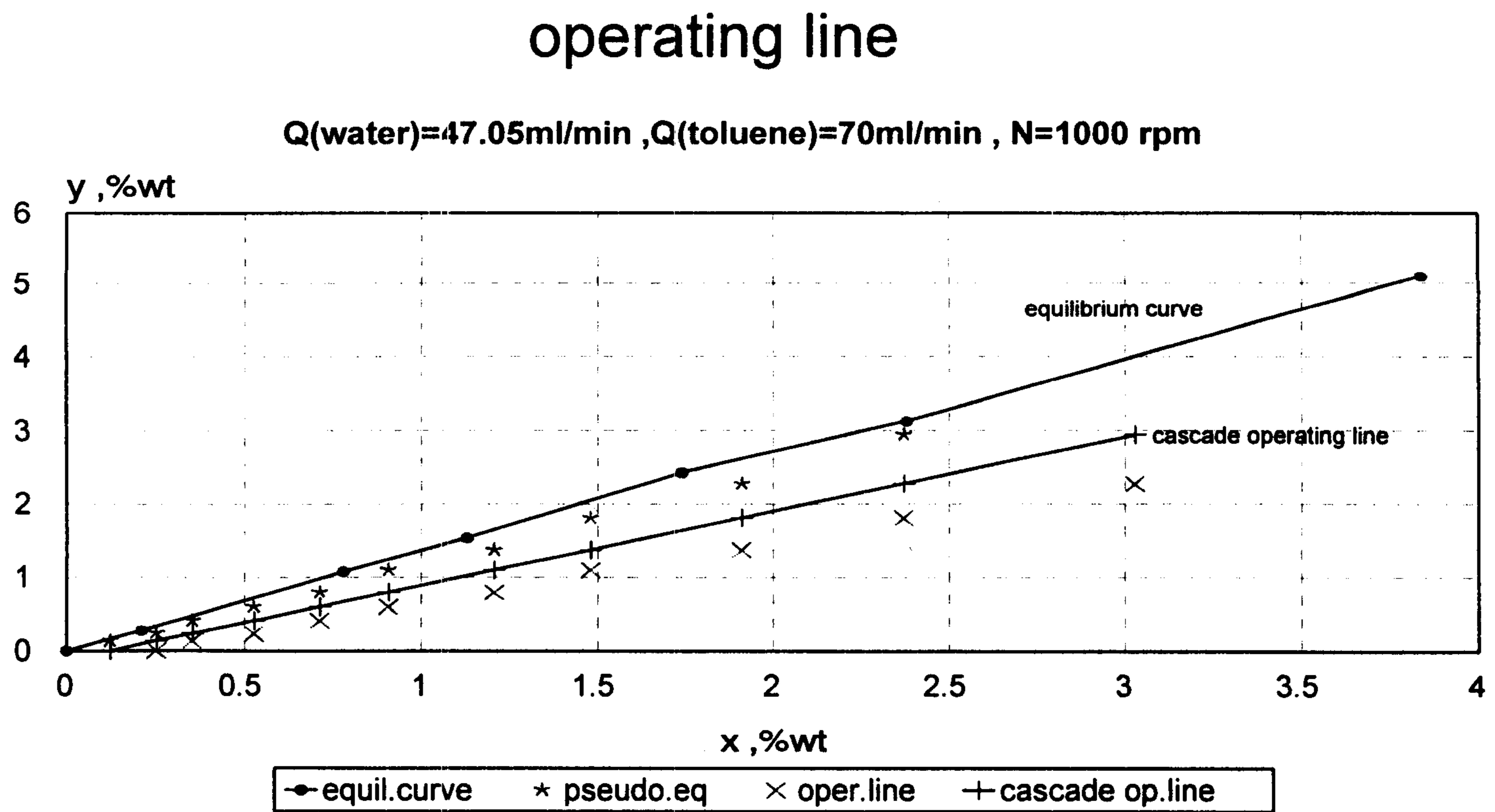
۹- بطور کلی می‌توان گفت ضرایب انتقال جرم و راندمانها از جمله پارامترهای مورد نیاز برای ارائه یک طراحی مناسب می‌باشند. اصولاً در طراحی میکسر-ستلرها، تعداد مراحل، میزان استخراج، دور مناسب همزن، نسبت دبی حجمی فازها و میزان حلال مصرفی از پارامترهای تعیین کننده می‌باشند که در این مقاله این موارد مورد بررسی قرار گرفته‌اند و با توجه به این اطلاعات می‌توان یک نوع طراحی مناسب برای این نوع از میکسر-ستلرهای افقی ارائه نمود.

تشکر و قدردانی

در اینجا لازم می‌دانم از آقای محمدرضا رضوانیان زاده کارشناس ارشد شیمی، آقای علی اصغر قربانپور کارشناس ارشد مهندسی شیمی، آقای حسن زهره و سایر پرسنل محترم آزمایشگاههای تحقیقاتی جابر بن حیان که در انجام آزمایشها نهایت همکاری را داشته‌اند تشکر و قدردانی نمایم



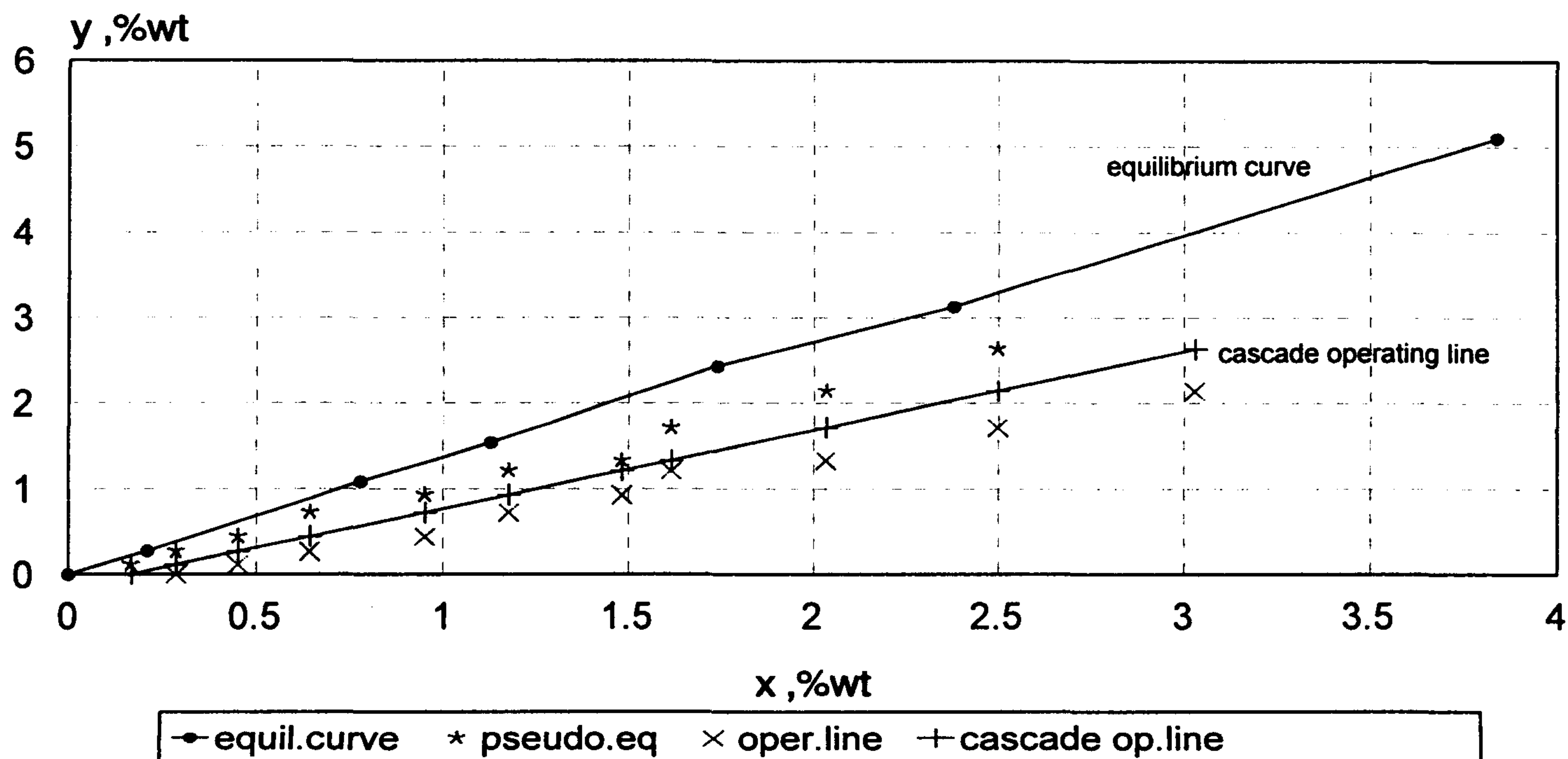
شکل ۱۶ : منحنی عملیاتی دستگاه میکسر - ستلر.



شکل ۱۷ : منحنی عملیاتی دستگاه میکسر - ستلر.

operating line

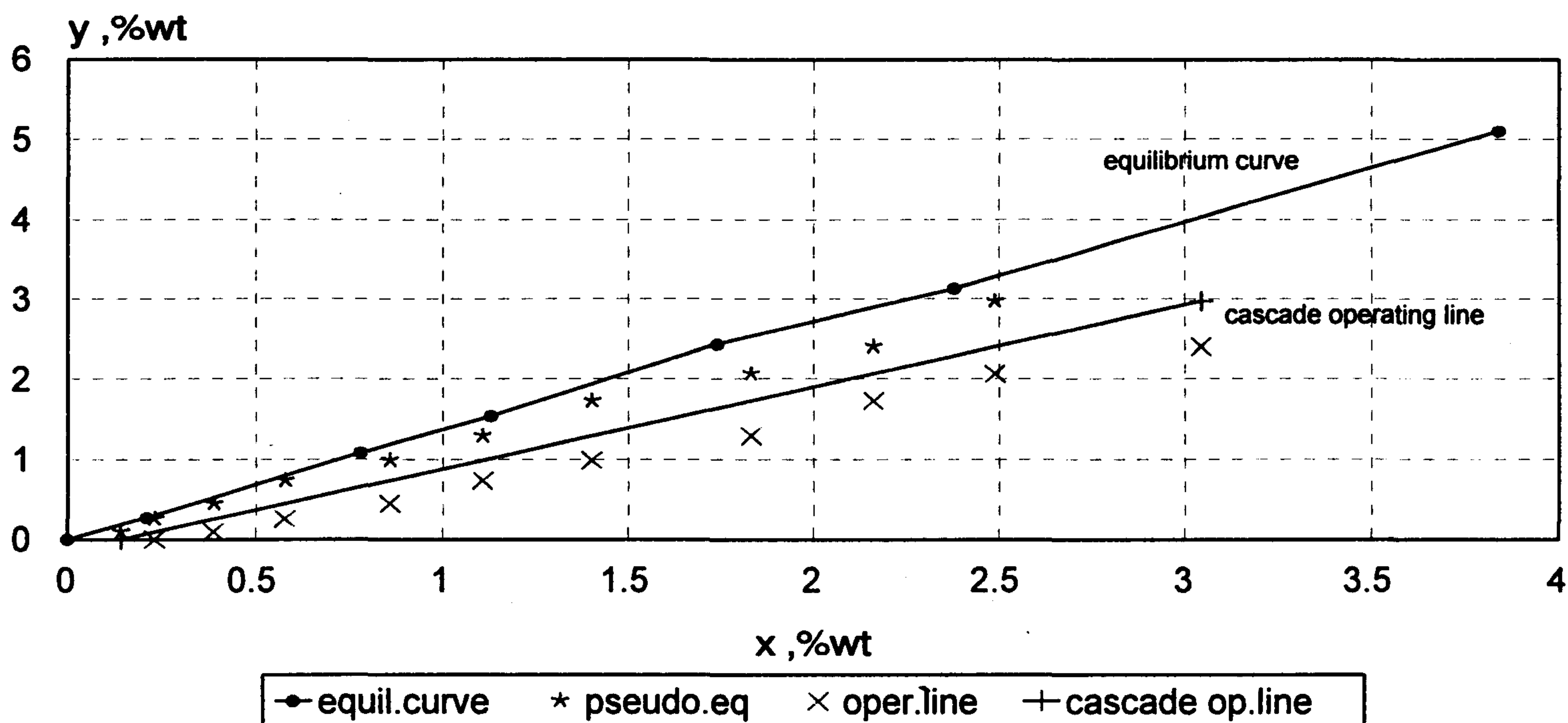
$Q(\text{water})=30.2\text{ml/min}$, $Q(\text{toluene})=52.9\text{ml/min}$, $N=800\text{ rpm}$



شکل ۱۸ : منحنی عملیاتی دستگاه میکسر - ستلر.

operating line

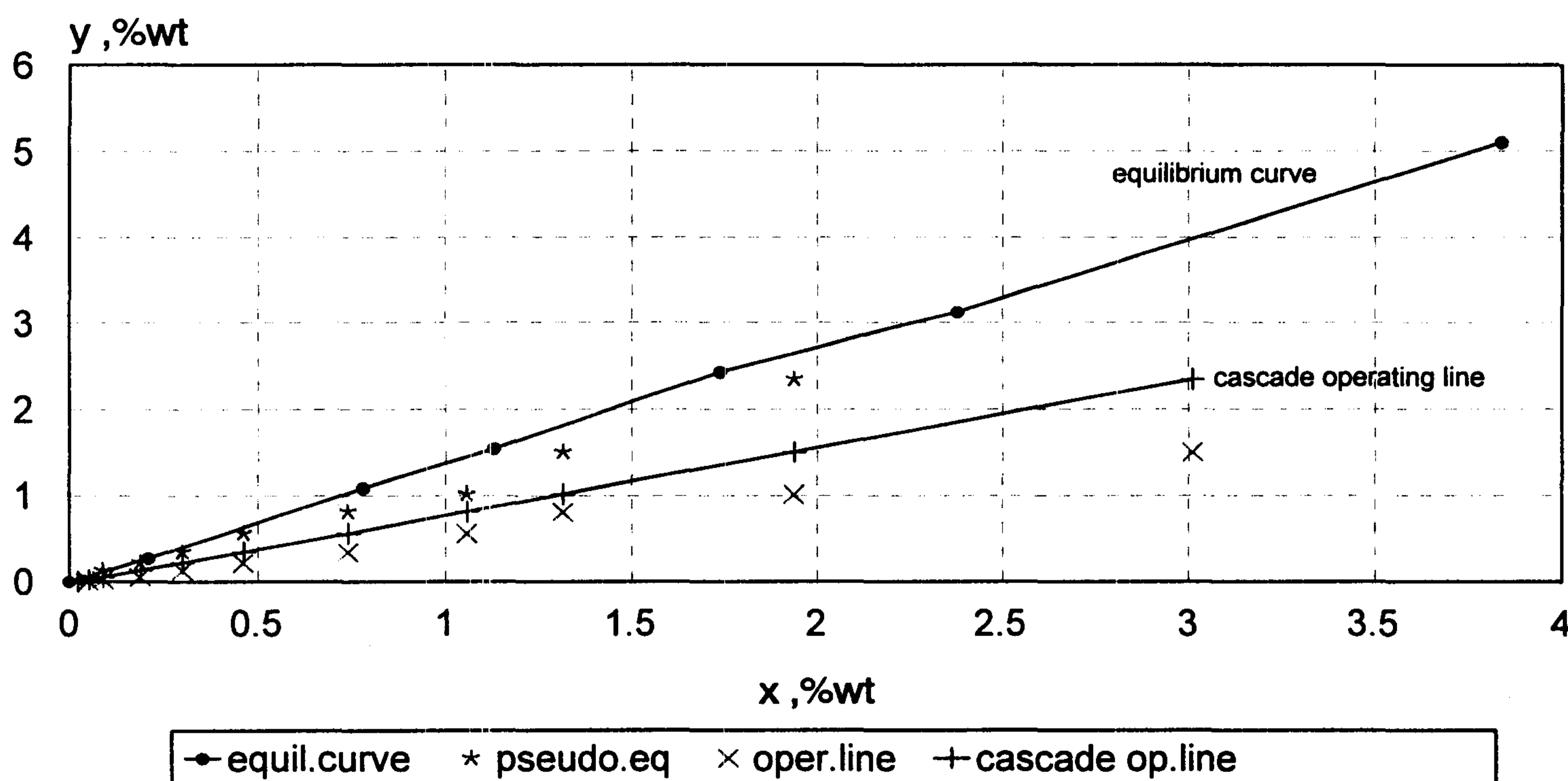
$Q(\text{water})=47.05\text{ml/min}$, $Q(\text{toluene})=52.9\text{ml/min}$, $N=800\text{rpm}$



شکل ۱۹ : منحنی عملیاتی دستگاه میکسر - ستلر.

operating line

$Q(\text{water})=65.5\text{ml/min}$, $Q(\text{toluene})=52.9\text{ml/min}$, $N=800\text{ rpm}$



شکل ۲۰: منحنی عملیاتی دستگاه میکسر - ستلر.

فهرست علائم

y_e : جزء جرمی تعادلی استن در فاز Extract
 E_o : راندمان کلی
 N_{ideal} : تعداد مراحل ایده‌آل
 N_{actual} : تعداد مراحل واقعی
 \dot{m}_R : دبی جرمی فاز سبک یا فاز Raffinate ، gr/sec
 x_{in} : جزء جرمی استن در فاز Raffinate در ورودی هر مرحله
 x_{out} : جزء جرمی استن در فاز Raffinate در خروجی هر مرحله
 x^* : جزء جرمی تعادلی استن در فاز Raffinate متناظر با فاز Extract
 $C_{R_{out}}$: غلظت جرمی استن در فاز Raffinate در خروجی هر مرحله ، gr/cm^3
 C_R^* : غلظت جرمی تعادلی استن در فاز Raffinate متناظر با فاز Extract ، gr/cm^3
 K_R : ضریب کلی انتقال جرم در فاز Raffinate ، m/sec
 a : سطح تماس ویژه ، m^2/m^3 یا cm^2/cm^3

E_{ext} : راندمان استخراج یا راندمان جداسازی
 X_{in} : نسبت جرمی استن به تولوئن در فاز Raffinate در ورودی
 X_{out} : نسبت جرمی استن به تولوئن در فاز Raffinate در خروجی
 X^* : نسبت جرمی تعادلی استن به تولوئن در فاز Raffinate متناظر با فاز Extract
 E_{stage} : راندمان مرحله ای
 x_1 : جزء جرمی استن در فاز Raffinate در ورودی هر مرحله
 x_2 : جزء جرمی استن در فاز Raffinate در خروجی هر مرحله
 x_e : جزء جرمی تعادلی استن در فاز Raffinate
 y_1 : جزء جرمی استن در فاز Extract در ورودی هر مرحله
 y_2 : جزء جرمی استن در فاز Extract در خروجی هر مرحله

Q : دبی حجمی، ml/min یا ml/sec	d_{32} : قطر متوسط ساتر (نسبت حجم به سطح)، cm یا m
N : دور همزن، rpm	V : حجم یک مرحله، m^3 یا cm^3
ρ_{av} : جرم حجمی متوسط در هر فاز، gr/m^3 یا gr/cm^3	\dot{m}_E : دبی جرمی فازسنگین یا فاز Extract، gr/sec
ρ_i : جرم حجمی متوسط هر جزء در هر فاز، gr/m^3 یا gr/cm^3	y_{in} : جزء جرمی استن در فاز Extract در ورودی هر مرحله
ω_i : جزء جرمی هر جزء در هر فاز	y_{out} : جزء جرمی استن در فاز Extract در خروجی هر مرحله
ρ_c : جرم حجمی فاز پیوسته، gr/cm^3	y^* : جزء جرمی تعادلی استن در فاز Extract متناظر با فاز Raffinate
ρ_d : جرم حجمی فاز پراکنده، gr/cm^3	$C_{E,out}$: غلظت جرمی استن در فاز Extract در خروجی هر مرحله، gr/cm^3
μ_c : ویسکوزیته فاز پیوسته، cp	C_E^* : غلظت جرمی تعادلی استن در فاز Extract متناظر با فاز Raffinate، gr/cm^3
μ_d : ویسکوزیته فاز پراکنده، cp	
σ : کشش بین فازی، dyn/cm	

مراجع

- 1 - Godfrey, G. C and Slater, M. J. (1994). *Liquid-liquid extraction*.
- 2 - Laddha, G. S. and Degalecsan, T. E. (1976). *Transport phenomena in liquid extraction*.
- 3 - Berkman, P. D. and Calabrese, R. V. (1988). *AIChE J.*, Vol. 34, No. 602.
- 4 - Kumar, R. and Hartland, S. C. (1985). *J. of Chem. Eng.*, Vol. 63, No. 368.
- 5 - Wichterlova, J. and Rod, V. (1991). "Determination of mixer settler efficiency by a response method." *Ch. Eng. Research & Design*, Vol. 69, No. 4, PP. 282-286.
- 6 - Robert, E. (1963). *Treybal ; liquid extraction*, 150-195, 396-461.
- ۷ - ابوالقاسمی، ح. و همکاران. "بررسی تأثیر دور همزن، دبی حجمی و هلدآپ فاز پراکنده بر روی راندمان دستگاه استخراج کننده میکسر ستلر." پنجمین کنگره ملی مهندسی شیمی-دانشگاه شیراز، اردیبهشت (۱۳۷۹).
- 8 - Skelland, A. H. P. (1970). *Diffusional mass transfer*. PP. 10-55.
- 9 - Fischer America INC. (1991). *Operation manual for mixer-settler extractor*.

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- | | |
|--|-------------------------|
| 1 - Extraction Efficiency | 12 - Stage Efficiency |
| 2 - Hold-Up | 13 - Overall Efficiency |
| 3 - Liquid-Liquid Extraction | 14 - Stage |
| 4 - Mixer-Settler | 15 - Counter-Current |
| 5 - Efficiency | 16 - Interface Level |
| 6 - Overall Volumetric Mass Transfer Coefficient | 17 - Steady State |
| 7 - Unagitated Columns | 18 - Steady-State |
| 8 - Pulsed Columns | |
| 9 - Mechanically Agitated Columns | |
| 10 - High Turbulancy | |
| 11 - Dispersion | |