

## عملکرد رسوب شیره چغندر قند در لوله شیاردار افقی در اثر تزریق حباب هوا

هادی شریفی<sup>۱</sup>، پرویز احمدی مقدم<sup>۲\*</sup>، صمد جعفرمدار<sup>۳</sup>، علی محمد نیکبخت<sup>۴</sup>، عادل حسین پور<sup>۵</sup>

۱. Hadisharifi8rodi@gmail.com

۲. P.ahmadi@urmia.ac.ir

۳. S.jafarmadar@urmia.ac.ir

۴. a.nikbakht@urmia.ac.ir

۵. a.hosainpour@urmia.ac.ir

### چکیده

در مطالعه حاضر، به دلیل تزریق هوا، عملکرد رسوب گذاری یک لوله موجدار محیطی بررسی شد. شیره چغندر قند به عنوان مایعات در لوله تحت شار حرارتی ثابت در نظر گرفته شد. همچنین، میزان جریان شیره چغندر قند در پنج جریان مختلف هوا مورد بررسی قرار گرفت و تأثیر سرعت جریان هوا بررسی شد. سرعت جریان سیال کار با دبی ثابت ۲ لیتر در دقیقه حفظ شد. این آزمایش‌ها برای ۵۰۰۰ ثانیه (۸۴ دقیقه) انجام گرفت. برای درک بهتر از ماهیت جریان، ساختار بخار دو فاز از طریق دوربین Canon SX540 ضبط شده است. نتایج ارائه شده نشان داد که تزریق هوا در لوله شیاردار ساختار سیال را کاملاً تغییر می‌دهد و ساختاری بسیار آشفته برای سیال ایجاد می‌کند. نتایج حرارتی نشان داده است که در طول زمان آزمایش، تزریق هوا ضریب انتقال حرارت را در حدود ۱۲۰٪ بالاتر از یک جریان تک فاز نگه می‌دارد و همچنین نتایج ارزیابی کلی نشان داد که تزریق هوا می‌تواند وزن ماده رسوب شده را تا ۷۵٪ کاهش دهد.

### کلمات کلیدی:

لوله شیاردار، تزریق هوا، شیره چغندر قند، ضریب انتقال حرارت.

\* پرویز احمدی مقدم

## مقدمه

پدیده رسوب گذاری به عنوان مهم ترین مشکل در دستگاه های صنعتی و فرایندهای تولید شناخته می شود [۱،۲]. پدیده رسوب زدایی در دستگاه های حرارتی نه تنها هزینه های تعمیر و نگهداری زیادی را به همراه دارد، بلکه باعث کاهش بازده حرارتی دستگاه ها می شود که منجر به کاهش کارایی کل سیستم هست [۳]. در دهه های اخیر، لوله های موج دار به عنوان یک راه حل برای استفاده در دستگاه های حرارتی پیشنهاد شده است زیرا آن ها دارای عملکرد حرارتی بهتر و طبیعت ضد رسوب در مقایسه با لوله های صاف هستند [۳،۴]. از سوی دیگر، لوله شیاردار توسعه لایه مرزی را قطع می کند و شدت تلاطم جریان اصلی را افزایش می دهد که منجر به بهبود انتقال حرارت و افزایش پایداری بسته ها در جریان می شود [۵،۷]. علاوه بر این، در سال های اخیر استفاده از تزریق هوا به عنوان یک روش بسیار مؤثر برای بهبود انتقال حرارت در دستگاه های حرارتی پیشنهاد شده است [۸،۹]. با این حال، مطالعات بسیار نادر تأثیر هم زمان تزریق هوا و لوله شیاردار بر رسوب و عملکرد حرارتی را مورد بررسی قرار داده است. در ادامه، خلاصه ای از مطالعات مربوط به استفاده از هر دو لوله صاف و شیاردار، تزریق هوا و پدیده رسوب گذاری ارائه شده است [۱۰]. لی و همکاران تأثیر ریزانه های نوع H را بر عملکرد حرارتی - هیدرولیکی و رسوب یک مبدل حرارتی لوله بررسی کردند و نتایج آن ها نشان داد که باله های نوع H با سه جفت شیار می توانند میزان رسوب را تا ۲۳،۷٪ کاهش دهد. [۱۱] ترافچینسکی و همکاران عملکرد رسوب یک مبدل حرارتی را ارزیابی کرده و پیشنهاد مناسب برای برنامه ریزی بهتر عملکرد مبدل حرارتی را ارائه دادند. اثر کربوکسی متیل سلولز سدیم (SCMC) بر عملکرد رسوب یک سطح انتقال حرارت توسط Xu و همکاران بررسی شد. [۱۲] آن ها از طریق مطالعه اثر پارامترهای مختلف سرعت جریان جرم محلول، دمای ورودی محلول و گرانروی محلول را بررسی کردند. [۱۳] چاپ لا و همکاران یک مدل گذرا از عملکرد حرارتی و پدیده های رسوب زدایی از دیگ بخار پوسته زیست توده را کاوش کردند [۱۴]. تانگ و همکاران بسته های لوله دایره ای لانه زنبوری را به عنوان یک طرح جدید برای کاهش رسوب در یک مبدل حرارتی پوسته و بسیاری پیشنهاد داده است. علاوه بر این، آن ها همبستگی جدیدی برای تعداد ناسلت، ضریب اصطکاک و مقاومت حرارتی رسوب ایجاد کردند. نتایج آن ها نشان داد که نتایج پیش بینی شده از همبستگی تنها ۴٪ انحراف از نتایج شبیه سازی عددی داشته است. [۱۵] ژائو و همکاران عملکرد حرارتی و خصوصیات رسوب هنگام سقوط در حال تبخیر را از طریق یک لوله عمودی بررسی کردند. آن ها با مطالعه خود اثر سطح متخلخل را با یک لوله ساده مقایسه کردند. نتایج آن ها نشان داد که گرچه عملکرد حرارتی لوله با سطح متخلخل کمی بدتر از لوله ساده بود اما سرعت رسوب لوله با سطح متخلخل یک دهم نسبت به لوله ساده بود. [۱۶] وانگ و همکاران خصوصیات رسوب گذاری a را در لوله پره ای بررسی کرد مبدل حرارتی لوله پره ای از طریق مطالعه آن ها، تأثیر لوله ها و آرایش های مختلف ارزیابی شد. یافته های آن ها نشان داد که باله های دو تایی نوع H می توانند کمی رسوب زدگی را کاهش دهند. عملکرد رسوب گذاری یک لوله تقویت شده در یک برج خنک کننده استفاده شده و توسط شن و همکاران کاوش شد آن ها مدلی را برای پیش بینی محل رسوب دهی ایجاد کردند که حداکثر خطای ۰،۰۶۴۵ را نشان می داد [۱۷]. در مطالعه دیگری، وانگ و دیگران عملکرد حرارتی و رسوب زدایی را در لوله ای صاف با لوله های شیاردار مقایسه کردند. تعداد رینولدز بررسی شده ۱۶۰۰۰ در نظر گرفته شد. نتایج آن ها در مقایسه با لوله ساده عملکرد رسوب گذاری بهتری را نسبت به لوله شیاردار نشان می دهد [۱۸]. سون و همکاران از تزریق هوا به عنوان یک روش ضد رسوب برای غشای میکرو فیلتراسیون نوع صفحه استفاده کردند. آن ها از طریق مطالعه خود، تأثیر تزریق مداوم و دوره ای هوا را بررسی کردند الگوریتم ها نتایج آن ها تأثیر بسیار مؤثری از تزریق دوره ای هوا در کاهش رسوب از طریق غشا considered در نظر گرفته شده را نشان داد [۱۹]. سیناگا و دیگران یک تحقیق تجربی انجام دادند و اثر تزریق هوا بر عملکرد حرارتی یک مبدل حرارتی لوله دو گانه را بررسی کردند. آن ها ذکر کردند که تزریق هوا شدت تلاطم جریان کلی را افزایش می دهد که منجر به عملکرد بهتر حرارتی و رسوب مبدل های حرارتی می شود [۲۰].

در مطالعه حاضر، اثر هم‌زمان استفاده از لوله شیاردار و تزریق هوا بر عملکرد حرارتی و رسوب‌گذاری یک مبدل حرارتی مستقیم ارزیابی شده و با یک مبدل حرارتی لوله ساده مقایسه می‌شود. با توجه به منابع فوق و بر اساس دانش نویسندگان، تقریباً هیچ تحقیقی درباره تأثیر این دو مورد انجام نشده است.

## مواد و روش‌ها

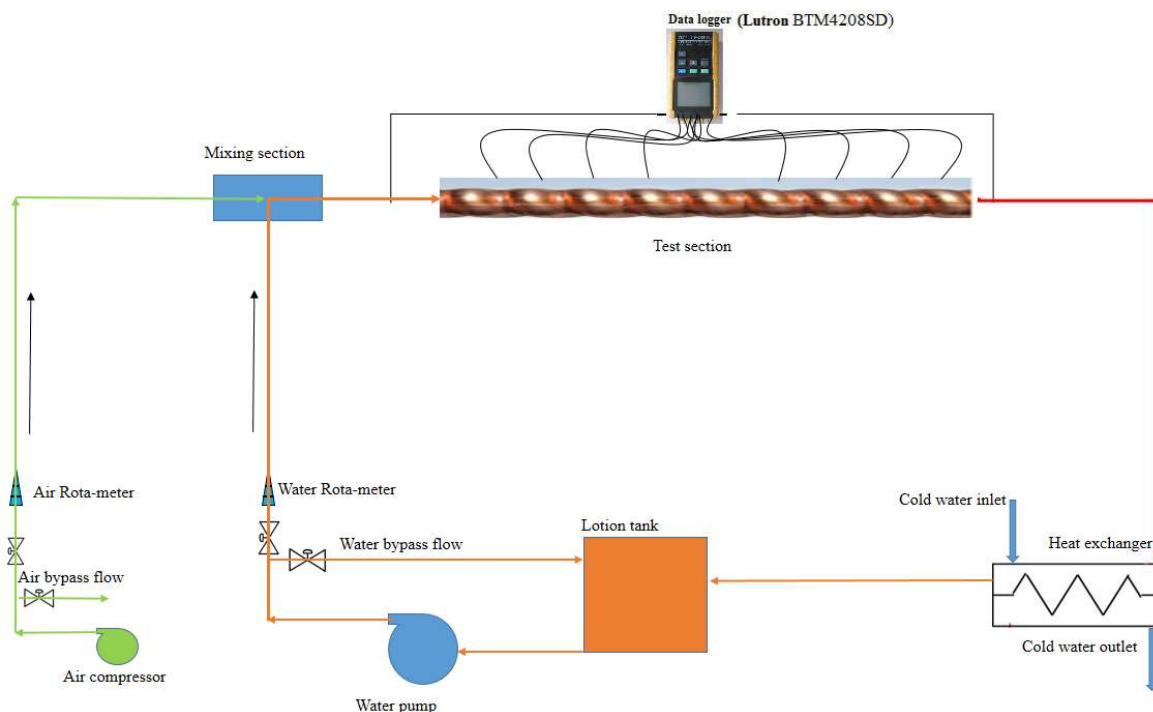
در شکل ۱ شماتیک دکل آزمایشی برای انجام آزمایش‌ها در نظر گرفته شده، ارائه شده است. روش تزریق هوا مورد استفاده در این مطالعه قبلاً توسط محققان مختلف استفاده شده بود [۲۲، ۲۱، ۵]. مزیت این روش تزریق این است که از آنجا که در خارج از واحد تبادل حرارت قرار دارد، می‌توان از آن برای دستگاه‌های حرارتی موجود در کاربردهای صنعتی استفاده کرد. از شکل ۱ می‌توان فهمید که دکل آزمایشی از دو قسمت اصلی تشکیل شده است. اولین قسمت تأمین هوا بود که از کمپرسور، دو سوپاپ و یک جریان هوا به اندازه روتا متر تشکیل شده بود. مورد دوم سیستم تأمین مایعات در حال کار است که شامل مخزن لوسیون (که برای ذخیره شیره چغندر قند استفاده می‌شد)، دو سوپاپ کنترل و یک جریان لوسیون با اندازه‌گیری روتا متر است. هوا از طریق دستگاه به جریان لوسیون تزریق می‌شود. سپس جریان دو فاز تشکیل شده از بخش آزمون عبور می‌کند. با عبور از قسمت آزمایش، لوسیون انرژی گرمایی را از دیواره‌های گرم لوله شیاردار می‌گیرد. انرژی حرارتی از طریق بخاری تولید می‌شود سیم‌هایی که در تمام طول قسمت آزمایش به دور لوله پیچیده شده بودند. در مرحله آخر و پس از گذراندن قسمت آزمایش، لوسیون دوفازی به مبدل حرارتی هدایت شد تا انرژی حرارتی خود را از دست داده و دمای اولیه را پیدا کند. سپس، این جریان دو فاز دوباره به مخازن لوسیون هدایت می‌شود. از طریق مخزن لوسیون، هوا از شیره چغندر قند به دلیل اثر شناوری جدا شد.

برای ثبت داده‌ها، دو روش ارزیابی انجام شد. اولین تجزیه و تحلیل تغییر وزن و دومی ارزیابی ضریب انتقال حرارت. ارزیابی ضریب انتقال حرارت یک روش غیرمستقیم برای درک تغییر مقاومت حرارتی ناشی از پدیده رسوب است. برای اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت، دمای سطح لوله شیاردار و صاف و همچنین نیز دمای ورودی و خروجی لوسیون نیز اندازه‌گیری می‌گردد. لازم به ذکر است که دمای ورودی جریان هوا و مایع در حال جریان (شیره چغندر قند) تقریباً ثابت نگه داشته شد و به ترتیب در حدود ۱۲ درجه سلسیوس و ۱۴ سلسیوس بود.

ارزیابی جرم توسط مقیاسی (مدل: باما ۱۱۱) انجام شد که دارای دقت  $\pm 0.1$  گرم بود.

سیستم ثبت دما با یک دستگاه ثبت داده دیجیتال ۱۲ کانال (مدل Lutron 4208SD) انجام شد که با ترموکوپل‌های نوع K همراه بود. سیستم فوق‌الذکر دقت  $\pm 0.5$  °C برای اندازه‌گیری دما فراهم می‌کند. لازم به ذکر است که زمان آزمون در حال اجرا ۵۰۰۰ s

(حدود ۸۴ دقیقه) در نظر گرفته شد. جدول ۱ موارد مختلف را نشان می‌دهد در مطالعه حاضر هم‌زمان با خصوصیات هندسی لوله ساده و موج‌دار در نظر گرفته شده است. قابل ذکر است که تجزیه و تحلیل عدم اطمینان بر اساس روش پیشنهادی موقت انجام شده است [۲۳]. این روش قبلاً توسط محققان زیادی استفاده شده بود [۵،۷،۲۰،۲۴،۲۵]. عدم اطمینان برای ضریب انتقال گرما و وزن به ترتیب حداکثر ۸/۶۵ و ۵ درصد بود



شکل ۱: نمای کلی ستاپ آزمایشگاهی

ضریب انتقال حرارت وابسته به زمان به شرح زیر تعریف شده است.

کل انرژی حرارتی به دست آمده توسط سیال را می‌توان از طریق معادله زیر اندازه‌گیری کرد. که در آن  $\dot{m}$ ،  $C_p$ ،  $T_{in}$  و  $T_{out}$  به ترتیب جرم، ضریب انتقال حرارت خاص، دمای خروجی مایع کار و دمای ورودی سیال را مشخص می‌کند.

$$Q(t) = \dot{m}(t)C_p(T_{out}(t) - T_{in}(t)) \quad (1)$$

برای یافتن ضریب انتقال حرارت همرفت، انرژی گرمایی محاسبه شده فوق باید برابر باشد با استفاده از روش همرفتی. که منجر به محاسبه ضریب انتقال حرارت در نوع زیر می‌شود.

$$h(t) = \frac{Q(t)}{A(T_w(t) - T_b(t))} \quad (2)$$

همان‌طور که قبلاً ذکر شد، تجزیه و تحلیل توده در این مطالعه انجام شد. برای ارائه بهتر نتایج، پارامترهای زیر در این مطالعه تعریف شده است. در این مطالعه، تفاوت در وزن اولیه لوله و وزن پایانی لوله در هر آزمون به عنوان  $\beta$  و به شرح زیر تعریف شده است.

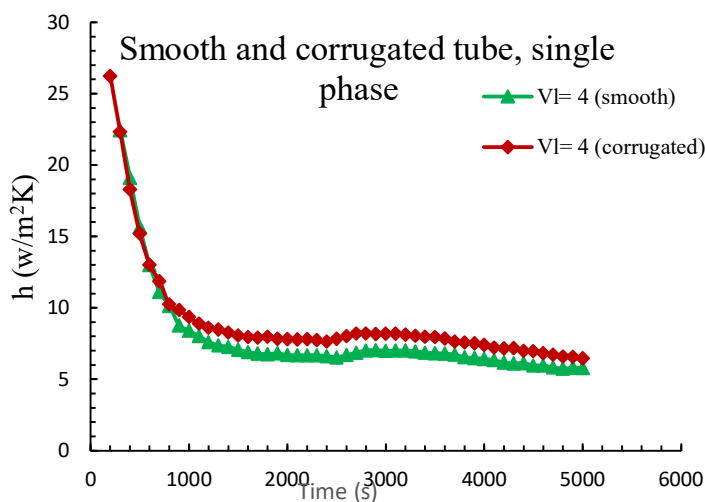
$$\beta = W_{t=5000}(t) - W_i \quad (3)$$

در معادله فوق  $W_{t=5000}(t)$  وزن لوله‌ها در پایان زمان اجرا و  $W_i$  وزن اولیه لوله است. در بخش نتایج، به ترتیب اختلاف وزن لوله صاف و لوله شیاردار تعریف می‌شود. همچنین، درصد اختلاف وزن به صورت زیر به دست می‌آید.

$$a = \frac{W_{t=5000}(t) - W_i}{W_i} * 100 \quad (4)$$

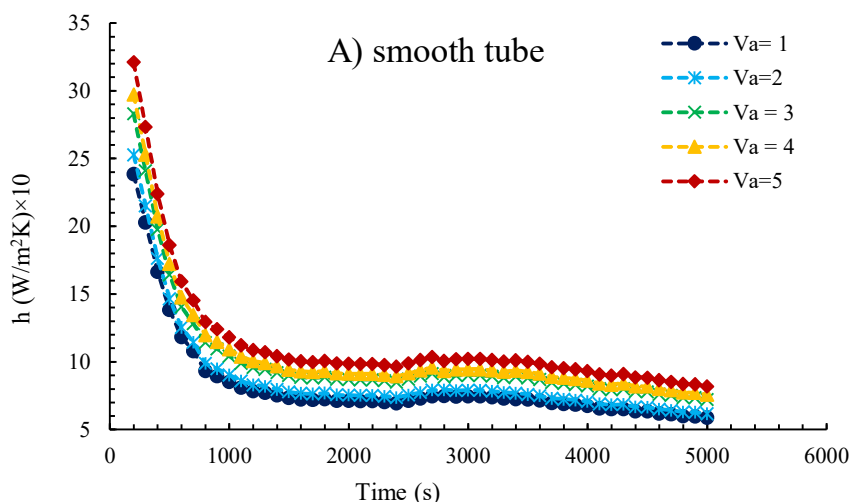
### نتایج و بحث‌ها

ضریب انتقال حرارت وابسته به زمان در هر دولوله صاف و لوله شیاردار در جریان دوفازی (تزریق هوا) و جریان تک فاز ارائه شده است. در شکل ۲، ضریب انتقال حرارت نسبت به زمان از لوله صاف و لوله شیاردار در مورد جریان تک فاز ارائه شده است. سرعت جریان فاز مایع ( $V_l$ ) ثابت نگه داشته شد و برابر با ۴ لیتر در دقیقه بود. از شکل ۲، می‌توان دریافت که در لوله شیاردار ضریب انتقال حرارت نسبت به لوله صاف در طول زمان اجرا آزمایش بیشتر است. از آنجا که تمام پارامترها بین لوله صاف و شیاردار برابر بوده، ولی اختلاف در ضریب انتقال حرارت مربوط به مقاومت رسوب دولوله است. در لوله‌های صاف مواد بیشتری روی دیواره تشکیل می‌شود و این باعث افزایش مقاومت رسوب لوله و همچنین منجر به کاهش ضریب انتقال حرارت می‌شود. با این حال برای لوله شیاردار دیواره‌های موجدار لوله از رسوب‌دهی جلوگیری می‌کند. این امر باعث ایجاد نوسان درافت فشار و تغییر در جهت حرکت چرخه از طریق سیال در حال جریان می‌شود. همه این‌ها با هم، از ایجاد لایه رسوب از طریق لوله جلوگیری می‌کند و ضخامت آن را کاهش می‌دهد که منجر به افزایش ضریب انتقال حرارت می‌شود.



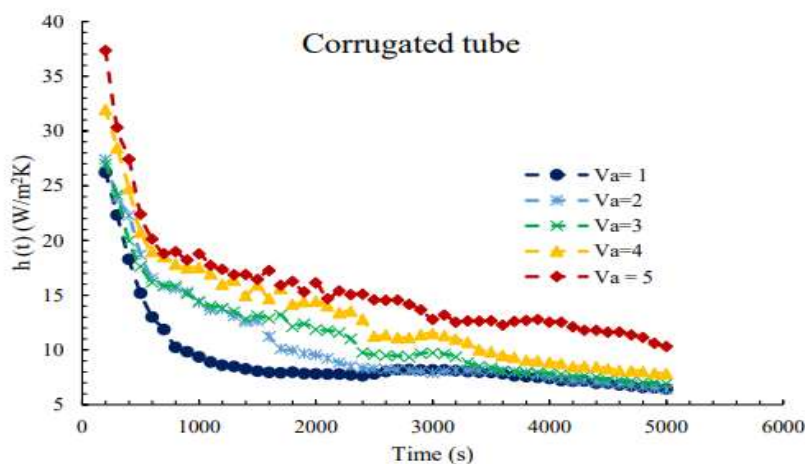
شکل ۲: تغییرات ضریب انتقال حرارت در طول زمان برای لوله صاف و شیاردار در جریان تک فازی

شکل ۳، تغییر ضریب انتقال حرارت نسبت به زمان در صورت تزریق هوا را نشان می‌دهد. همان‌طور که قبلاً گفته شد، میزان جریان مایع ثابت نگه داشته شد و برابر با ۴ لیتر در دقیقه بود، باین حال، پنج سرعت جریان مختلف هوا ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ لیتر در دقیقه برای بررسی تأثیر هوا در نظر گرفته شد سرعت جریان تزریق همان‌طور که از شکل ۳ قابل درک است، تزریق هوا ضریب انتقال حرارت را از طریق زمان اجرا افزایش داده است. همچنین، با افزایش سرعت تزریق هوا، افزایش سرعت جریان هوا به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است. در واقع، تزریق هوا باعث ایجاد حباب / حلزون هوا در فاز مایع شده و هم‌زمان بین حباب‌های هوا و فاز مایع باعث افزایش شدت تلاطم جریان می‌شود. در نتیجه، لایه رسوب با سرعت کمتری توسعه می‌یابد و ضریب انتقال حرارت در مقادیر بالا باقی می‌ماند. با افزایش سرعت جریان تزریق هوا، اندازه حباب‌های هوا بزرگ‌تر، بزرگ‌تر می‌شوند. با افزایش واکنش بین حباب‌های هوا و سیال در حال جریان، پایداری بسته‌های رسوب درون مایع کار افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، ماسوره حلزون‌های فشار هوا در بالای لوله (جهت‌گیری افقی لوله در این مقاله در نظر گرفته شده است) لایه رسوب را جارو می‌کند و از توسعه آن جلوگیری می‌کند. در نتیجه، ضریب انتقال حرارت مقادیر بالاتر را به دست می‌آورد.



شکل ۳: تغییرات ضریب انتقال حرارت نسبت به زمان جریان دو فاز در لوله صاف.

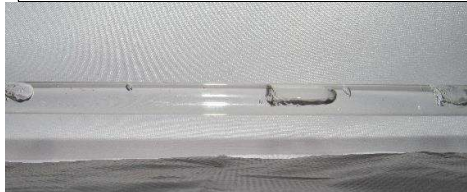

شکل ۴، ضریب انتقال حرارت را برای موارد تزریق هوا از طریق لوله شیاردار نشان می‌دهد. از شکل ۴ می‌توان فهمید که تأثیر تزریق هوا در افزایش عملکرد از طریق لوله شیاردار بیشتر از لوله صاف است. در واقع، از طریق لوله شیاردار، هم‌زمانی حباب‌ها با دیواره‌های شیاردار، باعث ایجاد گرداب‌ها در داخل فاز مایع می‌شود. این گرداب‌ها از تجمع بسته‌ها در دیواره‌های گرم شده لوله جلوگیری می‌کنند که باعث افزایش عملکرد رسوب و افزایش ضریب انتقال حرارت می‌شود. با مقایسه دو شکل ۳ و ۴، می‌توان فهمید که منحنی‌های مربوط به شکل ۳ صاف‌تر از شکل مربوط به شکل ۴ (لوله شیاردار) است. این به دلیل خاصیت تلاطمی جریان داخل لوله شیاردار است. برای درک این موضوع، ساختار جریان دو فاز گاز / مایع از طریق لوله شیاردار، بروب درون یک لوله شیاردار شیشه‌ای مشاهده شد. از طریق لوله شیاردار شیشه‌ای، تمام خصوصیات هیدرولیکی جریان با آن در بخش آزمایش گرم واقعی یکسان است. شکل ۵ ساختار جریان دو فاز گاز / مایع را در داخل لوله شیاردار نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که برای گرفتن ساختارهای جریان ارائه شده، از یک دوربین Canon SX 540 استفاده شد که سرعت شاتر آن ۲۰۰۰/۱ بود. همچنین لازم به ذکر است که برای بررسی ساختار جریان، از آب به جای ملاس استفاده شده است چغندر قند. به دلیل این واقعیت است که به دلیل تاریکی ملاس چغندر قند، گرفتن عکس‌های مناسب غیرممکن بود. با این حال، باید توجه داشت که با توجه به ویسکوزیته مناسب ملاس قند پتین با آب، ساختار جریان این دو ترکیب گاز و مایع را می‌توان تقریباً یکسان فرض کرد [۲۶، ۲۷].











شکل ۴: تغییرات ضریب انتقال حرارت نسبت به زمان جریان دو فاز در لوله شیاردار.

از شکل ۵، می‌توان دریافت که با تزریق هوا به لوله شیاردار، حلزون‌های هوا و حباب هوا به‌طور همگی ایجاد می‌شوند. رابط اسلاگ هوا با فاز آب در داخل لوله شیاردار بسیار مواج است. باین‌حال، رابط حلزون‌های هوا با فاز آب درون لوله صاف از یک خط بسیار صاف تشکیل شده است.

مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت جریان تزریق هوا، حباب‌های کوچک و زیادی در جریان ایجاد می‌شوند. می‌توان دریافت که با افزایش تعداد حباب‌های کوچک، شکل پراکندگی حباب‌ها نیز تغییر می‌کند. در واقع، در نرخ جریان پایین با تزریق هوا، حباب‌ها در نیمه بالایی لوله حرکت می‌کنند درحالی‌که همانند سرعت جریان بالاتر، حباب در کل سطح مقطع لوله پراکنده می‌شود. این روش پراکندگی، به‌طور قابل توجهی بر روی جمع شدن قطعات رسوب تأثیر می‌گذارد و از ایجاد لایه رسوب جلوگیری می‌کند. در نتیجه، مقاومت رسوب در مقادیر جزئی باقی می‌ماند و ضریب انتقال حرارت در مقادیر بالاتر از جریان تک فاز قرار می‌گیرد.

صاف	$V_l$	$V_a$	شیاردار
	2	1	



	2	2	
	2	3	
	2	4	
	2	5	

شکل ۵: تغییرات فرم جریان در اثر تزریق حباب هوا برای لوله صاف و شیاردار.

### نتایج تغییر وزن لوله

تغییرات وزنی لوله صاف و شیاردار در پایان هر مرحله آزمون بررسی شده و در شکل ۶ نمایش داده شده است. همانطور که نمایش داده شده بیشترین میزان تغییرات وزنی (رسوب جمع شده) مربوط به لوله صاف و برای زمانی است میزان دبی حجمی هوا (Va) برابر با صفر بوده است. مشخص است که تزریق هوا باعث کاهش این میزان شده است. با افزایش دبی حجمی هوا میزان تغییرات وزنی کاهش بیشتری داشته است.

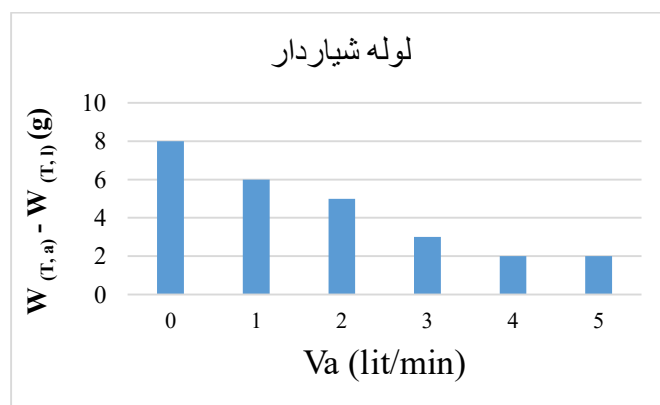
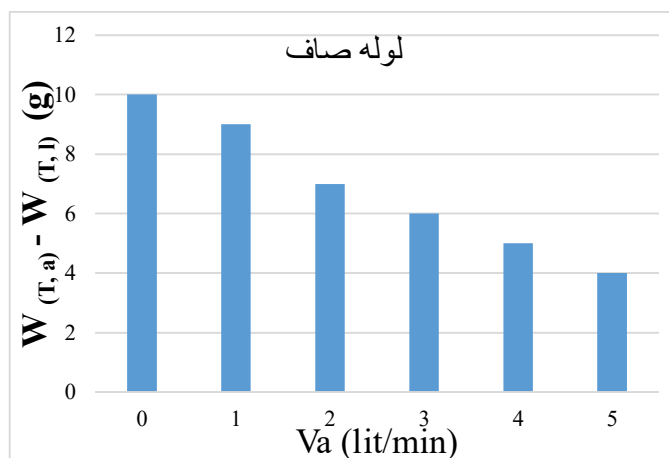
با توجه به شکل ۶ مربوط به لوله شیاردار متوجه می شویم که کمترین مقادیر مربوط به تغییرات وزنی در دبی هوای ۵ لیتر بر دقیقه به دست آمده است. بیشترین و کمترین میزان تغییرات وزنی برابر با ۱۰ و ۲ گرم بوده است و به ترتیب مربوط به لوله صاف در حالت جریان تک فازی و لوله شیاردار در حالت دوفازی است.

مقایسه حالت تک فاز لوله صاف و شیاردار نیز نشان می دهد که در لوله شیاردار میزان تغییرات وزنی (جذب رسوب) نسبت به لوله صاف کمتر است. واقعیت این است که تزریق حباب باعث ایجاد تلاطم در جریان می شود این باعث می شود که ذرات رسوب مدت زمان

بیشتری در جریان مایع به صورت معلق قرار بگیرند. در این حالت نیروی اینرسی جریان مایع می‌تواند تأثیر بیشتری بر روی این ذرات گذاشته و آن‌ها را تا انتهای لوله با خود حمل کند. در لوله شیاردار به خاطر ساختار لوله میزان این تلاطم به مراتب بیشتر است. و همچنین تلاطم در جریان دوفازی به مراتب بیشتر از جریان در لوله صاف است. به این ترتیب تأثیر نیروی اینرسی بر ذرات در لوله شیاردار به مراتب بیشتر است. شکل ۶، به ترتیب نتایج تغییرات جرم را برای لوله صاف و شیاردار را نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده کرد که حداکثر جرم تجمع یافته مواد رسوبی مربوط به موارد بدون تزریق هوا در هر دو لوله صاف و لوله شیاردار است. به راحتی می‌توان دریافت که با افزایش سرعت جریان تزریق هوا، نتایج تغییرات جرم کاهش می‌یابد، و این نشان می‌دهد که افزایش سرعت جریان تزریق هوا باعث کاهش وزن جمع شده مواد رسوب کننده می‌شود.

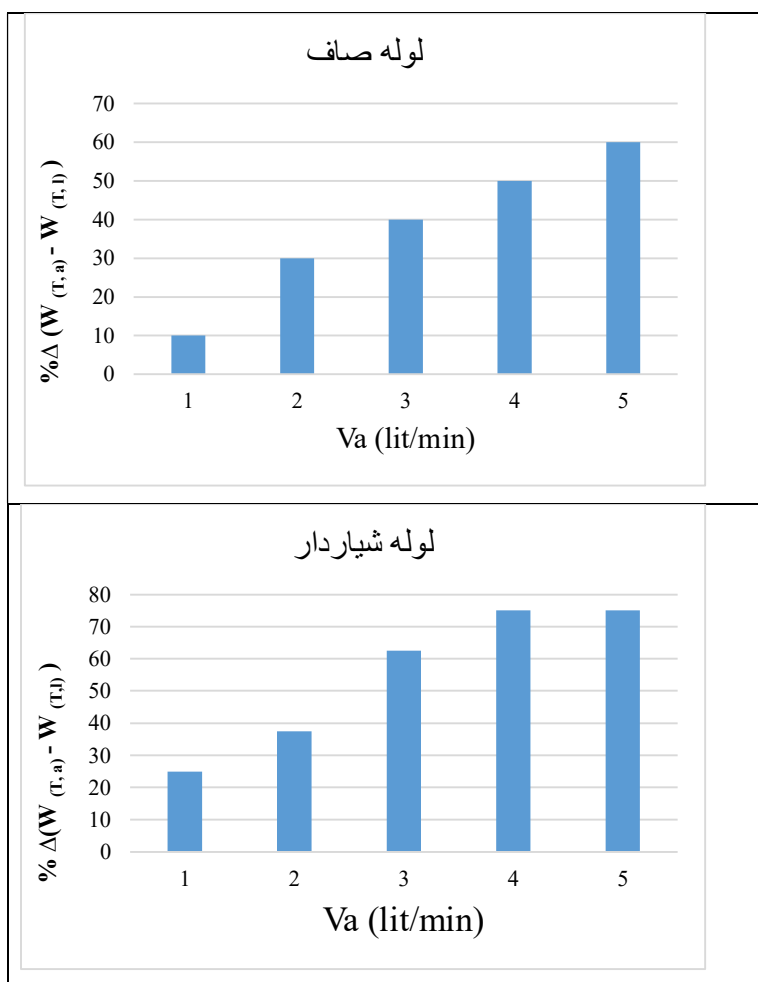
حداکثر تغییرات جرم حدود ۱۰ گرم بود که مربوط به لوله صاف در جریان تک فاز می‌باشد و همچنین، حداقل نتایج تغییر جرم نیز

مربوط به لوله شیاردار و مقادیر ۲ گرم است که مربوط به جریان دو فاز با سرعت جریان هوا ۵ لیتر / در دقیقه است.



شکل ۶: درصد تغییرات وزنی در لوله صاف و شیاردار.

همان‌طور که از شکل ۷ برمی‌آید ایجاد حباب باعث کاهش ۶۰ درصدی میزان رسوب جمع شده در لوله صاف و همچنین باعث کاهش ۷۵ درصدی میزان رسوب‌گیری در لوله شیاردار شده است.



شکل ۷: درصد تغییرات وزنی لوله صاف و شیاردار در اثر تزریق حباب هوا

نتیجه‌گیری

در این مقاله، عملکرد حرارتی و رسوب گذاری لوله ساده و لوله شیاردار به صورت لوله‌ها تحت شار حرارتی ثابت و شیره چغندر قند به عنوان مایع مورد آزمایش و مقایسه قرار گرفت. آزمون‌ها برای ۵۰۰۰ S (۸۴ دقیقه) اجرا شد. برای درک بهتر از ماهیت جریان، ساختار جریان دو فاز از طریق یک دوربین SX540 Canon درون یک لوله شیشه‌ای ضبط شد. یافته‌های اصلی مقاله حاضر به شرح زیر است:

۱. لوله شیاردار در طول زمان ضریب انتقال حرارت بیشتری را نسبت به لوله ساده عبور می‌دهد.
۲. ساختار جریان درون لوله شیاردار پیچیده‌تر از ساختار لوله ساده است.
۳. پراکندگی حباب‌ها در لوله شیاردار بیشتر از لوله‌های ساده است.
۴. عملکرد رسوب گذاری در لوله شیاردار به طور قابل توجهی کمتر از لوله ساده است.
۵. مشخص شد که افزایش سرعت جریان تزریق هوا منجر به کاهش رسوب می‌شود تجمع بر روی دیواره‌های لوله می‌شود.
۶. حداکثر کاهش در تجمع رسوب برای لوله شیاردار ۷۵٪ است.

#### منابع:

1. J.S. Patel, B. Bansal, M.I. Jones, M. Hyland, Fouling behaviour of milk and whey protein isolate solution on doped diamond-like carbon modified surfaces, *J. Food Eng.* 116 (2013) 413–421. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.12.014>.
2. J.A. Barish, J.M. Goddard, Anti-fouling surface modified stainless steel for food processing, *Food Bioprod. Process.* 91 (2013) 352–361. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2013.01.003>.
3. G. Zakrzewska-Trznadel, M. Harasimowicz, A. Miśkiewicz, A. Jaworska, E. Dłuska, S. Wroński, Reducing fouling and boundary-layer by application of helical flow in ultrafiltration module employed for radioactive wastes processing, *Desalination*. 240 (2009) 108–116. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.10.091>.
4. M. Sun, M. Zeng, Investigation on turbulent flow and heat transfer characteristics and technical economy of corrugated tube, *Appl. Therm. Eng.* 129 (2018) 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.09.136>.
5. S. Khorasani, A. Dadvand, Effect of air bubble injection on the performance of a horizontal helical shell and coiled tube heat exchanger: An experimental study, *Appl. Therm. Eng.* 111 (2017) 676–683. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.09.101>.
6. H. Sadighi Dizaji, S. Jafarmadar, M. Abbasalizadeh, S. Khorasani, Experiments on air bubbles injection into a vertical shell and coiled tube heat exchanger; exergy and NTU analysis, *Energy Convers. Manag.* 103 (2015) 973–980. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.07.044>.
7. Y. Cao, P.T. Nguyen, K. Jermsittiparsert, H. Belmabrouk, S.O. Alharbi, M.S. Khorasani, Thermal characteristics of air-water two-phase flow in a vertical annularly corrugated tube, *J. Energy Storage*. 31 (2020) 101605. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101605>.
8. S.M. Peyghambarzadeh, A. Vatani, M. Jamialahmadi, Influences of bubble formation on different types of heat exchanger fouling, *Appl. Therm. Eng.* 50 (2013) 848–856. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.07.015>.

9. L. Liu, B. Gao, J. Liu, F. Yang, Rotating a helical membrane for turbulence enhancement and fouling reduction, *Chem. Eng. J.* 181–182 (2012) 486–493. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.12.007>.
10. X.L. Li, S.Q. Wang, D.L. Yang, G.H. Tang, Y.C. Wang, Thermal-hydraulic and fouling performances of enhanced double H-type finned tubes for residual heat recovery, *Appl. Therm. Eng.* 189 (2021) 116724. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116724>.
11. M. Trafczynski, M. Markowski, K. Urbaniec, P. Trzcinski, S. Alabrudzinski, W. Suchecki, Estimation of thermal effects of fouling growth for application in the scheduling of heat exchangers cleaning, *Appl. Therm. Eng.* 182 (2021) 116103. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116103>.
12. Z. Xu, Y. Zhao, J. He, H. Qu, Y. Wang, B. Wang, Fouling characterization of calcium carbonate on heat transfer surfaces with sodium carboxymethyl cellulose as an inhibitor, *Int. J. Therm. Sci.* 162 (2021) 106790. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2020.106790>.
13. S. Chapela, N. Cid, J. Porteiro, J.L. Míguez, Numerical transient modelling of the fouling phenomena and its influence on thermal performance in a low-scale biomass shell boiler, *Renew. Energy.* 161 (2020) 309–318. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.07.068>.
14. S.-Z. Tang, M.-J. Li, F.-L. Wang, Z.-B. Liu, Fouling and thermal-hydraulic characteristics of aligned elliptical tube and honeycomb circular tube in flue gas heat exchangers, *Fuel.* 251 (2019) 316–327. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.04.045>.
15. L. Zhao, W. Tang, L. Wang, W. Li, W.J. Minkowycz, Heat transfer and fouling characteristics during falling film evaporation in a vertical sintered tube, *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 109 (2019) 104388. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2019.104388>.
16. F.-L. Wang, S.-Z. Tang, Y.-L. He, F.A. Kulacki, Y. Yu, Heat transfer and fouling performance of finned tube heat exchangers: Experimentation via on line monitoring, *Fuel.* 236 (2019) 949–959. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.09.081>.
17. C. Shen, R. Gao, X. Wang, Y. Yao, Investigation on fouling of enhanced tubes used in a cooling tower water system based on a long-term test, *Int. J. Refrig.* 104 (2019) 9–18. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2019.05.003>.
18. Z. Wang, G. Li, J. Xu, J. Wei, J. Zeng, D. Lou, W. Li, Analysis of fouling characteristic in enhanced tubes using multiple heat and mass transfer analogies, *Chinese J. Chem. Eng.* 23 (2015) 1881–1887. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cjche.2015.07.011>.
19. D.-J. Son, D.-G. Kim, W.-Y. Kim, K.-H. Hong, Anti-fouling effect by internal air injection in plate-type ceramic membrane fabricated for the treatment of agro-industrial wastewater, *J. Water Process Eng.* 41 (2021) 102021. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102021>.

20. N. Sinaga, S. Khorasani, K. Soopy Nisar, A. Kaood, Second law efficiency analysis of air injection into inner tube of double tube heat exchanger, *Alexandria Eng. J.* 60 (2021) 1465–1476. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.10.064>.
21. S. Khorasani, A. Moosavi, A. Dadvand, M. Hashemian, A comprehensive second law analysis of coil side air injection in the shell and coiled tube heat exchanger: An experimental study, *Appl. Therm. Eng.* 150 (2019) 80–87. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.12.163>.
22. S. Rostami, N. Ahmadi, S. Khorasani, Experimental investigations of thermo-exergitic behavior of a four-start helically corrugated heat exchanger with air/water two-phase flow, *Int. J. Therm. Sci.* 145 (2019) 106030. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2019.106030>.
23. R.J. Moffat, Describing the uncertainties in experimental results, *Exp. Therm. Fluid Sci.* 1 (1988) 3–17. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0894-1777\(88\)90043-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0894-1777(88)90043-X).
24. R.A. Rezaei, S. Jafarmadar, S. Khorasani, Presentation of frictional behavior of micro helical tubes with various geometries and related empirical correlation; an experimental study, *Int. J. Therm. Sci.* 140 (2019) 377–387. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2019.03.011>.
25. M.-W. Tian, S. Khorasani, H. Moria, S. Pourhedayat, H.S. Dizaji, Profit and efficiency boost of triangular vortex-generators by novel techniques, *Int. J. Heat Mass Transf.* 156 (2020) 119842. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119842>.
26. S.M. Bhagwat, A.J. Ghajar, Experimental investigation of non-boiling gas-liquid two phase flow in upward inclined pipes, *Exp. Therm. Fluid Sci.* 79 (2016) 301–318. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2016.08.004>.
27. S.M. Bhagwat, A.J. Ghajar, Similarities and differences in the flow patterns and void fraction in vertical upward and downward two phase flow, *Exp. Therm. Fluid Sci.* 39 (2012) 213–227. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2012.01.026>

## **Fouling performance of sugar beet sap in horizontal corrugated tube due to air injection**

Parviz Ahmadi Moghaddam<sup>1\*</sup>, Hadi Sharifi<sup>1</sup>, Samad Jafarmadar<sup>2</sup>, Ali M. Nikbakhti<sup>1</sup>, Adel Hosainpour<sup>1</sup>

1. Biosystems Engineering Department, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran  
2. mechanical engineering Department, Urmia University, Urmia, Iran

### **Abstract**

In the present study, the fouling performance of a circumferentially corrugated tube was probed due to the air injection. The molasses of sugar beet was considered as the working fluid. The tube was considered to be under constant heat flux. Also, the flow rate of the molasses of sugar beet was considered to be constant. Five different flow rates of air stream was considered to check the effect of air flow rate. The flow rate of working fluid was kept at the constant flow rate of 2 lit/min. The tests were conducted for 5000s (84minute). For a better understanding of the nature of flow, the structure of two phase steam was recorded via a Canon SX540 Camera. The results presented that the air injection in the corrugated tube will completely change the structure of the working fluid which will bring a very turbulent structure for the working fluid. The thermal results presented that during the testing time, the air injection will keep the heat transfer coefficient about 120% higher than a single phase stream. The mass evaluation results revealed that the air injection, could decrease the weight of fouled substance up to 75%.

**Key words:** Fouling, Air injection, molasses of sugar beet, heat transfer coefficient

\*Corresponding author

E-mail: ah\_banakar@modares.ac.ir