مکانیک سازهها و شارهها/ سال ۱۳۹۶/ دوره ۷/ شماره ۱/ صفحه ۱۴۷–۱۶۰



محله علمی بژو،شی مکانیک سازه ، و شاره ،



DOI: 10.22044/jsfm.2017.929

بررسی تجربی کاهش اتلاف هد بهوسیلهی حبابهای هوا در جریان تیلور-کوئت آشفته

رضا مریمی^{(**}، سعید فراهت^۲ و سید مرتضی جوادپور^۳ ^۱ دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران ^۲ استاد مهندسی مکانیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران ^۳ استادیار مهندسی مکانیک، مجتمع آموزش عالی گناباد، گناباد، ایران مقاله مستقل: تاریخ دریافت: ۲۰۱/۱۲۹۲/۰ تاریخ بازنگری: ۲۹۹۵/۰۷/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۲/۱۰

چکیدہ

در این تحقیق، اثر تزریق حبابهای کوچک روی اتلاف هد جریان محصور در فضای حلقوی بین دو استوانه هممحور (سیستم تیلور-کوئت)، بطور تجربی بررسی شد. به منظور تعیین اتلاف هد، اختلاف فشار جریان بین دو نقطهی معین در راستای محور استوانهها اندازه-گیری گردید. طبق تغییرات عدد رینولدز دورانی و محوری، جریان تیلور-کوئت ایجاد شده کاملا آشفته بود و گردابههای تیلور در فضای حلقوی ظاهر شدند. آب به عنوان سیال عامل و هوا با شرایط اتاق برای تولید حبابها استفاده شدند که از قسمت تحتانی سیستم به داخل فضای حلقوی تزریق شدند. به منظور تعیین قطر و آرایش حبابها، در جریان تکنیک مجسم سازی جریان استفاده شد. نتایج اولیه نشان دادند که حبابهای هوا میتوانند در بهترین حالت، اتلاف هد را تا ۶۰٪ کاهش دهند. با افزایش عدد رینولدز دورانی، اتلاف هد افزایش یافت؛ پدیدهای که با تجمع حبابهای کوچک در هستهی گردابههای تیلور و افزایش انتقال مومنتم توجیه شد. گرچه در اعداد رینولدز دورانی کوچک، کاهش چگالی جریان توسط حبابها پارامتر اصلی در کاهش اتلاف هد مطرح شده است. در این رژیم مشاهده شد که افزایش عافت، پدیدهای که با تجمع حبابهای کوچک در هسته گردابه مای تیلور و افزایش انتقال مومنتم توجیه شد. گرچه در اعداد رینولدز دورانی کوچک، کاهش چگالی جریان توسط حبابها پارامتر اصلی در کاهش اتلاف هد مطرح شده است. در این رژیم مشاهده شد

كلمات كليدى: حبابهاى هوا؛ تيلور -كوئت؛ اتلاف هد؛ جريان أشفته.

Experimental Investigation of Head Resistance Reduction by Air Bubbles in Turbulent Couette-Taylor Flow

R. Maryami^{1,*}, S. Farahat², S. M. Javadpour³

¹ Ph.D Student, Dept. Mech. Eng, Yazd University, Yazd, Iran.
 ² Prof, Dept. Mech. Eng, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.
 ³ Assis Prof, Dept. Mech. Eng, University of Gonabad, Gonabad, Iran.

Abstract

The effect of samll bubles injecting on the head resistance of the flow closed between co-axial cylinders (Couette-Taylor system) was experimentally investigated In this research. The Pressure difference of flow between two certain point along axis cylinders was measured to determaine haed resistance. According to variations of rotary and axial Reynolds numbers, the made Couette-Taylor flow was fully turbulent and Taylor vortices appeared in the annulus gap. Water as working fluid and the air with room condition were used to produce small bubbles which were injented into anuulus gap at the bottom of system. Flow visualization technique is used to determine diameters and distribution of bubbles in flow. The preliminary results showed that the air bubbles can reduce the head resistance up to up to 60% in the best case. Head resistance is increased as the rotary Reynolds number is increased, a phenomenon which can be explained in terms of the accumulation of bubbles into Taylor vortex cores and enhancement of momentum transfer. However, in the small rotary Reynolds numbers, the reduced fluid density by air bubbles plays a major role in head resistance reduction. In this regime, it observed that incresing axial Reynolds number promotes head resistance reduction, which is due to damping vortices by axial flow.

Keywords: Air Bubbles; Taylor-Couette; Skin Friction; Turbulent Flow.

آدرس پست الكترونيك: <u>r.maryami@gmail.com</u>

۱– مقدمه

هنگامی که سیالی روی جسم جامدی در حرکت است و یا شئی جامد در سیالی حرکت میکند، نیروی مقاومی در خلاف جهت حرکت سیال و یا شئ وارد می شود که نیرو درگ نامیده میشود. این نیرو، برآیند دو نیروی درگ اصطکاکی و درگ فشاری است. هر روز به منظور حفظ تداوم حرکتهای ذکر شده در بالا انرژی مصرف می شود که بخش زیادی از آن صرف غلبه بر نیروی مقاوم درگ میشود. در سال های اخیر با توجه به افزایش قیمت انرژی و همچنین آلودگیهای ناشی از اتلاف انرژی، تلاشهای بسزایی در جهت کاهش تاثیر نیروی درگ صورت پذیرفته است. این تلاشها، معطوف به یافتن روشهایی با بازدهی زیاد و هزینهی کم بوده است. کاهش درگ میکروحبابی، از جملهی این روشها است. در این روش، حبابهای هوا و یا گازها دیگر به داخل جریان یا روی جسم متحرک در جریان تزریق میشوند. این روش در مقایسه با دیگر روشهای پیشنهاده شده در طی سالهای اخیر، ارزانتر است و علاوه بر این، آلودگیهای زیست محیطی ایجاد شده در یی استفاده از آن کمتر است.

کاهش درگ بوسیلهی میکروحبابها، اولین بار توسط مک کرمیک و بتاچاریا [۱]، بطور عملی مورد استفاده قرار گرفت. آنها از شیوهی الکترولیز، به منظور تولید میکروحباب-های هیدروژن حول یک مدل شناور و متحرک در تانک آب استفاده کردند. نتایج نشان دادند که بازدهی تزریق حبابها روی کاهش درگ، وابسته به سرعت حرکت مدل و نرخ تولید حرابها در آب است. با شروع تحقیقات در زمینهی کاهش درگ میکروحبابی، آزمایشات متعددی در کانال یا تونل آب به منظور تعیین پارامترهای موثر روی کارایی این روش انجام شدند (بگوویچ و همکاران [۲]، مدون و همکاران [۳ و۴]، مرکل و همکاران [۵]، دیوتیچ و کاسانو [۶]، کیت و همکاران [۷]،گوین و همکاران [۸]).

بگوویچ و همکاران [۲]، اثر اشباع گازی روی کاهش درگ پوستهای ایجاد شده توسط میکروحبابها را روی یک صفحه تخت و همچنین دیواره تونل آب بررسی کردند. آنها گزارش کردند که حداکثر کاهش درگ در حد معینی از انباشتگی حبابها صورت میگیرد. بررسی تغییرات خواص لایه مرزی مغشوش با گرادیان فشار صفر، در حضور میکروحبابها توسط مدون و همکاران [۳]، در قسمتی از

یک تونل آب انجام شد. نتایج نشان دادند که نیروی شناوری، نقش موثری در کاهش درگ میکروحبابی دارد. مسالهی توزیع میکروحبابها در لایه مرزی، با استفاده از شبیه سازی عددی فرآیند کاهش درگ، توسط توسط مدون و همکاران [۴] انجام شد. نتایج نشان دادند که مقدار کاهش درگ پوستهای، به غلظت حجمی حبابها و توزیع آنها در لایهی بافری بستگی دارد. این موضوع توسط مرکل و همکاران [۵]، با انجام آزمایشاتی در تونل آب نیز اثبات شد. علاوه براین آنها نشان دادند که رشد ضخامت زیرلایهی ویسکوز، تحت تاثیرحبابها است. لکنر [۹] و ماری [۱۰]، مکانیزمهای کاهش درگ میکروحبابی را بطور تئوری بررسی کردند. آنها نشان دادند که کاهش چگالی مخلوط دوفازی و اصلاح ویسکوزیتهی موثر در لایه مرزی، یکی از دلایل مهم برای کاهش درگ در حضور حبابها است.

بطور موازی با تحقیقات تئوری، مطالعاتی عددی انجام شدند که بیشتر معطوف به کاهش درگ در حضور حبابهای کروی کوچک بودند. (بلتون و لوس [۱۱]، فرانت و الگوباشی (۱۲]، اکس یو و همکاران[۱۳]). لو و همکارن [۴]، تاثیر حبابهای نسبتا بزرگ را روی کاهش درگ اصطکاکی دیوار های کانال کوچک بررسی کردند. آنها با استفاده از روش شبیه سازی عددی مستقیم (DNS)، نشان دادند که حباب های انعطاف پذیر با سرکوب کردن گردابههای جریان، سبب کاهش درگ قابل توجهی میشوند. روش تابع چگالی مشخص (MDF) به منظور شبیهسازی جریان آشفتهی حامل حباب در یک کانال و همچنین بررسی اندرکنش بین حباب ها و آشفتگی جریان در مجاورت دیوار، توسط کانا و همکاران [۱۵] بکار گرفته شد. نتایج نشان دادند که حضور حبابها در اغتشاشات و ایجاد رفتار لایهای میشوند.

علاوه بر مطالعات آزمایشگاهی و عددی، اثر تزریق حبابهای گازی در کاهش اتلافات اصطکاکی روی نمونههای واقعی مانند، بدنهی کشتیها و همچنین قایقها بررسی شد (یانار و همکاران [۱۶]، تاکاهاشی و همکاران [۱۷] و لاتور و همکاران [۱۸]). نوری و سررشته داری [۱۹]، بطور تجربی اثر تزریق حبابها را روی کاهش اتلافات یک جسم دوار بررسی کردند. آنها نشان دادند که افزایش کسر حجمی،

منجر به کاهش تنش برشی اعمالی روی سطح جسم دواری میشود.

طبق تحقیقات اخیر مشخص شده است که کاهش درگ میکروحبابی در جریانهای داخلی و خارجی، پدیدهای پیچیده و مطالعه مکانیزمهای آن مشکل است. از این رو، سیستمهای جدیدی برای چنین مطالعاتی پیشنهاد شده است. یکی از این سیستمها، سیستم تیلور-کوئت است. سیستم تیلور-کوئت، متشکل از دو استوانهی هم محور است که یکی ثابت و دیگر متحرک است. در یک چنین سیستمی با استوانهی داخلی متحرک و استوانهی خارجی ثابت، تغییر سرعت دورانی استوانه داخلی، ماهیت جریان محصور در فضای حلقوی بین دو استوانهی را تحت تاثیر قرار میدهد. در حقیقت در سرعتهای دورانی کم، جریان در فضای حلقوی آرام است که اصطلاحا جریان کوئت نامیده می شود و رفته رفته با افزایش سرعت دورانی آشفته می شود. در سیستمهای تيلور-كوئت، آشفته شدن جريان متناسب با پيدايش گردابه-هایی تحت عنوان گردابههای تیلور است که در شکل ۱، طرحواره سادهای از آنها نشان داده شده است. در این حالت، جریان ایجاد شده در سیستم، جریان تیلور-کوئت نامیده می-شود.

تحقیقات انجام شده در سیستمهای تیلور-کوئت، بیشتر معطوف به بررسی شرایط ناپایداری جریان در حالتهای مختلف بوده است. كوئت [٢٠]، مالوك [٢١]، ريلي [٢٢] و تيلور [٢٣]، اولين افرادي بودند كه محدوده ناپايداري جريان های تیلور-کوئت را مشخص کردند. تعیین شرایط ناپایداری جریان های تیلور-کوئت در حضور جریان محوری، موضوعی است که با شروع مطالعات در سیستمهای تیلور-کوئت مد نظر محققان قرار گرفت. كرونيش [۲۴]، گولدستين [۲۵]، چاندرسکا [۲۶]، دی پریما [۲۷]، دانلی و فولتز [۲۸]، از جمله افرادی بودند که نشان دادند، جریان محوری میتواند با میرا کردن گردابههای تیلور، پایداری جریانهای تیلور-کوئت را افزایش دهد. با پیشرفت سیستمهای تصویر برداری، مطالعاتی توسط شیومی و همکاران [۲۹]، آتخن و همکاران [۳۰] و هیوباز و همکارن [۳۱]، در خصوص تعیین الگوهای جریان ایجاد شده در فضای حلقوی بین دو استوانهی هم محور صورت پذيرفت.



شکل ۱- نمایی از تشکیل گردابههای تیلور در فضای حلقوی

در سالهای اخیر، علاوه بر موضوعات مطرح شده در بالا، اثر میکروحبابها روی کاهش اتلافات ناشی از اصطکاک در فضای حلقوی سیستمهای تیلور-کوئت، توسط محققانی نظیر، ون در برگ [۳۲ و ۳۳] بررسی شد. بررسی اثر میکروحبابها روی کاهش درگ و همچنین تعیین الگوهای توزیع حبابها در سیستمهای تیلور- کوئت، توسط مورای و همکاران [۳۴] انجام پذیرفت. در این تحقیق نشان داده شد که میکروحبابها با کاهش چگالی سیال و انبساط گردابههای تیلور در جهت محور استوانهها، سبب کاهش درگ میشوند. های هوا و همچنین اثر جریان محوری روی کاهش درگ میکروحبابی را در یک جریان آشفتهی تیلور-کوئت بررسی میکروحبابی را در یک جریان آشفتهی تیلور-کوئت بررسی کردند. آنها نشان دادند که در بازه مشخصی از تغییرات عدد رینولدز دورانی، حبابها درگ اصطکاکی را کاهش میدهند.

حبابها را در کاهش درگ اصطکاکی افزایش میدهد. علاوه بر مطالعات تجربی انجام شده در این زمینه، تحقیقاتی هم با استفاده از شبیه سازی عددی توسط سوگیوما و همکاران [۳۷] و مریمی و همکاران [۳۸] انجام شدند.

توجه به این نکته ضروری است که اتلاف انرژی در سیستمهای تیلور-کوئت، فقط ناشی از درگ اصطکاکی نیست. در حقیقت، افت فشار در جهت جریان علاوه بر درگ اصطکاکی، می تواند روی اتلاف انرژی در فضای حلقوی موثر باشد. اتلاف انژری ناشی از افت فشار در سیستمهای تیلور-كوئت، معمولا به اتلاف هد معروف است [۳۹]. همانطور كه قبلا اشاره شد، در سالهای اخیر تاثیر میکروحبابها روی کاهش درگ اصطکاکی، بطور تجربی و عددی در جریانهای تیلور-کوئت بررسی شده است؛ این در حالی است که کارایی حبابها در یک چنین جریانهایی روی کاهش اتلاف هد، مورد مطالعه قرار نگرفته است. با توجه به اینکه تحقیقات صورت گرفته تاثیر مثبت تزریق حبابها را روی کاهش درگ اصطکاکی نشان میدهند، میتوان پیش بینی کرد که تزریق حبابها روی کاهش اتلاف هد در جریانهای تیلور-کوئت موثر است؛ بنابراین در تحقیق پیش رو سعی شد تا تاثیر تزریق حبابهای کوچک روی کاهش اتلاف هد در یک سیستم تیلور-کوئت عمودی، بطور تجربی مورد بررسی قرار گیرد. در این سیستم، حبابهای هوا به همراه جریان آب بطور همزمان از قسمت تحتانی سیستم به داخل فضای حلقوی فرستاده شدند. با استفاده از جسم متخلخل حباب-هایی با قطری کوچکتر یا در حدود ۱/۷mm در سیستم ایجاد گردیدند. به منظور مطالعه تغییرات اتلاف هد در حضور حبابها، اختلاف فشار بین دو مقطع مشخص از سیستم نیز اندازه گیری شد.

۲- سیستم آزمایشگاهی

شماتیکی از سیستم آزمایشگاهی در شکل ۲، نشان داده شده است. مشخصات مربوط به این سیستم آزمایشگاهی در جدول ۱ ارائه شده و این سیستم تیلور-کوئت، بطور مفصل در مرجع [۳۵ و ۳۶] توضیح داده شده است. ذکر این نکته ضروری است که در سیستم آزمایشگاهی به کار رفته در مرجع [۳۵]، ورود و خروج جریان آب وجود ندارد؛ یعنی حجم آب محصور در فضای حلقوی سیستم همواره ثابت

است؛ این در حالی است که سیستم بکار گرفته شده در تحقیق پیش رو و همچنین مرجع[۳۶] مجهز به سیستم بازگردش آب است که در شکل ۲، نشان داده شده است.

در سیستم تیلور-کوئت مورد نظر استوانه داخلی متحرک بوده، از پلکسی گلاس غیر شفاف ساخته شده است تا از عبور نور به منظور تصویر برداری بهتر جلوگیری کند. استوانهی خارجی در این سیستم ثابت بوده، از پلکسی گلاس شفاف ساخته شده است. استوانهی خارجی روی یک نازل همگرا کننده قرار گرفته است تا ورود جریان دو فازی به فضای حلقوی به سادگی صورت پذیرد.

سیستم باز گردش جریان، سبب برقراری جریانی در جهت محوری در فضای حلقوی بین دو استوانهی هم مرکز میشود. این سیستم شامل، یک پمپ جریان مستقیم دور متغییر، فلومتر، صاف کننده و مخزن ذخیره سازی است. در این سیستم هدف، استفاده از صاف کننده آرام کردن جریان ورودی به سیستم است و مخزن علاوه بر ذخیره سازی سیال، سبب خارج شدن حبابهای وارد شده به سیال قبل از ورود مجدد به سیستم میشود. در قسمت بالایی، مخزن غشایی قرار داده شده است که به خارج شدن حبابها از آب کمک می کند. هوای لازم برای تولید حبابها و همچنین فشار کافی برای تزریق هوا به سیستم، از طریق کمپرسوری گریز از مرکز تامین شده است. حبابهای هوا از طریق دو وسیلهی تزریق کننده که نمونهای از آنها در شکل ۳ نشان داده شده است، به داخل فضای حلقوی تزریق میشوند.

این وسایل روی نازل همگرا کننده و دقیقا روبهروی هم نصب شدهاند. برای دوران استوانهی داخلی، از یک الکتروموتور AC استفاده شدهاست. به منظور کاهش ارتعاشات سیستم هنگام دوران استوانهی داخلی، الکتروموتور از طریق یک مکانیزم تسمه و پولی به شفت متصل به استوانهی داخلی متصل شده است. علاوه براین محور استوانه داخلی از بالا و پایین، از طریق دو بلبرینگ حمایت شده تا دوران این استوانه با اصطکاک کمتری صورت پذیرد.

فضای حلقوی بین دو استوانهی هم مرکز با آب به عنوان سیال عامل پر شده است. خصوصیات فیزیکی آب و همچنین دیگر شرایط آزمایشگاهی، در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به اینکه وجود ناخالصیهایی مانند، نمک و دیگر محلولهای فعال در سطح روی اندازهی حبابها و کاهش

درگ میکروحبابی موثر است [۴۰]؛ سعی شده تا خلوص آب در تمامی آزمایشات ثابت باشد.



شکل۲ – نقشهی خلاصه شدهی سیستم آزمایشگاهی: ۱ – تانک، ۲ – پمپ، ۳ – شیر، ۴ – دبی سنج آب، ۵ – توزیع کنندهی آب، ۶ – کمپرسور، ۷ – دبی سنج هوا، ۸ – توزیع کنندهی هوا، ۹ – سرعت سنج، ۱۰ – موتور، ۱۱ – استوانهی داخلی، ۱۲ – استوانهی خارجی، ۱۳ – نقاط سنجش فشار، ۱۴ – صاف کنندهی آب، ۱۵ – حباب هوا



شکل ۳- وسیله ی تزریق کنندهی هوا به سیستم

جدول ۱- مشخصات سیستم آزمایشگاهی		
مقدار	پارامتر	
$d_1 = 1 \Upsilon \cdot mm$	قطر استوانه داخلى	
$d_2 = 1 \cdot \mathbf{f} \cdot \mathbf{mm}$	قطر استوانه خارجي	
$L_1 = \mathfrak{Pr} \cdot \mathbf{mm}$	طول استوانه داخلی	
$L_2 = \mathfrak{r} \cdot \cdot \mathbf{mm}$	طول استوانه خارجي	
$L_n = \cdots mm$	طول نازل هم گرا کننده	
$\delta = $ \ · mm	فاصله شعاعى	
۶۳۰mm	ارتفاع محل تست	
۶۳	نسبت جنبه ای	
۸۰۰kPa	حداكثر فشار كمپرسور	
$\Lambda/\Psi \pm \cdot /\Lambda kPa$	فشار هوای تزریقی	
۱۰۱۷/۳۶mm ²	مساحت جسم متخلخل	
۲۰µm	قطر اسمى منفذهاى جسم متخلخل	
۱/۵hp	قدرت الكترو موتور	

جدول ۲- شرایط آزمایش

مقدار	پارامتر
$ρ_w$ =٩٩۶/٩ δ kg/m ³	چگالی آب
$v_w = \cdot / \mathfrak{l} \cdot \mathfrak{l} \Delta \times \mathfrak{l} \cdot \mathfrak{l}^{-\mathfrak{s}} \mathfrak{m}^2 / \mathfrak{s}$	ویسکوزیتهی سینماتیکی آب
70 °C	دمای آب
۵∙ <i><ω<</i> ٩٧۵rpm	سرعت دورانی
$\cdot \leq Q_a \leq \beta / \forall \lambda \cdot \times \vee \cdot^{-\beta} m^3 / s$	دبی جریان هوا
$\Delta.\Delta I \times I \cdot I^{-\Delta} \leq Q_{W} \leq V \cdot V \times I \cdot I^{-\Delta} \mathrm{m}^{3}/\mathrm{s}$	
$\forall \times 1 \cdot \mathbf{r} < \mathbf{Re}_{\omega} < \forall \cdot \times 1 \cdot \mathbf{r}$	عدد رينولدز دورانى
799.10 <rea<taf.1a< td=""><td>عدد رينولدز محورى</td></rea<taf.1a<>	عدد رينولدز محورى
$f_{1/8} \times 10^{\circ} < Ta < \lambda 1/88 \times 10^{\circ}$	عدد تيلور
•/•TT9 <we<t tav<="" td=""><td>عدد وبر</td></we<t>	عدد وبر
$\cdot < \alpha < /.$	كسرحجمى
$D_b \leq 1/$ Ymm	قطر حباب

همانطور که قبلا ذکر شد، اتلاف در فضای حلقوی بین دو استوانهی هم محور وابسته به تغییرات فشار در راستای محور استوانهها است. علاوه بر این فشار در هر مقطع وابسته

به پارامترهایی مانند، سرعت متوسط جریان محوری، سرعت دورانی استوانه داخلی، فاصلهی شعاعی بین دو استوانه و شعاع استوانه داخلی است [۳۹]. در سیستم تیلور-کوئت، طراحی شده در این مطالعه، فاصلهی شعاعی بین دو استوانه و شعاع استوانهی داخلی ثابت است و سرعت متوسط جریان محوری و سرعت دورانی استوانهی داخلی به ترتیب، با تغییر دبی جریان محوری و گشتاور اعمال شده روی استوانهی اثرات جریان محوری و سرعت دورانی روی اندازه گیری فشار، اثرات جریان محوری و سرعت دورانی روی اندازه گیری فشار، پورتی با طراحی خاص استفاده شده است. این پورت شامل، استوانهها و دیگری عمود بر صفحه گذرنده از محور استوانهها است. در حقیقت این پورت شامل، دو لوله عمود برهم است است. در حقیقت این پورت شامل، دو لوله عمود برهم است منسورهای فشار متصل شدهاند.

همانطور که در شکل ۳ مشهود است، در سیستم تیلور-کوئت طراحی شده در این تحقیق، فشار در دو مقطع و توسط دو پورت فشار اندازه گیری می شود که پورتها روی بدنه استوانهی خارجی نصب شدهاند.

دقت کلیه سیستمهای اندازه گیری استفاده شده در این تحقیق، بر مبنای تحلیل عدم قطعیت در جدول ۳ ارائه شده است. علاوه براین برای ارزیابی دقت سیستم تیلور-کوئت مورد نظر، مقایسهای بین نتایج گشتاور اعمالی روی استوانه داخلی در این تحقیق و نتایج ارائه شده توسط بیلگن و بولوز [۴۱] صورت پذیرفته است. این مقایسه در جریانی تک فاز و در غیاب هرگونه حبابی صورت پذیرفته است. همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است، گشتاور در تمام محدوده رینولدز دورانی، از تطابق خوبی با نتایج مرجع [۴۱] برخوردار است.

جدول ۳- دقت سیستم های اندازه گیری

مقدار	پارامتر
$\cdot / \cdot \cdot Pa$	سنسورهای فشار
$\cdot / \cdot \cdot \cdot \wedge m^3 / min$	دبی سنج هوا
•/\ <i>rpm</i>	دورسنج



۳- شیوهی انجام آزمایشات

در این تحقیق اختلاف فشار، اصلی ترین فاکتور برای ارزیابی تغییرات اتلاف هد در حضور حبابهای هوا است که باید در حالت دائم اندازه گیری شود. برای این منظور سعی شده پس از تعیین پارامترهای ورودی در هر مرحله از آزمایش، اندازه-گیری فشار در جریانی یکنواخت رخ دهد.

در حالت کلی آزمایشات به این شیوه انجام شدند که در مرحلهی اول، دبی جریان آب ورودی به سیستم از طریق فلومتر آب اندازه گیری شد و سپس جریان آب از قسمت زیرین سیستم به داخل فضای حلقوی فرستاده شد. در مرحله دوم، دبی جریان هوای مورد نیاز برای ایجاد حبابها در سیستم توسط دبی سنج هوا تعیین گردید و به داخل آب تزریق شد. در مرحله سوم، استوانهی داخلی در سرعت زاویه-ای از پیش تعیین شده به حرکت در آورده شد. در نهایت، ای از پیش تعیین شده به حرکت در آورده شد. در نهایت، تقریبا یکنواخت در سیستم، فشار در مقاطع مورد نظر اندازه-گیری شد. این آزمایشات با تغییر سرعت دورانی استوانهی توجه به این نکته ضروری است که زمان دست یافتن به شرایط یکنواخت قبل از اندازه گیری فشار، در تمامی شرایط توه است.

پس از اندازه گیری اختلاف فشار (ΔP) بین دو مقطع مورد نظر ضریب اتلاف هد (λ) با رابطه (۱) بدست می آید: $h = \Delta P / \gamma_w = \lambda l V_m^2 / 4 \delta g$ (۱)

از معادله ۱ می توان اتلاف هد (h) را برای جریان محصور در فضای حلقوی بین استوانههای هم محور محاسبه کرد. در این معادله l، γ_w ، γ_w ، γ_w ، V_m ، فاصلهی بین پورتهای سنجش فشار، سرعت متوسط جریان محوری، وزن مخصوص آب، فاصلهی شعاعی بین دو استوانهها و شتاب جاذبه زمین است.

جریان برقرار شده در فضای حلقوی، ترکیبی از جریان محوری و جریان چرخشی است، بنابراین اصلاح اتلاف هد از طریق تزریق حبابهای کوچک با تغییر دو عدد رینولدز در این آزمایشات، مورد بررسی قرار گرفته است. جریان چرخشی، به خاطر دوران استوانه داخلی شکل می گیرد و آشفتگی این جریان با عدد رینولدز دورانی توصیف می شود که بصورت رابطه (۲) تعریف می شود:

 ${
m Re}_{\omega}=r_1\delta\omega/v_w$ (۲) در اینجا «۷ ویسکوزیته یسینماتیکی آب بدون حباب است. بهخاطر این که در جریان دوفازی ایجاد شده در یک سیستم تیلور-کوئت، ویسکوزیته ی موثر تقریبا تحت تاثیر حبابها نیست [۳۴]؛ بنابراین از ویسکوزیته سینماتیکی آب بدون حباب برای تعریف عدد رینولدز در این تحقیق، استفاده شده است. علاوه براین r_1 و «۷ به ترتیب، شعاع استوانه ی داخلی و سرعت زاویه ای هستند.

ماهیت جریان محوری، از طریق عدد رینولدز محوری تعیین میشود که بصورت رابطه (۳) اندازه گیری میشود: (۳)

 $\mathrm{Re}_{\mathrm{a}} = V_{\mathrm{m}} \; 2 \delta / v_w$ در جریان
های تیلور-کوئت، زمان پیدایش گردابههای

تیلور با عدد بی بعد تیلور مشخص می شود که بصورت رابطه (۴) تعریف می شود:

 $Ta = Re_{\omega}^{2}(\delta/r_{1}) = (\omega^{2}r_{1}\delta^{3}/v_{w}^{2})$ (*)

از معادله ۲، می توان فهمید که زمان پیدایش گردابههای تیلور علاوه بر عدد رینولدز دورانی، وابسته به فاصلهشعاعی بین دو استوانه است. کازلی [۴۲]، عنوان می کند که در یک سیستم تیلور -کوئت ساده، گردابههای تیلور در ^۲ ۱۰×۱/۲ ظاهر می شوند. طبق تغییرات عدد رینولدز دورانی که در جدول ۱ آورده شده است، بازهی تغییرات عدد تیلور در این تحقیق، از ۲۱/۶۶×۴۱/۶ تا ۲۰۲×۸۱/۶۶ است؛ بنابراین می توان نتیجه گرفت که گردابههای تیلور در جریان محصور شده در فضای حلقوی در تمام رنج تغییرات عدد رینولدز دورانی ظاهر می شوند.

با هدف مشخص شدن بزرگی برهم کنش بین حبابها و گردابههای ایجاد شده در جریان از عدد بی بعد کسر حجمی استفاده شده است. این عدد برای جریانهای تیلور -کوئت، بصورت رابطه (۵) تعریف می شود: (۵)

 $\alpha = Q_a/(Q_a + Q_w)$ در معادله Q_a ، Q_a ، Q_a دبی جریان آب است. در این مطالعه، آنالیز عدم قطعیت برای کسر حجمی نشان می دهد که عدم قطعیت چنین پارامتری تقریبا ٪ ۲. است.

۴ – تصویر برداری و پردازش تصویر

برای اندازه گیری قطر حبابها، از تصویربرداری و پردازش تصویر استفاده شده است. برای این منظور، از دوربین دیجیتال کاسیو مدل EX-F1 استفاده شده که مجهز به سنسور CMOS و پردازنده سرعت بالای LSI است. برای تعیین قطر حبابها، از عکس برداری سرعت بالا استفاده شده است و دادهها مستقیما به کامپیوتر منتقل گردیده است. برای این منظور، ابتدا دوربین مورد نظر کالیبره شده است. برای کالیبره کردن دوربین، ابتدا نمونههایی در ابعاد و اندازه مشخص تهیه شده که در شکل ۵ نشان داده شدهاند.



شکل ۵- نمونه هایی برای کالیبره کردن دوربین

پس از تهیهی نمونه، دوربین روی سه پایه و در مکانی مشخص قرار گرفته و سعی شده تا حدالامکان مکان دوربین تا پایان آزمایشات تغییر نکند.

پس از این مرحله، نمونه داخل سیستم و در مکانی مشخص قرار داده شده است (شکل ۵). در ادامه با استفاده از دوربین و تحت حالت عکسبرداری از نمونه چندین عکس گرفته شده است. توجه به این نکته ضروری است که در سیستم مورد نظر هنگام عکس برداری آب وجود دارد.

حال با استفاده از یک نرم افزار، اندازه نمونه در تصاویر گرفته شده از طریق دوربین با اندازه واقعی آن مقایسه شده است و میزان خطا در عکسبرداری مشخص گردیده است. به عبارتی دیگر، اختلاف x و X و همچنین اختلاف y و Y برای هر دو نمونه مربعی و دایرهای که در شکل ۵ نشان داده شده-اند، محاسبه شده است. مقدار خطا بر مبنای تحلیل عدم قطعیت، حدودا ۵۸/۸μm بوده است.

برای پردازش تصویر، ابتدا نویزهای موجود در تصاویر حذف شده است و سپس با استفاده از الگوریتم تعیین لبه، مرز حبابها مشخص شده است. مقدار خطا در تعیین قطر حبابها تقریبا 1± پیکسل، یعنی μμ ۶۰ بوده است. به منظور کاهش مقدار خطا مربوط به قطر حبابها، در هر تصویر بطور میانگین ۵۰۰ حباب انتخاب شده است.

۵- نتایج

شکل ۶، تغییرات قطر حبابها را برحسب تغییرات کسرحجمی نشان میدهد. نتایج گویای آن است که با افزایش کسر حجمی، قطر حبابها کاهش مییابد. دلیل این تغییرات، افزایش دبی جریان هوا است. با افزایش دبی جریان هوا، مومنتم تزریق و سرعت روبه بالای حبابها افزایش می-یابد. در نتیجه حبابها پس از خروج از تزریق گرها بطور منفرد در جریان توزیع میشوند و کمتر به یکدیگر می-پیوندند. از طرفی دیگر، افزایش مومنتم تزریق منجر به افزایش نیروی اعمالی روی حبابها میشود که در شکست حبابها و تبدیل آنها به حبابهای کوچکتر نیز موثر است.



شکل ۲، تغییرات λ را برحسب تابعی از Re_a در مقادیر مختلفی از $\operatorname{Re}_{\omega}$ و Q_a نشان میدهد. در این شکل با افزایش روی روی محوری روی λ ،Re $_{\mathrm{a}}$ گردابههای تیلور میتواند دلیل چنین تغییراتی باشد. در یک سیستم تیلور-کوئت با اعمال جریان محوری سه نیروی اصلی هر المان سيال را تحت تاثير قرار مىدهند. اين نيروها شامل، نیروی محوری، نیروی گریز از مرکز و نیروی اصطکاکی هستند. هنگامیکه Re_a در مقدار مشخصی از Re_o افزایش می یابد، نیروی محوری در مقایسه با نیروی گریز از مرکز بر جریان غالب خواهد شد. در این حالت، تاثیر نیروی اصطکاکی بین المانهای سیال افزایش مییابد؛ بنابراین شکل گیری رژیمهایی از جریان که شامل گردابههای تیلور هستند، به تاخیر میافتد. در حقیقت جریان محوری با تقویت نیرویهای اصطکاکی، گردابههای تیلور را میرا می سازد و شکل گیری آنها را تا اعداد تیلور بزرگتر به تاخیر می اندازد. تاخیر در شکل-گیری گردابههای تیلور، سبب کاهش انتقال مومنتم در جریان می شود. با در نظر گرفتن نتایج نشان داده شده در شکل ۷ می توان فهیمد که با افزایش Re_o در هر مقداری از افزایش می یابد. در این شرایط، تاثیر هر چه بیشتر λ ،Re $_{\mathrm{a}}$ نیروی گریز از مرکز روی المان های سیال و پیدایش گردابه-های تیلور دلیل افزایش λ است.



شکل ۷- تغییرات ضریب اتلاف هد برحسب عدد رینولدز محوری و در دبیهای مختلف هوا

به منظور مطالعه تاثیر حبابها روی تغییرات λ نسبت ضریب افت هد با معادله ۶ محاسبه می شود. (۶) (۶)

در اینجا زیراندیس صفر نشان دهنده، شرایط جریان در غیاب حبابها است.

شکل ۸ ، رابطهی بین تغییرات ξ و e_{ω} Re را در مقادیر مختلفی از Q_a و Re_a نشان میدهد. نتایج نشان میدهند که حداکثر کاهش اتلاف هد، تقریبا ۶۰٪ است. ξ با افزایش Re_{ω} و Re کاهش مییابد و حتی منفی میشود. منفی شدن ξ به این معنا است که حبابها اتلاف هد را افزایش میدهند.

تعییرات ⁵ در شکل ۸، برحسب عدد رینولدز دورانی و محوری بصورت زیر توجیه میشوند. در اعداد رینولدز دورانی کوچک تاثیر نیروی گریز از مرکز روی حبابها و همچنین المانهای سیال کم است؛ بنابراین توزیع حبابها بطور منفرد و آهسته در فضای حلقوی رخ میدهد. علاوه براین، جابجایی المانهای سیال به آهستگی اتفاق میافتد و گردابههای تیلور در جریان ظاهر نمیشوند. در این حالت، آشفتگی جریان کم است و حبابها میتواند از طریق چند مکانیزم اتلاف هد را در جریان کاهش دهند. مهمترین مکانیزم، کاهش چگالی جریان توسط حبابها است. کاهش آشفتگی جریان از طریق



شکل ۸- تغییرات نسبت ضریب اتلاف هد برحسب عدد رینولدز دورانی و در رینولدزهای محوری مختلف

مکانیک سازهها و شارهها/ سال ۱۳۹۶/ دوره ۷/ شماره ۱ SID.ir

تاثیر مستقیم تراکمپذیری موثر حبابها روی نوسانات جریان، می تواند مکانیزم دیگری برای کاهش اتلاف هد باشد. تراکم پذیری موثر با جابجا کردن ساختارهای گردابهای جریان به فواصلی دور از سطح استوانهی داخلی، سبب کاهش آشفتگی جریان می شود. علاوه بر مکانیزمهای اشاره شده در بالا، انبساط گردابههای تیلور در راستای محور استوانهها و همچنین کاهش تعداد آنها در این راستا، فاکتور دیگری برای کاهش اتلاف هد در حضور حبابها است.

در اعداد رینولدز دورانی کوچک، با افزایش ه Re_a ، میرا شدن گردابههای تیلور و سرعت صعود حبابها افزایش می-یابد؛ بنابراین افزایش Re_a ، کاهش هر چه بیشتر اتلاف هد در جریان را درپی خواهد داشت که در شکل ۸ نشان داده شده است. با افزایش Re_a ، تاثیر نیروی گریز از مرکز روی حبابها افزایش مییابد. در این حالت، اغلب حبابها بطور یکنواخت شعاعی و بطرف استوانهی داخلی رخ میدهد. چنین توزیعی، شعاعی و بطرف استوانهی داخلی رخ میدهد. چنین توزیعی، منجر به تجمع حبابها و ایجاد ابرهای حبابی در مجاورت استوانهی داخلی و در هستهی گردابههای تیلور خواهد شد. ابرهای حبابی در مجاورت استوانهی داخلی با تخریب لایه امرزی، سبب افزایش انتقال مومنتم و در نتیجه افزایش اتلاف هد می شوند. علاوه براین ابرهای حبابی با قرار گرفتن در مسته گردابههای تیلور، منجر به بقای گردابهها و افزایش نوسانات جریان خواهند شد.

در رینولدزهای دورانی بزرگ افزایش هRe، تاثیری در میرا کردن گردابههای تیلور نخواهد داشت؛ زیرا گردابهها با جابجایی سریع المانهای سیال و همچنین قرارگیری ابرهای حبابی در هسته آنها بسیار پایدارند. از طرفی دیگر، افزایش هی، منجر به جابجایی ابرهای حبابی میشود که در تخریب Rea، مرزی و افزایش نوسانات جریان موثر است؛ بنابراین افزایش هRe، سبب میشود تا حبابها تاثیری منفی روی کاهش اتلاف هد داشته باشند.

شکل ۹، تغییرات توزیع حبابها را در رینولدزهای دورانی مختلف نشان می دهد. در اعداد رینولدز دورانی کوچک، نیروی گریز از مرکز ضعیف است، بنابراین حبابها بطور یکنواخت و منفرد در جریان توزیع می شوند و در مسیرهای اریب حرکت می کنند که در شکل ۹آ نشان داده شده است. در این حالت، حبابها بطور هم زمان در سه

جهت شعاعی، محوری و محیطی حرکت میکنند و از یک لایه سیال به لایه دیگر تغییر مکان میدهند. با افزایش عدد رینولدز تا ۲۰۲×۲۴/۴=۵۳، تاثیر نیروی گریز اعمالی روی حباب ها در جهت شعاعی به سمت استوانهی داخلی حرکت حباب ها در جهت شعاعی به سمت استوانهی داخلی حرکت کرده، در مجاورت سطح این استوانه تجمع میکنند (شکل افزایش عدد رینولدز دورانی تا ۲۰۲×۲۴/۴۵=۵۳ افزایش می-افزایش عدد رینولدز دورانی تا ۲۰۲×۵۲/۴۵=۵۳ افزایش می-جهت محیطی و در مسیرهای حلقوی شکل حرکت میکنند (شکل ۹ت). علاوه براین در شکل ۱۰ نشان داده شده است (شکل ۹ت). علاوه براین در شکل ۱۰ نشان داده شده است که ابرها بین هر جفت از گردابههای تیلور و در مجاورت استوانهی داخلی قرار میگیرند. در این اعداد رینولدز دورانی، قرارگیری ابرهای حبابی در هستهی گردابهها محتمل است.

۶- نتیجهگیری

در این مطالعه، بطور تجربی تاثیر حبابهای کوچک روی کاهش اتلاف هد جریان (اتلاف ناشی از افت فشار) در یک سیستم تیلور-کوئت بررسی شد. سیستم آزمایشگاهی مجهز به سیستم بازگردش جریان است که در حین دوران استوانه داخلی، جریان را به داخل فضای حلقوی فرستاده و از آن خارج ساخته است. جریان برقرار شده بین دو استوانهی هم محور که ترکیبی از جریان محوری و جریان چرخشی است، کاملا آشفته بوده، گردابههای تیلور در تمام بازهی تغییرات عدد رینولدز دورانی در جریان ظاهر شدهاند. حبابهای کوچک (حباب هایی با قطر کمتر یا در حدود (۱/۷mm) و جریان محوری، از قسمت تحتانی سیستم به داخل فضای حلقوی فرستاده شدهاند. به منظور مطالعه تغییرات اتلاف هد، اختلاف فشار بین دو نقطه مشخص در راستای محور استوانه-ها اندازه گیری شده است.

نتایج نشان دادند که کاهش اتلاف هد، تحت تاثیر تزریق حبابهای هوا است. حبابها در اعداد رینولدر دورانی کوچک با کاهش چگالی جریان، کاهش تعداد گردابههای تیلور در راستای محور استوانهها و همچنین کاهش آشفتگی از طریق جابجا کردن ساختارهای گردابهای، منجر به کاهش اتلاف هد میشوند. در این حالت، حداکثر کاهش اتلاف هد ثبت شده ۶۰٪ است. علاوه براین مشاهده شد که در اعداد رینولدز

دورانی کوچک، افزایش عدد رینولدز محوری، اتلاف هد را کاهش میدهد که این بهدلیل میرا شدن گردابههای تیلور توسط جریان محوری است. با افزایش عدد رینولدز دورانی، حبابها به یگدیگر پیوسته و با ایجاد ابرهای حبابی در

مجاورت استوانهی داخلی و هستهی گردابههای تیلور، منجر به افزایش نوسانات جریان و در نتیجه افزایش اتلاف هد می-شوند. در ضمن در اعداد رینولدز دورانی بزرگ، افزایش عدد رینولدز محوری سبب افزایش اتلاف هد میشود.



شکل ۹- تغییرات الگوی جریان محصور در فضای حلقوی نسبت به عدد رینولدز دورانی

۸- مراجع

- McCormick ME, Bhattacharyya R (1973) Drag reduction of a submersible hull by electrolysis. Naval Eng J 85: 11-16.
- [2] Bogdevich VG, Evseev AR, Mayyuga AG, Migirenko GS (1977) Gas-saturation effect on near-wall turbulence characteristics. In Proc. Second International Conference on Drag Reduction, (ed. H.S. Stephens & J. A. Clark), Cambridge, England. BHRA Fluid Engineering, D 2, 25-37.
- [3] Madavan NK, Deutsch S, Merkle CL (1984) Reduction of turbulent skin friction by micro bubbles. Phys Fluids 27: 356-363.
- [4] Madavan NK, Merkle CL, Deutsch S (1985) Numerical investigations into the mechanisms of microbubble drag reduction. J Fluids Eng 107: 370-377.
- [5] Merkle CL, Deutsch S (1989) Microbubble drag reduction. In Frontiers in Experimental Fluid Mechanics. (ed. M. Gad-el-Hak), 291-335. Springer, New York.
- [6] Deutsch S, Castano J (1986) Microububble skin friction reduction on an axisimmetric body. Phys Fluids 29: 3590-3597.
- [7] Kato H, Miyanaga M, Haramoto Y, Guin MM, (1994) Frictional drag reduction by injecting bubbly water into turbulent boundary layer. In Proc. Cavitation and Gas-Liquid Flow in Fluid Machinery and Devices ASME, 190, 185-194.
- [8] Guin MM, Kato H, Yamaguchi H, Maeda M, Miyanaga M (1996) Reduction of skin friction by micro bubbles and its relation with near wall concentration in a channel. J Mar Sci Technolo 1: 241-254.
- [9] Legner HH (1984) Simple model for gas bubble drag reduction. Phys Fluids 27: 2788-2790.
- [10] Marie JL (1987) A simple analytical formulation for microbubble drag reduction. J Phys-Chem Hydro 13: 213-220.
- [11] Felton K, Loth E (2002) Diffusion of spherical bubbles in a turbulent boundary layer. Int J Multiphas Flow 28: pp. 69-92.
- [12] Ferrante A, Elghobashi S (2004) On the physical mechanism of drag reduction in a spatially developing turbulent boundary layer laden with microbubbles. J Fluid Mech 503: 345-355.
- [13] Xu J, Maxey MR, Karniadakis GE (2002) Numerical simulation of turbulent drag reduction using microbubbles. J Fluid Mech 468: 271-281.
- [14] Lu J, Fernadez A, Tryggvason G (2005) The effect of bubbles on the wall drag in a turbulent channel flow. Phys Fluids 17: 1-12.
- [15] Kanai A, Miyata H (2001) Direct numerical simulation of wall turbulent flows with micro bubbles. Int J Numer Meth Fluids 35: 593-615.







۷– فہر ست علائم قطر استوانههای داخلی و خارجی(m) d_1, d_2 شتاب گرانش زمین(²⁻ms) g اختلاف فشار (Nm²) ΔP دبی جریان هوا(m³s⁻¹) Q_a دبی جریان آب (m³s⁻¹) Q_w فاصلهی بین پورتهای سنجش فشار (m) l طول استوانه های داخلی و خارجی(m) L_{1}, L_{2} طول نازل همگرا کننده (m) L_n شعاع استوانه های داخلی و خارجی (m) r_{1}, r_{2} (ms^{-1}) سرعت متوسط جریان محوری (ms^{-1} V_m عدد رينولدز دوراني _oRe عدد رينولدز محورى Re_a عدد تيلور Та كسرحجمى α (Nm^{-3}) وزن مخصوص آب (Nm⁻³) γ_w فاصلهی شعاعی بین دو استوانه (m) δ ضريب اتلاف هد λ ویسکوزیتهی سینماتیکی آب (m²s⁻¹) v_w نسبت ضريب اتلاف هد ξ چگالی آب (kgm⁻³) ρ_w سرعت زاویهای(rpm) ω

- [31] Hubacz R, Wronski S (2004) Horizontal Couette– Taylor flow in a two-phase gas–liquid system: flow patterns, Exp ThermnFluid Sci 28: 457-466.
- [32] Van den Berg TH, Luther S, Lathrop D, Lohse D (2005) Drag reduction in bubbly Taylor–Couette turbulence. Phys Rev 94: 1-4.
- [33] Van der Berg TH, van Gils DPM, Lathrop DP, Lohse D (2007) Bubbly Turbulent Drag reduction is a boundary Layer effect. Phys Rev 98: 084501.
- [34] Murai Y, Oiwa H, Takeda Y (2008) Frictional drag reduction in bubbly Couette–Taylor flow. Phys Fluids 20: 1-12.
- [35] Maryami R, Javad Poor M, Farahat S, Shafie Mayam MH (2014) Experimental drag reduction by bubbles in a Couette. Modares Mech Eng 9: 1-10. (In Persian)
- [36] Maryami R, Farahat S, Shafie Mayam MH, Javad Poor M (2015) Experimental investigation of the Bubbly drag reduction in the presence of axial flow in a the Couette-Taylor system. Amirkabir Journal of Science & Research (Mechanical Engineering) 47: 33-45. (In Persian)
- [37] Sugiyama K, Calzavarini E, Lohse D (2008) Microbubbly drag reduction in Taylor-Couette flow in the wavy vortex regime. J Fluid Mech 1-30.
- [38] Maryami R, Shafiei Mayam MH, Farahat S, JavadPour M (2011) Numerical study of drag reduction using micro bubbles in a vertical Couette-Taylor system. 7th International Chemical Engineering Congress & Exihibition Kish, Iran.
- [39] Yamada Y, (1960) Resistance of a flow through an annulus with an inner rotating cylinder. Bulletin of JSME 18: 302-310.
- [40] Shen X, Ceccio SL, Perlin M (2006) Influence of bubble size on micro-bubble drag reduction. Exp Fluids 41: 415-424.
- [41] Bilgen, E, Boulos R (1973) Functional dependence of torque coefficient of coaxial cylinders on gap width and Reynolds numbers. J Fluid Eng-T ASME 95(1): 122-126.
- [42] Cazley JC (1985) Heat trasfer characteristics of the rotational and axial flow between cocentric cylinders. ASME 80: 77-90.

- [16] Yanuar, Gunawan, Sunaryo, Jamaluddin A (2012) Micro-bubble drag reduction on a high speed vessel model. J Marince Sci Appl 11: 301-304.
- [17] Takahashi T, Kakugawa A, Makino M, Kodama Y (2003) Experimental study on scale effect of drag reduction by microbubbles. using very large flat plate ships. J Kansai Soc NA Jpn 239: 11-20.
- [18] Latorre R, Miller A, Philips R (2003) Microbubble resistance reduction on a model SES catamaran. Ocean Eng 30(17): 2297-2309.
- [19] Nouri NM, Sarreshtehdari A (2009) An experimental study on the effect of air bubble injection on the flow induced rotational hub. Exp Therm Fluid Sci 33: 386-392.
- [20] Couette M (1890) Etudes sur le frottement des liquids. Ann Chim Phys Fluids 21: 433-510.
- [21] Mallock A (1896) Experiments on fluid viscosity. Phil Trans R Soc Lond A 93: 41.
- [22] Rayleigh L (1916) On the dynamics of revolving fluids. Proc Roy Sac Lond A 93: 148-154.
- [23] Taylor GI (1923) Stability of a viscous liquid contained between two rotating cylinders. Phil Trans Roy Soc Lond A 223: 289-343.
- [24] Cornish JA (1933) Flow of water through fine clearances with relative motion of the boundaries. Proc R Soc Lond A 140: 227-240.
- [25] Goldstein S (1937) The stability of viscous fluid flow between rotating cylinders. Proc Camb Phil Soc 33; 41-61.
- [26] Chandrasekhar S (1960) The hydrodynamic stability of viscous flow between coaxial cylinders. Proc Natl Acad Sci 46: 141-143.
- [27] Di Prima RC (1960) The stability of a viscous fluid between rotating cylinders with an axial flow. J Fluid Mech 9: 621-631.
- [28] Donnelly RJ, Fultz D (1960) Experiments on the stability of spiral flow between rotating cylinders. Proc Natl Acad Sci 46: 1150-1154.
- [29] Shiomi Y, Kutsuna H, Akagawa K, Ozawa M (1993) Two-phase flow in an annulus with a rotating inner cylinder—flow pattern in bubbly flow region. Nucl Eng Des 141(1-2): 27-34.
- [30] Atkhen K, Fontaine J, Wesfreid JE (2000) Highly turbulent Couette-Taylor bubbly flow patterns. J Fluid Mech 422: 55-68.