

مطالعه آزمایشگاهی عملکرد رادیومتر کروکس*

مقاله پژوهشی

رضا عرب‌پور^(۱)احسان روحی^(۲)

چکیده این مقاله به بررسی و مطالعه آزمایشگاهی عملکرد پره‌های پمپ‌های رادیومتریک می‌پردازد. یک نمونه از این پمپ‌های رادیومتریک، رادیومتر کروکس است که شامل محفظه‌ای شیشه‌ای شکل است که درون آن خلأ است. داخل این محفظه شیشه‌ای پره‌هایی بر روی یک سوزن قرار دارند. یک طرف از این پره‌ها به صورت براق و سمت دیگر به صورت تیره هستند. در این پژوهش برای اولین بار مکانیزمی برای تعیین دما به صورت مستقیم از روی پره‌های سرد و گرم در نظر گرفته شده است. مشاهده می‌شود که نیروی اندازه‌گیری شده با اختلاف دمای میان دو سر پره متناسب است و این تناسب به صورت خطی است؛ اما این ارتباط تنها تا بیشینه اختلاف دما صادق است. سرعت زاویه‌ای پره‌ها نیز توسط یک تاکومتر لیزری اندازه‌گیری شده است. برای محاسبه نیرو از سرعت اندازه‌گیری شده استفاده شده است. این مطالعه در سه بخش صورت گرفته است. بخش اول (آزمایشگاهی) ساخت یک نمونه رادیومتر کروکس است. بخش دوم شامل مطالعه و بازخوانی تحلیل جریان رادیومتریک و تئوری‌های مربوط به نیروی رادیومتریک می‌باشد و در بخش سوم مقایسه نتایج آزمایشگاهی و تئوری‌های موجود در قسمت آزمایشگاهی انجام شده است. این آزمایش در چهار فشار کاری 30 pa ، 6 pa ، 0.6 pa و 0.06 pa انجام شده است. هر فشار به ترتیب نماینده اعداد نودسن 10^5 ، 10^4 ، 10^3 و 10^2 و یک رژیم جریان است. بیشینه نیروها در فشار 6 pa و بیشینه سرعت در فشار 0.6 pa مشاهده شد که با داده‌های تئوری تطابق خوبی دارد.

واژه‌های کلیدی جریان رقیق شده، جریان رادیومتریک، پمپ‌های رادیومتریک، رادیومتر کروکس

مقدمه

تنش‌های حرارتی غیر خطی [9,10]، جریان لبه حرارتی

[11] و جریان ناشی از اختلاف دما در طرفین یک پره

(جریان رادیومتریک) [12,13].

پمپ‌های رادیومتریک در جریان‌های گاز رقیق بر اساس ایجاد نیروی رادیومتریک عمل می‌کنند. معیار رقیق‌شدگی در جریان‌های گازی با عدد بدون بعد نودسن (Kn) نمایش داده می‌شود. این عدد نسبت طول پوشش آزاد مولکولی (λ) به طول مشخصه هندسی (L) را گزارش می‌کند. عدد نودسن طبق رابطه (۱)، با عدد رینولدز (Re) و عدد ماخ (Ma) ارتباط دارد [14].

$$Kn = \lambda / L = \sqrt{\frac{\gamma\pi}{2}} \frac{Ma}{Re} \quad (1)$$

از ویژگی‌های منحصر به فرد گاز رقیق این است که می‌توان بدون نیاز به وجود اختلاف فشار یا یک نیروی خارجی، یک جریان ایجاد کرد. در این نوع جریان‌ها واکنش میان سیال رقیق و مرز جامد نقش مهم و تعیین‌کننده‌ای در شکل‌گیری جریان بازی می‌کند. اگر به دلیل اختلاف دما بین نقاط یک جسم با سیال رقیق، و یا توزیع دمای اعمال شده در مرزهای سیال رقیق، جریان جرمی در سیال ایجاد شود، جریانی که حاصل می‌شود را جریان حرارتی می‌نامند [1]. در رژیم جریان رقیق‌شده، جریان‌های حرارتی مهم عبارتند از جریان خزش حرارتی [2-5]، جریان خزش حرارتی معکوس [6]، جریان تنش‌های حرارتی لغزشی [7,8]، جریان

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۰/۰۱/۱۲ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۰/۱۰/۱۲ می‌باشد.

(۱) دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

(۲) نویسنده مسئول، استاد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

هم‌زمان لیتوین و بروخ آزمایش‌های زیادی برای بررسی تأثیر گازهای مختلف و هندسه پره‌های رادیومتر بر روی نیروی تولیدشده انجام دادند. آنها نیروی رادیومتریکی را به صورت تابعی از فشار به دست آوردند [20].

$$F \propto \frac{1}{\frac{a}{P} + \frac{P}{b}} \quad (2)$$

در رابطه (۲) متغیر a و b تابعی از هندسه و گاز-های مختلف هستند. در همین دوره اینشتین (Einstein) دو عبارت برای رابطه نیرو روی پره‌های رادیومتر ارائه نمود [21]:

۱- اگر پره‌ای که یک طرف آن سرد و طرف دیگر آن گرم است در گازی با دمای یکنواخت T قرار گیرد، رابطه نیرو به صورت رابطه (۳) است. اولین عبارت مربوط به نیروی روی یک پره رادیومتر با اختلاف دما میان دو طرف آن و قرار گرفتن در گازی با دمای یکنواخت است.

$$F = -P\lambda \frac{\Delta T}{T} \quad (3)$$

در رابطه (۳) λ طول پویش آزاد مولکولی، ΔT اختلاف دمای دو طرف پره و T دمای گاز را نشان می‌دهند.

۲- اگر پره دمای یکنواختی داشته باشد و داخل گازی با گرادین دمای قابل ملاحظه قرار گیرد (پدیده ترموفورسیس) نیرو به صورت رابطه (۴) بیان می‌شود.

$$F = -\frac{1}{2} P \frac{\lambda^2}{T} \frac{dT}{dx} \quad (4)$$

سکسل رابطه (۵) را ارائه داد که n درجه آزادی مولکول‌ها است [22]:

$$F = -\frac{14.72}{n+5} \frac{p\lambda^2}{T} \Delta \quad (5)$$

در رابطه (۱) γ ثابت گاز است. تقسیم‌بندی رژیم جریان برحسب عدد نودسن به صورت زیر است [1].

۱. رژیم پیوسته: ($Kn < 0.001$)

۲. رژیم لغزشی: ($0.001 < Kn < 0.1$)

۳. رژیم گذرا: ($0.1 < Kn < 10$)

۴. رژیم مولکول‌های آزاد: ($Kn > 10$)

جریان‌های رادیومتریکی که نوعی از جریان‌های حرارتی هستند، پیرامون صفحه‌ای ایجاد می‌شوند که طرفین آن به صورت غیریکنواخت گرم شده باشد، یا به عبارتی دو طرف صفحه اختلاف دما داشته باشد. نیرویی که از سمت صفحه گرم به صفحه سرد اعمال می‌شود نیروی رادیومتریکی نامیده می‌شود.

در سال ۱۸۷۰ ویلیام کروکس رادیومتری را که امروزه به نام رادیومتر کروکس شناخته می‌شود، ساخت. این رادیومتر شامل پره‌هایی با رنگ طرفین متفاوت بود که در محفظه‌ای از گاز رقیق شده قرار داشت. او آزمایش‌های متعددی برای بررسی تأثیر انرژی تابشی بر روی پره‌های رادیومتر انجام داد [13,15]. پیش از او بنت در سال ۱۷۹۲ بدون ارائه تعریف مشخصی، اثر تابش گرمایی بر روی پره‌های تحت فشار خلأ را مشاهده کرد [16].

فرسنل در سال ۱۸۲۵ مشاهده کرد که صفحات نازک فلزی تحت تابش در خلأ یکدیگر را دفع می‌کنند [17]. هدف محققان به دست آوردن رابطه بین نیروهای واردشده به پره‌ها و فشار داخل حباب و مکانیزم چرخش پره‌ها بود [14]. وست این پدیده را بررسی کرد و به نتایج زیر دست یافت [18,19]:

۱. در کمترین فشارها نیرو با \sqrt{T} متناسب است.

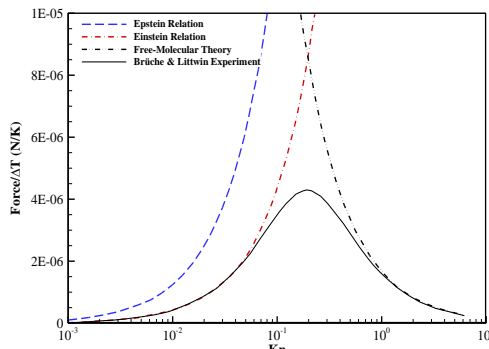
۲. اگر فشار افزایش یابد، پدیده‌ای که باعث

چرخش پره‌ها می‌شود جریان خزشی گرمایی خواهد بود.

۳. گرادین دما در لبه‌ها بسیار قوی‌تر از گردیان

دما در طول پره‌ها است.

بر روی پره‌های رادیومتر، به دانستن اختلاف دما بر روی پره‌های رادیومتر نیاز است، اما تاکنون در هیچ آزمایشی اندازه‌گیری دمای دو طرف پره به صورت مستقیم انجام نشده است. در تحقیق آزمایشگاهی حاضر برای اولین بار اندازه‌گیری دمای دو طرف پره به صورت مستقیم توسط سنسورهای مقاومت گرمایی انجام شده است. این روش اندازه‌گیری دما علاوه بر این که دقت اندازه‌گیری دما را افزایش می‌دهد و عدم قطعیت در تعیین دما را به حدود ۱،۵٪ می‌رسد، در محاسبه نیروی وارد شده به پره‌های رادیومتر اثرگذار خواهد بود و باعث می‌شود نیروی رادیومتریکی با دقت بالاتری گزارش شود.



شکل ۱ مقایسه نتایج تئوری‌های انیشتین، اپستین، رژیم مولکولی آزاد و نتایج تجربی بروخ و لیتوین برای نیرو بر واحد گردان دما برحسب عدد نودسن [26]

ماهیت نیروهای رادیومتریکی

نیروی غالب در مکانیزم رادیومتر بستگی به عدد نودسن و رژیم جریان دارد. در رژیم مولکول‌های آزاد، نیروی اصلی به وسیله اختلاف ممتم مولکول‌های انعکاس یافته از دو طرف پره ایجاد می‌شود (شکل ۲). مولکولی که از سمت گرم پره انعکاس می‌یابد، با سرعت بیشتر و نیز با ممتم بالاتری حرکت می‌کند. این اختلاف ممتم ناشی از اختلاف دما، باعث ایجاد اختلاف فشار در دو سمت پره می‌شود و نیرویی را تولید می‌کند که به شدت به سطح پره وابسته است. اگر این نیرو را نیروی سطحی در نظر بگیریم و جریان عدد نودسن بالایی داشته باشد، می‌توانیم این نیرو را عامل اصلی حرکت بنامیم (شکل ۲-).

در اواسط دههٔ چهل راسنبلت و لامر بر روی پدیده ترموفورسیس کار کردند. آنها با مقایسه نیروهای رادیومتریکی در حالت‌های مختلف و آزمایش‌های عملی، مقایسه‌ای بین نتایج کارهای اینشتین و اپستین انجام دادند و در یک رابطه گزارش کردند [23]:

$$F = -Crp \frac{\lambda^2 dT}{T dx} \quad , \quad \begin{cases} c = \pi & \text{Einstein} \\ c = 8.95 & \text{Epstein} \end{cases} \quad (6)$$

در رابطه (۶) شعاع پره و C ثابت است که برای هرکدام از روابط اینشتین و اپستین متفاوت می‌باشد. سلدن نیز با استفاده از رابطه انیشتین (۶) رابطه نیرو

را به صورت زیر پیشنهاد نمود.

$$F = \frac{1}{2} p A \left(\sqrt{\frac{T_H}{T_g}} - \sqrt{\frac{T_C}{T_g}} \right) \quad (7)$$

در اعداد نود سن کوچک، آنچه به صورت نیروی اصلی که باعث گردش پره‌هاست در نظر گرفته می‌شود، نیرویی است که نزدیک لبه‌های پره ایجاد می‌شود. پس در اعداد نود سن کوچک اثر لبه‌ای غالب است ولی در اعداد نود سن بزرگ اثرات اختلاف فشار طرفین پره‌ها نیز قابل ملاحظه می‌شود [14]. در شکل (۱) نتایج رابطه انیشتین (رابطه (۴) با ضریب $c=\pi$) رابطه اپستین (رابطه (۶) با ضریب $c=8.95$)، روابط مربوط به جریان مولکولی آزاد [24] و نتایج تجربی بروخ و لیتوین [25] با یکدیگر مقایسه شده‌اند. مشاهده می‌شود تئوری انیشتین در اعداد نود سن کم و تئوری مولکولی آزاد در اعداد نودسن زیاد با نتایج تجربی بیشترین هماهنگی را دارند.

باتوجه به امکان طراحی پمپ‌های نودسن که با اختلاف دما جریان را به حرکت درمی‌آورند، در سال‌های اخیر محققان مختلفی به مطالعه عددی جریان رادیومتریکی پرداخته‌اند [27-31]، اما مطالعات تجربی اندکی در این زمینه گزارش شده است. اکثر دانشمندان به این نتیجه رسیدند که برای محاسبه نیروهای واردشونده

مدل‌سازی آزمایشگاهی

برای بررسی تجربی پدیده رادیومتريک دو راه وجود دارد. راه اول استفاده از محفظه آزمایش بسیار کوچک از مرتبه میکرو و انجام آزمایش در فشار اتمسفر است. راه دوم انجام آزمایش در فشارهای بسیار پایین‌تر از یک اتمسفر با هندسه‌ای در ابعاد ماکرو می‌باشد، به‌صورتی که عدد نودسن محلی آزمایش به‌اندازه کافی بزرگ باشد که شرایط جریان رقیق شده ایجاد شود. برای مشاهده پدیده رادیومتريک در ابعاد بزرگ مقیاس باید از روش دوم استفاده کرد.

هدف از انجام این آزمایش، بررسی پدیده رادیومتريک و اندازه‌گیری پارامترهای سرعت، دمای دو طرف پره و میزان نیروی تولیدشده توسط پره‌های رادیومتر است. پیدا کردن رابطه‌ای میان اختلاف دمای صفحه سرد و گرم و میزان نیروی تولیدشده از دیگر اهداف مهم این تحقیق است. یکی از عوامل به‌شدت تأثیرگذار در روند مسأله عدد نودسن است که میزان رقیق‌شدگی جریان گاز را گزارش می‌کند. ارتباطی مستقیم بین عدد نودسن گزارش‌شده و سرعت و نیروی تولیدشده توسط رادیومتر وجود دارد.

شرایط آزمایش

در روش دوم، همان‌طور که ذکر شد، باید شرایط جریان رقیق برقرار شود. برای محاسبه جریان رقیق از رابطه (۸) استفاده می‌شود تا فشار متناسب با عدد نودسن مورد نظر و هندسه مسأله به‌دست آید.

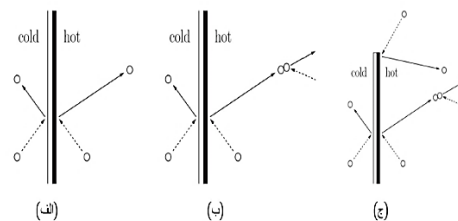
$$\lambda = \frac{\text{طول کل مسیر مولکول}}{\text{تعداد برخوردها}} = \frac{\bar{v}t}{\pi d^2 \bar{v}tn} = \frac{1}{\pi n d^2} \quad (۸)$$

که \bar{v} سرعت مولکولی، t زمان، d قطر مولکولی و n چگالی عددی است. با جای‌گذاری معادله حالت، رابطه (۹):

راست). اگر به‌سمت اعداد نودسن کمتر حرکت کنیم، برخورد بین مولکول‌های انعکاس‌یافته و برخوردکننده افزایش می‌یابد و این امر موجب کاهش اختلاف فشار میان دو سمت پره می‌شود (شکل ۲- وسط). در این صورت نیروی سطحی دیگر نیروی اصلی برای شکل گرفتن مکانیزم رادیومتر نخواهد بود.

در اعداد نودسن کم اختلاف ممتد فقط در لبه پره وجود دارد. این نیرو در فاصله‌ای به‌اندازه طول پویش آزاد مولکولی (λ) در اطراف لبه پره به‌وجود می‌آید که عامل اصلی چرخش رادیومتر در اعداد نودسن کم است (شکل ۲- چپ) [12]. گرادیان دما در طول لبه پره رادیومتر به‌دلیل خزش حرارتی موجب حرکت جریان از صفحه سرد به صفحه گرم می‌شود. این خزش حرارتی باعث ایجاد اختلاف فشار در لبه پره می‌شود.

تنش‌های حرارتی گاز در اطراف لبه پره، دلیل اصلی برای وجود نیروی رادیومتريک است. گرادیان دما در طول لبه پره‌های رادیومتر باعث تنش مماسی بر روی لبه پره می‌شود که به‌وسیله خزش حرارتی ایجاد می‌گردد. خزش حرارتی یک پدیده در رژیم‌های جریان گذرا است که در آن جریان از سمت سرد صفحه به سمت گرم حرکت می‌کند. این خزش حرارتی به‌طور عمده باعث اختلاف فشار ایجادشده بین دو طرف لبه پره می‌شود و نیرویی از سمت گرم به‌سمت سرد اعمال می‌کند.



شکل ۲ مکانیزم‌های نیروی رادیومتريک [27]: شکل (الف) مکانیزم نیروی سطحی، شکل (ب) مولکول‌های نزدیک در اطراف صفحه مانع برخورد مولکول‌های دورتر می‌شوند، شکل (ج) مکانیزم نیروی اثرکننده بر لبه صفحه رادیومتر

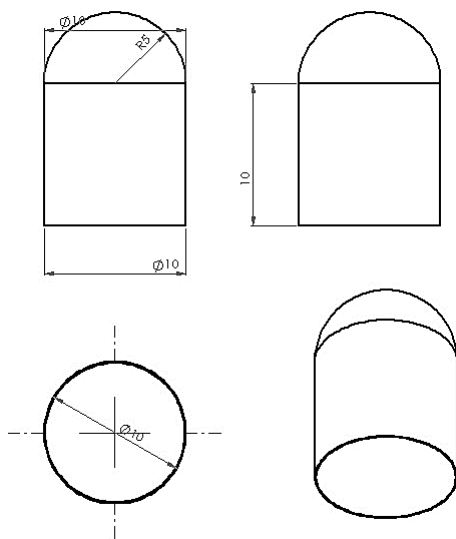
هندسه و اجزای آزمایش. هندسه آزمایش از یک محفظه خلأ و بدنه اصلی رادیومتر تشکیل شده است. بدنه اصلی شامل یک مجموعه ثابت و چرخان است. مجموعه ثابت شامل یک پایه نگهدارنده و یک سوزن است. همان طور که در شکل (۳) مشاهده می شود، سوزن بر روی پایه نگهدارنده ثابت شده است و وظیفه آن نگاه داشتن قسمت چرخان می باشد.

به دلیل سطح بسیار کم نوک سوزن، میزان اصطکاک میان قسمت چرخان و ثابت بسیار کم و قابل صرف نظر کردن است.

اجزای قسمت چرخان. قسمت چرخان از چهار قسمت تشکیل شده است:

۱. کلاهک شیشه ای.
۲. نگه دارنده پره ها.
۳. بازوی اتصال پره ها.
۴. پره های رادیومتر.

کلاهک شیشه ای (شکل ۴) از جنس بروسلیکات است و دارای سطوح صاف و صیقلی است. قطر کلاهک شیشه ای 5mm و ارتفاع آن 10mm است.



شکل ۴ شماتیک کلاهک شیشه ای

$$\frac{P}{kT} = \rho RT = n \quad (9)$$

در رابطه (۸) خواهیم داشت:

$$\lambda = \frac{\bar{v}t}{\pi d^2 \bar{v}tn} = \frac{kT}{P\pi d^2} \quad (10)$$

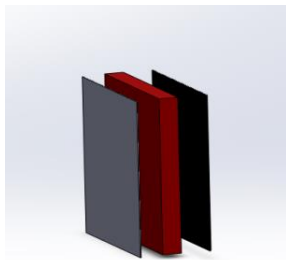
رابطه (۱۰) را در رابطه (۱) جایگذاری نموده و رابطه میان عدد نودسن و فشار آزمایش مشخص می شود.

$$P = \frac{kT}{kn\pi d^2 L} \quad (11)$$



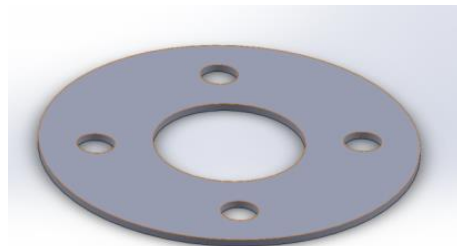
شکل ۳ مجموعه ثابت شامل سوزن و پایه نگهدارنده محل اتصال کلاهک شیشه ای به سوزن که در صورت منحرف شدن نوک سوزن از مرکز ثقل به علت نیروی وزن دوباره به جای خود بازمی گردد.

پره‌های رادیومتر. یکی از مهم‌ترین پارامترها در مورد پره‌های رادیومتریک انتخاب جنس پره‌ها است. با توجه به این که در این آزمایش ایجاد اختلاف دما در دو طرف پره مطلوب است، و از طرفی هدایت حرارتی پره‌ها باید بالا باشد، انتخاب فلز آلومینیوم به نظر مناسب می‌رسد. با توجه به نیاز پره با رسانایی حرارتی بالا، درصد خلوص آلیاژ آلومینیوم بسیار مهم می‌باشد. آلیاژ مورد استفاده در این آزمایش آلومینیوم ۱۰۵۰ آلومینیوم است که در این نوع آلیاژ درصد خلوص بالاتری از آلومینیوم وجود دارد. خلوص بالاتر آلومینیوم به فرآیند بهتر شدن رسانایی در سطح پره‌ها کمک می‌کند. در این آلیاژ درصد خلوص ۹۹/۵ درصد است. اغلب کاربرد این آلیاژ در صنایع غذایی، هادی‌های الکتریکی و صنایع دارویی است. به علت ماهیت نیروی رادیومتریک میزان نیروی تولید شده یا به عبارتی گشتاور تولیدی بسیار کم است. به همین دلیل متغیر وزن نهایی پره‌ها، فاکتور مهمی است. برای انتخاب پره‌ها از ورقه‌های نازک آلیاژ توضیح داده شده در بالا استفاده شده است. ضخامت ورقه‌های استفاده شده ۱۰۰ میکرون است. این ضخامت علاوه بر کاهش وزن پره، باعث افزایش نرخ توزیع حرارت در سطح پره نیز می‌شود. هر پره به صورت مربع است و بین هر دو طرف پره یک لایه از جنس فوم عایق قرار دارد. ابعاد هر پره مربعی به ضلع 1.6cm است. ضخامت هر قسمت عایق 2mm است. در شکل (۶) نمای شمایی سه‌بعدی پره‌ها به همراه عایق میانی نشان داده شده است.



شکل ۶ نمای سه‌بعدی پره‌های آلومینیومی به همراه عایق کامپوزیتی میان دو طرف پره

نگه‌دارنده پره‌ها، همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، از یک صفحه مسی دایره‌ای با قطر خارجی 10mm و یک سوراخ در مرکز آن به قطر 4mm تشکیل شده است. برای قسمت نگه‌دارنده از فلز آلومینیوم با ضخامت 0.4 mm استفاده شده است تا وزن آن زیاد نباشد. در هر یک از زوایای 90,180,270,360 درجه یک سوراخ به قطر 1mm ایجاد شده است. به هر کدام از سوراخ‌های ریز دور تا دور بازوی اتصال، پره‌ها متصل است. در واقع سوراخ بزرگ‌تر برای قرارگیری کلاهک شیشه‌ای و سوراخ‌های کوچک‌تر برای اتصال بازوها است.



شکل ۵ نمای شماتیک نگه‌دارنده پره‌ها

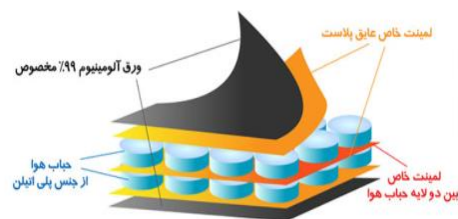
کلاهک شیشه‌ای در مرکز نگه‌دارنده پره‌ها قرار می‌گیرد. به دلیل هم‌اندازه بودن قطر داخلی سوراخ مرکزی نگه‌دارنده و قطر خارجی کلاهک شیشه‌ای این دو داخل یکدیگر ثابت شده و محکم شده‌اند. کلاهک شیشه‌ای به همراه نگه‌دارنده پره‌ها که داخل یکدیگر ثابت شده‌اند، بر روی سوزن قرار می‌گیرند. محل تماس بین قسمت چرخان و قسمت ثابت همان محل تماس بین سوزن و کلاهک شیشه‌ای است. یکی از دلایل استفاده از سوزن علاوه بر کاهش اصطکاک، افزایش تعادل استاتیکی و تعادل دینامیکی است؛ زیرا در صورت منحرف شدن قسمت چرخان، به دلیل انحنای قسمت کلاهک شیشه‌ای، مرکز ثقل مجموعه چرخان مجدد به حالت اولیه باز می‌گردد.

محفظه خلأ. یکی دیگر از قسمت‌های مهم آزمایش محفظه خلأ است که در شکل (۸) نشان داده شده است. دو پارامتر مهم در تعیین پمپ خلأ تاثیرگذار هستند. پارامتر اول امکان تأمین و نگه داشتن فشار مورد نظر برای آزمایش است و پارامتر دوم امکان مشاهده پدیده آزمایش حین انجام آن و اندازه‌گیری دما و سرعت چرخش پرها است. در مورد پارامتر اول یعنی میزان فشار، ابتدا باید محاسباتی برای به دست آوردن فشار آزمایش، براساس پارامترهایی هم‌چون طول مشخصه پره و عدد نودسن انجام داد. باتوجه به این‌که طول مشخصه پره رادیومتر 1.6 cm است، بنا به رابطه (۱۱) داریم:

$$P = \frac{1.38 \times 10^{-23} \times 300}{\sqrt{2} \times 1\pi \times (3 \times 10^{-10})^2 \times 1.6 \times 10^{-2}} = 0.644 \text{ pa} \quad (12)$$

باتوجه به رابطه (۱۲) فشار متناسب با شرایط هندسه مسئله و عدد نودسن ۱ برابر ۰/۶ پاسکال است. برای تأمین این فشار، یک پمپ خلأ قوی مورد نیاز است. معمولاً برای ایجاد چنین فشارهایی از پمپ‌های خلأ دو مرحله‌ای استفاده می‌کنند. پمپ‌های خلأ دو مرحله‌ای معمولاً شامل یک پمپ خلأ روتاری و یک پمپ خلأ دیفیوژن هستند. ابتدا توسط پمپ روتاری فشار به محدوده 100 pa کاسته می‌شود، سپس با فعال شدن پمپ دیفیوژن فشار به مرتبه‌های پایین‌تر تقلیل می‌یابد. همان‌طور که اشاره شد فشار نهایی قابل وصول با پمپ‌های مکانیکی ۰/۱ mbar است؛ لذا برای دستیابی به فشارهای پایین‌تر از پمپ‌های غیرمکانیکی استفاده می‌شود که یکی از انواع آن پمپ دیفیوژن (پمپ بخار) است.

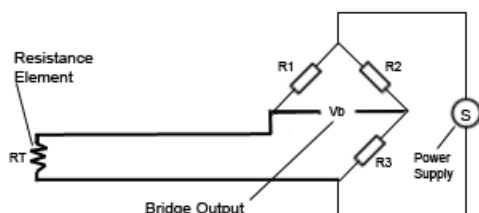
جنس عایق‌ها از نوع فوم‌های EPE (Expanded Polyethylene) پلی‌اتیلن با چگالی پایین است و از قابلیت انعطاف‌پذیری بسیار بالایی برخوردار است. عایق‌های پلی‌اتیلن از نوع سلول بسته انعطاف‌پذیر است و به دو نوع EPE (Expanded Poly ethylene) و XLPE (Cross-linked Poly ethylene) تقسیم‌بندی می‌شوند. عایق‌های پلی‌اتیلن علاوه بر داشتن ضریب مقاومت حرارتی بسیار مناسب، در مقابل نفوذ رطوبت نیز مقاومت بسیار خوبی دارند. چگالی پایین این نوع عایق باعث کم شدن وزن پرها می‌شود. از طرفی این نوع فوم‌ها، مطابق شکل (۷)، به دلیل این‌که دارای دو لایه هوا هستند، از نظر میزان عایق بودن بازدهی خوبی دارند.



شکل ۷ پره‌های آلومینیومی و عایق میانی

محدوده دمایی عایق استفاده شده بین ۵۰- تا ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد است که در محدوده دمایی آزمایش مورد نظر است. ابعاد سطح قسمت عایق درست مطابق ابعاد هر سمت پره می‌باشد. عایق میان دو قسمت تیره و شفاف پره قرار می‌گیرد تا بتواند از هدایت حرارتی میان صفحه گرم و سرد جلوگیری کند. اتصال میان قسمت‌های فلزی و عایق توسط نوعی چسب عایق و محکم برقرار می‌شود. به علت ضخامت بسیار کم چسب میان عایق و قسمت فلزی پره از تأثیرات آن صرف نظر می‌شود. درواقع عایق در این قسمت مانع انتقال حرارت از قسمت گرم به قسمت سرد می‌شود زیرا در این آزمایش ایجاد اختلاف دما میان صفحه سرد و گرم بااهمیت است.

حالت چرخش پره‌هاست که کار را سخت‌تر نیز می‌کند. راه‌حلی که برای اندازه‌گیری مستقیم دما ارائه شد، استفاده از سنسور pt100 بود. سنسور pt100 در واقع یک مقاومت گرمایی می‌باشد که در تماس با سطح مورد نظر دمای آن قسمت را گزارش می‌کند. این حسگر مقاومتی دما یک Resistance thermometer یا RTD می‌باشد که از سنسورهای رایج در اندازه‌گیری دما است. در این سنسورها، سیگنال خروجی به صورت یک سیگنال مقاومتی است. اساس کار RTD تغییر مستقیم مقاومت فلزات با دما هست به این صورت که با قرار دادن RTD درون یک مدار پل و محاسبات مقاومت RTD با توجه به مدار پل از روی جدول استانداردها، دمای مربوط را می‌توان پیدا کرد. به منظور جلوگیری از خطاهای مربوط به مقاومت، سیم‌های رابط RTD را به صورت دوتایی یا سه‌تایی استفاده می‌کنند. یکی از مهم‌ترین مزایای سنسورهای pt 100 ارتباط خطی میان تغییرات دما و مقاومت تولیدشده می‌باشد. این ارتباط خطی نحوه محاسبه و استخراج دما را ساده می‌کند. همچنین قابل ذکر است این سنسورها در مدل‌های دو سیم، سه سیم و چهار سیم عرضه می‌شوند. در این آزمایش، از مدل دو سیم بدون غلاف استفاده شده است، زیرا در محیط محفظه فقط دو زوج سیم خروجی می‌توانیم داشته باشیم. در شکل (۹) پل الکتریکی سنسور pt100 دو سیم مشاهده می‌شود.



شکل ۹ مدار الکتریکی سنسور pt100

یکی از راه‌های آسان برای استفاده از سنسور pt100 استفاده از درایورهای مخصوص این سنسور می‌باشد. در داخل این درایورها پل مخصوص برای محاسبه مقاومت



شکل ۸ پمپ خلأ دو مرحله‌ای شرکت Edwards با محفظه شفاف شیشه‌ای

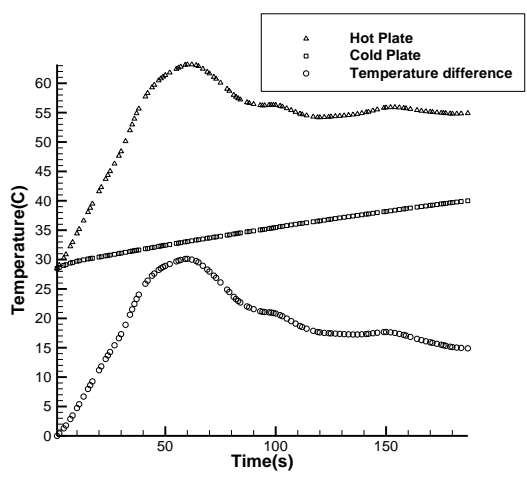
شرح آزمایش و پارامترهای اندازه‌گیری شده

اندازه‌گیری سرعت. هدف این آزمایش اندازه‌گیری سرعت و دمای دو طرف پره‌های سرد و گرم و دمای محیط است. برای اندازه‌گیری سرعت در ابتدا از دورسنج بدون تماس مدل Tachometers UT372 از سری UT-370 استفاده شد. این مدل یک دورسنج و سرعت‌سنج لیزری می‌باشد که قادر است تعداد دور و سرعت چرخش شفت، دیسک و... را بدون تماس در فاصله ۵ تا ۲۰ سانتی‌متری در محدوده اندازه‌گیری سرعت ۱۰۰۰۰ RPM تا ۰ و محدوده شمارش ۰~۹۹۹۹۹ با استفاده از نوار بازتابی که بر روی هدف نصب می‌شود، اندازه‌گیری کند.

اندازه‌گیری دما. یکی از مهم‌ترین قسمت‌های آزمایش، اندازه‌گیری دمای پره‌ها و دمای محیط است. در تمام آزمایش‌های پیش از این، دمای پره‌های آزمایش به‌طور مستقیم اندازه‌گیری نشده بودند. عدم اندازه‌گیری مستقیم دما به دلیل دو محدودیت اساسی می‌باشد. محدودیت اول عدم جای‌گذاری هر نوع دماسنج معمولی درون محفظه خلأ می‌باشد. محدودیت دوم اندازه‌گیری دما در

نتایج

پارامترهایی که اندازه‌گیری شده‌اند شامل سرعت و دما هستند. برای اندازه‌گیری دما همان‌طور که ذکر شد از سنسورهای مقاومت گرمایی استفاده شده‌است. همان‌طور که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود هر کدام از پره‌ها به مدت سه دقیقه در معرض تابش قرار گرفته‌اند. اثر تابش دما بر روی هر کدام از صفحات تیره و روشن متفاوت است. دمای صفحه تیره به دلیل جذب بیشتر انرژی تابشی به صورت خطی افزایش می‌یابد. این افزایش در ابتدا تا ثانیه ۶۰ با شیب بزرگ‌تری نسبت به صفحه روشن افزایش می‌یابد. در واقع مکانیزم انتقال حرارت در صفحه گرم به دو صورت انجام می‌پذیرد. مکانیزم اول جذب حرارت به وسیله تشعشع ناشی از منبع تابشی است. مکانیزم دوم دفع حرارت جذب‌شده به قسمت مرکزی پره و سمت صفحه روشن است. پس از جذب سریع حرارت صفحه تیره توسط تابش، نمودار دمای پره افزایش می‌یابد. پس از ثانیه ۶۰ اثرات دفع گرما که به وسیله هدایت حرارتی صورت می‌گیرد موجب کاهش دمای صفحه تیره، دمای آن تقریباً ثابت می‌شود.



شکل ۱۰ اندازه‌گیری تجربی از تغییرات زمانی دمای صفحه سرد و دمای صفحه گرم و اختلاف بین آنها

این سنسورها تعبیه شده‌است و بنا بر فرمول خطی این سنسورها از مقاومت تولیدی، دمای سطح مورد نظر را محاسبه می‌کنند. این درایورها در عمل دقت آزمایش را بالا می‌برند زیرا محاسبات و مشاهدات انسانی را از فرآیند اندازه‌گیری دما حذف می‌کنند.

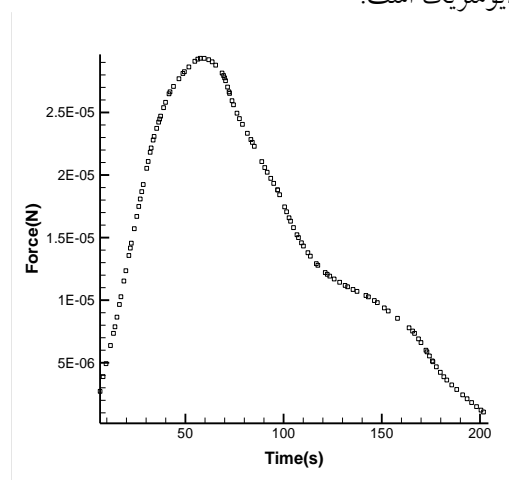
برای کالیبره کردن این سنسور در بازه دمایی ۰ تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد این کار انجام می‌گیرد. در درایور-های مخصوص این سنسور، کالیبراسیون به صورت خودکار انجام می‌شود. در این پژوهش تنها به کالیبراسیون درایور اکتفا نشده و برای اعتبارسنجی سنسور مورد نظر، دمای محیط را با دماسنج جیوه‌ای اندازه‌گیری و با دمای خروجی از سنسور مقایسه شده‌است. پس از بررسی‌های مورد نظر مشاهده شد که دمای گزارش شده از سنسور و دمای خوانده شده از روی دماسنج جیوه‌ای برابر هستند.

پس از راه‌اندازی و نصب سنسورهای pt100 و درایورهایشان، یکی دیگر از محدودیت‌های اندازه‌گیری دما وجود خواهد داشت. این محدودیت، اندازه‌گیری دما در حال چرخیدن پره‌ها می‌باشد. برای گزارش درست دما باید سنسور به پره‌ها متصل باشد. با اتصال سنسور علاوه بر برهم زدن تعادل استاتیکی روتور، امکان چرخش برای پره‌ها دیگر نخواهد بود. برای حل این مشکل اندازه‌گیری دما در حالت ایستا انجام شده‌است، بدین صورت که با تعویض منبع تابش و تغییر آن به یک منبع تابش یک‌نواخت، پس از گرفتن تست‌های سرعت، آزمایش مجدداً با شرایط قبلی انجام گرفت با این تفاوت که پره‌های رادیومتر قفل شدند و سنسور سنجش دما به آنها متصل شد. برای کاهش خطای اندازه‌گیری دما، دمای هر کدام از پره‌ها به‌طور جداگانه استخراج شد. مشاهدات ثبت شده ما را به این نتیجه رساند که دمای گزارش شده از همه پره‌ها با یکدیگر مطابقت دارد و بدین ترتیب درستی اندازه‌گیری دما ثابت شد.

حالت اختلاف ممتنم بین مولکول‌های برگشتی افزایش می‌یابد و باعث افزایش نیروی وارد شده به پره می‌گردد. تأثیر افزایش اختلاف دما در هر دو مکانیزم ایجادکننده نیروی وارد شده به پره مؤثر است. در مورد مکانیزم نیروی صفحه‌ای که در بالا به آن اشاره شد، اما در مورد اثر اختلاف دما بر نیروی ایجاد شده توسط لبه پره‌ها، باید گفت این مکانیزم با افزایش اختلاف دما قوی‌تر می‌شود. با ادامه دریافت انرژی و افزایش دما تأثیر ایجاد این نیرو به سرعت کم نمی‌شود. در مورد نیروی صفحه‌ای با گذشت زمان مولکول‌های اطراف پره انرژی گرفته و ممتنم آنها افزایش می‌یابد. این پدیده باعث می‌شود مولکول‌هایی که در فاصله دورتر قرار دارند نتوانند با صفحه برخورد کنند. ادامه این روند تعداد برخوردها را به صفحه گرم کاهش می‌دهد. کاهش تعداد برخوردها کاهش اختلاف ممتنم بین دو سمت پره‌ها را نتیجه می‌دهد. به همین دلیل نیروی وارد شده به پره با گذشت زمان کاهش می‌یابد. اما نکته جالب در کاهش نیروها این است که این اتفاق با شیب ملایم‌تری می‌افتد. دلیل این پدیده مربوط به مکانیزم نیروی ایجاد شده توسط لبه‌ها می‌باشد. با گذشت زمان و با دریافت انرژی توسط پره‌ها و مولکول‌هایی که به آنها برخورد می‌کنند، امکان برخورد مولکول‌های دیگر به صفحه کم نمی‌شود. این عامل باعث می‌شود اگرچه با گذشت زمان اثر مکانیزم نیروی صفحه‌ای کاهش می‌یابد، اما مکانیزم ایجاد نیروی لبه پره‌ها با سرعت بسیار کمتری کاهش می‌یابد. به همین دلیل کاهش نیرو نسبت به افزایش نیرو شیب کندتری دارد.

در مورد سرعت زاویه‌ای هم که در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود، می‌توان تحلیلی مشابه تحلیل نیروها داشت. لازم به ذکر است سرعت زاویه‌ای با یک رشد سریع به بیشینه خودش می‌رسد و پره‌ها مدت زمان نسبتاً زیادی با سرعت ثابت شروع به چرخش می‌کنند.

در صفحه سرد، به دلیل رنگ روشن صفحه جذب انرژی کمتر صورت می‌گیرد. به همین دلیل افزایش دمای آن به صورت خطی و با یک شیب کم انجام می‌پذیرد. افزایش دما در قسمت سرد، بیشتر به دلیل در معرض تابش قرار گرفتن است. مهم‌ترین قسمت در شکل (۱۰) اختلاف دمای دو صفحه سرد و گرم است. در واقع این اختلاف دما، موتور محرک برای ایجاد جریان رادیومتریکی است.



شکل ۱۱ نیروی خالص وارد شده به پره در اثر جریان رادیومتریکی

در شکل (۱۱) مقدار نیرو برحسب زمان در فشار ثابت و $Kn=1$ نشان داده شده است. برای محاسبه نیرو طبق قانون دوم نیوتن از ضرب شتاب پره‌ها در اثر نیروی رادیومتریکی، در جرم پره‌ها استفاده شده است. این محاسبه با فرض اصطکاک ناچیز میان هولدر پره‌ها و نوک سوزن قسمت نگه‌دارنده می‌باشد، که البته فرض درستی است زیرا جرم پره‌ها بسیار کم و سطح مقطع تماسی بین دو جسم به سمت صفر میل می‌کند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود نیروی وارد شده به پره‌های رادیومتر در زمان ۶۰ ثانیه به مقدار بیشینه می‌رسد. در این زمان بیشینه اختلاف دما بین دو صفحه روشن و تیره نیز وجود دارد. هنگامی که اختلاف دمای بین دو سمت پره افزایش می‌یابد به دلیل بالا رفتن دما، مولکول‌های برخوردی به سمت گرم پره، با ممتنم بالاتری برمی‌گردند. در این

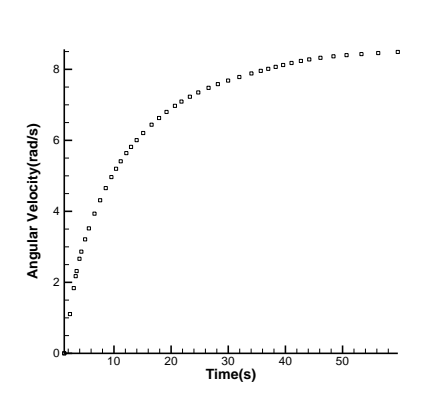
در شکل‌هایی که تاکنون بررسی شد عدد نودسن جریان برابر ۱ بوده‌است. مشخصات جریان رادیومتریکی، شامل نیرو به اختلاف دما و سرعت زاویه‌ای در چهار فشار کاری آزمایش شده است. این مشخصات در جدول (۱) گزارش شده‌است.

جدول ۱ مقایسه نسبت نیرو به اختلاف دما و سرعت زاویه‌ای در اعداد نودسن مختلف جریان

عدد نودسن	0.05	0.1	1	10
نسبت نیرو به اختلاف دما (N/K)	3.13×10^{-8}	1.16×10^{-6}	8×10^{-7}	3.15×10^{-7}
سرعت زاویه‌ای (rad/s)	0.23	7.95	8.49	1.87

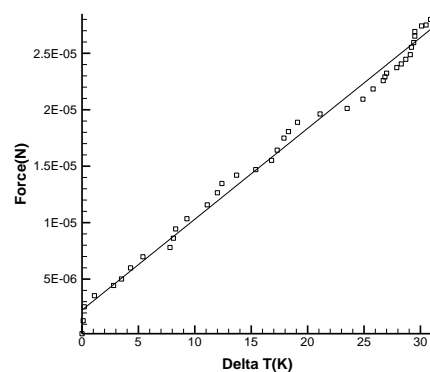
در شکل (۱۳) مشاهده شد که نیرو با اختلاف دما رابطه‌ای مستقیم و خطی دارد، اما پارامترهای مهم دیگری در جریان رادیومتریکی تعیین‌کننده هستند؛ از آن جمله عدد نودسن جریان یا به عبارتی میزان رقیق‌شدگی جریان است. همان‌طور که در جدول (۱) مشاهده می‌شود، بیشترین نیروی رادیومتریکی در عدد نودسن ۰/۱ اتفاق می‌افتد. رژیم جریان در عدد نودسن ۰/۱ تقریباً مرز میان رژیم گذار و رژیم جریان لغزشی است. در این رژیم، هر دو مکانیزم تولید نیروی رادیومتریکی عمل می‌کند؛ به همین دلیل نیروی تولید شده در بیشینه خود قرار داد.

در شکل (۱۴) [20] یک مقایسه کلی میان تئوری‌های مختلف (رابطه سلدن، سکسل، اسکاندورا، انیشتین)، داده‌های تجربی سلدن و داده‌های به‌دست‌آمده از آزمایش حاضر انجام شده‌است. در بازه فشار 0.05pa تا فشار 0.65 pa دقت خوبی برای آزمایش‌های



شکل ۱۲ سرعت زاویه‌ای پره‌های رادیومتر

با بررسی نمودارهای دما و نیرو برحسب زمان نتیجه می‌شود که ارتباط مهمی میان نیروی ایجادشده بر روی پره‌های رادیومتر و اختلاف دمای دوسر پره‌ها وجود دارد. در شکل (۱۳) ارتباط میان نیروی تولیدشده و اختلاف دمای دو طرف پره مشهود است. در واقع ارتباط این دو پارامتر به صورت خطی است؛ یعنی با افزایش اختلاف دمای دو سر پره‌ها نیرو به صورت خطی افزایش می‌یابد. شیب این خط با پارامترهایی نظیر عدد نودسن متناسب است، اما این تناسب به صورت دائمی نیست. با گذشت زمان و ثابت شدن اختلاف دما در دو سمت پره‌ها با وجود ثابت ماندن نسبتی اختلاف دما باز هم نیرو روند کاهشی دارد. علت روند کاهشی به همان دلیل کاهش برخورد‌های مولکول‌ها به صفحه گرم و کاهش اختلاف دمای ایجادشده بین دو صفحه گرم و سرد است.



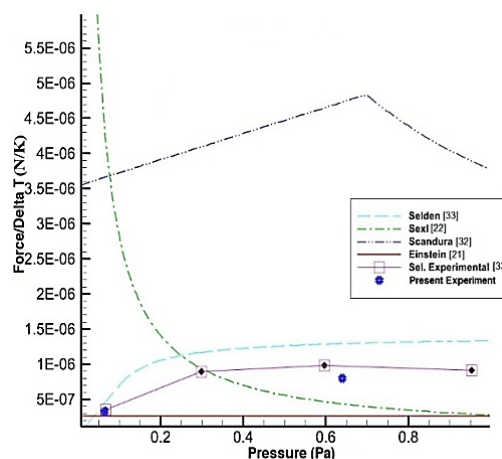
شکل ۱۳ نیروی خالص واردشده به پره‌ها برحسب اختلاف دمای دو طرف پره

همان‌طور که ملاحظه می‌شود دقت اندازه‌گیری‌ها در فشار 6.4 Pa نسبت به حالت‌های دیگر دارای خطای بیشتری است. در این فشار کاری، عدد نودسن برابر ۰/۱ است. در عدد نودسن ۰/۱ نیروی رادیومتریک تحت تأثیر دو عامل نیروی اثرکننده در لبه‌های پره و نیروی سطحی به صورت هم‌زمان قرار دارد. در این عدد نودسن نیروی اندازه‌گیری شده بیشینه است. از طرف دیگر نیرو با اختلاف دمای دو سر پره رابطه مستقیم دارد. کوچک‌ترین خطا در فرآیند آزمایش، زمانی که خروجی بیشینه است، منجر به بروز اختلاف‌های زیاد در نتیجه می‌شود. مجموع عوامل ذکر شده در بالا باعث پدید آمدن خطاهای بیشتر و بزرگ‌تر می‌شود؛ به همین دلیل در این فشار کاری درصد عدم قطعیت در مقایسه با دیگر شرایط اندکی بیشتر است.

جمع‌بندی نتایج

در این پژوهش ماهیت جریان رادیومتریک تشریح شد. عوامل مؤثر بر نیروی رادیومتریک شناسایی شدند و برای اولین بار از یک روش مستقیم برای اندازه‌گیری دمای پره‌های رادیومتر استفاده شد. اندازه‌گیری مستقیم دمای پره‌ها باعث بالا رفتن دقت در محاسبه نیروی پره-های رادیومتر می‌شود. مشاهده شد که در عدد نودسن ۰/۱ بیشینه نیروی رادیومتریک اتفاق می‌افتد. بیشترین سرعت زاویه‌ای در عدد نودسن ۱ مشاهده شد. با افزایش اختلاف دمای دو طرف پره‌ها، نیرو به صورت خطی افزایش می‌یابد. شیب این خط با پارامترهایی نظیر عدد نودسن متناسب است، اما این تناسب به صورت دائمی نیست. با گذشت زمان و ثابت شدن اختلاف دما در دو سمت پره‌ها با وجود ثابت ماندن نسبی اختلاف دما، نیرو روند کاهشی دارد. علت روند کاهشی به دلیل کاهش برخوردهای مولکول‌ها به صفحه گرم و کاهش اختلاف ممتد ایجاد شده بین دو صفحه گرم و سرد است. نیروی رادیومتریک علاوه بر اختلاف دمای دو طرف پره به عدد نودسن و به نوعی به رژیم جریان نیز وابسته است.

صورت گرفته در مقایسه با نتایج تجربی سلدن مشاهده می‌شود.



شکل ۱۴ نیروی خالص وارد شده به پره‌ها برحسب فشار محفظه

بررسی عدم قطعیت

تمامی آزمایش‌های تجربی همواره با مقداری خطا همراه است. خطاها شامل دو دسته خطای تکرار و خطای تجهیزات اندازه‌گیری است. شک و تردیدی که در اندازه‌گیری و نتایج وجود دارد، عدم قطعیت است. عدم قطعیت براساس تکرار آزمایش‌ها و دقت اندازه‌گیری تمامی تجهیزات اندازه‌گیری در آزمایش تعیین شده است. با توجه به روابط مرجع [34]، عدم قطعیت استاندارد براساس پارامتر نیرو به اختلاف دما، برای نتایج در سه فشار 0.064 Pa و 0.64 Pa، 6.4 Pa در جدول (۲) گزارش شده است.

جدول ۲ مقایسه عدم قطعیت در سه فشار مختلف

فشار آزمایش	درصد عدم قطعیت تکرار	درصد عدم قطعیت ابزار اندازه‌گیری	درصد عدم قطعیت استاندارد
6.4 Pa	6.5%	1.5%	6.7%
0.64 Pa	5.5%	1.5%	5.7%
0.064 Pa	4.9%	1.5%	5.1%

واژه نامه	فهرست علائم	
Thermal creep flow	جریان خزش حرارتی	فشار (kgm-1s-2) P
Inverted thermal creep flow	جریان خزش حرارتی معکوس	عدد رینولدز Re
Thermal stress slip flow	جریان تنش حرارتی لغزشی	سرعت (ms-1) V
Nonlinear Thermal stress flow	جریان تنش حرارتی غیرخطی	دما (K) T
Thermal edge flow	جریان لبه حرارتی	عدد ماخ Ma
Radiometric flow	جریان رادیومتریکی	طول مشخصه (m) L
Knudsen Number	عدد نودسن	نیرو (kgms-2) F
Free Molecular regime	رژیم مولکولی آزاد	دمای صفحه گرم (K) T_H
Transition regime	رژیم گذرا	دمای صفحه سرد (K) T_C
Slip flow regime	رژیم جریان لغزشی	دمای محیط (K) T_g
Continuum flow regime	رژیم جریان پیوسته	مساحت (m^2) A
Thermophoresis	ترموفورسیس	ثابت گازها (J/K.mol) R
Area force	نیروی سطحی	قطر مولکولی (m) d
Reflected Molecules	مولکول های بازتاب شده	
Diffusion vacuum pump	پمپ خلأ دیفیوژن	علائم یونانی
Rotary vacuum pump	پمپ خلأ روتاری	چگالی (kgm-3) ρ
		لزجت دینامیکی (kgm-1s-1) μ
		طول پویس آزاد مولکولی (m) λ

تقدیر و تشکر و پیوست ها

در پایان، نویسندگان بر خود لازم می دانند از همکاری اعضای گروه آزمایشگاه آنکستروم دانشگاه فردوسی مشهد بابت در اختیار گذاشتن وسایل و امکانات برای انجام آزمایش ها، تشکر و قدردانی نمایند.

مراجع

1. Y. Sone, "Molecular gas Dynamics, Theory, Techniques, and Applications", Springer Science & Business Media, (2007).
2. Kennard, E. H., "Kinetic Theory of Gases, with an Introduction to Statistical Mechanics", New York: McGraw-Hill, (1938).
3. Y. Sone, "Thermal Creep in Rarefied Gas", *Journal of the Physical Society of Japan*, Vol. 21, pp. 1836-

- 1837, (1966).
4. T. Ohwada, Y. Sone, and K. Aoki, "Numerical Analysis of the Shear and Thermal Creep Flows of a Rarefied Gas over a Plane Wall on the Basis of the Linearized Boltzmann Equation for Hard-Sphere Molecules", *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, Vol. 1, pp. 1588-1599, (1989).
 5. Akhlaghi, H., Balaj, M., Roohi, E., "Hydrodynamic Behavior of Micro/Nanoscale Poiseuille Flow under Thermal Creep Condition", *Applied Physics Letters*, 103, 073108 (2013).
 6. Mohammadzade, A., Struchtrup, H., "Velocity Dependent Maxwell Boundary Conditions in DSMC", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 87, pp. 151-160, (2015).
 7. Kogan, M. N., Galkin, V. S., Fridlender, O. G., "Stresses Produced in Gasses by Temperature and Concentration in Homogeneities", *New types of free convection. Physics-Uspekhi*, Vol. 19, No. 5, pp. 420-428, (1976).
 8. Sone, Y., Tanaka, S., "Thermal Stress Slip flow Induced in Rarefied Gas between Non Coaxial Circular Cylinders", *In Theoretical and Applied Mechanics*, Vol. 1, pp. 405-416, (1980).
 9. Sone, Y., "Flows Induced by Temperature Fields in a Rarefied Gas and their Ghost Effect on the Behavior of a Gas in the Continuum Limit", *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 32, pp. 779-811, (2000).
 10. RafieeNasab, S., Roohi, E., Teymourtash, A., "Numerical Analysis of Nonlinear Thermal Stress Flow between Concentric Elliptical Cylinders", *Physics of Fluids*, Vol. 32, 102007, (2020).
 11. K. Aoki, Y. Sone, and T. Yamada, "Numerical analysis of gas flows condensing on its plane condensed phase on the basis of kinetic theory", *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, Vol. 2, No. 10, pp. 1867-1878, (1990).
 12. Lotfian, A., Roohi, E., "Radiometric Flow in Periodically Patterned Channels: Fluid Physics and Improved Configurations", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 860, pp. 544-576, (2019).
 13. Crookes, W., "On Attraction and Repulsion Resulting from Radiation", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 164, pp. 501-527, (1874).
 ۱۴. روحی گل خطمی، احسان، « مکانیک سیالات در ابعاد میکرو و نانو»، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۹۹.
 15. Crookes, W., "On Attraction and Repulsion Resulting from Radiation", Parts III & IV. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 166, pp. 325-376, (1876).
 16. Bennet, A., "A New Suspension of the Magnetic Needle Invented for the Discovery of Minute Quantities of Magnetic Attraction", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Vol. 82, pp. 81-82, (1792).
 17. Fresnel, A., "Note Sur la Repulsion que des Corps Chauffs Execent sur les Autres des Distances

- Sensibles", *Annales de Chimie et de Physique*, Vol. 29, pp. 57-62, (1825).
18. West, G.D., "On the Forces Acting on Heated Metal Foil Surfaces in Rarefied Gases", *Proceedings of the Physical Society of London*, Vol. 32, pp. 166-189, (1920).
 19. West G.D., "A Modified Theory of the Crookes Radiometer", *Proceeding of the Physical Society of London*, Vol. 32, pp. 222-231, (1920).
 20. Ketsdever, A., Gimelshein, N., Gimelshein, S. and Selden, N., "Radiometric Phenomena: From the 19th to the 21st Century", *Vacuum*, Vol. 86, pp. 1644-1662, (2012).
 21. Einstein, A., "Zur Theorie der Radiometrerkräfte", *Zeitschrift für Physik*, 27, pp. 1-5, (1924).
 22. Sexl, T., "The Theory of Radiometer Effects II", *Annalen der Physik*, Vol. 81, pp. 800-806, (1926).
 23. Rosenblatt, P., LaMer, V.K., "Motion of a Particle in a Temperature Gradient; Thermal Repulsion as a Radiometer Phenomenon", *Physical Review* 1, Vol. 70, No. 5-6, pp. 385-395, (1946).
 24. Schuster, A., "On the Nature of the Force Producing the Motion of a Body Exposed to Rays of Heat and Light", *Proceedings of the Physical Society of London*, Vol. 24, pp. 391-392, (1875).
 25. Brüche, E., Littwin, W., "Experimental Contributions to the Radiometer Question", *Zeitschrift für Physik*, Vol. 52, pp. 318-335, (1928).
 26. Selden, N., "Experimental Study of Radiometric Forces with Comparison to Computational Results", PhD thesis, University of Southern California, (2009).
 27. Taguchi, S., Aoki, K., "Motion of an Array of Plates in a Rarefied Gas Caused by Radiometric Force", *Physical Review E*, Vol. 91, No. 6, pp. 063007, (2015).
 28. Wang, X., Su, T., Zhang, W., Zhang, Z., Zhang, S., "Knudsen Pumps: A Review, *Microsyst*", *Nanoeng*, Vol. 6, No. 1, pp. 1-28, (2020).
 29. Lotfian, A., Roohi, E., "Binary Gas Mixtures Separation Using Micro-Scale Radiometric Pumps", *International Communication in Heat and Mass Transfer*, 121C, 105061, (2021).
 30. Wang, X., Zhang, W., Su, T., Zhang, Z., & Zhang, S., "Gas-Surface Interaction Effects on Rarefied Gas Flows Around Microbeams Induced by Temperature Fields", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 172, pp. 121186, (2021).
 31. Zeng, D., Cai, R., & Yang, Y., "Rarefied Gas Flow Around a Double-Plate Induced by Temperature Difference", *Advances in Space Research*, in Press, (2021).
 32. Scandurra M, Iacopetti F, Colona P., "Gas Kinetic Forces on Thin Plates in the Presence of Thermal Gradients", *Physical Review E*, 75:026308, (2007).
 33. Selden N, Ngalande C, Gimelshein N, Gimelshein S, Ketsdever A., "Origins of Radiometric Forces on a Circular Vane with a Temperature Gradient", *Journal Fluid Mech*, 634: 419e31, (2009).

-
34. Barlow, J. B., Rae, W. h., Pope, A., "Low-Speed Wind Tunnel Testing", 3rd ed. Wiley-Interscience Publication, (1999).

An Experimental Study of Crooks Radiometer's Performance

Reza Arabpour¹, Ehsan Roohi²

1. Introduction

One of the most critical features of rarefied gas is that flow could be induced without imposed pressure or external forces. If the mass flow is generated by the temperature difference in an object within rarefied gas, the obtained flow will be called thermally-driven flow. Radiometric flow, which is a thermally-driven flow, is created on the perimeter of a surface where the sides are heated unevenly or the two sides of the surface have temperature differences. The force imposed by the heated side of the surface to the cold side is called radiometric force. Radiometric pumps work based on producing radiometric force in rarefied gas flow. The Knudsen number expresses the degree of rarefaction in gas flows. This number reports the ratio of the molecular mean free path to the characteristic length of the geometry.

At small Knudsen numbers, the primary force that causes the blades of a radiometer to rotate is a force created near the blade's edges. Thus, the edge effect is dominant in small Knudsen numbers, but in large Knudsen numbers, the effect of pressure difference between both sides of the blade is noticeable.

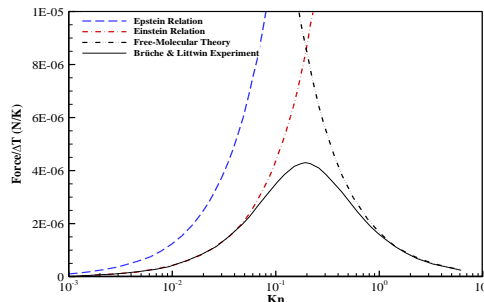


Figure 1. The comparison between the results of different theories and the experimental data for force per unit temperature difference based on Knudsen number

In Figure 1, the results of Einstein's, Epstein's, and free molecular regime theories and the experimental results of Brüche and Littwin for force per unit temperature gradient are compared for radiometric flow. It is observed that Einstein's theory at low Knudsen numbers and the free molecular theory in large Knudsen numbers agree well with the experimental data.

Different researchers performed quantitative studies of radiometric flow in recent years, but few experimental studies have been reported in this field. Researchers have concluded that knowing the temperature difference on radiometric blades is essential to calculate the generated forces on radiometric blades. However, no experiment has reported the temperature measurement of the two sides of a blade. Using thermal resistant sensors, this experimental study reported directly the temperature measurement of the blade's two sides for the first time. This temperature measurement method will effectively calculate the generated forces to radiometric blades and result in the radiometric forces to be reported with higher accuracy.

2. Experimental setup

The geometry of the experiment consists of a vacuum bell jar and the main body of the radiometer. The main body consists of a rotor with dark and light sides and a fixed section. The fixed section consists of a needle and a holder. As Figure 2 shows, the needle is fixed on the holder and its task is to keep the rotor set.



Figure 2. Fixed parts of the radiometer and the rotors

3. Results

The measured parameters include the velocity and temperature of each of the blades. The effect of temperature on dark and light surfaces is different. As Figure 3 shows, the temperature of the dark surface increases linearly due to absorbing more heat. From $t=0$ to 60 s, this increase has a higher slope than the increase of the lighter surface. The heat transfer mechanism of the hot surface happens in two ways. The first mechanism is absorbing heat by the radiation caused by the radiation source. The second mechanism is conducting the absorbed heat to the central section of the blade and towards the light surface.

¹. PhD student of Aerospace Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

². Corresponding Author, Professor of Aerospace Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. e.roohi@um.ac.ir

After the dark surface's rapid absorption of heat by radiation, the blade's temperature increases. After 60 s, the effects of heat repulsion due to thermal conduction cause the temperature of the hot surface to become lower. After a slight decrease in temperature on the dark surface, its temperature becomes almost constant. The most crucial section in Figure 3 is the temperature difference between the cold and hot surfaces. This temperature difference is the stimulant for the creation of the radiometric force.

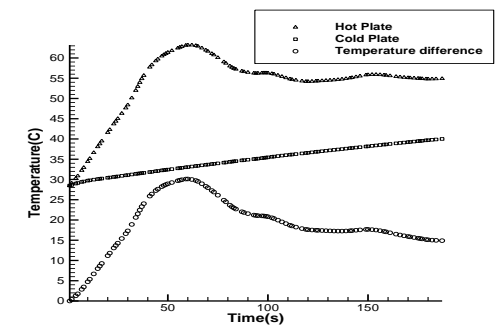


Figure 3. The experimental temperature measurement of the cold and the hot surface and their differences

Studying the temperature on time graphs, one can conclude that there is an essential relation between the force created on the radiometer blades and the temperature difference on both sides of the blades. The connection between these two parameters is linear, which means that with an increase in the temperature difference between the two sides of the blade, the force increases in a linear form. The slope of this line is proportional with parameters such as the Knudsen number, but this proportionality is not permanent. Over time, the temperature difference becomes fixed on both sides of the blade; the force decreases, although the relative temperature difference is fixed. This decreasing process is due to the decrease of molecules colliding with the hot surface and a reduction in momentum difference between the two hot and cold surfaces.

Radiometric flow features consisting of force to temperature difference and angular velocity in four pressures have been studied. Table 1 shows these data.

Table 1. The comparison of the ratio of force to temperature difference and angular velocity at different Knudsen numbers

Knudsen number	0.05	0.1	1	10
Force to Temperature differences	3.13×10^{-8} N/K	1.16×10^{-6} N/K	8×10^{-7} N/K	3.15×10^{-7} N/K
Angular velocity	0.23 rad/s	7.95 rad/s	8.49 rad/s	1.87 rad/s

It is observed that force has a direct and linear relationship with temperature difference. But other essential parameters influence the radiometric flow, one of which is the Knudsen number. As shown in Table 1, maximum radiometric force occurs at $Kn=0.1$. The flow at $Kn=0.1$ is at the border between the transition and the slip flow regimes. In this regime, both mechanisms of radiometric force work. This is why the generated force is at its maximum.

In Figure 4, a general comparison of different theories, Selden's experimental data, and the data obtained from this experiment is reported. From the pressure of 0.05 pa to the pressure of 0.65 pa, higher accuracy is observed in the present experiments than Selden's experimental results.

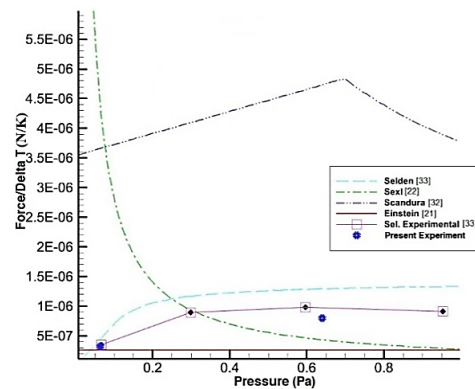


Figure 4. The comparison of the measured force with the experimental and analytical data

4. Conclusion

In this research, key parameters influencing the radiometric force were identified. For the first time, a direct method was used to measure the temperature of the radiometric blades. It was observed that the maximum radiometric force occurs at $Kn=0.1$. The highest angular velocity was observed at $Kn=1$. By increasing the temperature difference between the two sides of the blade, the force increases in a linear form. The slope of this line is proportional with parameters such as the Knudsen number, but this proportionality is not permanent. As time passes and the temperature difference becomes constant on both sides of the blade and with the temperature difference remaining relatively the same, the force decreases. The reason for the decreasing process is the decrease in the number of molecules colliding with the hot surface and a reduction in the momentum difference created between the hot and cold surfaces.