Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 52(4) (2020) 223-226
DOI: 10.22060/mej.2019.14866.5961

Experimental Study of the Effects of Fluid Physical Properties on Conduction Pump Performance

M. Jafari*, E. Esmaeilzadeh, N. Farrokhi

Department of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

ABSTRACT: In the current study, the performance of a conduction pump with flush electrodes has been experimentally investigated using two dielectrics (n-hexane and n-decane) as the working fluids. The study is conducted for different liquid film thicknesses, and effects of changing the magnitude of applied electrical voltage, and other different parameters such as fluid physical properties (ion mobility difference, density, and viscosity) and working temperature of the liquids on the performance and efficiency of the pump are investigated. Results show that while higher ion mobility difference increases the electrical power consumption of the pump, since it leads to higher flow velocity, significantly enhances flow rate and efficiency. Therefore, using liquids with higher ion mobility difference is more appropriate in industrial applications due to the simultaneous enhancement of flow rate and efficiency. On the other hand, although increasing the applied voltage decreases the pump efficiency, it raises the flow rate, which is an important pump characteristic and even more important than efficiency for conduction pumps. Furthermore, it is observed that increasing the liquids temperature enhances the pump efficiency due to the reduction of fluids density and viscosity.

Review History:

Received: 20 Aug. 2018
Revised: 22 Dec. 2018
Accepted: 27 Dec. 2018
Available Online: 15 Jan. 2019

Keywords:

Electrohydrodynamic
Electrical conduction pump
Ion mobility difference
Pump characteristics

1- Introduction

Applying an electric field to a dielectric fluid medium causes mechanical body-force, which can create fluid flow at some conditions. This phenomenon can be used in many applications such as mass transport, heat transfer, liquid film pumping, and electronic device cooling. Electro Hydrodynamic (EHD) pumps are mostly categorized into three types based on the way they form free charges: ion-drag pumps, induction pumps, and conduction pumps. Conduction pumping phenomenon is based on the dynamic equilibrium of molecules dissociation and recombination of the ions generated from dissociation, which is a suitable pumping mechanism for homogeneous and isothermal fluids. Eq. (1) shows the mentioned dynamic equilibrium for conduction pumping [1]

$$A^+B^- \underset{k_r}{\overset{k_d}{\longleftrightarrow}} A^+ + B^- \qquad (1)$$

where k_d , k_r are constants of dissociation and recombinatio n rates, respectively.

From the different types of EHD pumps, Conduction pumping is a relatively new field among EHD topics. Jeong and Seyed-Yagoobi [2] began the studies about pumping of dielectric fluids by conduction phenomenon, and investigated conduction pumping performance. Atten and Seyed–Yagoobi [3] presented a simple model of conduction with its corresponding numerical model. They used different electrode types and dielectrics. Yazdani and Seyed–Yagoobi [4] numerically investigated the effects of conduction on the flow of the liquid film. They observed that for the flush electrodes, the difference between the width of the electrodes leads to a net flow of liquid. Hemayatkhah et al. [5] experimentally investigated the flow pattern of the electrical conduction pump with flush electrodes and presented their results about the location and situation of eddies creation in the vicinity of the electrodes. Nourdanesh and Esmaeilzadeh [6] experimentally investigated heat transfer in electrical conduction pump with flush electrodes for kerosene. They reported that by applying electrical field heat transfer was enhanced significantly. Gharraei and Esmaeilzadeh [7] numerically simulated conduction pump with flush electrodes and compared the results with the experimental results, which showed proper conformity.

To the best of the authors' knowledge, there has been no study working on the simultaneous effects of changing working temperature and using different dielectric fluids on the performance characteristics of conduction pumps. In the current study, the effect of parameters such as the working temperature of the system and applied voltage for two different dielectric liquids on the performance and applicability of the conduction pump with flush electrodes is experimentally investigated.

2- Methodology

The setup has a loop-shaped channel with its floor made of polyethylene and walls made from plexiglass. The loop consists of two direct sections and two curved sections. One of the direct sections has the flush electrodes mounted on it, while the

*Corresponding author's email: mjafari@tabrizu.ac.ir

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

other one is the place where measurements of flow velocity are performed. Under the surface of the two curved sections, heaters are embedded to create the ability of changing fluid temperature. The average temperature of the fluid in the channel is measured by using temperature sensors. Measurements accuracy for temperature, film thickness, applied voltage and electrical current is $\pm 0.1°C$, $\pm 0.2mm$, $\pm 1V$, $\pm 1nA$, respectively.

3- Results and Discussion

In this section, electrical conduction pumping of two different dielectric liquid films in an open channel using copper flush electrodes is investigated, and the effect of liquid physical properties and temperature of the dielectric liquid on efficiency as one of the performance characteristics of the pump is discussed. The pump efficiency is expressed as [8]

$$\eta = \frac{pump\ output\ power}{power\ consumption} = \frac{\rho g Q h}{VI} \tag{2}$$

where h is the specific energy of open channel flow.

The effect of the fluid average temperature on the conduction pump efficiencies for the film thickness is shown in Fig. 1. Increasing the average temperature of the fluid increases the pump efficiency. Since the two fluids have lower density and viscosity values at higher temperatures, the motion of the formed vortices and also fluid flow in the channel becomes easier. This raises the output power as well as diminishing the power consumption, leading to higher efficiencies. It is demonstrated that n-decane has lower efficiency as well as lower flow rates in comparison with n-hexane which is a limiting factor to use it as the operating fluid, while it has advantages such as higher flash point temperature. Also, it is seen that increasing the film thickness shows more significant effect on the efficiencies of n-hexane in comparison with n-decane, which can be due to the easier formation of more effective vortices at the vicinity of the electrodes because of higher ion mobilities and rather lower density and viscosity values. It should be mentioned that in some applications such as cooling electronic devices, the film thickness is the limiting design factor, and has to be considered.

4- Conclusions

The current study experimentally investigated electrical conduction pumping of two hydrocarbon dielectric having different properties such as ion mobility, density, and viscosity. Results show that:

- Although conduction pumping efficiency reduces with increasing applied voltage since it is accompanied by higher flow rates, especially for n-hexane it is of the lower order of importance. On the other hand, efficiency reduction with voltage for n-hexane shows faster rates, and finding an optimized range of applied voltage may be needed for some applications.
- Increasing the working temperature of fluids raises efficiency due to reducing the viscosity of both of them. For the n-hexane effect of increasing temperature is more obvious.
- Despite showing a higher flow rate and efficiency values for n-hexane, it should be concerned that the last mentioned hydrocarbon has rather lower flash point temperature in comparison with n-decane and heavier hydrocarbons. This parameter, especially at higher operating temperatures, becomes very important which can be a limiting factor about using it as the working fluid of the conduction pumping system. References.

Fig. 1. Efficiency variations with applied voltage for film thickness $d = 6mm$: (a) n-hexane, (b) n-decane

References

[1] R. Raghavan, J. Qin, L.Y. Yeo, J.R. Friend, K. Takemura, S. Yokota, K. Edamura, Electrokinetic actuation of low conductivity dielectric liquids, Sensors and Actuators B: Chemical, 140(1) (2009) 287-294.

[2] S.-I. Jeong, J. Seyed-Yagoobi, P. Atten, Theoretical/numerical study of electrohydrodynamic pumping through conduction phenomenon, IEEE Transactions on Industry Applications, 39(2) (2003) 355-361.

[3] P. Atten, J. Seyed-Yagoobi, Electrohydrodynamically induced dielectric liquid flow through pure conduction in point/plane geometry, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 10(1) (2003) 27-36.

[4] M. Yazdani, J. Seyed-Yagoobi, Electrically induced dielectric liquid film flow based on electric conduction phenomenon, IEEE Transactions on dielectrics and electrical insulation, 16(3) (2009).

[5] M. Hemayatkhah, R. Gharraei, E. Esmaeilzadeh, Flow pattern visualization of liquid film conduction pumping using flush mounted electrodes, Experimental Thermal and Fluid Science, 35(6) (2011) 933-938.

[6] N. Nourdanesh, E. Esmaeilzadeh, Experimental study of heat transfer enhancement in electrohydrodynamic conduction pumping of liquid film using flush electrodes,

Applied Thermal Engineering, 50(1) (2013) 327-333.

[7] R. Gharraei, E. Esmaeilzadeh, M.R.H. Nobari, Numerical investigation of conduction pumping of dielectric liquid film using flush-mounted electrodes, Theoretical and Computational Fluid Dynamics, 28(1) (2014) 89.

[8] M. Hojjati, E. Esmaeilzadeh, B. Sadri, R. Gharraei, Electrohydrodynamic conduction pumps with cylindrical electrodes for pumping of dielectric liquid film in an open channel, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 392(1) (2011) 294-299.

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۲، شماره ۴، سال ۱۳۹۹، صفحات ۸۸۱ تا ۸۹۲
DOI: 10.22060/mej.2019.14866.5961

مطالعه تجربی تأثیرات ویژگی‌های فیزیکی سیال بر روی عملکرد پمپ رسانشی

محرم جعفری*، اسماعیل اسماعیل‌زاده، نوید فرخی

دانشکده فنی مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

خلاصه: در مقاله حاضر، با انجام تست‌های تجربی عملکرد پمپ رسانشی با استفاده از الکترودهای مسطح برای دو مایع دی‌الکتریک مختلف نرمال–هگزان و نرمال–دکان به‌عنوان سیال عامل مورد مطالعه قرار گرفته است. این مطالعه برای ضخامت‌های مختلف فیلم سیال و با در نظر گرفتن ولتاژ الکتریکی متغیر، انجام شده و اثرات پارامترهای مختلف مانند ویژگی‌های فیزیکی سیال (اختلاف تحرک یونی، چگالی و گرانروی) و دمای کارکرد مایعات بر عملکرد و بازده پمپ بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از سیال با اختلاف تحرک یونی بالاتر باوجودآن‌که باعث افزایش مصرف توان پمپ می‌شود، ولی به دلیل بیشترکردن سرعت جریان، افزایش قابل ملاحظه‌ای را در دبی و بازده پمپ ایجاد می‌نماید. بر این اساس، می‌توان بیان نمود که در کاربردهای صنعتی استفاده از سیال با اختلاف تحرک یونی بالاتر به دلیل افزایش توأم دبی و بازده پمپ مناسب‌تر خواهد بود. از سوی دیگر اگرچه بازده پمپ رسانشی با افزایش ولتاژ اعمالی کاهش می‌یابد، دبی جریان که از دیگر ویژگی‌های مهم پمپ است و در مورد پمپ رسانشی اهمیتی بیشتر از بازده دارد افزایش می‌یابد. علاوه بر این، نتیجه قابل توجهی که حاصل می‌شود این است که افزایش درجه حرارت سیال به دلیل کاهش میزان چگالی و گرانروی آن باعث افزایش بازده می‌شود.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۷/۰۵/۲۹
بازنگری: ۱۳۹۷/۱۰/۰۱
پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۰۶
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷/۱۰/۲۵

کلمات کلیدی:
الکتروهیدرودینامیک
پمپ رسانش الکتریکی
اختلاف تحرک یونی
مشخصه‌های کارکردی پمپ

۱- مقدمه

اعمال میدان الکتریکی به یک سیال دی‌الکتریک[1] نیروی حجمی مکانیکی[2] ایجاد می‌کند که در برخی شرایط می‌تواند به جریان سیال منجر شود. این پدیده در بسیاری از کاربردها مانند انتقال جرم، انتقال گرما، پمپاژ فیلم مایع و خنک‌کاری دستگاه‌های الکترونیکی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد [۱]. نیروهای حجمی ایجادشده در اثر اعمال میدان الکتریکی به سیال به‌صورت زیر بیان می‌شود [۲]:

$$\boldsymbol{f}_e = q\boldsymbol{E} - \frac{1}{2}E^2\nabla\varepsilon + \frac{1}{2}\nabla\left[E^2\left(\frac{\partial\varepsilon}{\partial\rho}\right)_T\rho\right] \qquad (۱)$$

که در آن f_e، q، E، ε و ρ به‌ترتیب معرف نیروی حجمی، چگالی حجمی بار الکتریکی، شدت میدان الکتریکی و گذردهی الکتریکی و چگالی سیال می‌باشد. اولین عبارت در رابطه (۱) نشان‌دهنده نیرویی است که به بارهای آزاد (مثبت یا منفی) اعمال و نیروی کولمب[3] (نیروی الکتروفورتیک[4]) نامیده می‌شود. عبارت دوم، نیروی دی‌الکتریک[5] است و به علت گرادیان گذردهی الکتریکی[6] ایجاد می‌گردد. هم‌چنین، عبارت سوم نیروی الکترواستریکتیو[7] است که ناشی از قابلیت فشردگی سیال می‌باشد. این سه نیرو لزوماً به‌صورت هم‌زمان در یک سیستم خاص حضور ندارند؛ به‌عنوان‌مثال، برای یک محیط سیال تک‌فاز و تک‌دما، نیروی کولمب تنها نیروی ایجادکننده جریان سیال است [۱].

پمپ‌های الکتروهیدرودینامیکی به‌طورکلی بر اساس نحوه شکل‌دهی یون‌ها به سه دسته پمپ‌های کشش یونی[8] [۶-۳]، پمپ‌های القایی[9] [۱۰-۷] و پمپ‌های رسانشی[10] تقسیم می‌شوند. در پمپ‌های کشش یونی، بارها

1 Dielectric
2 Mechanical body force

3 Coulomb Force
4 Electrophoretic force
5 Dielectric force
6 Electric permittivity
7 Electrostrictive force
8 Ion-drag pump
9 Induction pump
10 Electrical conduction pump

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: mjafari@tabrizu.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

به‌طور مستقیم به سیال تزریق می‌شود. این امر می‌تواند خواص الکتریکی سیال کاری را در طول زمان عملکرد پمپ تضعیف کند و هم‌چنین موجب پدیداری اتفاقاتی چون تخلیه کرونا شود که هیچ کدام از موارد یادشده مطلوب نمی‌باشند. پمپاژ القایی، با القای بار ناشی از عدم یکنواختی رسانش الکتریکی سیال صورت می‌پذیرد که عدم یکنواختی به دلیل ناهمگنی مایع و یا اختلاف درجه حرارت ایجاد می‌شود. بنابراین، هنگام کار با سیستم‌های همگن و تک‌دما، پمپاژ القایی رخ نمی‌دهد. پدیده پمپاژ رسانشی بر پایه تعادل دینامیکی جداسازی[1] و بازترکیب[2] یون‌های تجزیه‌شده استوار است و یک مکانیزم مناسب پمپاژ برای سیالات هم‌گن و تک‌دما می‌باشد. رابطه (۲) تعادل دینامیکی اشاره‌شده برای پمپاژ رسانشی را نشان می‌دهد [۱۴-۱۱]:

$$AB \underset{k_r}{\overset{k_d}{\longleftrightarrow}} A^+ + B^- \qquad (۲)$$

که در آن k_d و k_r به‌ترتیب ثابت‌های مربوط به آهنگ جداسازی و بازترکیب یون‌ها می‌باشد. آهنگ بازترکیب را می‌توان یک ثابت در نظر گرفت، درحالی‌که آهنگ جداسازی تابعی از شدت میدان الکتریکی است. برای میدان الکتریکی قوی‌تر از ۱ کیلوولت بر متر، شدت جداسازی بالاتر از شدت بازترکیب است و این امر منجر به وجود بارهای آزادی می‌گردد که به سمت الکترودهای با قطب مخالف حرکت می‌کنند [۱۵]. نیروی جاذبه بین هر یک از الکترودهای با دو قطب آند یا کاتد و لایه سیال با بار مخالف الکترود، دارای جهت‌های مخالف هستند که می‌توانند یکدیگر را خنثی کنند. برای جلوگیری از این مسئله، طراحی سیستم باید به‌گونه‌ای باشد که یک نیروی خالص به‌عنوان برآیند دو نیروی جاذبه باقی بماند. دو عامل برای ایجاد این امکان وجود دارد که اولین عامل طراحی نامتقارن الکترود آند و کاتد است. کاهش عرض الکترود با حفظ مقدار اولیه طول آن منجر به افزایش شدت میدان الکتریکی در مجاورت آن الکترود می‌شود که این امر موجب اعمال نیروی قوی‌تر به لایه‌ی سیال با بار مخالف مربوط به آن می‌شود. عامل دوم، متفاوت بودن تحرک یونی[3] بارهای مثبت و منفی یک مایع است که قابلیت این بارها برای حرکت به سمت الکترودهای متناظر با قطب مخالف را تعیین می‌کند. البته اثر دومین عامل یادشده ممکن است نتایج مختلفی را برای مایعات با میزان تحرک یونی بارهای مثبت و منفی متفاوت ایجاد کند.

در میان انواع گوناگون پمپ‌های الکتروهیدرودینامیکی، کارکرد پمپ رسانشی یک زمینه تحقیقاتی نسبتاً جدید می‌باشد که در سال‌های اخیر مورد توجه محققان قرار گرفته است. جیانگ[4] و همکاران [۱۵] مطالعه در مورد پمپاژ مایعات دی‌الکتریک با پدیده رسانش الکتریکی را آغاز و کارکرد پمپ‌های رسانشی را بررسی نمودند. آن‌ها در کارشان از سه نوع الکترود ولتاژ بالای سوزنی، لوله توخالی و چند لوله‌ای و هم‌چنین سیال کاری $R-۱۲۳$ استفاده کردند. آتن[5] و سیدیعقوبی [۱۶] با مدل‌سازی عددی پمپ رسانشی را با در نظر گرفتن انواع مختلف الکترودها به‌صورت صفحه- نقطه و صفحات موازی بررسی کردند. هاناوکا[6] و همکاران [۱۷]، جت مایع ایجادشده توسط پمپاژ رسانشی را مطالعه نمودند. آن‌ها الکترود ولتاژ بالا را بدون لبه‌های تیز و مشابه یک حلقه استوانه‌ای کشیده شده طراحی و همچنین از الکترودهای متفاوت برای اتصال به زمین استفاده کردند. از الکترودهای مختلف برای اتصال به زمین استفاده کردند و اثر برخی عوامل را بر پدیده پمپاژ رسانشی بررسی نمودند. صدیقی [۱۸] به‌طور تجربی به بررسی رفتار فیلم مایع تحت اثر پدیده رسانش الکتریکی پرداخت. وی از آرایش‌های گوناگون الکترود و ضخامت‌های متفاوت فیلم مایع استفاده کرد. نتایج مطالعه وی نشان داد که کارکرد پمپ به میزان ولتاژ اعمال‌شده و ضخامت فیلم بستگی دارد. یزدانی و سیدیعقوبی [۱۹] اثر رسانش الکتریکی بر جریان فیلم مایع را به‌صورت عددی بررسی و مشاهده کردند که برای الکترودهای مسطح، متفاوت بودن مقدار پهنای الکترودهای مثبت و منفی همسایه در یک جفت الکترود، منجر به جریان خالص مایع می‌شود. حجتی و اسماعیل‌زاده [۲۰] پمپاژ رسانشی با الکترودهای استوانه‌ای را به‌طور تجربی مورد مطالعه قرار دادند و اثر میدان الکتریکی و ضخامت فیلم سیال بر کارکرد آن را بررسی کردند. همایت‌خواه و همکاران [۲۱] الگوی جریان پمپ‌های رسانش الکتریکی با الکترودهای مسطح را مورد بررسی قرار دادند و نتایج خود در رابطه با موقعیت و وضعیت ایجاد گردابه در نزدیکی الکترودها ارائه کردند. نوردانش و اسماعیل‌زاده [۲۲] به بررسی تجربی انتقال گرما در پمپ‌های رسانش الکتریکی با الکترودهای مسطح برای نفت سفید پرداختند. آن‌ها گزارش کردند که با اعمال میدان الکتریکی، انتقال گرما به میزان قابل‌توجهی افزایش یافته است. غرائی و همکاران [۲۳] پمپ‌های رسانش الکتریکی را به‌صورت عددی شبیه‌سازی و نتایج عددی را با نتایج تجربی مقایسه کردند. سبحانی و همکاران [۲۴] جریان فروریزنده فیلم روغن ترانسفورمر را در مجاورت میدان الکتریکی

1 Dissociation
2 Recombination
3 Ion Mobility
4 Jeong
5 Atten
6 Hanaoka

(الف)

شکل ۱: الف) تصویر تجهیزات آزمایشی (ب) طرحواره تجهیزات آزمایشی: ۱- حسگرهای دما (ترموکوپل‌ها) ۲- محل سنجش دبی ۳- محل قرارگیری الکترودها ۴ و ۵- ورود و خروج جریان برق از منبع تغذیه

Fig. 1. (a) Experimental setup, (b) Schematic of the setup: 1. Temperature sensors, 2. Flow rate measurement location, 3. Electrodes location, 4, 5. Electrical power in/out

بررسی نمودند. نتایج نشان داد که اعمال میدان، ضخامت فیلم فروریزنده را برای گستره وسیعی از اعداد رینولدز کاهش می‌دهد. یزدانی و سیدیعقوبی [۲۵] تأثیر تزریق بار بر عملکرد پمپ رسانش الکتریکی را مطالعه کردند. آن‌ها مشاهده نمودند تزریق بار مثبت منجر به تضعیف عملکرد پمپ رسانش الکتریکی و در نهایت معکوس شدن جریان پمپ می‌شود. میرزایی و صفاراول [۲۶] بهبود انتقال گرمای جابه‌جایی با به‌کارگیری رسانش الکتروهیدرودینامیکی را بررسی و برای آن یک پارامتر تأثیر معرفی کردند. نتایج نشان داد روش ارائه شده برای رینولدزهای پایین تأثیر بیشتری را نشان می‌دهد.

بررسی اجمالی مطالعات انجام‌شده در این زمینه نشان می‌دهد که تاکنون هیچ مطالعه‌ای در زمینه بررسی هم‌زمان اثرات تغییر دمای کارکرد و استفاده از مایعات دی‌الکتریک مختلف بر روی مشخصه‌های کارکردی پمپ‌های رسانشی انجام نشده است. تنها تحقیق موجود، با استفاده از یک سیال عامل دی‌الکتریک (نفت سفید) که حتی مایع خالص نیز نیست و نمی‌توان برای آن ویژگی‌های فیزیکی ثابتی در نظر گرفت، صورت پذیرفته است [۲۲]. باید توجه داشت که دماهای کارکردی مختلف در هنگام استفاده از قابلیت‌های بهبود انتقال گرما در مورد پدیده پمپاژ رسانشی، بسیار مهم است و حتی می‌تواند امکان به‌کارگیری پمپ را در معرض چالش جدی قرار دهد. بر

شکل ۲: آرایش الکترودهای مورداستفاده در آزمایش

Fig. 2. Arrangement of the electrodes in the setup

این اساس در مطالعه حاضر، اثر پارامترهایی مانند دمای کارکرد سیستم و ولتاژ اعمال‌شده بر کارکرد و قابلیت به‌کارگیری پمپ رسانشی با الکترودهای مسطح برای دو نوع مایع دی‌الکتریک مختلف مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

۲- تجهیزات آزمایش

تصویر تجهیزات آزمایشی مطالعه حاضر و طرح‌واره آن در شکل ۱ نشان داده شده است. پمپ رسانشی دارای یک کانال حلقه‌ای-شکل از جنس پلی‌اتیلن و دیوار ساخته‌شده از پلکسی‌گلس می‌باشد. حلقه شامل دو بخش بدون انحنا و دو بخش منحنی شکل است. بر روی یکی از بخش‌های بدون انحنا، الکترودهای مسطح نصب شده‌اند و در بخش دیگر اندازه‌گیری سرعت جریان انجام می‌شود. زیر سطح دو بخش منحنی، گرم‌کن‌هایی[1] به‌منظور ایجاد امکان تغییر دمای سیال تعبیه شده‌اند. عرض کانال ۵۱ و ارتفاع آن ۲۰ میلی‌متر است.

گرم‌کن‌ها از صفحات مسی ساخته شده‌اند و عایقی بر روی آن‌ها نصب شده است تا گرم‌کن‌ها از سیال موجود در کانال جدا شوند. هم‌چنین، حسگر دما مدل PT۱۰۰ زیر گرم‌کن‌ها تعبیه شده است تا امکان کنترل دمای آن‌ها را با تغییر جریان الکتریکی فراهم کند. حسگر به یک کنترل‌کننده دمای Autonics مدل TC۴Y-۱۴R متصل شده است که نقش تغییردهنده جریان الکتریکی را ایفا می‌کند. دقت اندازه‌گیری برای درجه حرارت، ضخامت فیلم، ولتاژ اعمال‌شده و جریان الکتریکی به‌ترتیب برابر ۰/۱ درجه سانتی‌گراد، ۰/۲ میلی‌متر، ۱ ولت و ۱ نانو آمپر است. باید توجه داشت که در یک آزمایش تجربی همراه با انتقال گرما، کالیبراسیون ترموکوپل‌ها مسأله‌ای بسیار مهم برای اطمینان از صحت نتایج می‌باشد که در پژوهش حاضر نیز مورد توجه قرار گرفته است. روند کار به این صورت است که یک لیوان آب داغ برای کالیبره‌کردن ترموکوپل‌ها در شرایط محیط قرار داده می‌شود تا به تدریج خنک شود. دمای آب به طور لحظه‌ای هم‌زمان با فرایند خنک‌شدن، به‌وسیله هر کدام از ترموکوپل‌ها و نیز به‌وسیله یک دماسنج مخصوص کالیبراسیون (با دقت ۰/۱ درجه سانتی‌گراد) ثبت می‌گردد. به‌این‌ترتیب انحراف سنجش دما توسط ترموکوپل‌ها از مقدار واقعی، در ثبت مقدار دما مشخص و در محاسبات لحاظ می‌شود. هم‌چنین باید توجه داشت که داده‌ها در شرایط پایا و مستقل از زمان جمع‌آوری شود. بنابراین در هر مرحله از ثبت داده‌ها باید آن اندازه از اعمال تغییرات زمان بگذرد تا نتایج وابسته به زمان نباشند. دما و فشار محیط در هنگام انجام آزمایشات به ترتیب برابر ۲۵°C و ۸۵/۵kPa می‌باشد.

آرایش شش جفت الکترود مورداستفاده در شکل ۲ نشان داده شده است. عرض الکترودهای مسطح نصب‌شده روی کف کانال، برای الکترودهای زمین و ولتاژبالا به‌ترتیب برابر ۴ و ۱۶ میلی‌متر است. فاصله بین الکترودهای ولتاژبالا و الکترودهای زمین متناظر آن‌ها برابر ۲ میلی‌متر و فاصله بین یک الکترود ولتاژبالا و الکترود زمین از جفت همسایه آن برابر ۲۲ میلی‌متر است [۱۹].

Table 1. Physical properties of the used fluids

جدول ۱: ویژگی‌های فیزیکی مایعات مورداستفاده

نوع ماده	چگالی [۲۷] (kg/m^3)	گرانروی [۲۸] (mPa.s)	تحرک یونی (10^{-8} m^2/V s)		رسانش الکتریکی [۲۹] (10^{-12} S/m)
			یون مثبت	یون منفی	
نرمال-هگزان	۶۵۷	۰/۳۱۲۶	۶/۸	۱۰	۸۰
نرمال-دکان	۷۲۸	۰/۹۲۹۱	۱/۵	۳/۵	۳/۴۶

1 Heater

شکل ۳: تغییرات مصرف توان برحسب ولتاژ اعمالی: (الف): نرمال-هگزان (ب) نرمال-دکان

Fig. 3. Power consumption versus applied voltage: (a) n-hexane, (b) n-decane

ویژگی‌های فیزیکی مایعات مورداستفاده در این مطالعه که نرمال-هگزان[1] و نرمال-دکان[2] می‌باشند، در جدول ۱ نشان داده شده است. دمای میانگین مایع موجود در کانال با استفاده از حسگر دمای PT۱۰۰ اندازه‌گیری می‌شود.

۳- نتایج و بحث

در این قسمت، پمپاژ رسانشی فیلم دو مایع دی‌الکتریک مختلف در یک کانال باز با استفاده از الکترودهای مسی مسطح بررسی می‌شود. همچنین، اثر ویژگی‌های فیزیکی مایع بر مشخصه‌های عملکردی پمپ مانند مصرف توان، دبی جریان و بازده مورد بحث قرار می‌گیرد. در هر مرحله، داده‌ها هنگامی‌که سیستم در حالت پایا تثبیت می‌شود، جمع‌آوری می‌گردد.

۳- ۱- مصرف توان

در این بخش، تأثیر ولتاژ اعمالی بر روی مصرف توان پمپ رسانشی مورد بحث قرار می‌گیرد. تغییرات مصرف توان الکتریکی با ولتاژ اعمال‌شده برای دو سیال در شکل ۳ نشان داده شده است. نمودار مصرف توان رفتاری مشابه چندجمله‌ای درجه دوم را نشان می‌دهد که از رابطه زیر قابل پیش‌بینی است:

$$P=\frac{V^2}{R} \qquad (۳)$$

که در آن P، V و R به‌ترتیب مصرف توان، ولتاژ اعمال‌شده و مقاومت الکتریکی می‌باشد.

1 n-hexane
2 n-decane

همان‌گونه که از شکل ۳ مشاهده می‌شود برای سیال نرمال-هگزان با اعمال ولتاژ ۶ کیلوولت، توان مصرفی برای ضخامت‌های ۶ و ۸ میلی‌متر فیلم مایع نسبت به ضخامت ۴ میلی‌متر به‌ترتیب ۲۴٪ و ۴۴٪ کاهش می‌یابد. علت این امر را می‌توان به این صورت بیان نمود که با افزایش ضخامت فیلم، ممان اینرسی گردابه‌ها افزایش و سرعت در مجاورت الکترودها کاهش می‌یابد و درنتیجه مصرف جریان و توان کاهش پیدا می‌کند. همچنین، مقادیر متناظر کاهش توان مصرفی برای سیال عامل نرمال-دکان به ترتیب برابر ۱۴٪ و ۲۱٪ به دست می‌آید. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد که برای ضخامت فیلم مایع برابر ۶ میلی‌متر و ولتاژ اعمالی ۶ کیلوولت، مصرف توان نرمال-هگزان و نرمال-دکان به‌ترتیب برابر با ۱۱۴ و ۷۲ میلی‌وات می‌باشد. به علت کم‌تر بودن اختلاف تحرک یونی و همچنین رسانش الکتریکی و بالاتر بودن مقادیر چگالی و گرانروی سیال عامل نرمال-دکان نسبت به نرمال-هگزان، سرعت گردابه‌ها در اطراف الکترودها کاهش بیشتری می‌یابد و درنتیجه مقادیر توان مصرفی برای ضخامت‌های مختلف فیلم نرمال-دکان به‌نسبت پایین‌تر از مقادیر متناظر مربوط به نرمال-هگزان می‌شود.

۳- ۲- دبی حجمی

تغییرات سرعت سیال با ولتاژ اعمال‌شده برای دو مایع موردمطالعه، در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش ولتاژ منجر به افزایش سرعت مایع در کانال می‌شود. با افزایش ولتاژ، شدت میدان الکتریکی و بنابراین نیروی حجمی اعمال‌شده به بارها افزایش می‌یابد که این امر باعث افزایش سرعت حرکت سیال می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد که برای ولتاژهای بیش از ۳ کیلوولت، آهنگ تغییرات سرعت بالاتر می‌رود که این امر

شکل ۴: تغییرات سرعت سیال برحسب ولتاژ اعمالی (الف) سیال عامل نرمال-هگزان (ب) سیال عامل نرمال-دکان

Fig. 4. Average velocity versus applied voltage: (a) n-hexane, (b) n-decane

شکل ۵: تغییرات دبی حجمی سیال برحسب ولتاژ اعمالی (الف) سیال عامل نرمال-هگزان (ب) سیال عامل نرمال-دکان

Fig. 5. Flow rate versus applied voltage: (a) n-hexane, (b) n-decane

به دلیل تشدید آهنگ جداسازی یون‌ها می‌باشد. همچنین، برای ولتاژهای بالاتر از ۱۰ کیلوولت، جریان سرعت‌بالای مایع در اطراف الکترود، بارها را از مجاورت الکترودها جابه‌جا می‌کند و نیروی اعمال‌شده بر روی آن‌ها را کاهش می‌دهد. این تأثیر در شکل ۳ به‌صورت حالت اشباع برای سرعت دیده می‌شود که با افزایش بیشتر ولتاژ، آهنگ تغییرات سرعت میانگین سیال کم‌تر می‌گردد. افزایش ضخامت فیلم که منجر به بیشتر شدن ممان اینرسی مایع می‌شود، دبی جریان را کاهش می‌دهد. از سوی دیگر نرمال-دکان در مقایسه با نرمال-هگزان به دلیل مقادیر پایین‌تر برای اختلاف تحرک یونی که یکی از عامل‌های اصلی پمپاژ رسانشی است، سرعت کم‌تری را نشان می‌دهد. البته چگالی و گرانروی بالاتر نرمال-دکان به‌عنوان عوامل مقاومت در مقابل حرکت سیال نیز به کاهش سرعت کمک می‌کنند. به‌عنوان‌مثال، برای ضخامت فیلم مایع برابر ۶ میلی‌متر و ولتاژ اعمالی ۶ کیلوولت، سرعت میانگین نرمال-هگزان و نرمال-دکان به‌ترتیب برابر با ۲۲/۶ و ۶/۳ متر بر ثانیه می‌باشد که برای سیال دوم ۲۵۹ درصد بیشتر از سیال اول است.

در ادامه تغییرات دبی حجمی جریان دو مایع برحسب ولتاژ اعمالی مورد مطالعه قرار می‌گیرد که نتایج آن در شکل ۵ نشان داده شده است. مقدار دبی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$Q = dwu \qquad (۴)$$

که در آن d، w و u به‌ترتیب ضخامت فیلم، پهنای کانال و سرعت میانگین سیال می‌باشد. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که برای ضخامت فیلم مایع برابر ۶ میلی‌متر و ولتاژ اعمالی ۱۲ کیلوولت، دبی نرمال-هگزان و نرمال-دکان به‌ترتیب برابر با ۱۳/۴۴ و ۶/۴۲ میلی‌لیتر بر ثانیه می‌باشد

شکل ۶: تغییرات بازده پمپ برحسب ولتاژ اعمالی: (الف): نرمال-هگزان (ب) نرمال-دکان

Fig. 6. Efficiency variations with applied voltage: (a) n-hexane, (b) n-decane

که برای سیال دوم در حدود دو برابر سیال اول است. باوجود آن‌که سرعت فیلم‌های نازک‌تر مایع بالاتر است، ولی از آن‌جا که با افزایش ضخامت فیلم سطح مقطع جریان بیشتر می‌شود، دبی حجمی افزایش می‌یابد.

۳- ۳- بازده پمپ

یکی دیگر از پارامترهای مهم در مطالعه عملکرد پمپ‌ها بازده آن می‌باشد. با مدنظر قرار دادن توان خروجی و توان مصرفی، بازده پمپ به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\eta = \frac{\text{pump output power}}{\text{power consumption}} = \frac{\rho g Q h}{VI} \qquad (۵)$$

که در آن h انرژی ویژه جریان کانال روباز است و از رابطه زیر به دست می‌آید [۳۰]:

$$h = d + \frac{u^2}{2g} \qquad (۶)$$

در شکل ۶ تغییرات بازده برای دو مایع موردبررسی نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که بازده پمپ برای ضخامت ۶ میلی‌متر سیال عامل نرمال-هگزان با اعمال ولتاژهای ۶ کیلوولت و ۱۲ کیلوولت به‌ترتیب برابر ۰/۲۳٪ و ۰/۱۵٪ است که ۳۵ درصد کاهش را درنتیجه افزایش دوبرابری ولتاژ نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود برای هر دو سیال عامل موردبررسی، افزایش ولتاژ به علت ایجاد آشفتگی بیشتر بر روی الکترودها بازده را کاهش می‌دهد. با توجه به این‌که افزایش دبی جریان برای بسیاری از کاربردهای عملی بسیار مهم و حائز اهمیت می‌باشد، به علت مصرف کم توان در پدیده پمپاژ رسانشی این کاهش بازده که با افزایش دبی جریان همراه است می‌تواند مطلوب باشد. هم‌چنین، نتایج نشان می‌دهد که فیلم‌های ضخیم‌تر موردمطالعه با توجه به توان خروجی بالاتر و هم‌چنین مصرف توان الکتریکی پایین‌تر که به آن اشاره شد، بازده بالاتری را نشان می‌دهند.

همان‌گونه که در شکل ۶ دیده می‌شود، استفاده از نرمال-دکان بازده و هم‌چنین دبی پایین‌تری نسبت به نرمال-هگزان دارد که این امر یک عامل محدودکننده برای استفاده از آن به‌عنوان سیال عامل است، هرچند نرمال-دکان دارای مزایای مهمی مانند نقطه اشتعال بالاتر می‌باشد. هم‌چنین در شکل ۶ مشخص است که افزایش ضخامت فیلم بر بازده پمپ با سیال نرمال-هگزان نسبت به بازده پمپ با سیال نرمال-دکان اثر بیشتری دارد. علت این پدیده آن است که در سیال عامل نرمال-هگزان تحرک یون‌ها نسبت به نرمال-دکان بالاتر و چگالی و گرانروی پایین‌تر می‌باشد و بنابراین گردابه‌ها در همسایگی الکترود با حضور نرمال-هگزان آسان‌تر ایجاد می‌شوند و درنتیجه بازده افزایش می‌یابد. لازم به یادآوری است که در بعضی از کاربردها مانند خنک‌کاری دستگاه‌های الکترونیکی، ضخامت فیلم عامل محدودکننده طراحی است و باید موردتوجه قرار گیرد.

۳- ۴- تأثیر دمای کارکرد

با توجه به این‌که تغییر دمای مایع دی‌الکتریک منجر به تغییر بازده پمپ می‌شود، بررسی این تأثیر به‌ویژه هنگامی‌که پمپ رسانشی به‌عنوان یک مبادله‌کن گرما مورد استفاده قرار می‌گیرد، بسیار مهم است. شکل ۷ تأثیر دمای میانگین مایع بر روی بازده پمپ رسانشی را برای ضخامت ۴ میلی‌متری

شکل ۷: تغییرات بازده برحسب ولتاژ اعمالی برای ضخامت ۴ میلی‌متری فیلم مایع: (الف): نرمال–هگزان (ب) نرمال–دکان

Fig. 7. Efficiency variations with applied voltage for film thickness $d = 4\text{mm}$: (a) n-hexane, (b) n-decane

شکل ۸: تغییرات بازده برحسب ولتاژ اعمالی برای ضخامت ۶ میلی‌متری فیلم مایع: (الف): نرمال–هگزان (ب) نرمال–دکان

Fig. 8. Efficiency variations with applied voltage for film thickness $d = 6\text{mm}$: (a) n-hexane, (b) n-decane

فیلم نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، با افزایش دمای میانگین مایع بازده پمپ بیشتر می‌شود. برای مثال میزان افزایش بازده پمپ در دماهای ۳۵ و ۴۵ درجه سانتی‌گراد نسبت به دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد برای سیال عامل نرمال–هگزان با اعمال ولتاژ ۶ کیلوولت به‌ترتیب برابر ۲۳٪ و ۵۲٪ است. از آن‌جا که دو مایع در دماهای بالاتر دارای چگالی و گرانروی پایین‌تری هستند، حرکت گردابه‌ها و هم‌چنین جریان سیال در کانال آسان‌تر می‌شود. این امر باعث افزایش توان خروجی و هم‌چنین کاهش مصرف انرژی می‌گردد که منجر به افزایش بازده می‌شود. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، تغییرات بازده به‌عنوان تابعی از ولتاژ اعمال‌شده برای هر دو مایع در ضخامت ۴ میلی‌متری فیلم بسیار مشابه است.

تأثیر دمای میانگین سیال بر روی بازده پمپ رسانشی برای ضخامت ۶ میلی‌متری فیلم مایع در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌گونه که پیش‌تر اشاره گردید، بازده برای نرمال–هگزان نسبت به نرمال–دکان بالاتر است که دلیل آن به‌طور کامل در مورد شکل ۶ توضیح داده شده است و در این‌جا برای رعایت اختصار از آوردن مجدد آن پرهیز می‌گردد. در این ضخامت فیلم نیز دیده می‌شود که با افزایش دمای میانگین مایع، بازده پمپ بیشتر می‌گردد. برای نمونه، میزان افزایش بازده پمپ در دماهای ۳۵ و ۴۵ درجه سانتی‌گراد نسبت به دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد برای سیال عامل نرمال–هگزان با اعمال ولتاژ ۶ کیلوولت به‌ترتیب برابر ۱۷٪ و ۴۵٪ است. هم‌چنین، در شکل ۹ تأثیر دمای میانگین مایع بر روی بازده پمپ برای ضخامت ۸ میلی‌متری فیلم مایع نشان داده شده است. در این ضخامت نیز همانند ضخامت ۶ میلی‌متری، افزایش دمای میانگین مایع، بازده پمپ را افزایش می‌دهد. برای مثال، افزایش بازده پمپ در دماهای ۳۵ و ۴۵ درجه سانتی‌گراد نسبت به دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد برای سیال عامل نرمال–هگزان با اعمال ولتاژ ۶ کیلوولت به‌ترتیب برابر ۲۹٪ و ۸۰٪ است.

از آن‌جایی که در مورد نرمال–هگزان به‌دلیل مقادیر بالاتر تحرک یونی

شکل ۹: تغییرات بازده برحسب ولتاژ اعمالی برای ضخامت ۸ میلی‌متری فیلم مایع: (الف): نرمال–هگزان (ب) نرمال–دکان

Fig. 9. Efficiency variations with applied voltage for film thickness $d = 8\text{mm}$: (a) n-hexane, (b) n-decane

و نیز چگالی و گرانروی پایین‌تر، گردابه‌های بزرگ‌تر و مؤثرتری بر روی الکترودها تشکیل می‌شود (که البته این مسئله در فیلم‌های ضخیم‌تر مایع مشهودتر است)، بنابراین بازده پمپ نسبت به حالت استفاده از نرمال–دکان بیشتر می‌باشد. هم‌چنین بررسی نتایج نشان می‌دهد که تأثیر افزایش دما بر بازده پمپ در هنگام استفاده از نرمال–هگزان نسبت به نرمال–دکان به‌طور معناداری بیشتر است. مقادیر بازده برای ضخامت‌های ۶ و ۸ میلی‌متری فیلم مایع، در برخی نقاط اندکی خارج از روند منحنی‌وار موجود در شکل‌های ۸ و ۹ دیده می‌شود که این امر ناشی از طبیعت گذرای گردابه‌های تشکیل‌شده می‌باشد. البته روند کلی تغییرات بازده، مطابقت مناسبی با توضیحات ارائه‌شده دارد.

۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر پمپاژ رسانشی دو دی‌الکتریک هیدروکربنی دارای ویژگی‌های متفاوت شامل تحرک یونی، چگالی و گرانروی، به‌صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که هرچند افزایش ولتاژ اعمال‌شده باعث افزایش مصرف توان برای هر دو سیال نرمال–هگزان و نرمال–دکان می‌شود، اما برای یک ولتاژ مشخص، سیال عامل نرمال–هگزان مصرف توان بیشتری را نشان می‌دهد. هم‌چنین بررسی نتایج مشخص می‌کند که اختلاف تحرک یونی و رسانش الکتریکی، پارامترهای غالب تعیین‌کننده میزان مصرف توان هستند. علاوه بر این، در یک ولتاژ مشخص، به علت مقدار بالاتر اختلاف تحرک یونی برای نرمال–هگزان و تشدید ایجاد گردابه در بالای الکترودها، سرعت و دبی سیال در کانال برای نرمال–هگزان بالاتر است. برخلاف آن‌چه در مورد مصرف توان گفته شد، مقادیر بالاتر چگالی و گرانروی برای نرمال–دکان به‌عنوان عوامل کاهش سرعت و دبی جریان عمل می‌کنند.

اگرچه بازده پمپاژ رسانشی با افزایش ولتاژ اعمالی کاهش می‌یابد، ولی به علت افزایش دبی جریان این مسئله از اهمیت کم‌تری برخوردار است. از سوی دیگر، کاهش بازده ناشی از افزایش ولتاژ برای نرمال–هگزان آهنگ تندتری را نشان می‌دهد و برای بعضی از کاربردهای آن می‌توان از محدوده بهینه ولتاژ اعمالی استفاده نمود. هم‌چنین، نتایج نشان می‌دهد که افزایش دمای کارکرد به دلیل کاهش چگالی و گرانروی هر دو مایع موجب افزایش بازده پمپ می‌شود. این مسئله برای ضخامت ۴ میلی‌متری فیلم مایع قابل‌ملاحظه نمی‌باشد، ولی در ضخامت‌های ۶ و ۸ میلی‌متر تأثیر آن بیشتر دیده می‌شود. هم‌چنین با توجه به این‌که با افزایش دما حرکت گردابه‌ها آسان‌تر صورت می‌پذیرد، بنابراین اثر افزایش دما بر افزایش بازده برای نرمال–هگزان بیشتر از حالت متناظر مربوط به استفاده از سیال عامل نرمال–دکان می‌باشد.

درنهایت می‌توان بیان نمود که باوجود بالاتر بودن دبی و بازده برای حالت استفاده از نرمال–هگزان، باید توجه داشت که این هیدروکربن نسبت به نرمال–دکان و هیدروکربن‌های سنگین‌تر نقطه اشتعال پایین‌تری دارد. این مسئله به‌ویژه در دماهای کارکردی بالاتر بسیار مهم است و می‌تواند عامل محدودکننده مهمی در استفاده از نرمال–هگزان یا دیگر هیدروکربن‌های سبک، به‌عنوان سیال عامل سیستم پمپ رسانش الکتریکی باشد.

منابع

[1] D.S. Cho, S. Kang, Y.K. Suh, Development of a bi-directional electrohydrodynamic pump: Parametric study with numerical simulation and flow visualization, Advances in Mechanical Engineering, 8(6) (2016) 12-34.

[2] J. Melcher, Continuum electromechanics (Cambridge, MIT press, 198 (1981) 3.1-3.26.

[3] P. Atten, M. Haidara, Electrical conduction and ehe motion of dielectric llquids in a knife-plane electrode assembly, IEEE Transactions on Electrical Insulation, (2) (1985) 187-198.

[4] J. Bryan, J. Seyed-Yagoobi, Analysis of 2-dimensional flow field generated by a 1-electrode-pair ion-drag pump, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1(3) (1994) 459-466.

[5] J.M. Crowley, G.S. Wright, J.C. Chato, Selecting a working fluid to increase the efficiency and flow rate of an EHD pump, IEEE Transactions on Industry Applications, 26(1) (1990) 42-49.

[6] W.F. Pickard, Ion drag pumping. I. Theory, Journal of Applied Physics, 34(2) (1963) 246-250.

[7] K. Brand, J. Seyed-Yagoobi, Effect of electrode configuration on electrohydrodynamic induction pumping of a stratified liquid/vapor medium, IEEE Transactions on Industry Applications, 38(2) (2002) 389-400.

[8] J. Seyed-Yagoobi, J. Chato, J. Crowley, P. Krein, Induction electrohydrodynamic pump in a vertical configuration: Part 1—Theory, Journal of Heat Transfer, 111(3) (1989) 664-669.

[9] A. Washabauch, M. Zahn, J. Melcher, Electrohydrodynamic traveling-wave pumping of homogeneous semi-insulating liquids, IEEE transactions on electrical insulation, 24(5) (1989) 807-834.

[10] M. Wawzyniak, J. Seyed-Yagoobi, Electrohydrodynamic induction pumping of a stratified liquid/vapor medium in the presence of volumetric and interface electric charges, IEEE Transactions on Industry Applications, 37(4) (2001) 950-958.

[11] R. Hanaoka, I. Takahashi, S. Takata, T. Fukami, Y. Kanamaru, Properties of EHD pump with combination of rod-to-rod and meshy parallel plates electrode assemblies, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 16(2) (2009).

[12] R. Hanaoka, S. Takata, M. Murakumo, H. Anzai, Properties of liquid jet induced by electrohydrodynamic pumping in dielectric liquids, Electrical Engineering in Japan, 138(4) (2002) 1-9.

[13] S.-I. Jeong, J. Seyed-Yagoobi, Experimental study of electrohydrodynamic pumping through conduction phenomenon, Journal of Electrostatics, 56(2) (2002) 123-133.

[14] R. Raghavan, J. Qin, L.Y. Yeo, J.R. Friend, K. Takemura, S. Yokota, K. Edamura, Electrokinetic actuation of low conductivity dielectric liquids, Sensors and Actuators B: Chemical, 140(1) (2009) 287-294.

[15] S.-I. Jeong, J. Seyed-Yagoobi, P. Atten, Theoretical/numerical study of electrohydrodynamic pumping through conduction phenomenon, IEEE Transactions on Industry Applications, 39(2) (2003) 355-361.

[16] P. Atten, J. Seyed-Yagoobi, Electrohydrodynamically induced dielectric liquid flow through pure conduction in point/plane geometry, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 10(1) (2003) 27-36.

[17] R. Hanaoka, H. Nakamichi, S. Takata, T. Fukami, Distinctive flow properties of liquid jet generated by EHD pump and conical nozzle, Electrical Engineering in Japan, 154(1) (2006) 9-19.

[18] M.A.W. Siddiqui, Experimental Study of Stratified Liquid Film Pumping with Electric Conduction Phenomenon, Doctoral Dissertation, Illinois Institute of

Technology, 2006.

[19] M. Yazdani, J. Seyed-Yagoobi, Electrically induced dielectric liquid film flow based on electric conduction phenomenon, IEEE Transactions on dielectrics and electrical insulation, 16(3) (2009).

[20] M. Hojjati, E. Esmaeilzadeh, B. Sadri, R. Gharraei, Electrohydrodynamic conduction pumps with cylindrical electrodes for pumping of dielectric liquid film in an open channel, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 392(1) (2011) 294-299.

[21] M. Hemayatkhah, R. Gharraei, E. Esmaeilzadeh, Flow pattern visualization of liquid film conduction pumping using flush mounted electrodes, Experimental Thermal and Fluid Science, 35(6) (2011) 933-938.

[22] N. Nourdanesh, E. Esmaeilzadeh, Experimental study of heat transfer enhancement in electrohydrodynamic conduction pumping of liquid film using flush electrodes, Applied Thermal Engineering, 50(1) (2013) 327-333.

[23] R. Gharraei, E. Esmaeilzadeh, M. Hemayatkhah, J. Danaeefar, Experimental investigation of electrohydrodynamic conduction pumping of various liquids film using flush electrodes, Journal of Electrostatics, 69(1) (2011) 43-53.

[24] A. Sobhani, S. Nasirivatan, R. Gharraei, E. Esmaeilzadeh, Experimental investigation of fully developed falling film flow in the presence of conduction pumps, Journal of Electrostatics, 73 (2015) 71-79.

[25] M. Yazdani, J.S. Yagoobi, The effect of uni/bipolar charge injection on EHD conduction pumping, Journal of Electrostatics, 75 (2015) 43-48.

[26] M. Mirzaei, M. Saffar-Avval, Enhancement of convection heat transfer using EHD conduction method, Experimental Thermal and Fluid Science, 93 (2018) 108-118.

[27] R.C. Reid, Tables on the Thermophysical Properties of Liquids and Gases. NB Vargaftik, Halsted Press, Division of John Wiley & Sons, Inc., New York, August, 1975. $49.50, 758 pages, AIChE Journal, 21(6) (1975) 1235-1235.

[28] O. Gzowski, Mobility of ions in liquid dielectrics, Nature, 194(4824) (1962) 173-173.

[29] J. Bryan, J. Seyed-Yagoobi, Experimental study of ion-drag pumping using various working fluids, IEEE Transactions on Electrical Insulation, 26(4) (1991) 647-655.

[30] J.K. Vennard, Elementary fluid mechanics, Read Books Ltd, 2013.

این صفحه عمداً خالی است