

Research Paper



The influence of transfer tube length on the characteristics of transitional cold atmospheric plasma



Abolfazl Soulat*¹, Taghi Mohsenpour,² Hamid Naghshara,³



This paper is an open access and licenced under the CC BY NC licence.



DOI: 10.22034/strap.2024.18920

Reference to this article: Soulat, A; Mohsenpour, T; Naghshara, H; (2024). The influence of transfer tube length on the characteristics of transitional cold atmospheric plasma. *Scientific Researches in Theoretical and Applied Physics*, 2 (2): 45-50

Keywords

transitional cold atmospheric plasma, Plasma parameters, Transfer tube length

Received: 2024/04/11

Accepted: 2024/12/10

Available: 2025/07/08

ABSTRACT

Transitional cold atmospheric plasma (TCAP) has emerged as a promising technology across various industries, such as medicine, food processing, materials, and other technological domains. In this experimental investigation, we explore the impact of transmission pipe length on TCAP characteristics, including voltage, current, and frequency, during the transmission process. To conduct this study, a dielectric barrier discharge (DBD) reactor served as the primary source for plasma transfer. TCAP plasma was generated using various gas combinations (argon, argon+nitrogen, argon+oxygen, and argon+air) within transmission tubes of varying lengths. The results revealed a direct correlation between transmission tube length and applied voltage, wherein an increase in tube length led to an increase in applied voltage and a decrease in electric current and plasma frequency. These observations stemmed from the relationship between tube length and the power required for plasma transfer. Furthermore, we observed distinct effects on plasma transport based on different gas compositions (argon, nitrogen, oxygen, and air), underscoring the influence of gas composition on TCAP plasma properties. Consequently, the plasma transfer process significantly impacts plasma-related parameters.

* Corresponding Author: Abolfazl Soulat

E-mail: a.soulat02@umail.umz.ac.ir

1. University of Mazandaran, Iran.

2. University of Mazandaran, Iran.

3. Faculty of Physics, University of Tabriz, Solid State Physics, Tabriz, Iran.

مقاله پژوهشی



تأثیر طول لوله انتقال بر ویژگی‌های پلاسمای اتمسفری سرد انتقال یافته

ابوالفضل صولت^{1*}، تقی محسن پور²، حمید نقش آرا³

این مقاله به صورت دسترسی باز و با لایسنس CC BY NC کپی‌رایت کامانز قابل استفاده است.



ارجاع به این مقاله: صولت، ابوالفضل؛ محسن پور، تقی؛ نقش آرا، حمید (1403). تأثیر طول لوله انتقال بر ویژگی‌های پلاسمای اتمسفری سرد انتقال یافته. پژوهش‌های علمی در فیزیک نظری و کاربردی، 2(2): 45-50.

DOI: 10.22034/strap.2024.18920



چکیده

فناوری پلاسمای اتمسفری سرد انتقال یافته (TCAP)، به‌عنوان یکی از فناوری‌های پیشرفته در بسیاری از صنایع از جمله پزشکی، صنایع غذایی، پردازش مواد و سایر حوزه‌های فناوری، توجه بسیاری را به خود جلب کرده است. در این مطالعه تجربی، تأثیر طول لوله انتقال بر ویژگی‌های TCAP مانند ولتاژ، جریان و فرکانس در فرآیند انتقال مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور، از یک راکتور تخلیه سد دی الکتریک (DBD) به عنوان منبع اصلی انتقال پلاسما استفاده شد و پلاسمای TCAP با استفاده از ترکیبات گازی مختلف (آرگون، آرگون+نیتروژن، آرگون+اکسیژن و آرگون+هوا) در طول‌های متفاوت لوله‌های انتقال استفاده شد. نتایج نشان دادند که با افزایش طول لوله انتقال، ولتاژ اعمالی افزایش و جریان الکتریکی و فرکانس پلاسما کاهش می‌یابد. این تغییرات به دلیل رابطه مستقیم بین طول لوله انتقال و میزان توان مصرفی برای انتقال پلاسما بوده است. همچنین، تأثیرات انتقال پلاسما در ترکیبات گازی مختلف (آرگون، نیتروژن، اکسیژن و هوا) مشاهده شد، که نشان می‌دهد ویژگی‌های پلاسمای TCAP تحت تأثیر ترکیبات گازی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در نتیجه، فرآیند انتقال پلاسما تأثیر چشمگیری بر روی پارامترهای مرتبط با پلاسما می‌گذارد.

کلیدواژه‌ها

پلاسمای اتمسفری سرد انتقال-
یافته، پارامترهای پلاسما، طول
لوله انتقال.

دریافت شده: 1403/01/23

پذیرفته شده:
1403/09/20

منتشر شده: 1404/04/17

* نویسنده مسئول: ابوالفضل صولت

رایانامه: a.soulat02@umail.umz.ac.ir

1- دانشگاه مازندران.

2- دانشیار، دانشگاه مازندران.

3- دانشیار، دانشکده فیزیک، دانشگاه تبریز، فیزیک حالت جامد.

مقدمه

فرآیند انتقال پلازما با فشار اتمسفری اساساً یک جت پلازما فشار اتمسفری (APPJ)¹ ثانویه تشکیل شده از یک تخلیه اولیه تولید شده در یک راکتور یا از یک جت پلازما است که به دور از تخلیه اولیه تشکیل می‌شود [1]. تخلیه اولیه معمولاً یک تخلیه سد دی‌الکتریک (DBD)² است به دلیل پوشیده شدن حداقل یکی از الکترودها، از انتقال به تخلیه قوسی جلوگیری می‌کند [2]. ویژگی بارز پلاسمای انتقال یافته (جت پلازما ثانویه)، تولید پلازما از طریق جریان گاز و میدان الکتریکی در منطقه‌ای به دور از منبع ولتاژ بالا است که ایمنی در عملکرد و کنترل آن را بهبود می‌بخشد [3]. همچنین، جداسازی فضایی ناحیه تخلیه و ناحیه کاربرد، قابلیت انعطاف پذیری قابل توجه، تضمین شرایط درمان ایمن و همچنین توانایی نفوذ و انتشار در داخل منافذ کوچک از جمله ویژگی‌های بارز انتقال پلازما می‌باشند [4]. نقش اصلی در فرآیند انتقال از تخلیه اولیه و القای تخلیه ثانویه را یک سیم نازک مسی با پتانسیل شناور که از پتانسیل الکتریکی تخلیه اولیه تبعیت می‌کند، بازی می‌کند [5]. این سیم مسی به عنوان یک اتصال سری به تخلیه اولیه، باعث تسهیل شکست گاز در تخلیه اولیه و ایجاد یک میدان الکتریکی به اندازه کافی قوی در انتهای خود می‌شود که موجب ایجاد یک جت پلازما فشار اتمسفری در انتهای پایین دستی لوله انتقال می‌شود [6]. بنابراین، انتشار پلازما با تجمع بار سطحی روی دیواره‌های داخلی لوله‌های دی‌الکتریک و در نتیجه افزایش میدان الکتریکی داخل لوله‌ها مرتبط است [7].

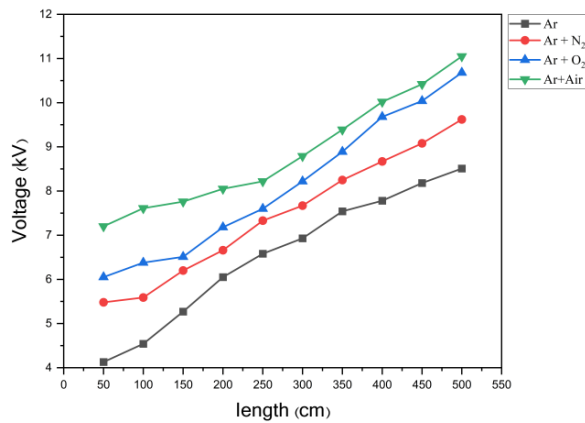
از طرفی، فرآیند انتقال پلازما با فرآیند انتشار گلوله‌های پلاسمایی یا انتشار امواج یونیزاسیون (IWs)³ در باریکه‌های انعطاف پذیر طولانی توصیف می‌شود [8]. انتشار IWs ها در طول لوله‌های دی‌الکتریک تحت تاثیر عواملی چون حرکت سوقی یون‌ها و یا گونه‌های برانگیخته، توزیع پتانسیل پلازما در طول لوله دی‌الکتریک، باز ترکیب سطحی گونه‌های باردار، تولید و گسیل الکترون‌ها از کاتد می‌باشد [9]. IWs ها که بر روی سطح داخلی یک لوله دی‌الکتریک منتشر می‌شوند، فقط در صورتی انتشار می‌یابند که الکترون‌های آزاد جلوتر از IWs ها وجود داشته باشند [10]. از سوی دیگر، IWs ها توانایی طی کردن فاصله‌هایی تا صدها سانتیمتر را در درون لوله‌های دی‌الکتریک با سرعت 10^7 الی 10^8 سانتیمتر بر ثانیه را دارند که با افزایش چگالی پیش یونیزاسیون از 10^4 به 10^8 سانتی متر مکعب، این سرعت انتشار می‌تواند دو برابر شود [10, 11]. نهایتاً، از لحاظ وابستگی به پارامترهای

سیم نازک مسی، انتشار IWs ها هیچ وابستگی به قطر سیم مسی ندارد، ولی به شدت تحت تاثیر طول سیم مسی قرار دارد [2, 10, 11]. پژوهش تجربی حاضر، بررسی پارامترهای موثر مانند ولتاژ، جریان و فرکانس بر انتقال پلازما از یک تخلیه سد دی‌الکتریک را در طول‌های متفاوت انتقال و گاز آرگون و ترکیب آن با گازهای اکسیژن، نیتروژن و هوا را ارائه می‌کند.

روش‌ها و مواد

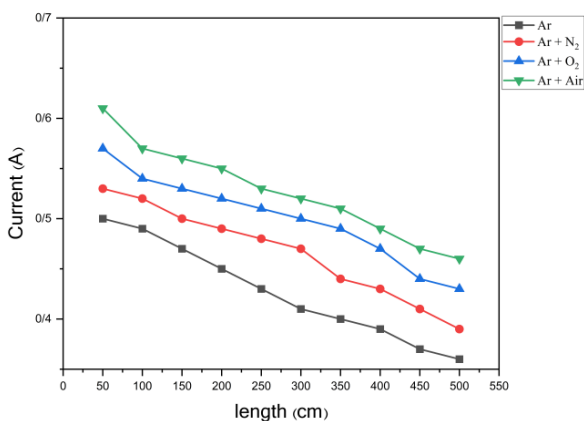
هدف از این مطالعه تجربی، بررسی پارامترهای موثر در پلاسمای اتمسفری سرد انتقال یافته (TCAP)⁴ مانند ولتاژ، جریان و فرکانس در طول‌های مختلف لوله انتقال برای گاز کاری آرگون و ترکیب آن با گازهای اکسیژن، نیتروژن و هوا بود. TCAP مورد استفاده از طریق منبع تغذیه با فرکانس متغیر کیلوهرتز تولید گردید. جریان گاز آرگون ۵ لیتر بر دقیقه و ترکیبات آن با گازهای اکسیژن، نیتروژن و هوا به نسبت ۱۰ به ۱ بود (۵ لیتر بر دقیقه آرگون + 0/5 لیتر بر دقیقه اکسیژن، نیتروژن و هوا). تولید پلازما در این مطالعه از یک فرآیند دو مرحله‌ای پیروی می‌کند که در شکل 1 نشان داده شده است. در مرحله اولیه، پلازما در یک راکتور DBD هم‌محور استوانه‌ای که شامل الکترودهای داخلی و خارجی است، تولید می‌شود. الکترود خارجی یک لوله مسی با قطر 24 میلی‌متر و ضخامت 2 میلی‌متر است، در حالی که الکترود داخلی یک سیم مسی با قطر 2 میلی‌متر است که در یک لوله شیشه‌ای کوارتز با قطر 4 میلی‌متر و ضخامت 1 میلی‌متر قرار دارد. این الکترودها توسط یک عایق پلیمری پلی تترا فلورو اتیلن (PTFE)⁵ جدا شده و لوله کوارتز به همراه الکترود داخلی داخل آن قرار می‌گیرد. استفاده از دو عایق در راکتور DBD باعث تشکیل رشته‌های پلازما بجای تشکیل توده پلازما در کل حجم DBD می‌شود که باعث کاهش چشمگیر انرژی لازم برای تشکیل و انتقال پلازما می‌گردد. با ورود گازهای آرگون و ترکیبات آن و اعمال ولتاژ بالا به الکترود داخلی، پلاسمای اولیه به صورت رشته‌های پلازما در راکتور DBD تشکیل می‌شود. در مرحله دوم، انتهای الکترود خارجی از طریق شیشه پیرکس قیفی شکل به اولین لوله انتقال پلاستیکی (طول 5 متر و قطر خارجی 6 میلی‌متر) متصل می‌شود. در داخل این لوله انتقال، یک سیم مسی باریک (قطر 0/1 میلی‌متر) به عنوان عامل اصلی انتقال عمل می‌کند که از نزدیک عایق PTFE شروع می‌شود و تا انتهای لوله امتداد می‌یابد. این سیم مسی که از پتانسیل اعمالی به راکتور DBD تبعیت می‌کند، با القای میدان الکتریکی در انتهای خود، پلاسمای اولیه را از

Atmospheric pressure plasma jet¹Dielectric barrier discharge²Ionization waves²Transferred cold atmospheric plasma⁴Polytetrafluoroethylene⁵



شکل 2. تغییرات ولتاژ مربوط به انتقال پلاسما در طول لوله‌های مختلف برای گازهای متفاوت.

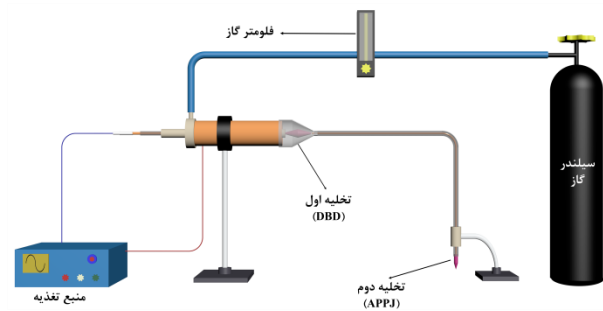
با توجه به شکل 2، با افزایش طول لوله انتقال، ولتاژ اعمالی به رآکتور DBD افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده رابطه مستقیم طول انتقال با ولتاژ اعمالی است. علاوه بر این، افزایش ولتاژ اعمالی نشان‌دهنده افزایش میزان مصرفی مورد نیاز برای انتقال پلاسما است. هم‌چنین، در تمامی طول‌های لوله انتقال، گاز آرگون کمترین مقدار ولتاژ اعمالی را به خود اختصاص می‌دهد و این ولتاژ به ترتیب در ترکیبات آرگون با گازهای نیتروژن، اکسیژن و هوا بیشتر می‌شود که به دلیل افزایش مقدار انرژی یونیزاسیون لازم برای یونیزاسیون ترکیبات گازی مذکور می‌باشد.



شکل 3. تغییرات جریان الکتریکی مربوط به انتقال پلاسما در طول لوله‌های مختلف برای ترکیبات گازی متفاوت.

شکل 3 جریان الکتریکی انتقال پلاسما در طول‌های متفاوت و برای ترکیبات گازی مختلف نشان می‌دهد. با توجه به شکل 3، جریان الکتریکی با طول لوله انتقال در تمامی ترکیبات گازی رابطه معکوسی را نشان می‌دهد. به طوری که با افزایش طول لوله انتقال، جریان

رآکتور DBD به انتهای لوله اول منتقل می‌کند و در خروجی اولین لوله انتقال، یک APPJ ایجاد می‌کند.



شکل 1. ستاپ TCAP

یک نیم پل 800 وات و یک ترانسفورماتور فریت 1:60 منبع تغذیه مورد استفاده در این مطالعه را تشکیل دادند. این منبع تغذیه ولتاژ خروجی 18 کیلوولت با حداکثر جریان خروجی 500 میلی آمپر را ارائه می‌دهد.

برای جمع آوری داده های الکتریکی از TCAP، یک اسپیلوسکوپ Tektronix TDS2024D با یک پروب ولتاژ بالا AOP-10 (500 MΩ, 1000X, 3 pF, 10MHz) استفاده شد.

نتایج

در فرآیند TCAP، پس از تشکیل اولیه در رآکتور DBD، پلاسما در یک مرحله متوالی و پیوسته منتقل شد که به صورت APPJ در انتهای لوله‌های انتقال اول ظاهر می‌شود. مراحل انتقال TCAP شامل ورود گاز آرگون و ترکیبات آن با گازهای اکسیژن، نیتروژن و هوا و اعمال ولتاژ بالا از منبع تغذیه با فرکانس متغیر از طریق سیم مسی باریک داخل لوله‌های انتقال بود. تخلیه اولیه در رآکتور DBD، که به عنوان منبع اصلی انتقال پلاسما عمل می‌کرد، رخ داد. تخلیه ثانویه به شکل جت پلاسما در انتهای پایین دست اولین لوله انتقال (طول لوله در محدوده ۵۰ سانتی‌متر تا ۵ متر) تشکیل شد. دو تخلیه مشتعل شده توسط TCAP با اعمال ولتاژ بالا برای گاز آرگون و ترکیبات آن با سایر گازها به رآکتور DBD، با سرعت جریان 5 لیتر در دقیقه برای گاز آرگون و 0/5 لیتر بر دقیقه با ترکیبات سایر گازها تولید شد. شکل ۲ ولتاژ اعمالی به تمامی ترکیبات گازی به منظور انتقال پلاسما را در طول‌های مختلف ۵۰ سانتی‌متر تا ۵ متر را نشان می‌دهد.

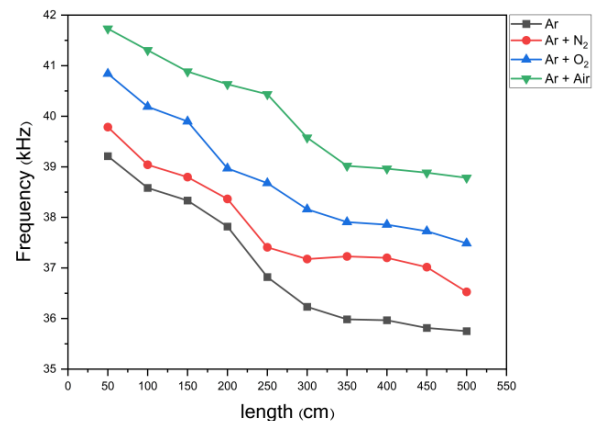
گازی می‌باشند. با توجه به شکل ۲، با افزایش طول لوله انتقال، ولتاژ اعمالی به رآکتور DBD افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده‌ی رابطه مستقیم بین طول انتقال و ولتاژ اعمالی است. این افزایش ولتاژ نشان‌دهنده‌ی افزایش توان مصرفی مورد نیاز برای طول‌های افزایش-یافته انتقال پلاسماست. هم‌چنین، میزان ولتاژ اعمالی با اضافه نمودن گازهای دیگر به گاز آرگون افزایش می‌یابد که نشان از افزایش انرژی یونیزاسیون برای یونیزه کردن ترکیب گازی مورد نظر است. در شکل ۳، با افزایش طول لوله انتقال، جریان الکتریکی کاهش می‌یابد. این کاهش جریان الکتریکی باعث کاهش توان مصرفی نیز می‌شود. هم-چنین، کاهش جریان در گاز آرگون نسبت به ترکیبات آن با سایر گازها بیشتر به چشم می‌خورد. با توجه به شکل ۴، فرکانس مربوط به انتقال پلاسمای با افزایش طول لوله انتقال کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده‌ی افزایش پویا آزاد میانگین ذرات می‌باشد. این افزایش در فاصله بین دو برخورد متوالی ذرات اتفاق می‌افتد و به عبارت دیگر با افزایش طول لوله انتقال، فاصله بین دو برخورد متوالی ذرات افزایش می‌یابد. از طرفی، کاهش فرکانس در گاز آرگون بیشتر از کاهش فرکانس آن با ترکیب سایر گازها است.

به طور کلی، با افزایش طول لوله انتقال در فرآیند TCAP، ولتاژ اعمالی به رآکتور DBD افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده‌ی افزایش توان مصرفی است. هم‌چنین، جریان الکتریکی و فرکانس پلاسمای با افزایش طول لوله انتقال کاهش می‌یابد که به افزایش پویا آزاد میانگین ذرات و کاهش توان مصرفی منجر می‌شود. در همه پارامترها نوع گاز و ترکیبات آن یک پارامتر تاثیرگذار مهم می‌باشد، به طوری که تغییرات در گاز آرگون نسبت به ترکیبات آن با سایر گازها بیشتر به چشم می‌خورد. این تغییرات می‌توانند بر اثرات و عملکرد فرآیند TCAP تأثیرگذار باشند و این موضوع می‌تواند در بهینه‌سازی این فرآیند مورد توجه قرار گیرد.

منابع و مراجع

- [1] do Nascimento, F., et al., *Different configurations of transferred atmospheric pressure plasma jet and their application to polymer treatment*. Contributions to Plasma Physics, 2023. 63(1): p. e202200055. <https://doi.org/10.1002/ctpp.202200055>.
- [2] Bastin, O., et al., *Optical and electrical characteristics of an endoscopic DBD plasma jet*. Plasma Medicine, 2020. 10(2): 10.1615/PlasmaMed.2020034526.
- [3] Siadati, S., F. Sohbatazadeh, and A. Valinataj Omran, *DC superimposed AC high voltage: A new strategy for transferring stable he atmospheric pressure cold plasma bullets through long dielectric tubes*. Physics of Plasmas, 2017. 24(6): <https://doi.org/10.1063/1.4989713>.
- [4] Gkelios, A., et al., *Guided propagation of excited species produced by microjet plasma*. IEEE Transactions on

الکتریکی کاهش می‌یابد. این کاهش جریان با توجه به رابطه $I = VA/\rho L$ که A, V, I, ρ به ترتیب نشان‌دهنده جریان الکتریکی، ولتاژ، سطح مقطع سیم مسی، مقاومت الکتریکی ذاتی سیم مسی و طول سیم مسی است، با طول سیم مسی رابطه معکوسی دارد. به طوری که با افزایش طول L ، جریان الکتریکی کاهش می‌یابد. این کاهش در گاز آرگون بیشتر به چشم می‌خورد. به طوری که کاهش جریان الکتریکی به ترتیب در گاز آرگون، ترکیب آرگون و نیتروژن، ترکیب آرگون و اکسیژن و ترکیب آرگون با هوا بیشتر است.



شکل 4. تغییرات فرکانسی مربوط به انتقال پلاسمای در طول لوله‌های مختلف برای ترکیبات گازی متفاوت.

نهایتاً، شکل 4 تغییرات فرکانس را در طول لوله‌های متفاوت و در ترکیبات گازی مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به شکل 4، فرکانس مربوط به انتقال پلاسمای با طول لوله انتقال رابطه معکوسی را نشان می‌دهد. به طوری که با افزایش طول لوله انتقال، فرکانس کاهش می‌یابد. این کاهش فرکانس به ترتیب در گاز آرگون، ترکیب آرگون با نیتروژن، ترکیب آرگون با اکسیژن و ترکیب آرگون با هوا بیشتر نمود پیدا می‌کند. این بدین معنی است که با افزایش طول لوله انتقال، به دلیل رابطه معکوس فرکانس با پویا آزاد میانگین، پویا آزاد میانگین ذرات افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، با افزایش طول لوله انتقال، فاصله بین دو برخورد متوالی ذرات افزایش می‌یابد که این افزایش در ترکیب آرگون با هوا بیشتر است.

بحث و نتیجه‌گیری

در فرآیند انتقال پلاسمای که به صورت رشته‌های پلاسمای در رآکتور DBD شروع می‌شود و به صورت پلاسمایی با نام APPJ در انتهای لوله انتقال ظاهر می‌شود، تغییرات مختلفی در ولتاژ اعمالی، جریان الکتریکی و فرکانس رخ می‌دهد. شکل‌های ۲، ۳، و ۴ نشان‌دهنده‌ی تغییرات این پارامترها در طول لوله انتقال و برای ترکیبات مختلف

- [8] Kostov, K.G., et al., *Transfer of a cold atmospheric pressure plasma jet through a long flexible plastic tube*. Plasma Sources Science and Technology, 2015. 24(2): p. 025038.10.1088/0963-0252/24/2/025038.
- [9] Onyshchenko, I., et al., *Atmospheric pressure plasma penetration inside flexible polymeric tubes*. Plasma Processes and Polymers, 2015. 12(3): p. 271-284.<https://doi.org/10.1002/ppap.201400190>.
- [10] Xia, Y., et al., *The transfer of atmospheric-pressure ionization waves via a metal wire*. Physics of Plasmas, 2016. 23(1).<https://doi.org/10.1063/1.4940332>.
- [11] Xiong, Z., et al., *Atmospheric-pressure plasma transfer across dielectric channels and tubes*. Journal of Physics D: Applied Physics, 2013. 46(15): p-0022/155203.10.1088 .155203/15/46/3727
- Plasma Science, 2011. 39(11): p. 2296-2297.10.1109/TPS.2011.2159312.
- [5] Nascimento, F., K. Petroski, and K. Kostov, *Effects of O2 addition on the discharge parameters and production of reactive species of a transferred atmospheric pressure plasma jet*. Applied Sciences, 2021. 11(14): p. 6311.<https://doi.org/10.3390/app11146311>.
- [6] do Nascimento, F., et al., *A low cost, flexible atmospheric pressure plasma jet device with good antimicrobial efficiency*. IEEE Transactions on Radiation and Plasma Medical Sciences, 2023.10.1109/TRPMS.2023.3342709.
- [7] Valinataj Omran, A., et al., *Atmospheric pressure surface modification and cross-linking of UHMWPE film and inside HDPE tube by transporting discharge*. Plasma Processes and Polymers, 2018. 15(1): p .1700145<https://doi.org/10.1002/ppap.201700145>.