

Research Paper

# Design and Construction of a Plasma Generation Device Using the Surface Dielectric Barrier Discharge (SDBD) Method in a Laboratory Scale<sup>1</sup>

Ameneh Kargarian<sup>2</sup>, Soolmaz Jamali<sup>3\*</sup> and Mehdi Bakhshzad Mahmoudi<sup>4</sup>

Received: 2023.12.23

Revised: 2024.03.15

Accepted: 2024.04.17

## Abstract

This article aims to design and construct a plasma generation device using the surface dielectric barrier discharge method (SDBD) on a laboratory scale to produce a stable and uniform atmospheric pressure plasma layer. For this purpose, a copper electrode with a thickness of 100 microns with a comb- like structure was designed and constructed for this system, and a mica sheet with a thickness of 0.5 mm and dimensions of  $10 \times 10$  cm was built to make the dielectric. According to the experimental data and analytical calculations of the constructed SDBD system in working conditions of 3 kV voltage and 12.5 kHz frequency, the consumption power of this system is calculated at 50 watts. Due to the production of stable and uniform plasma created on the dielectric surface and the measured power consumption, this system will be able to be used in various sciences and industries, including surface processing industries.

**Keywords:** *Uniform Plasma, SDBD, Consumption Power, Comb- like Structure.*

<sup>1</sup> <https://doi.org/10.22051/ijap.2024.45959.1379>

<sup>2</sup> Assistant Professor, Plasma and Nuclear Physics Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI), Tehran, Iran. Email: kargarian@aeoi.org.ir

<sup>3</sup> PhD Graduated, Plasma and Nuclear Physics Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI), Tehran, Iran. (Corresponding Author) Email: s.jamali62@yahoo.com

<sup>4</sup> M. Sc. Graduated, Plasma and Nuclear Physics Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI), Tehran, Iran. Email: bakhshzad@gmail.com



## طراحی و ساخت دستگاه تولید پلاسما به روش تخلیه سد دی الکتریک سطحی (SDBD) در مقیاس آزمایشگاهی<sup>۱</sup>

آمنه کارگریان<sup>۲</sup>، سولماز جمالی<sup>۳\*</sup> و مهدی بخش زاد محمودی<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۰۲  
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۲/۲۵  
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۲۹

فصلنامه علمی فیزیک کاربردی ایران  
دانشکده فیزیک، دانشگاه الزهرا  
سال چهاردهم، پیاپی ۳۸، پاییز ۱۴۰۳  
صص ۴۱ - ۵۲

### چکیده:

در این مقاله، هدف طراحی و ساخت دستگاه تولید پلاسما به روش تخلیه سد دی الکتریک سطحی (SDBD) در مقیاس آزمایشگاهی به منظور تولید لایه‌ای از پلاسما فشار اتمسفری پایدار و یکنواخت است. بدین منظور الکترود مسی با ضخامت ۱۰۰ میکرون با ساختار شانه‌ای برای این سامانه طراحی و ساخته شد. برای ساخت دی الکتریک نیز از ورقه میکا با ضخامت ۰/۵ میلی‌متر با ابعاد ۱۰×۱۰ سانتی‌متر استفاده شد. با توجه به داده‌های تجربی و محاسبات تحلیلی برای اندازه‌گیری توان مصرفی سامانه SDBD ساخته شده، در شرایط کاری ولتاژ ۷ کیلوولت و فرکانس ۱۲/۵ کیلوهرتز، توان مصرفی این سامانه برابر با ۵۰ وات محاسبه شد. همچنین، با استفاده از طیف‌سنجی نشر نوری، طیف بدست آمده از پلاسما مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به تولید پلاسما پایدار و یکنواخت ایجاد شده بر روی سطح دی الکتریک و توان مصرفی اندازه‌گیری شده‌ی قابل قبول، این سامانه توانایی استفاده در علوم و صنایع مختلف از جمله صنایع پردازش سطوح را خواهد داشت.

**واژگان کلیدی:** پلاسما یکنواخت، تخلیه سد دی الکتریک سطحی، توان مصرفی، ساختار شانه‌ای شکل.

<sup>۱</sup> <https://doi.org/10.22051/ijap.2024.45959.1379>

<sup>۲</sup> استادیار، پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران. Email: kargarian@aeoi.org.ir

<sup>۳</sup> دانش‌آموخته دکترا، پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران (نویسنده مسئول).

Email: s.jamali62@yahoo.com

<sup>۴</sup> دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران. Email:

bakhshzad@gmail.com



## ۱. مقدمه

ویژگی‌های منحصر به فرد پلاسما امکان استفاده از آن را به صورت گسترده در زمینه‌های گوناگون مهیا ساخته است. از نقطه نظر فشار، پلاسما را می‌توان به دو دسته کلی پلاسماهای فشار پایین و پلاسماهای فشار اتمسفری تقسیم‌بندی کرد. در حال حاضر، پلاسماهای فشار اتمسفری به دلیل سادگی و هزینه‌ی کم آن نسبت به پلاسماهای فشار پایین مورد توجه زیادی قرار گرفته است و به دلیل دمای پایین و توانایی تولید گونه‌های فعال می‌تواند در زمینه‌های مختلف صنعتی، پزشکی و زیستی به کار رود [۱].

یکی از روش‌های تولید پلاسما سرد، تخلیه سد دی‌الکتریک (DBD) است. این روش توانایی تولید پلاسماهای غیرحرارتی حتی در هوای محیط را داراست که برای پردازش صنعتی مواد حساس به حرارت چون فویل‌های پلیمری چند لایه از اهمیت بالایی برخوردار است. به صورت همه‌جانبه، تخلیه سد دی‌الکتریک بین دو الکتروود که حداقل یکی از آن‌ها با یک لایه دی‌الکتریک پوشانده شده است، صورت می‌گیرد. این تخلیه با اعمال ولتاژ بالای متناوب در حد چندین کیلوولت با فرکانس ۵۰ هرتز تا چندین کیلوهرتز بین دو الکتروود انجام می‌گردد. وجود دی‌الکتریک مانع از عبور جریان بالا میان دو الکتروود و شکل‌گیری تخلیه قوسی می‌گردد [۲]. در حقیقت، این نوع تخلیه سبب تولید پلاسما سرد فشار اتمسفری می‌شود. نخستین پژوهش‌ها در این زمینه توسط زیمنس در حدود سال‌های ۱۸۵۷ انجام شد که بیشتر تمرکز آن در جهت تولید ازن بوده است [۳].

تخلیه سد دی‌الکتریک دارای کاربردهای متنوعی می‌باشد. به همین منظور و متناسب با کاربرد دارای پیکربندی و ساختار متفاوتی از جمله تخلیه حجمی<sup>۲</sup> و تخلیه سطحی<sup>۳</sup> است. یک گروه پژوهشی در سال ۲۰۱۷ به مقایسه DBD حجمی و DBD سطحی در تولید ازن پرداختند. آن‌ها ساختارهای مولدهای پلاسمایی مدنظر را طراحی و ساختند. بر اساس نتایج بدست آمده، آن‌ها گزارش کردند که هرچند DBD حجمی در صنعت به صورت گسترده‌ای برای تولید ازن استفاده می‌شود اما بازده DBD سطحی در تولید ازن بسیار بهتر از DBD حجمی می‌باشد. از طرف دیگر بازده انرژی پلاسماهای تخلیه سد دی‌الکتریک سطحی به صورت قابل ملاحظه‌ای بالاتر از راکتور حجمی است [۴]. همچنین، در پژوهش دیگری، رابطه عملکردی بین ویژگی‌های مواد، فرکانس اعمالی و میزان

<sup>1</sup> Dielectric Barrier Discharge

<sup>2</sup> Volume Discharge

<sup>3</sup> Surface Discharge



توليد ازن برای تخلیه سد دی‌الکتريک سطحی در اتمسفر هوا مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش، دی‌الکتريک‌های مختلف از جمله آلومینا، سرامیک PTFE، هیدروکربن و پلیمر بلور مایع مورد مطالعه قرار گرفتند [۵].

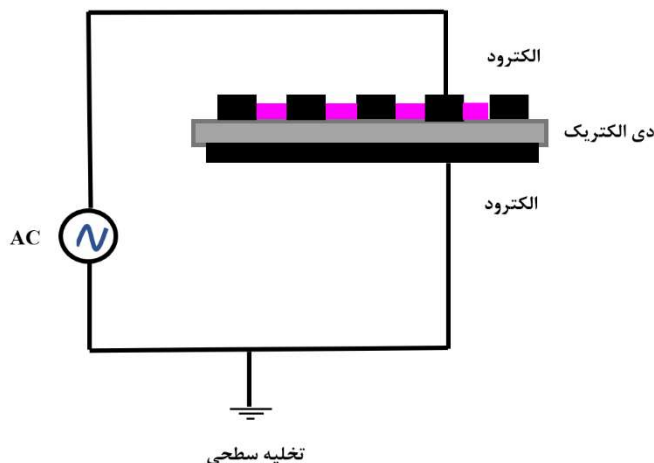
مطالعات سال‌های کنونی نشان دادند، از پلاسمای تولید شده به روش تخلیه سطحی (SDBD) می‌توان برای بسیاری از کاربردها از جمله پردازش سطح با لایه‌ای از پلاسمای نازک از مرتبه  $0/1$  میلی‌متر استفاده کرد که بسیار مفیدتر از حجم‌های کم‌بیش بزرگ پلاسمای تولید شده با استفاده از ساختار تخلیه سد دی‌الکتريک حجمی است. افزون بر یکنواختی، امکان تولید پلاسمای پایدار در هوا و سایر گازهای فعال با کمک SDBD وجود دارد. سایر مزایای ذاتی سامانه‌های SDBD شامل سادگی، استحکام و توانایی پردازش در طیف گسترده‌ای از گازهای فعال است. همچنین، SDBDها روشی مؤثر برای کاربردهای مختلف از جمله بهبود ویژگی‌هایی مانند آب‌دوستی سطح در زمان‌های بسیار کوتاه می‌باشند. بنابراین، چنین سامانه‌ای می‌تواند در کاهش زمان پردازش با پلازما و مصرف انرژی بسیار قابل توجه باشد. افزون بر این، استفاده از پلاسمای سرد فشار اتمسفری به روش SDBD بدون تأثیر بر بخش بیشتر زیرلایه به صورت قابل توجهی ویژگی‌های سطحی مختلف چون رطوبت و چسبندگی را تغییر می‌دهد و اغلب ریخت‌شناسی سطح را بهبود می‌بخشد. همچنین، فرآیندهای پردازش با این روش به راحتی قابل کنترل هستند و هزینه پردازش در مقایسه با سایر روش‌های تولید پلاسمای کم‌فشار پایین است [۸-۶].

در این مقاله، هدف طراحی و ساخت سامانه تولید پلازما به روش تخلیه سد دی‌الکتريک سطحی (SDBD) با ساختار دی‌الکتريک شانه‌ای- شکل است که از ویژگی مهم این دستگاه تولید لایه‌ای نازک از پلاسمای فشار اتمسفری پایدار، یکنواخت و با ابعاد بزرگ به دلیل نوع و ساختار الکترودها و دی‌الکتريک استفاده شده در آن است. به دلیل اهمیت ساخت دستگاه تولید پلازما با ویژگی‌های بیان شده، در سال‌های کنونی، مطالعاتی بر روی طراحی و ساخت سامانه SDBD صورت گرفته است [۴-۲ و ۹-۱۲]. ساختار الکترودها استفاده شده در این منابع به صورت ساده می‌باشد و پلاسمای بدست آمده نسبت به ساختارهایی نظیر آنچه در مقاله حاضر در نظر گرفته شده است دارای ابعاد کم و یکنواختی کمتری بر روی سطح می‌باشد.

در بخش دوم این مقاله، طراحی و ساخت سامانه SDBD شرح داده شده است. در بخش سوم، روابط تحلیلی محاسبه توان مصرفی سامانه بیان شده و انجام آزمایش و داده‌گیری تجربی در بخش چهارم بیان شده است. در نهایت، نتیجه‌گیری در بخش پنجم مقاله بیان شده است.

## ۲. طراحی و ساخت سامانه SDBD

سامانه تخلیه سد دی الکتریک سطحی، از دو الکتروود موازی تشکیل شده است به گونه ای که لایه دی الکتریک فضای بین دو الکتروود (گپ) را کامل می پوشاند. در این پیکربندی، فرآیند تخلیه در طول لایه دی الکتریک صورت گرفته و هیچگونه تخلیه ای در گپ صورت نمی گیرد. در شکل (۱) نمونه ای از ساختار تخلیه الکتریکی سطحی نشان داده شده است.

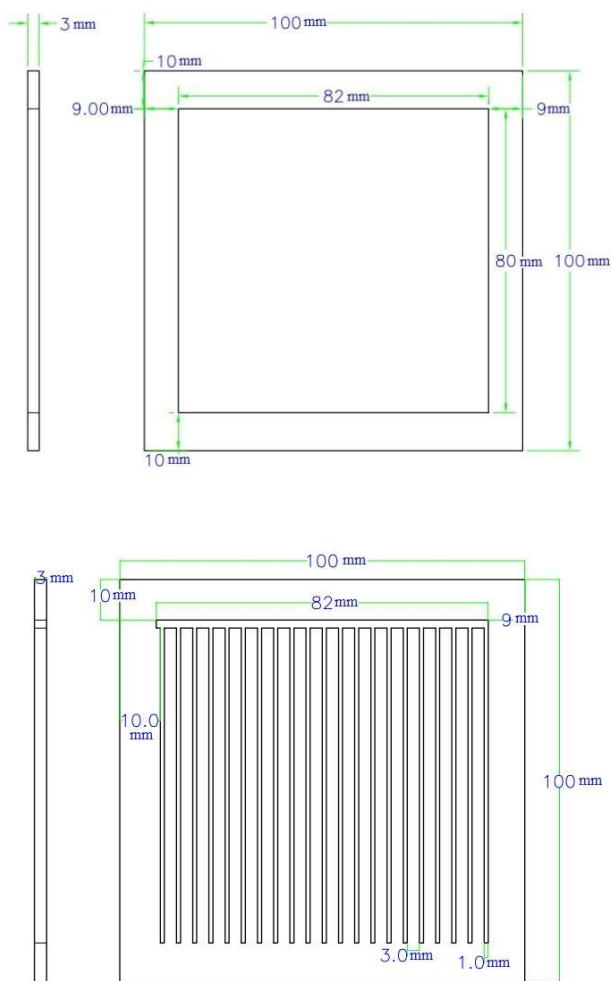


شکل ۱ ساختار تخلیه سد دی الکتریک سطحی.

از جمله مزایای استفاده از این ساختار، تولید لایه ای از پلاسمای یکنواخت و پایدار می باشد که برای کاربردهای صنعتی دارای اهمیت بسیاری می باشد. در مقاله حاضر، سامانه تخلیه سد دی الکتریک به گونه ای طراحی شده است که الکتروود بالایی دارای ساختار شانه ای - شکل و الکتروود پایینی تخت می باشد. ضخامت الکتروودها ۱۰۰ میکرون و ابعاد آنها ۸×۸ سانتی متر می باشد. دی الکتریک طراحی شده دارای ابعاد ۱۰×۱۰ سانتی متر و ضخامت ۰/۵ میلی متر است و در وسط الکتروودها قرار می گیرد. شکل (۲)، نمایی از ساختار طراحی شده برای الکتروودهای سامانه SDBD را نشان می دهد. نوع دی الکتریک مورد استفاده در ساختار تخلیه سد دی الکتریک بسیار اهمیت دارد. اغلب در تخلیه سد دی الکتریک از عایق هایی استفاده می شود که دارای استحکام بالا و همچنین ثابت دی الکتریک بالایی هستند. در حقیقت، درجه ای استحکام این مواد از اهمیت بسزایی برخوردار است تا در مقابل برخورد های الکترون - یونی استقامت خوبی داشته و به مرور زمان فرسوده نشوند. در مطالعات انجام شده بر روی این سامانه موادی با جنس هایی نظیر کوارتز [۶]، شیشه [۱۰] و آلومینا [۱۱] به عنوان



دی‌الکتریک مورد استفاده قرار گرفته است. در مقاله حاضر، از عایق میکا به عنوان دی‌الکتریک استفاده شده است که افزون بر دارا بودن استحکام مناسب و ثابت دی‌الکتریک بالا نسبت به شیشه از قیمت مناسبی نسبت به دی‌الکتریک‌های کوارتز و آلومینا برخوردار است.



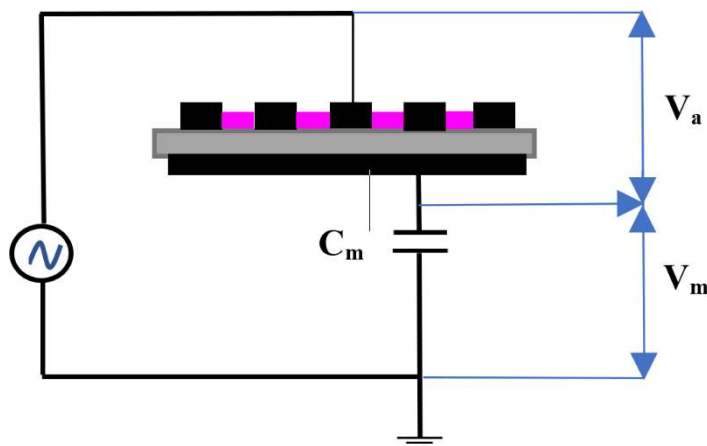
شکل ۲ نمایی از پشت و روی الکترودهای طراحی شده سامانه SDBD.

الکترودهای استفاده شده در ساختار SDBD نیز باید دارای رسانایی الکتریکی بسیار بالا و مقاومت حرارتی بالایی باشد. در این مقاله، از مس که یکی از مناسبترین فلزات با رسانایی بالا و مقاومت

حرارتی بالا می‌باشد، برای ساخت الکترودها استفاده شده است. همانگونه که اشاره شد، الکترودها بالا دارای ساختار شانه‌ای- شکل و الکترودها پایین دارای ساختار تخت می‌باشد که توسط لایه‌ای از کیتون پوشانده می‌شود. در این ساختار، ورقه مسی به عنوان الکترودها با ابعاد مشخص شده بر روی سطح دی‌الکتریک کاملاً چسبانده می‌شود به گونه‌ای که هیچگونه فاصله‌ای در فضای بین الکترودهای بالایی و پایینی و دی‌الکتریک که در بین آنها قرار گرفته است، وجود ندارد. پس از ساخت الکترودها و دی‌الکتریک سامانه SDBD با ساختار مورد نظر، منبع تغذیه با مشخصات ولتاژ ۲۰-۰ کیلوولت و فرکانس ۰-۱۵ کیلوهرتز برای تولید پلازما با استفاده از این سامانه استفاده شد.

### ۳. محاسبه توان مصرفی

برای محاسبه توان مصرفی سامانه تولید پلازما به روش تخلیه سد دی‌الکتریک از روش‌های متفاوتی از جمله روش خازن ناظر، اندازه‌گیری جریان القایی با استفاده از پیچ‌ه‌های روگوفسکی و روش مقاومت موازی استفاده می‌شود. در مقاله حاضر، از روش خازن ناظر برای محاسبه توان مصرفی دستگاه SDBD ساخته شده استفاده شده است. در شکل (۳)، نمودار جریان الکتريکی در روش خازن ناظر نشان داده شده است. در این نمودار،  $V_a$  ولتاژ اعمالی،  $V_m$  ولتاژ دو سر خازن و  $C_m$  ظرفیت خازن است.



شکل ۳ نمودار جریان الکتريکی در روش خازن ناظر.



روابط تحلیلی برای محاسبه توان مصرفی،  $P_a$ ، در یک سیکل زمانی  $T$ ، در روش استفاده از خازن ناظر بصورت زیر می باشد:

$$P_a(t) = V_a(t).I_a(t) = V_a(t).C_m \frac{dV_m(t)}{dt} \quad (1)$$

$$\bar{P}_a = \frac{1}{T} \int_0^T V_a(t).C_m \frac{dV_m(t)}{dt} dt = \frac{1}{T} \int V_a.C_m dV_m = \frac{1}{T} \int V_a dQ_m \quad (2)$$

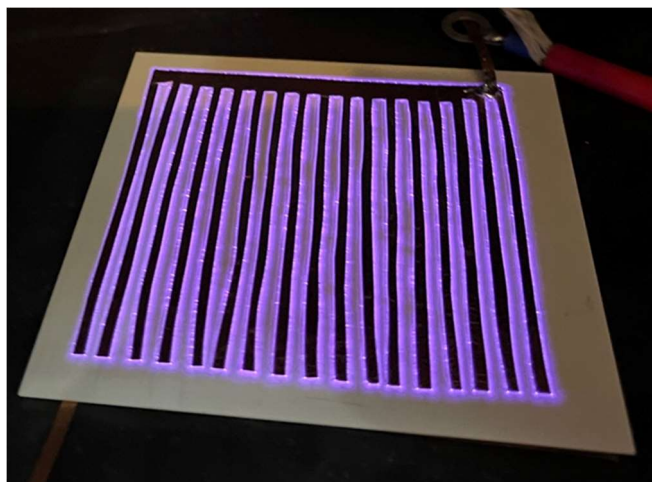
بر اساس روابط بیان شده، با رسم نمودار بار خازنی لحظه ای بر حسب ولتاژ لحظه ای SDBD، در صفحه  $Q_m-V_a$  منحنی لیسازو بدست می آید. رابطه (۲) نشان می دهد که مساحت داخلی منحنی لیسازو تقسیم بر دوره تناوب چرخه  $ac$  یعنی  $T$  برابر با توان مصرفی سامانه SDBD خواهد بود [۱۳].

#### ۴. انجام آزمایش و داده گیری

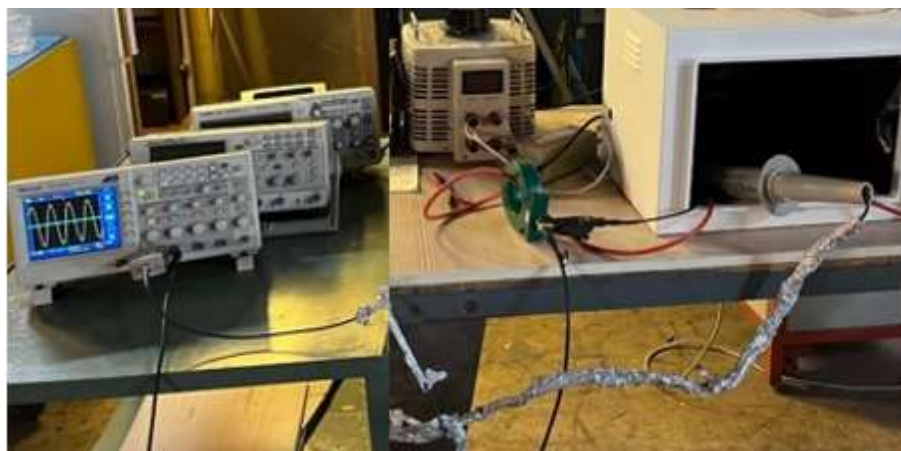
پس از طراحی و ساخت سامانه SDB با ساختار مدنظر، مدار الکتریکی مناسب برای این سامانه ساخته شد و با استفاده از منبع تغذیه با مشخصات ولتاژ ۲۰-۰ کیلوولت و فرکانس ۱۵-۰ کیلوهرتز، پلاسمای تولیدی از دستگاه ساخته شده مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۴) تصویری از پلاسمای پایدار و یکنواخت تشکیل شده بر روی سطح دی الکتریک در شرایط کاری ولتاژ ۷ کیلوولت و فرکانس ۱۲/۵ کیلوهرتز را نشان می دهد.

برای اندازه گیری توان مصرفی سامانه SDBD ساخته شده با استفاده از روش خازن ناظر، بر اساس نمودار الکتریکی نمایش داده شده در شکل (۴)، از چیدمان آزمایشگاهی مشابه با شکل (۵) استفاده شد. همانگونه که مشاهده می شود از پروب ولتاژ و اسیلوسکوپ برای ثبت و نمایش سیگنال های ولتاژ و جریان در این چیدمان استفاده شده است. همچنین، یک خازن ناظر با ظرفیت  $C_m=22 \text{ nF}$  به صورت سری در مدار جریان سامانه قرار گرفته است.





شکل ۴ تصویری از پلاسمای تشکیل شده در سامانه SDBD ساخته شده.



شکل ۵ چیدمان آزمایشگاهی برای اندازه گیری توان مصرفی سامانه SDBD ساخته شده.

پس از ثبت داده‌های تجربی، با استفاده از روابط محاسبه توان مصرفی در بخش (۳)، توان مصرفی سامانه SDBD ساخته شده محاسبه شد. در شرایط کاری ولتاژ ۷ کیلوولت و فرکانس ۱۲/۵ کیلوهرتز، توان مصرفی محاسبه شده برای این سامانه ۵۰ وات است. این میزان توان مصرفی مقدار قابل قبول برای سامانه‌های تولید پلاسما به روش تخلیه سد دی‌الکتریک [۱۴-۲۱] جهت کاربرد آن‌ها در علوم و صنایع مختلف می‌باشد. از این رو سامانه SDBD طراحی و ساخته شده توانایی توسعه جهت استفاده‌های کاربردی را دارد.

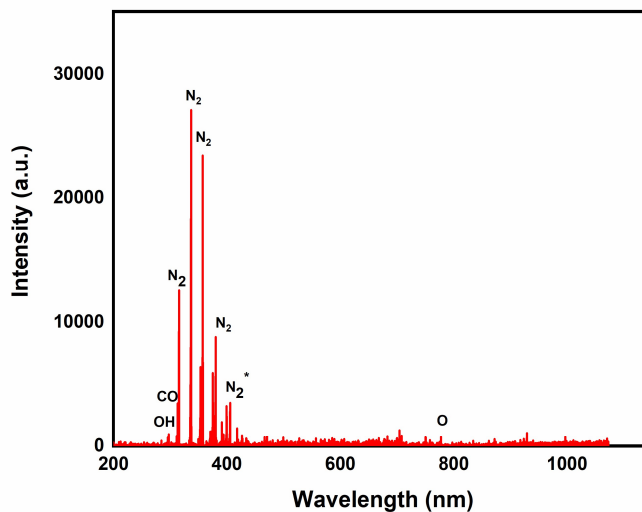


برای بررسی طیفی ویژگی‌های پلاسمای تولید شده توسط سامانه SDBD ساخته شده از روش طیف‌سنجی نشر نوری OES استفاده شد. طیف‌سنج مورد استفاده، متعلق به شرکت AVANTES، چهار کاناله و با جداسازی ۰/۱۹ نانومتر است. برای انجام آزمایش‌های طیف‌سنجی از چیدمانی مشابه با شکل (۶) استفاده شد.



شکل ۶ چیدمان آزمایشگاهی اندازه‌گیری‌های طیف‌سنجی سامانه SDBD ساخته شده.

طیف بدست آمده از پلاسمای تولیدی سامانه ساخته شده در شکل (۷) آمده است. با توجه به طیف بدست آمده از پلاسما، قله‌های مشخصه هوا که شامل قله‌های  $N_2$  در ۳۱۳/۴۶، ۳۳۴/۸۲، ۳۵۵/۳۸ و ۳۸۹/۲۸ نانومتر می‌باشند به روشنی در طیف بدست آمده قابل مشاهده است. همچنین، حضور قله مشخصه OH در طول موج ۲۹۶/۱ نانومتر و O در ۷۷۷/۵ نانومتر مشخص شده است.



شکل ۷ طیف بدست آمده از پلاسمای تولیدی سامانه SDBD ساخته شده.

## ۵. نتیجه گیری

در مقاله حاضر، یک نمونه دستگاه تولید پلاسما به روش تخلیه سد دی الکتریک سطحی (SDBD) با ساختار الکتروود شانه‌ای- شکل در مقیاس آزمایشگاهی طراحی و ساخته شده است. نتایج بدست آمده، تولید لایه‌ای نازک از پلاسمای فشار اتمسفری پایدار و یکنواخت بر روی سطح دی الکتریک سامانه SDBD ساخته شده را نشان دادند. در این سامانه برای ساخت الکتروود از ورقه نازک مسی با ضخامت ۱۰۰ میکرون با ساختار شانه‌ای- شکل استفاده شد. دی الکتریک نیز ورقه میکا با ضخامت ۰/۵ میلی متر با ابعاد  $10 \times 10$  سانتی متر است. از جمله مزایای این سامانه ضخامت بسیار کم الکتروودها و دی الکتریک و پهنای بسیار باریک نوارهای ساختار شانه‌ای- شکل می‌باشند که منجر به تشکیل پلاسما بر روی سطح کامل دی الکتریک می‌گردد. افزون بر این، استفاده از عایق میکا به عنوان دی الکتریک در مقایسه با عایق‌هایی چون آلومینا و کوارتز که در اکثر سامانه‌های SDBD از آن‌ها استفاده می‌شود، از نظر اقتصادی مقرون به صرفه می‌باشد. با استفاده از داده‌های تجربی و محاسبات تحلیلی توان مصرفی سامانه SDBD ساخته شده در شرایط کاری ولتاژ ۳ کیلوولت و فرکانس ۱۲/۵ کیلوهرتز، برابر با ۵۰ وات بدست آمد. افزون بر این، با استفاده از طیف‌سنجی نشر نوری OES، بررسی طیفی ویژگی‌های پلاسمای تولید شده انجام شد. با بررسی طیف بدست آمده از پلاسما، قله‌های مشخصه هوا به روشنی در طیف حاصل قابل مشاهده بودند. تولید لایه‌ای از پلاسمای پایدار و یکنواخت در این سامانه در مقایسه با سامانه‌های SDBD ساخته شده با ساختار الکتروود ساده و توان مصرفی اندازه‌گیری شده، نشان می‌دهد با ارتقای این سامانه می‌توان از آن در علوم و صنایع مختلف از جمله صنایع پردازش سطوح استفاده کرد.

## ۶. تقدیر و تشکر

نویسندگان لازم می‌دانند مراتب امتنان و قدردانی خود را از داوران محترم مقاله بابت نظرات و پیشنهادات ارزشمند ایشان که موجب ارتقا سطح علمی و ساختاری مقاله شده است صمیمانه ابراز نمایند. همچنین از همکاران محترم آزمایشگاه پردازش پلاسمایی، پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای قدردانی می‌گردد.



## منابع

- [1] Patil B S, Wang Q, Hessel V, Lang J, "Plasma N<sub>2</sub>-fixation 1900–2014". *Catalysis today* 256, 49-66, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2015.05.005>.
- [2] Ndong A C A, Zouzou N, Benard N, Moreau E., "Effect of Dielectric Aging on the Behavior of a Surface Nanosecond Pulsed Dielectric Barrier Discharge", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 20(5), 2013. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2013.6633683>
- [3] Siemens W V, Annale P, "Ozone production in an atmospheric-pressure dielectric barrier discharge", *Poggendorfs Annalen der Chemie und der Physik* 102, 66-122, 1857. <https://doi.org/10.1002/andp.18571780905>
- [4] Nassour K, Brahami M, Tilmatine A, Nemnich S, Miloua F, Ramdani N, Zouzou N., "Comparative experimental analysis of ozone generation between surface and volume DBD generators", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 25(2), 428-434, 2018. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2017.006600>
- [5] Ngo A, Pai K, Jacob J D., "Investigation of Scaling Effects Due to Varying Dielectric Materials in Asymmetric Surface Dielectric Barrier Discharge", *48th AIAA Plasma dynamics and Lasers Conference*, 3343, 2017.
- [6] Audier P, Rabat H, Leroy A, Hong D., "Experimental investigation of a surface DBD plasma actuator at atmospheric pressure in different N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> gas mixtures", *Plasma Sources Sci. Technol* 23, 065045, 2014. <https://doi.org/10.1088/0963-0252/23/6/065045>.
- [7] Jolibois J, Zouzou N, Moreau E, Tatibouet J M, "Generation of surface DBD on rough dielectric: Electrical properties, discharge-induced electric wind and generated chemical species", *Journal of Electrostatics* 69, 522-528, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2011.07.001>.
- [8] Jolibois J, Takashima K, Mizuno A., "Application of a non-thermal surface plasma discharge in wet condition for gas exhaust treatment: NO<sub>x</sub> removal", *Journal of Electrostatics* 70, 300-308, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2012.03.011>.
- [9] Jafari M, Safari M, Ahmadizadeh Y, Shokri B., "Air Flow Control at a Boundary Layer Using a Surface Dielectric Barrier Discharge Actuator", *Journal of Aeronautical Engineering* 12(1), 59-67, 2010. 20.1001.1.17359449.1389.12.1.5.7
- [10] Mahdavi H, Sohbatzadeh F., "The effects of applying different bias voltages and phase differences on performance of an asymmetric surface dielectric barrier discharge; an experimental investigation", *Journal of Theoretical and Applied Physics* 13, 165-177, 2019. <https://doi.org/10.1007/s40094-019-0334-3>
- [11] Khajvand salehan M, sohbatzadeh F, hajizadeh I, shafei F, Shakerinasab E, Mohsenpour T, "Comparison of the effect of dielectric barrier discharge plasma in surface and volume mode of treatment on physical and chemical properties of saffron", *FSCT* 18(120), 13-25, 2021. <https://doi.org/10.52547/fsct.18.120.2>
- [12] Sohbatzadeh, F, Yazdanshenas, H., Soltani, A.H. and Shabannejad, A., "An innovative strategy to rapidly inactivate 8.2-log Enterococcus faecalis in fresh pineapple juice using cold atmospheric plasma", *Scientific Reports* 11(1), 16010, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-95452-2>.
- [13] Ashpis, D.E., Laun, M.C. and Griebeler, E.L., "Progress Toward Accurate Measurement of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator Power", *AIAA J.* 55(7), 2254–2268, 2017. <https://doi.org/10.2514/1.J055816>.
- [14] Holub, M., "On the measurement of plasma power in atmospheric pressure DBD plasma reactors", *13th European Conference on Power Electronics and Applications EPE 2009*, 8-10 September 2009.



- [15] Kogelschatz, U., "Dielectric-barrier Discharges: Their History, Discharge Physics, and Industrial Applications", *Plasma Chemistry and Plasma Processing* 23(1), 2003. <https://doi.org/10.1023/A:1022470901385>.
- [16] Benard, N. and Moreau, E., "Electrical and mechanical characteristics of surface AC dielectric barrier discharge plasma actuators applied to airflow control", *Exp Fluids* 55, 1846, 2014. <https://doi.org/10.1007/s00348-014-1846-x>.
- [17] Abdelaziz A A, Abdel-Salam M, Hashim A A, Hammad G A, Kim H., "Development and characterization of surface dielectric barrier discharge-based reactor for ozone generation", *J. of Assiut Univ.* 49(1), 17-34, 2020. <https://doi.org/10.21608/AUNJ.2020.220860>.
- [18] Kriegseis, J., Möller, B., Grundmann, S. and Tropea, C., "Capacitance and power consumption quantification of dielectric barrier discharge (DBD) plasma actuators", *Journal of Electrostatics* 69, 302-312, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2011.04.007>.
- [19] Wilde, N.D., Xu, H., Gomez-Vega, N. and Barrett, S.R., "A model of surface dielectric barrier discharge power", *Appl. Phys. Lett.* 118(15), 154102, 2021. 1721.1/145281.
- [20] Gershman, S., Harreguy, M.B., Yatom, S., Raitzes, Y., Eftimion, P. and Haspel, G., "A low power flexible dielectric barrier discharge disinfects surfaces and improves the action of hydrogen peroxide", *Scientific Reports* 11(1), 4626, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84086-z>.
- [21] Choudhury, B., Portugal, S., Mastanaiah, N., Johnson, J.A. and Roy, S., "Inactivation of Pseudomonas aeruginosa and Methicillin-resistant Staphylococcus aureus in an open water system with ozone generated by a compact, atmospheric DBD plasma reactor", *Scientific reports* 8(1), 17573, 2018. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36003-0>.



This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

