

## **Air Teraktivasi Plasma: Mekanisme aktivasi dan Sifat Fisiko-kimia**

### ***Plasma-activated Water: Mechanisms of the activation and Its Physico-Chemical Properties.***

**Gede Arda<sup>1</sup>, Dian Mart Shoodiqin<sup>\*2</sup>**

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian Universitas Udayana, Badung, Bali, Indonesia

<sup>2</sup>Program Studi Fisika, Institut Teknologi Kalimantan, Balikpapan, Indonesia

\*email: dianms@lecturer.itk.ac.id

#### **Abstrak**

Teknologi plasma dikembangkan akhir-akhir ini karena sifatnya yang unik dan dapat dimanfaatkan dalam berbagai tujuan di berbagai bidang. Plasma merupakan gas yang molekul-molekul penyusunnya terdisosiasi sehingga mempunyai sifat reaktif. Namun karena sifatnya itu pula plasma harus digunakan saat plasma dibangkitkan. Mengaktivasi air dengan plasma ternyata mengakibatkan perubahan air menjadi lebih reaktif sehingga dapat dimanfaatkan untuk tujuan yang serupa dengan plasma dalam bentuk gas. Kajian literatur ini menyajikan tentang teknologi aktivasi air dengan plasma dari sudut pandang mekanisme pembangkitan dan reaksi-reaksi yang menyertainya. Artikel ini disajikan untuk memperkenalkan teknologi plasma yang saat ini masih minim dikaji di Indonesia.

**Kata kunci:** *plasma, air teraktivasi plasma, mekanisme, reaktif spesies.*

#### **Abstract**

Plasma technology has been developed recently because of its unique properties and can be utilized for various purposes in various fields. Plasma is a gas whose constituent molecules are dissociated and has reactive properties. However, because of its properties, plasma must be used when plasma is generated. Activating water with plasma turns out to cause water to become more reactive so that it can be utilized for similar purposes to plasma in gas form. This literature review presents water activation technology with plasma from the generation mechanism's perspective and the reactions accompanying it. This article introduces plasma technology, which is currently minimally studied in Indonesia.

**Keywords:** *plasma, plasma-activated water, mechanism, reactive species.*

#### **Pendahuluan**

Teknologi plasma telah banyak diterapkan dalam bidang industry, namun penerapannya di bidang diluar industry dimulai ketika teknologi ini diterapkan untuk membunuh bakteri (Dobrynin et al., 2009, 2011; Shainsky et al., 2010). Efikasi plasma dingin untuk membasmi bakteri telah memicu kajian yang lebih dalam terkait sifat-sifat plasma dingin yang dibangkitkan dengan berbagai teknik, komponen-komponen penyusun plasma, dan efektifitasnya berinteraksi dengan material dan matriks organik termasuk bakteri. Terkait dengan berbagai Teknik yang kembangkan sudah banyak disajikan di artikel review (Perinban et al., 2019; Pignata et al., 2017; Singh et al., 2021). Artikel ini menyajikan lebih khusus tentang mekanisme pembentukan reaktif spesies di dalam air ketika plasma digunakan untuk mengaktivasi air dan sifat-sifat yang tercipta setelah aktivasi.

#### **Mekanisme aktivasi air plasma**

Transformasi molekul netral menjadi ion, molekul tereksitasi, radikal, rekombinasi, dan proses atom dan molekul elementer lainnya akibat gaya elektromagnetik yang tinggi mengakibatkan gas yang teraktivasi mengalami transformasi sifatnya, berubah menjadi spesies yang lebih reaktif. (Girard dkk., 2018). Spesies reaktif dari plasma sangat bergantung pada gas yang digunakan untuk membuat plasma; oleh karena itu, beberapa gas telah dicoba untuk menghasilkan berbagai spesies reaktif yang menunjukkan sifat lebih efektif. Sebelum spesies reaktif mencapai antarmuka cairan dan dilarutkan serta didispersikan ke dalam cairan curah, spesies reaktif harus dihasilkan dalam fase plasma gas (*gaseous plasma phase*). Beberapa reaksi dapat terjadi antara komponen plasma dan gas sekitar di wilayah plasma. Beberapa molekul mungkin tidak pernah mencapai permukaan air, dan molekul lainnya mungkin mencapai permukaan cairan karena umur simpan dan reaktivitasnya berbeda. Selanjutnya terjadi reaksi antara plasma dengan cairan atau uap cair. Mirip dengan tahap sebelumnya, reaksi di

wilayah ini menghasilkan molekul yang lebih stabil atau beberapa molekul berumur pendek yang mudah bereaksi terhadap air atau komponen plasma lainnya. Akhirnya, molekul yang relatif stabil diproduksi dan tersedia di alam air, siap digunakan untuk tujuan tertentu. Pada bagian ini akan diuraikan tiga proses berturut-turut mengenai reaksi dan molekul yang dihasilkan.

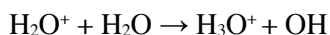
### Daerah plasma gas

Gas Argon (Ar) merupakan gas mulia yang umum ditemukan pada awal penelitian plasma karena mudah terurai. Sebagai sumber VUV, plasma Ar dapat menyebabkan disosiasi H<sub>2</sub>O secara signifikan menghasilkan •OH pada antarmuka gas-cairan. Van Gils dkk., (2013) menunjukkan bahwa jet plasma DBD yang dioperasikan pada ketinggian 5 mm di atas air berhasil menghasilkan fluks VUV yang cukup untuk memisahkan air sehingga menghasilkan radikal •OH. Selain itu, ion argon (Ar<sup>+</sup>) dihasilkan bereaksi terhadap atmosfer lembab untuk menciptakan gugus ion seperti H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>, CO<sub>4</sub><sup>-</sup>, H<sub>2</sub>O<sup>-</sup> dan HO<sub>2</sub><sup>-</sup> di wilayah plasma melalui reaksi berikut

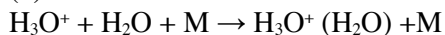
$$\text{Ar}^+ + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{O}^+ + \text{Ar}$$

(1)

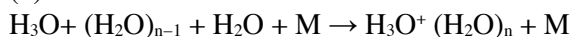
Diikuti oleh



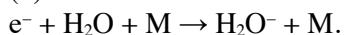
(2)



(3)



(4)



(5)

Uji coba lain dilakukan oleh (Van Durme et al., 2014) menggunakan argon murni, dan argon dengan konsentrasi oksigen dan uap air yang bervariasi membuktikan bahwa radikal hidroksil (•OH) dan atom oksigen (O) dihasilkan. Selain itu, konsentrasi •OH dan radikal O jauh lebih tinggi pada argon yang dikombinasikan dengan 0,3% H<sub>2</sub>O atau 0,3% O<sub>2</sub>. Penciptaan •OH sangat penting karena ia bergabung dengan •OH lain untuk menghasilkan hidrogen peroksida (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), yang merupakan spesies reaktif yang berumur panjang melalui reaksi (1) dan mudah larut dalam air.



(6)

Sejalan dengan laporan oleh (Van Durme et al., 2014), (Liu et al., 2016a) menggunakan gas campuran yang serupa yaitu Ar/O<sub>2</sub> (98% Ar, 2% O<sub>2</sub>) untuk menghasilkan plasma gas melalui pelepasan permukaan di atas air deionisasi. Mereka tidak mengidentifikasi radikal hidroksil dalam plasma gas; namun, mereka menghitung konsentrasi ozon yang tercipta dan terakumulasi di wilayah 0,1-2 cm di atas air. Di antara semua spesies gas yang diidentifikasi (ozon, hidrogen peroksida, HNO<sub>2</sub>, dan HNO<sub>3</sub>), ozon mencatat konsentrasi lebih dari tiga kali lipat dibandingkan dengan semua spesies lainnya (berkisar sekitar  $0,85 \times 10^{17}$  menjadi  $14,2 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ ).

Hasil investigasi yang lebih kaya disajikan oleh (Verlact et al., 2018a) yang mengaplikasikan plasma argon. Di wilayah plasma gas, mereka mengidentifikasi beberapa radikal dan molekul yang tercipta melalui reaksi spesies argon (energetic argon) dan komponen udara sekitar (yaitu, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, dan H<sub>2</sub>O). Atom O, O<sub>3</sub>, OH, HO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, H<sup>+</sup>, NO, N, NO<sub>2</sub>, HNO<sub>2</sub>, dan HNO<sub>3</sub> berhasil diidentifikasi di ujung nosel hingga wilayah 1,7 cm. Di antara spesies tersebut, ozon (O<sub>3</sub>), hidrogen peroksida (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), oksida nitrat (NO), asam nitrat (HNO<sub>2</sub>) dan asam nitrat (HNO<sub>3</sub>), ion nitrat (NO<sub>3</sub>), dan nitrogen dioksida (NO<sub>2</sub>) adalah molekul yang mencapai antarmuka cair dengan konsentrasi yang relatif tinggi.

Gas mulia lain yang telah digunakan untuk menghasilkan plasma adalah gas helium. Plasma helium dicirikan oleh lebih sedikit panas yang dihasilkan sehingga dapat disentuh tanpa efek berbahaya. Kelebihan plasma ini menghilangkan efek suhu tinggi pada objek yang dipapar dengan plasma, yang mungkin membuat hasil menjadi bias ketika plasma diterapkan pada target sensitif. Seperti plasma argon, helium mengalami eksitasi selama pembentukan plasma, berinteraksi dengan atmosfer sekitar dan menghasilkan berbagai kluster ion melekul positif dan negatif. Sebuah laporan oleh (Xu et al., 2015), yang menerapkan jet plasma tekanan atmosfer menggunakan helium sebagai gas operasionalnya mengidentifikasi OH tereksitasi, spesies nitrogen, helium, dan oksigen atom pada 200 - 1050 nm. Secara rinci, mereka menemukan kluster spesies positif yaitu N<sub>2</sub><sup>+</sup>, O<sub>2</sub><sup>+</sup>, NO<sup>+</sup>, H<sub>2</sub>O<sup>+</sup>, H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>, H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>(H<sub>2</sub>O), dan N<sub>2</sub>H<sup>+</sup> bersama dengan sejumlah kecil N<sup>+</sup>, O<sup>+</sup>, OH<sup>+</sup>, and H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>(H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub>. Kluster spesies negatif yang ditemukan adalah O<sup>-</sup>, O<sub>2</sub><sup>-</sup>, O<sub>3</sub><sup>-</sup>, OH<sup>-</sup>, (OH)O<sup>-</sup>, H<sub>3</sub>O<sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, dan NO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Hasil serupa dilaporkan oleh (Murakami et al., 2013), yang bekerja dengan sistem plasma yang sama dan menggunakan helium murni yang dicampur dengan udara (0-500 ppm) dan uap air (0-100% RH). Mereka melaporkan 59 spesies yang dihasilkan dari seluruh kombinasi gas yang terdiri dari spesies oksigen

reaktif, spesies nitrogen reaktif, dan ion bermuatan positif dan negatif. Atom O, O<sub>2</sub>(<sup>1</sup>D) and O<sub>3</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub> and N<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub><sup>+</sup>, O<sub>4</sub><sup>+</sup>, O<sup>-</sup> and O<sub>2</sub><sup>-</sup> adalah beberapa spesies yang ditemukan dalam konsentrasi yang jelas (lebih dari 10<sup>11</sup> cm<sup>-3</sup>). Temuan penting adalah bahwa konsentrasi spesies oksigen reaktif secara bertahap menurun seiring dengan penambahan udara lembab karena mereka bereaksi untuk menghasilkan berbagai macam spesies nitrogen reaktif dan spesies hidrogen. Artinya reaktivitas kimia plasma menurun seiring dengan meningkatnya kelembapan. Sebaliknya, reaksi antara spesies yang reaktif terhadap oksigen dengan udara lembab meningkatkan kepadatan ion negatif dan positif dalam plasma, mengubah keelektronegatifan (*electronegativity*) plasma secara keseluruhan.

Umur komponen plasma di wilayah gas, ditentukan oleh laju aliran dan jarak *probe* yang secara signifikan mempengaruhi peluang komponen tersebut untuk mencapai permukaan cairan. Namun kemampuan setiap spesies untuk larut dalam air sangat ditentukan oleh kelarutannya masing-masing; oleh karena itu, tidak semua spesies yang dihasilkan dalam plasma gas ada di air.

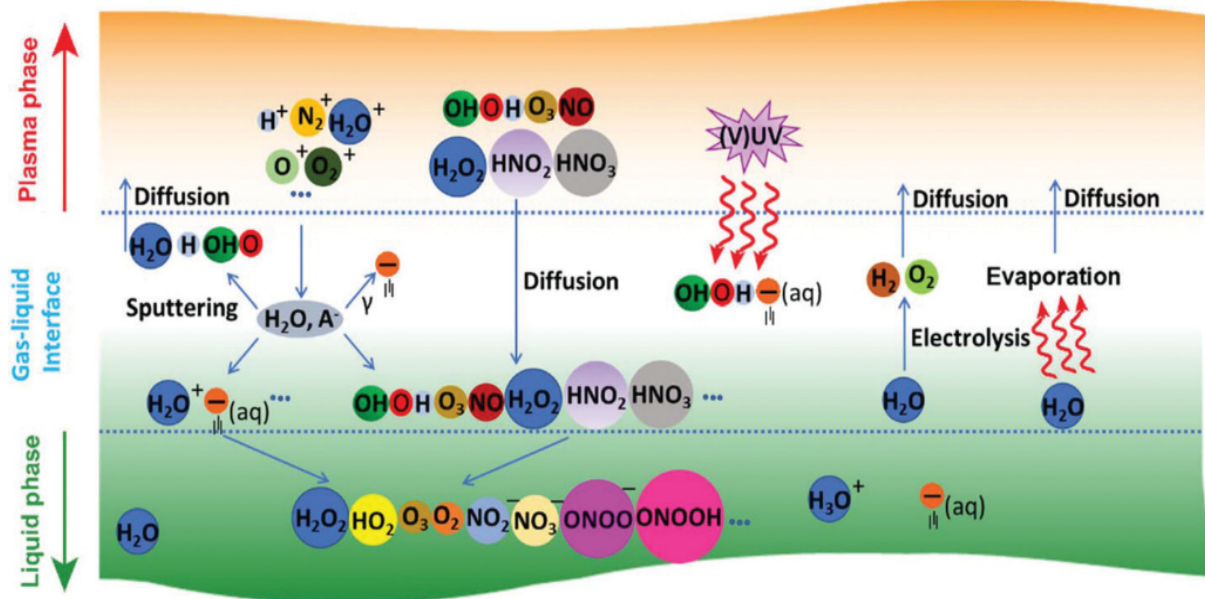
#### Daerah Antarmuka plasma-air

Menurut Verlackt et al., (2018a), OH, NO<sub>2</sub>, and NO<sub>3</sub> dengan cepat dikonsumsi pada antarmuka gas-air untuk menghasilkan beberapa spesies berumur panjang di dalam air. Dengan demikian, spesies ini hanya terdeteksi 1 mm di sepanjang antarmuka gas-air dan segera menghilang di lapisan bawah cairan. Sebaliknya konsentrasi H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, HNO<sub>2</sub>/NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, HO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub><sup>-</sup>, O<sub>3</sub>, dan ONOOH/ONOO<sup>-</sup> terdeteksi relatif konstan di seluruh cairan. Penulis menekankan bahwa spesies dengan konstanta Henry (kelarutan dalam air) yang tinggi tampaknya larut dalam air dan ditemukan dalam konsentrasi yang jauh lebih tinggi dibandingkan spesies dengan konstanta Henry yang lebih rendah. Misalnya ozon dengan konstanta Henry 1,22 × 10<sup>-2</sup> mol/L.atm ditemukan pada konsentrasi tinggi dalam plasma gas tetapi kurang dalam cairan dibandingkan hidrogen peroksida atau radikal OH dengan konstanta Henry masing-masing adalah 7,9 × 10<sup>4</sup> dan 3,03 × 10<sup>1</sup> mol/L.atm. Menurut Liu et al. (2016), konsentrasi ozon fase cair menurun hampir tiga belas kali lipat ketika ozon fase gas dipindahkan dari gas ke cair. Selain itu, nitrit berkurang hampir sebelas kali lipat, jauh lebih rendah dibandingkan hidrogen peroksida dan nitrat, yang berkurang dari 10 kali lipat (10<sup>14</sup> ke 10<sup>5</sup>/cm<sup>3</sup>). Temuan ini menunjukkan bahwa perpindahan spesies dari wilayah gas ke wilayah cair sangat bergantung pada kelarutan spesies tersebut.

Studi intensif dari bidang kimia dan fisika-kimia tentang interaksi plasma dan air telah

mengungkapkan bagaimana bakteri dibunuh oleh air yang diaktivasi dengan plasma. Kemampuan PAW untuk melakukan reaksi dekontaminasi terhadap mikroorganisme telah mendorong para peneliti untuk menyelidiki sifat kimia di balik fenomena tersebut. Beberapa makalah telah mengusulkan dan mengilustrasikan bagaimana spesies reaktif yang awalnya dihasilkan oleh pelepasan plasma dapat larut ke dalam air. Investigasi mendalam terhadap transportasi dan akumulasi spesies reaktif yang dihasilkan oleh jet plasma disajikan oleh Verlackt et al., (2018b). Temuan mereka menunjukkan bagaimana spesies reaktif dihasilkan, dilarutkan ke dalam antarmuka cairan, dan menjadi banyak dalam sebagian besar cairan. Singkatnya, mereka menunjukkan bahwa spesies reaktif yang berbeda dihasilkan, dikonsumsi/dihilangkan, atau ada dalam fase gas, antarmuka cairan, dan cairan curah. Selain itu, sirkulasi cairan curah mendistribusikan spesies reaktif dalam cairan yang diaktifkan plasma (PTL). Begitu pula dengan karya yang diterbitkan oleh Zhou et al. (2018) secara menarik mendeskripsikan molekul dan ion yang dihasilkan dalam antarmuka plasma-air dan kemudian akhirnya larut ke dalam air dan memulai reaksi lebih lanjut antara spesies reaktif dan molekul air (Gambar 1). Gas plasma, yang mengandung berbagai spesies oksigen dan nitrogen, berdifusi ke wilayah air plasma. Di wilayah ini, beberapa spesies dapat langsung larut ke dalam air dan bereaksi terhadap molekul air untuk menghasilkan spesies lain, seperti ONOO<sup>-</sup>, ONOOH, NO<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, and HO<sub>2</sub>. Di jalur pengiriman lain, elektron membagi molekul air menjadi H<sup>+</sup> dan OH<sup>-</sup> kemudian dapat bereaksi lebih jauh untuk menghasilkan H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, yang hadir dalam air lebih lama dari ion penyusunnya. Selain itu, sinar UV yang dipancarkan oleh molekul yang tereksitasi mentransfer energi dalam jumlah yang cukup tinggi ke air sehingga dapat memisahkan air menjadi ion. Penciptaan ion-ion ini mengubah sifat air, seperti yang ditunjukkan oleh penurunan pH secara cepat. Penurunan dari 6,17 menjadi 3,34 dapat dicapai dalam 5 menit aktivasi plasma, namun tidak ada perubahan pH yang signifikan apabila aktivasi diperpanjang (Xiang et al., 2019). Akhirnya, mekanisme ini mengubah sifat air dan mengubah air menjadi pembersih ramah lingkungan yang efektif (Zhou et al., 2020).

Thirumdas et al., (2018) menyajikan gambaran umum semua spesies reaktif yang dihasilkan dalam air yang diolah dengan alat penghasil plasma yang berbeda (Tabel 1). Di antara spesies tersebut, hidrogen peroksida, nitrat, nitrit, dan ozon umumnya diukur dalam mengevaluasi efektifitas PAW pada sistem biologis karena waktu paruhnya yang relatif lama (Park et al., 2017; Zhou et al., 2018, 2020).



Gambar 1. Mekanisme pengiriman spesies oksigen dan nitrogen reaktif (RONS) yang dihasilkan dalam fase gas ke dalam larutan.

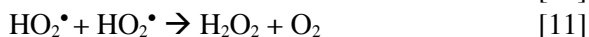
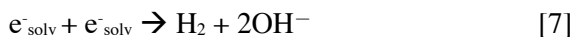
Tabel 1. Gambaran umum sistem plasma yang dapat digunakan untuk produksi air yang diaktifkan plasma

Modus operasi	Tujuan	Parameter kritis	Spesies
Plasma yang kontak dengan air:	Busur plasma (Arc plasma) dibangkitkan di atas permukaan.	Aliran gas	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>
Plasma di atas permukaan air		Jarak probe	Nitrit (NO <sub>2</sub> )
Plasma dengan semprotan air	Meningkatkan luas permukaan kontak.	Jarak antara ujung probe dan permukaan air	Nitrat (NO <sub>3</sub> )
		Waktu aktivasi	Superoksida anion radikal
Plasma dengan gelembung gas	Plasma dibangkitkan di dalam gelembung.	Jenis gas yang digunakan	Singlet oksigen
		Tegangan yang digunakan	Hydroxil radikal
Plasma dibawah permukaan air	Plasma dengan Listrik dibangkitkan di dalam air sehingga langsung kontak dengan air	Ozon	•OH, O <sub>2</sub> , •O <sub>2</sub> <sup>-</sup>
		Kedalaman ujung probe	Hidrogen peroksida
Plasma dibawah permukaan air	Plasma dengan Listrik dibangkitkan di dalam air sehingga langsung kontak dengan air	Gas yang digunakan	Peroksida
		Tipe elektrode	Nitrat
Plasma dibawah permukaan air	Plasma dengan Listrik dibangkitkan di dalam air sehingga langsung kontak dengan air	Tegangan yang digunakan	Nitrit
		Arus listrik	Superoksida anion (O <sub>2</sub> )
Plasma dibawah permukaan air	Plasma dengan Listrik dibangkitkan di dalam air sehingga langsung kontak dengan air	Frekuensi	Nitrit oksida radikal
		Ukuran electrode	Hidroxil radikal

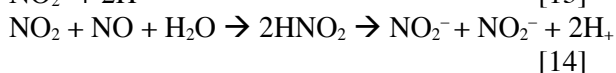
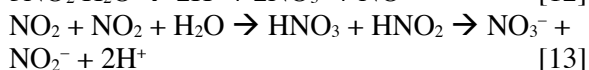
### Sifat fisikokimia PAW

Spesies nitrogen dan oksigen reaktif dalam air dapat diciptakan dengan menggunakan plasma non-termal, sehingga memberikan peluang besar bagi penanganan produk segar untuk melibatkan plasma dalam sanitasi. Paparan plasma menyebabkan air menjadi terakvitasi dan disosiasi molekul air yang dapat mengubah sifat air itu sendiri. Selama proses ini terjadi pembentukan spesies berumur pendek dan juga spesies berumur panjang. Penciptaan  $H^+$ ,  $OH^-$ , dan elektron terlarut dalam air ( $e^-_{solv}$ ), yang sangat reaktif, mengarah pada pembentukan spesies sementara dan lebih stabil seperti  $O_3$ ,  $H_2$ ,  $itu_2$ ,  $H_2O_2$ . Spesies stabil tersebut dapat bertahan lebih lama di dalam air dan mampu berperan dalam membunuh bakteri baik dengan bekerja sendiri atau bersinergis dengan berbagai spesies lain yang ada di dalam plasma (Khlyustova et al., 2019).

Berikut beberapa reaksi yang terjadi bila plasma terkena air:



Ketika gas yang mengandung nitrogen, seperti udara, digunakan untuk gas operasi, spesies nitrogen reaktif ( $NO^\bullet$ ,  $NO_2^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $ONOO^-$ ) terbentuk melalui reaksi berikut:



Spesies tersebut (hidrogen peroksida, nitrat, nitrit, ion  $H^+$  dan  $OH^-$ ) mengubah sifat-sifat air, seperti pH, potensial reduksi oksidasi (ORP), dan konduktivitasnya. Zhou et al. (2018) menyelidiki peran penting peroksinitrit (istilah yang biasanya mengacu pada anionik ( $OONO^-$ ) dan terprotonasi ( $ONOOH$ )). Senyawa ini dapat diproduksi secara endogen dalam sistem kehidupan. Mereka memainkan peran penting dalam transduksi sinyal, dan pertahanan antimikroba karena peningkatan kadar peroksinitrit dapat merusak komponen sel penting yang menyebabkan kematian sel melalui apoptosis dan nekrosis.

### Modus aktivasi

Pada tingkat tertentu, ketersediaan spesies dan ion reaktif di sekitar materi biologis seperti jaringan sel, sel, atau molekul, menempatkan materi biologis tersebut dalam kondisi yang tidak menguntungkan. Namun, mereka mengembangkan mekanisme kompleks untuk mengurangi efeknya guna mempertahankan fungsinya. Konsentrasi spesies reaktif yang berlebihan menyebabkan kerusakan pada spesies tersebut. Mekanisme umum ini memungkinkan pengembangan strategi non-termal untuk membasmi bakteri.

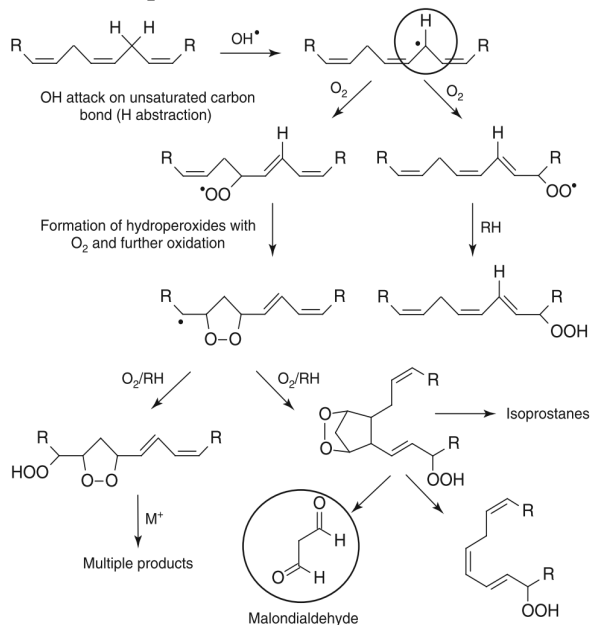
Mengaktifkan air menggunakan plasma non-termal berhasil menciptakan spesies reaktif yang larut dalam air sehingga merugikan bakteri yang ada di dalam air. Integritas dinding sel merupakan ciri penting yang harus dijaga oleh bakteri. Kehilangan integritas dinding sel menyebabkan kematian bakteri. Peningkatan keasaman atau penurunan derajat pH menunjukkan terciptanya ion dan spesies reaktif dalam air. Sun et al. (2012) berspekulasi bahwa pH yang lebih rendah mendukung spesies reaktif untuk menembus dinding sel. Oksidasi asam lemak tak jenuh yang menyusun dinding sel bakteri merupakan mekanisme nyata yang dilakukan oleh spesies reaktif yang mengganggu dinding sel. Reaksi berantai pada lapisan lipid ganda (*the lipid bilayer*) yang diawali oleh reaksi antara  $OH$  dan lipid akan memutuskan ikatan peptida, mengoksidasi rantai samping asam amino, dan pada akhirnya mengganggu keseluruhan struktur dinding sel bakteri. "Lubang" yang tercipta memungkinkan spesies atau ion reaktif lainnya menembus bagian dalam bakteri dan bereaksi lebih lanjut dengan organel antar sel seperti DNA dan protein lainnya.

Interaksi spesies kimia yang terbentuk dalam plasma dengan bakteri dan sel lain dimulai dari permukaan sel, di mana penghancuran kimiawi pada dinding sel, membran, dan komponen terkait dapat terjadi. Hal ini diikuti, dalam beberapa kasus, dengan pengangkutan spesies aktif ke dalam sel, di mana kerusakan internal sel dapat terjadi melalui penghancuran DNA, protein, dan komponen internal sel lainnya (Lukes et al., 2012).

### Radikal Hidroksil ( $OH^\bullet$ )

Radikal hidroksil  $OH^\bullet$  adalah ROS utama yang dihasilkan dalam air yang dipapar dengan plasma yang dibangkitkan dengan daya listrik.  $OH^\bullet$  radikal mempunyai daya oksidasi yang tinggi ( $E^\circ = 2,85$  V/SHE), oksidan terkuat dalam lingkungan berair. Ketika spesies radikal ini menyerang bakteri, target utamanya adalah dinding sel luar, termasuk membran sel yang tersusun dari  $OH^\bullet$  senyawa organik yang rentan seperti lipid, protein, dan polisakarida (Lukes

et al., 2012). Reaksi lipid dengan radikal OH• berlangsung terutama melalui abstraksi H dari ikatan karbon tak jenuh asam lemak, yang dengan adanya oksigen menyebabkan peroksidasi lipid. Mekanisme peroksidasi lipid disajikan pada Gambar 2. Meningkatnya jumlah malondialdehid (MDA) umumnya dianggap seiring dengan meningkatnya peroksidasi lipid.



Gambar 2. Mekanisme dinding sel peroksidasi lipid (Lukes et al., 2012); (Marnett, 1999)

### Hidrogen Peroksida (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)

Berbeda dengan radikal hidroksil yang hanya bertahan dalam waktu singkat, hidrogen peroksida merupakan oksidan penting lainnya yang bertahan dalam waktu yang relatif lama, oleh karena itu, sifat bakterisida dari air yang diaktifkan plasma dapat dipertahankan untuk jangka waktu tertentu. Hidrogen peroksida terkenal sebagai agen antibakteri dalam bentuk gas atau dilarutkan dalam air. Senyawa ini dapat dengan mudah berpindah melintasi membran sel sehingga membuat senyawa ini sangat merugikan bakteri pada tingkat minimal tertentu. Di dalam sel, hidroksil peroksida menghasilkan radikal hidroksil melalui reaksi Fenton, menyebabkan kerusakan oksidatif pada sel bakteri, dan menstimulasi pemutusan untai ganda (*double-strand*) pada DNA (Keyer et al., 1995).

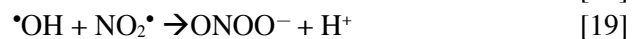


Namun, efek mematikan senyawa ini terhadap bakteri dapat dicapai pada konsentrasi 1,5 dan 2,5 mmol/L. Oleh karena itu, proses pembentukan spesies reaktif di dalam air harus dipertimbangkan

secara cermat untuk mencapai konsentrasi optimal (Imiay et al., 1986).

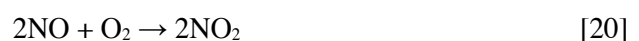
### Peroksinitrit (ONOO<sup>-</sup>)

Peroksinitrit adalah produk ketika ion nitrit bereaksi terhadap hidrogen peroksida dalam lingkungan asam (Lyman & Hurst, 1996). Ini adalah agen oksidan dan nitrat kuat yang mampu menyebabkan oksidasi dan nitrosasi protein, DNA, dan lipid melalui reaksi oksidatif langsung atau tidak langsung, mekanisme yang dimediasi radikal (Majou & Christeans, 2018). Ia merupakan oksidan dan nukleofil, dan kedua sifat kimia ini menentukan sebagian besar tindakan biokimianya, menjadikannya penyebab berbagai kerusakan sel. Peroksinitrit dapat melintasi membran sel baik melalui saluran anion atau pun melalui difusi pasif molekul anionik dan terprotonasi (Ferrer-Sueta & Radi, 2009). Peroksinitrit bertindak terutama sebagai agen yang mendorong modifikasi dasar DNA, termasuk pembentukan 8-hydroxydeoxyguanosine atau 8-nitroguanine. Selain itu, peroksinitrit dengan cepat bereaksi terhadap tiol dan tioeter, asam askorbat, asam amino yang mengandung substituen aromatik, dan komponen lipid pada membran. (Kamat, 2006). Karena umur (*lifetime*) dari spesies yang singkat, diperlukan metode yang lebih canggih untuk mengukur keberadaan peroksinitrit. Reaksi berikut dimana peroksinitrit diproduksi diusulkan oleh (Lukes et al., 2014):



### Nitrat dan nitrit

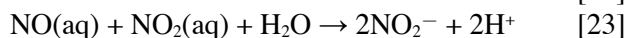
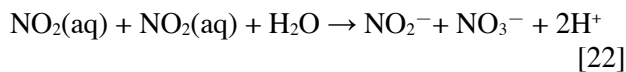
Nitrat (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) secara khusus digunakan dalam kondisi pengawetan produk tertentu di mana nitrit harus dihasilkan dalam produk dalam jangka waktu lama. Perannya adalah sebagai sumber nitrit untuk reaksi *curing* (pengawetan bahan makanan dengan bahan garam dan bahan lain). Meskipun nitrat memiliki fungsi yang sama dengan nitrit, ia bekerja jauh lebih lambat dan lebih jarang digunakan (Majou & Christeans, 2018). NO, yang terbentuk dalam plasma udara melalui reaksi fase gas dari nitrogen dan oksigen yang terdisosiasi, dengan cepat bereaksi dengan oksigen atau ozon menghasilkan NO<sub>2</sub>.



Nitrogen dioksida selanjutnya dapat larut dalam air, menghasilkan nitrit NO<sub>2</sub><sup>-</sup> dan nitrat NO<sub>3</sub><sup>-</sup> melalui



penangkapan elektron oleh nitrogen dioksida NO<sub>2</sub> atau oksidasi dengan oksida nitrat NO.



PH larutan kemudian diturunkan, yang seiring dengan peningkatan konduktivitas larutan, menyebabkan disproporsionasi nitrit menjadi nitrat dan oksida nitrat.



## KESIMPULAN

Reaktif spesies yang merupakan komponen aktif dalam air yang diaktivasi dengan plasma menjadikan sifat air berubah menjadi reaktif dan memberikan efek-efek yang khas. Ketika air yang teraktivasi plasma ini dipaparkan dengan bahan yang mengandung molekul baik organik maupun non-organik. Mengidentifikasi ion-ion yang terbangkitkan oleh plasma dan reaksi yang terjadi. Ketika kontak dengan material lain sangat penting untuk dikaji sehingga teknologi ini bisa dimanfaatkan dengan tepat. Kajian ini juga akan membuka potensi plasma dan air teraktivasi plasma bisa diterapkan di berbagai bidang yang berkaitan dengan kehidupan.

## Daftar pustaka

Dobrynin, D., Fridman, G., Friedman, G., & Fridman, A. (2009). Physical and biological mechanisms of direct plasma interaction with living tissue. *New Journal of Physics*, 11. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/11/11/115020>

Dobrynin, D., Friedman, G., Fridman, A., & Starikovskiy, A. (2011). Inactivation of bacteria using dc corona discharge: Role of ions and humidity. *New Journal of Physics*, 13. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/13/10/103033>

Ferrer-Sueta, G., & Radi, R. (2009). Chemical biology of peroxyxynitrite: Kinetics, diffusion, and radicals. *ACS Chemical Biology*, 4(3), 161–177. <https://doi.org/10.1021/cb800279q>

Imiyay, J. A., Chin, S. M., & Linnt, S. (1986). Toxic DNA Damage by Hydrogen Peroxide Through

the Fenton Reaction in Vivo and in Vitro. *Science*, 240, 2–5.

Keyer, K., Gort, A. S., & Imlay, J. A. (1995). Superoxide and the production of oxidative DNA damage. *Journal of Bacteriology*, 177(23), 6782–6790. <https://doi.org/10.1128/jb.177.23.6782-6790.1995>

Khlyustova, A., Labay, C., Machala, Z., Ginebra, M. P., & Canal, C. (2019). Important parameters in plasma jets for the production of RONS in liquids for plasma medicine: A brief review. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, 13(2), 238–252. <https://doi.org/10.1007/s11705-019-1801-8>

Liu, D. X., Liu, Z. C., Chen, C., Yang, A. J., Li, D., Rong, M. Z., Chen, H. L., & Kong, M. G. (2016a). Aqueous reactive species induced by a surface air discharge: Heterogeneous mass transfer and liquid chemistry pathways. *Scientific Reports*, 6(December 2015), 1–11. <https://doi.org/10.1038/srep23737>

Liu, D. X., Liu, Z. C., Chen, C., Yang, A. J., Li, D., Rong, M. Z., Chen, H. L., & Kong, M. G. (2016b). Aqueous reactive species induced by a surface air discharge: Heterogeneous mass transfer and liquid chemistry pathways. *Scientific Reports*, 6(December 2015), 1–11. <https://doi.org/10.1038/srep23737>

Lukes, P., Brisset, J. L., & Locke, B. R. (2012). Biological Effects of Electrical Discharge Plasma in Water and in Gas-Liquid Environments. *Plasma Chemistry and Catalysis in Gases and Liquids*, 309–352. <https://doi.org/10.1002/9783527649525.ch8>

Lukes, P., Dolezalova, E., Sisrova, I., & Clupek, M. (2014). Aqueous-phase chemistry and bactericidal effects from an air discharge plasma in contact with water: Evidence for the formation of peroxyxynitrite through a pseudo-second-order post-discharge reaction of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and HNO<sub>2</sub>. *Plasma Sources Science and Technology*, 23(1).

- <https://doi.org/10.1088/0963-0252/23/1/015019>
- Lymar, S. V., & Hurst, J. K. (1996). Carbon dioxide: Physiological catalyst for peroxy nitrite-mediated cellular damage or cellular protectant? *Chemical Research in Toxicology*, 9(5), 845–850.  
<https://doi.org/10.1021/tx960046z>
- Majou, D., & Christieans, S. (2018). Mechanisms of the bactericidal effects of nitrate and nitrite in cured meats. *Meat Science*, 145(June), 273–284.  
<https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.06.013>
- Murakami, T., Niemi, K., Gans, T., O’Connell, D., & Graham, W. G. (2013). Chemical kinetics and reactive species in atmospheric pressure helium-oxygen plasmas with humid-air impurities. *Plasma Sources Science and Technology*, 22(1), 1–29.  
<https://doi.org/10.1088/0963-0252/22/1/015003>
- Park, J. Y., Park, S., Choe, W., Yong, H. I., Jo, C., & Kim, K. (2017). Plasma-Functionalized Solution: A Potent Antimicrobial Agent for Biomedical Applications from Antibacterial Therapeutics to Biomaterial Surface Engineering. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 9(50), 43470–43477.  
<https://doi.org/10.1021/acsami.7b14276>
- Perinban, S., Orsat, V., & Raghavan, V. (2019). Nonthermal Plasma–Liquid Interactions in Food Processing: A Review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 18(6), 1985–2008.  
<https://doi.org/10.1111/1541-4337.12503>
- Pignata, C., D’Angelo, D., Fea, E., & Gilli, G. (2017). A review on microbiological decontamination of fresh produce with nonthermal plasma. *Journal of Applied Microbiology*, 122(6), 1438–1455.  
<https://doi.org/10.1111/jam.13412>
- Shainsky, N., Dobrynin, D., Ercan, U., Joshi, S., Fridman, G., Friedman, G., & Fridman, A. (2010). *Effect of liquid modified by non-equilibrium atmospheric pressure plasmas on bacteria inactivation rates*. 115020, 1.  
<https://doi.org/10.1109/plasma.2010.5533900>
- Singh, S., Chauhan, A. K., & Ranjan, R. (2021). Cold Plasma - Novel method of Food Preservation : A Review. *Indian Food Industry Magazine*, July, 1–12.
- Sun, P., Wu, H., Bai, N., Zhou, H., Wang, R., Feng, H., Zhu, W., Zhang, J., & Fang, J. (2012). Inactivation of *Bacillus subtilis* spores in water by a direct-current, cold atmospheric-pressure air plasma microjet. *Plasma Processes and Polymers*, 9(2), 157–164.  
<https://doi.org/10.1002/ppap.201100041>
- Thirumdas, R., Kothakota, A., Annature, U., Siliveru, K., Blundell, R., Gatt, R., & Valdramidis, V. P. (2018). Plasma activated water (PAW): Chemistry, physico-chemical properties, applications in food and agriculture. In *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 77, pp. 21–31). Elsevier Ltd.  
<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.05.007>
- Van Durme, J., Nikiforov, A., Vandamme, J., Leys, C., & De Winne, A. (2014). Accelerated lipid oxidation using non-thermal plasma technology: Evaluation of volatile compounds. *Food Research International*, 62, 868–876.  
<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.04.043>
- Verlact, C. C. W., Van Boxem, W., & Bogaerts, A. (2018a). Transport and accumulation of plasma generated species in aqueous solution. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 20(10), 6845–6859.  
<https://doi.org/10.1039/C7CP07593F>
- Verlact, C. C. W., Van Boxem, W., & Bogaerts, A. (2018b). Transport and accumulation of plasma generated species in aqueous solution. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 20(10), 6845–6859.  
<https://doi.org/10.1039/C7CP07593F>
- Xiang, Q., Liu, X., Liu, S., Ma, Y., Xu, C., & Bai, Y. (2019). Effect of plasma-activated water on



---

microbial quality and physicochemical characteristics of mung bean sprouts. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 52, 49–56. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.11.012>

Xu, Z., Shen, J., Zhang, Z., Ma, J., Ma, R., Zhao, Y., Sun, Q., Qian, S., Zhang, H., Ding, L., Cheng, C., Chu, P. K., & Xia, W. (2015). Inactivation effects of non-thermal atmospheric-pressure helium plasma jet on staphylococcus aureus biofilms. *Plasma Processes and Polymers*, 12(8), 827–835. <https://doi.org/10.1002/ppap.201500006>

Zhou, R., Zhou, R., Prasad, K., Fang, Z., Speight, R., Bazaka, K., & Ostrikov, K. (2018). Cold atmospheric plasma activated water as a prospective disinfectant: The crucial role of peroxy nitrite. *Green Chemistry*, 20(23), 5276–5284. <https://doi.org/10.1039/c8gc02800a>

Zhou, R., Zhou, R., Wang, P., Xian, Y., Mai-Prochnow, A., Lu, X., Cullen, P. J., Ostrikov, K. (Ken), & Bazaka, K. (2020). Plasma-activated water: generation, origin of reactive species and biological applications. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 53(30), 303001. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab81cf>