

## STUDI EMISI SPEKTRA PADA SINTESIS PEMBAKARAN METAL ALUMINIUM DALAM PLASMA-UDARA

Imam Sholahuddin<sup>1\*</sup>, Andi Sanata<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Jember, Jl. Kalimantan 37 Jember 68121

\* Email: imam.teknik@unej.ac.id

### ABSTRACT

*Research on emission spectra of metal combustion at temperatures above the boiling point of Al has been successfully carried out. This method can be used as a qualitative characterization of the presence of elements or compounds involved in the combustion process. Recording of emission spectra data was carried out during the process of burning Al powder with oxygen O in an air plasma flame at atmospheric pressure. The burning characteristic of Al was detected at the peak intensity of the wavelength  $\lambda_{Al} = 396 \text{ nm}$ , and the reaction products of AlO with the peak intensity of the wavelength  $\lambda_{AlO}$  were 471, 489 and 512 nm, respectively. The absolute temperature of the plasma flame black body was 5660 K based on the highest peak intensity  $\lambda_{AlO} = 512 \text{ nm}$ . The increase in emission intensity was quite significant when Al was started to be injected at 1.25 seconds, followed by an unstable plasma form. The steady state of the plasma flame indicates a full reaction in the vapor phase of  $AlO_{(g)}$  in the form of Al sub-oxide and alumina before condensing on the outer surface area of the plasma. High temperature thermal plasma-air can increase the homogeneity of the atomization process of particles into gaseous vapor which is an important initiation where nanoscale AlO particles begin to form.*

*Keywords: combustion synthesis, thermal plasma-air, Al, AlO, emission spectra.*

### PENDAHULUAN

Pembakaran serbuk metal banyak digunakan sebagai energi *booster* untuk sistem propulsi dan sintesis material [1-4]. Sintesis pembakaran metal dengan media udara atau oksigen juga menghasilkan serbuk metal-oksida berukuran sangat kecil dalam skala nano dengan kemurnian tinggi, dan ini merupakan metode yang cukup menjanjikan. Reaksi eksoterm metal aluminium (Al) dengan oksigen (O) di udara menambah akselerasi pembakaran dan jumlah panas sistem. Pada kondisi ini skenario pecahnya cairan *droplet* dalam temperatur tinggi akan meningkatkan jumlah uap gas yang terjadi secara berulang selama di dalam api plasma. Uap gas dan debu elektron plasma terbentuk dalam zona terbakarnya produk metal, memancarkan emisi elektron saat pembakaran di udara dalam tekanan atmosfer. Temperatur plasma tersebut biasanya sangat tinggi di atas 3500 K dan sistem dianggap isothermal. Fase kondensasi dan koagulasi akan mempertahankan dimensi produk pembakaran metal oksida dalam skala nanometer.

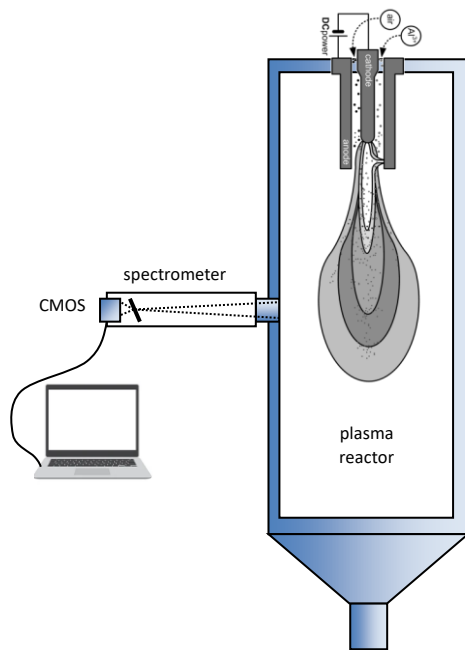
Untuk dapat menghasilkan serbuk AlO dalam skala nano harus melibatkan temperatur yang sangat tinggi di atas titik didih Al. Mendefinisikan proses dinamis sintesa pembakaran metal oksida secara internal pada fase plasma umumnya sulit untuk dilakukan. Hal ini disebabkan proses *thermal* kimia-fisika yang cukup kompleks selama terjadinya reaksi di dalam plasma. Namun besarnya energi reaksi yang terjadi selama proses pembakaran dalam fase plasma menghasilkan emisi spektra dengan tingkat visibilitas tinggi memberikan kemudahan untuk kajian atau

pengamatan proses pembakaran. Emisi spektra pembakaran dapat diukur menggunakan *spectrometer* untuk mengamati transisi reaksi pembakaran dan pembentukan produk pembakaran berupa unsur atau senyawa melalui intensitas puncak kuat dari panjang gelombang emisi yang dihasilkan. Pada pembakaran Al dengan udara akan menghasilkan produk AlO yang melepaskan emisi spektrum dengan puncak intensitas sangat kuat antara 396 nm – 512 nm. Penelitian emisi spektra pembakaran Al dan proses oksidasi di udara atmosfer banyak dilakukan pada rentang temperatur cair hingga titik didih AlO [5-9]. Hingga saat ini masih sulit ditemui laporan penelitian yang melibatkan temperatur di atasnya khususnya pada temperatur api plasma. Emisi spektra api plasma memiliki intensitas yang cukup kuat bila dibandingkan dengan pembakaran di atas yang umumnya menggunakan bahan bakar hidrokarbon. Hal ini menjadi tantangan untuk diteliti. Berikut ini akan dilaporkan hasil kajian emisi spektra proses pembakaran serbuk metal Al di udara atmosfer pada temperatur tinggi api plasma.

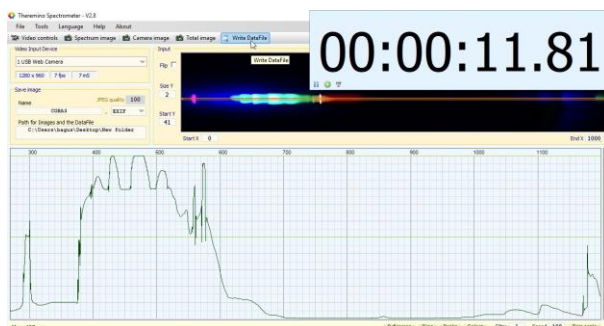
### METODOLOGI PENELITIAN

Kajian emisi spektra dilakukan melalui perekaman data emisi selama proses eksperimen pembakaran serbuk Al di dalam api plasma udara pada tekanan atmosfer (Gambar 1). Dimulai dengan proses memasukkan serbuk aluminium berukuran < 150  $\mu\text{m}$  ke dalam saluran nosel anoda-katoda pembangkit plasma yang dibawa oleh aliran udara 5

L/min diinjeksikan selama 2,5 detik setelah api plasma dinyalakan selama 1,25 detik. Sedangkan aliran udara plasma sendiri diatur sebesar 26 L/min. Energi pembangkit api plasma disuplai oleh listrik arus searah 1,9 kW dengan arus konstan 20 A.



Gambar 1. Skema aliran udara dan injeksi serbuk Al ke dalam saluran anoda-katoda plasma dan pengambilan data emisi spektra dengan *spectrometer*



Gambar 2. Perekaman data spektra selama proses pembakaran Al dengan perangkat lunak *Theremino Spectrometer V 2.8*

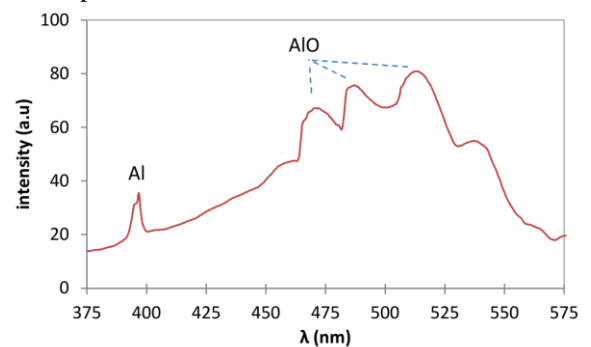
Secara teknis, emisi spektra dari nyala api plasma diamati melalui jendela kaca berdiameter 3cm, dengan jarak kamera 40 cm, menggunakan kamera CMOS dengan filter grating 1300 garis/mm, dan perangkat lunak *Theremino Spectrometer V.2.8* resolusi 1280x960/6fps (lihat Gambar 2). Pada waktu yang sama diambil juga gambar nyala api plasma (lihat Gambar 4a-c). Perangkat *spectrometer* sebelum digunakan dilakukan kalibrasi terhadap laser pointer dengan panjang gelombang  $\lambda = 636,87 \pm 0,14$  nm. Gambar emisi spektra hasil pembacaan (seperti contohnya Gambar 3) kemudian diolah menggunakan perangkat lunak *SpectraGryph 1.2*. Intensitas emisi spektra dapat sedikit berbeda pada setiap pengambilan data, kecuali posisi susunan puncak panjang gelombang  $\lambda_{Al}$  dan  $\lambda_{AlO}$  adalah tetap. Sehingga dari 4 kali pengambilan data,

yang ditampilkan pada laporan ini adalah data emisi dengan intensitas dan diferensiasi puncak tertinggi dari panjang gelombang  $\lambda_{Al}$  dan  $\lambda_{AlO}$ . Temperatur puncak api plasma selama proses pembakaran Al dihitung berdasarkan persamaan *Wien* [10]. Panjang gelombang cahaya tertinggi  $\lambda_{max} = b / T$ , yaitu perhitungan antara temperatur absolut *black body* (K) dari emisi spektra pembakaran dan konstanta pergeseran *Wien*  $b = 2,897779$  mm.K.

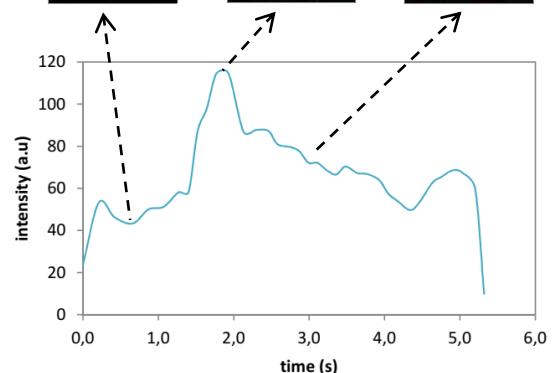
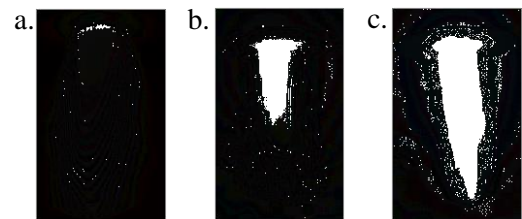
## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Hasil Penelitian

Keberadaan molekul atomik yang terlibat selama reaksi pembakaran akan memberikan sinyal cahaya dengan rentang panjang gelombang tertentu. Proses pembakaran serbuk Al di dalam api plasma udara menimbulkan reaksi pembakaran yang ditandai dengan perubahan intensitas cahaya api terhadap waktu.



Gambar 3. Emisi spektra dari sintesis pembakaran Al ( $\lambda_{Al}$ ) dengan O dan produk pembakaran berupa AlO ( $\lambda_{AlO}$ )



Gambar 4. Bagian atas adalah profil api: a. plasma udara, b. waktu awal injeksi Al setelah 1,25 detik (laju aliran serbuk belum stabil), c. laju aliran injeksi Al stabil selama 2,5 detik. Grafik perubahan intensitas emisi spektra terhadap waktu untuk panjang gelombang  $\lambda = 512,1$  nm selama proses pembakaran Al berlangsung

Karakteristik unsur atau senyawa yang terlibat selama pembakaran Al di udara dapat dipahami melalui perubahan intensitas pancaran emisi spektra yang dijelaskan sebagai berikut.

1. Karakteristik terbakarnya Al terdeteksi berada pada intensitas puncak  $\lambda = 396$  nm (Gambar 3).
2. Terbentuknya produk sintesis AIO ditunjukkan dengan ciri khas susunan intensitas puncak  $\lambda_{AIO}$  masing-masing 471, 489 dan 512 nm.
3. Berdasarkan persamaan *Wien* temperatur absolut *black body* api plasma sebesar 5660 K, yang berasal dari intensitas puncak tertinggi yaitu  $\lambda_{AIO} = 512$  nm.
4. Sebelum serbuk Al diinjeksikan, zona inti api plasma terlihat berwarna putih dan zona permukaan berwarna kekuningan (Gambar 4 a).
5. Kenaikan intensitas emisi cukup signifikan ketika Al mulai diinjeksikan pada 1,25 detik. Bentuk api plasma tidak stabil dan muncul berkas cahaya warna oranye yang juga merupakan produk kondensat  $AIO_{(g)}$  dari terbakarnya serbuk Al (Gambar 4 b).
6. Penurunan secara perlahan intensitas emisi diikuti dengan mulai stabilnya bentuk api plasma. Hal ini menandakan terjadinya dominasi proses reaksi penuh pada fasa uap  $AIO_{(g)}$  berupa Al sub-oksida dan alumina sebelum terkondensasi di area permukaan luar api plasma.

### Pembahasan

Reaksi eksoterm antara Al dengan oksigen O dalam udara menghasilkan produk AIO dengan melepaskan emisi energi yang cukup besar, ditandai dengan emisi spektra dari pancaran cahaya api plasma berupa susunan intensitas puncak tertinggi dari panjang gelombang  $\lambda_{Al}$  dan  $\lambda_{AIO}$ . Gas atomik Al netral membentuk AIO melalui proses reaksi rekombinasi dengan molukel  $O_2$  dan atomik O mengikuti persamaan  $Al_{(g)} + O_2 = AIO + O$ , dan  $Al_{(g)} + O + M = AIO + M$ . Formasi terbentuknya gas  $AIO_{(g)}$  terjadi di atas temperatur didih  $AIO > 3250$  K. Temperatur tinggi 5660 K semakin meningkatkan atomisasi atau homogenitas fasa gas. Pita emisi utama untuk sistem  $AIO_{(g)}$  terjadi pada  $\lambda = 486$  nm, sedangkan untuk Al berada pada  $\lambda = 396$  nm [7].

Dari beberapa rangkuman laporan emisi spektrum dari pembakaran Al terdapat sedikit perbedaan nilai  $\lambda_{Al}$  dan  $\lambda_{AIO}$  (lihat Tabel 1).

Tabel 1. Data perbandingan pembacaan  $\lambda$  (nm) emisi spektra pembakaran Al dan AIO.

$T_{peak}$ (K)	$\lambda_{Al-1}$	$\lambda_{Al-2}$	$\lambda_{AIO-1}$	$\lambda_{AIO-2}$	$\lambda_{AIO-3}$	Ref.
2790	-	396,1	-	484,2	510,2	[8]
1000	-	395,5	471,1	486,3	511,9	[5]
2083	394	396,2	-	484	-	[6]
3995	-	-	-	486	-	[7]
5660	-	396	471	489	512	Eksp.

Beberapa faktor yang mempengaruhi seperti ukuran partikel Al, laju aliran, temperatur pemantik, kadar oksigen, dan temperatur lingkungan. Faktor tersebut dapat mempengaruhi lemah atau kuatnya emisi

spektrum yang dihasilkan saat pembakaran Al. Hasil penelitian yang telah dilakukan cukup mendekati nilai emisinya dengan penelitian Zhou, dkk. [5].

Proses mulainya reaksi pembakaran Al dapat diamati melalui peningkatan intensitas emisi terhadap waktu. Kenaikan emisi diawal pembakaran disebabkan jumlah partikel Al yang terbakar cukup besar saat masuk pertama kali kedalam zona inti api plasma udara sebelum laju aliran serbuk mencapai kestabilan. Laju aliran serbuk yang terlalu cepat akan mengurangi tingkat penguapan dan reaksi lengkap dari partikel Al, sehingga sebagian residu AIO hanya pada permukaan droplet berupa cangkang sedangkan bagian dalam (*core*) masih dominan Al cair. Warna kekuningan menunjukkan keadaan reaksi oksidasi Al yang tidak lengkap sepenuhnya. Pada keadaan setimbang difusi oksigen O semakin meningkat disekitar zona permukaan api plasma. Di daerah ini  $AIO_{(g)}$  terlihat sangat jelas ditandai dengan emisi spektrum cahaya berwarna kebiruan menandakan reaksi oksidasi lengkap terhadap atom Al. Hal ini menandakan adanya korelasi yang cukup kuat antara transisi profil api plasma dari warna putih kekuningan sebelum pembakaran terhadap perubahan nilai intensitas panjang gelombang  $\lambda_{AIO}$ .

### KESIMPULAN

Penelitian emisi spektra pembakaran Al telah berhasil mendefinisikan proses pembakaran Al diatas temperatur titik didihnya didalam api plasma udara. Pembakaran Al diudara menghasilkan produk residu AIO yang dapat diamati proses pembentukannya. Hasil pengukuran emisi spektra ini sejalan dengan beberapa penelitian lainnya. Intensitas tertinggi pada puncak panjang gelombang  $\lambda_{AIO} = 512$  nm menunjukkan keberadaan uap gas  $AIO_{(g)}$  terbentuk dominan pada temperatur 5660 K, dimana temperatur tinggi akan meningkatkan homogenitas atomisasi partikel menjadi uap gas dan menjadi inisiasi penting dimana skala nano partikel AIO mulai terbentuk. Metode pengukuran emisi spektra dari nyala api dapat digunakan sebagai karakterisasi kualitatif terhadap keberadaan unsur atau senyawa yang terlibat dalam berbagai macam proses pembakaran.

### DAFTAR PUSTAKA

- [1] Zolotko, A. N., N. I. Poletaev, and Y. I. Vovchuk, 2015, Gas-disperse synthesis of metal oxide particles, *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, Vol. 51 (2), pp. 252-268.
- [2] Ohkura, Y., P. M. Rao, and X. Zheng, 2011, Flash ignition of Al nanoparticles: Mechanism and applications, *Combustion and Flame*, Vol. 158 (12), pp. 2544-2548.
- [3] Sundaram, D. S., V. Yang, and V. E. Zarko, 2015, Combustion of nano aluminum particles (Review), *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, Vol. 51 (2), pp. 173-196.
- [4] Rochman, H. A., A. G. Dirgantara, I. Sholahuddin, S. Junus, and A. Z. Muttaqin, 2017, Pengaruh Laju Prekursor Serbuk

- Aluminium terhadap Bentuk Morfologi Nanopartikel Alumina dengan Metode Thermal Plasma, *Jurnal ROTOR*, Vol. 10 (1), pp. 17-19.
- [5] Zhou, Y. n., J. Liu, D. Liang, W. Shi, W. Yang, and J. Zhou, 2017, Effect of particle size and oxygen content on ignition and combustion of aluminum particles, *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 30 (6), pp. 1835-1843.
- [6] Lynch, P., G. Fiore, H. Krier, and N. Glumac, 2010, Gas-Phase Reaction in Nanoaluminum Combustion, *Combustion Science and Technology*, Vol. 182 (7), pp. 842-857.
- [7] Lomba, R. *et al.*, 2016, Comparison of Combustion Characteristics of Magnesium and Aluminum Powders, *Combustion Science and Technology*, Vol. 188 (11-12), pp. 1857-1877.
- [8] Feng, Y., Z. Xia, L. Huang, and X. Yan, 2016, Experimental investigation on the combustion characteristics of aluminum in air, *Acta Astronautica*, Vol. 129 pp. 1-7.
- [9] Zhou, Y. *et al.*, 2017, Experimental Study on Dynamic Combustion Characteristics of Aluminum Particles, *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, Vol. 42 (8), pp. 982-992.
- [10] Saparullah, A. Purwanto, R. I. Wisnuwijaya, E. K. Sari, and W. S. B. Dwandaru, 2020, Non-contact temperature measurement based on Wien's displacement law using a single webcam in the infrared spectrum region, *Physics Education*, Vol. 55 (2), pp. 025017.