

Pembangkitan Plasma Dengan Laser Pulsa Daya Tinggi

Mangasi Alion Marpaung

Jurusan Fisika-FMIPA
Universitas Negeri Jakarta
mangasi@unj.ac.id

Abstrak

Dipelajari interaksi antara laser pulsa daya tinggi dengan zat padat logam dan bukan logam). Dalam interksi ini plasma dibangkitkan apabila berkas laser pulsa daya tinggi difokuskan ke permukaan zat padat. Dengan pengukuran spektroskopi cacah waktu dan cacah ruang, mekanisme pembangkitan dan karakteristik plasma dipelajari. Pada awal interkasi, energi laser diserab atom-atom zat padat sehingga material tersebut terablasi dengan kecepatan yang tinggi. Material terablasi tersebut berkompresi dengan gas lingkungan yang menghasilkan gelombang kejut dan melalui gelombang kejut ini atom-atom dalam plasma tereksitasi. Kami menyebut plasma ini sebagai plasma gelombang kejut. Karakteristik plasma yang dibangkitkan secara geometrik berbentuk setengah bola dan apabila dibangkitkan pada lingkungan gas dengan tekanan tinggi (sekitar 1 atm) diameter plasma sekitar 0,5 s/d 1 cm tetapi apabila tekanan gasnya dikurangi diameter plasma akan bertambah dan pada tekanan dibawah 1 Torr diameter plasma dapat mencapai 3 cm. Plasma yang dibangkitkan pada tekanan 1 atm berwarna putih yang sangat terang dengan latar belakang spektrum yang tinggi. Pada tekanan rendah (kurang dari 10 Torr) plasma yang dibangkitkan berwarna dengan spektrum yang tajam yaitu spektrum atomik. Analisis spektroskopik yang telah kami lakukan menunjukkan bahwa dengan plasma gelombang kejut ini analisis spektrokimia bahan dapat dilakukan dengan sensitivitas sampai orde ppm. Keunggulan lain adalah analisis unsur-unsur ringan seperti hidrogen dapat dianalisis sampai orde ppm.

1. Pendahuluan

Laser-plasma berkembang sebagai suatu objek penelitian baik bagi para fisikawan maupun para kimiawan. Banyak fenomena menarik yang diamati pada pembangkitan plasma dengan laser pulsa daya tinggi ini. Dari tinjauan ilmu pengetahuan, laser-plasma merupakan fenomena non-linier pada temperatur tinggi. Pembangkitan plasma pada umumnya adalah fenomena transien dalam orde waktu beberapa mikrosekond yang melibatkan banyak parameter yang mempengaruhi karakteristik plasma. Waktu pembangkitan plasma dengan laser ini dapat dibagi dalam dua regim yaitu selama irradasi dan setelah irradasi. Selama irradasi merupakan proses pembangkitan plasma dan setelah irradasi merupakan proses pendinginan plasma. Dalam proses pendinginan plasma inilah emisi spektrumnya lebih stabil dan emisi latar belakang yang rendah sehingga cocok untuk analisis spektrokimia baik kualitatif maupun kuantitatif.

Pembangkitan plasma dengan laser pulsa daya tinggi ini dibagi dalam dua tipe yaitu pembangkitan plasma dari target zat padat dan pembangkitan plasma dari gas.¹⁻⁴⁾Pembangkitan plasma dari target padat merupakan proses yang kompleks dan tidak ada suatu model yang komprehensif dapat menjelaskan secara lengkap proses

pembangkitannya. Banyak model telah diusulkan tetapi tidak mencakup seluruh parameter yang mempengaruhi proses pembangkitan plasma tersebut. Parameter yang mempengaruhi proses pembangkitan plasma itu antara lain, parameter dari laser itu sendiri yaitu panjang gelombang, energy dan lebar pulsa, parameter dari target dan parameter dari gas lingkungan.^{1,2, 5-6)}

Aplikasi laser-plasma telah dikembangkan untuk berbagai aplikasi diantaranya untuk spektroskopi atomic,⁷⁻¹⁰⁾ analisis spektrokimia¹¹⁻¹²⁾, produksi film tipis¹³⁾ dan plasma-fusi.¹⁴⁾ Tergantung pada aplikasinya maka kondisi percobaannya harus disesuaikan, misalnya untuk pembangkitan laser-plasma fusi diperlukan energy irradasi lebih besar dari 10^{13} Watt/cm² sementara untuk spektroskopi, analisis spektrokimia dan produksi film tipis memerlukan energy yang lebih rendah yaitu sekitar $10^6 - 10^{10}$ Watt/cm². Tabel berikut merupakan beberapa jenis laser pulsa yang tersedia secara komersial dipasaran.

Tabel 1. Jenis laser pulsa dan karakteristiknya

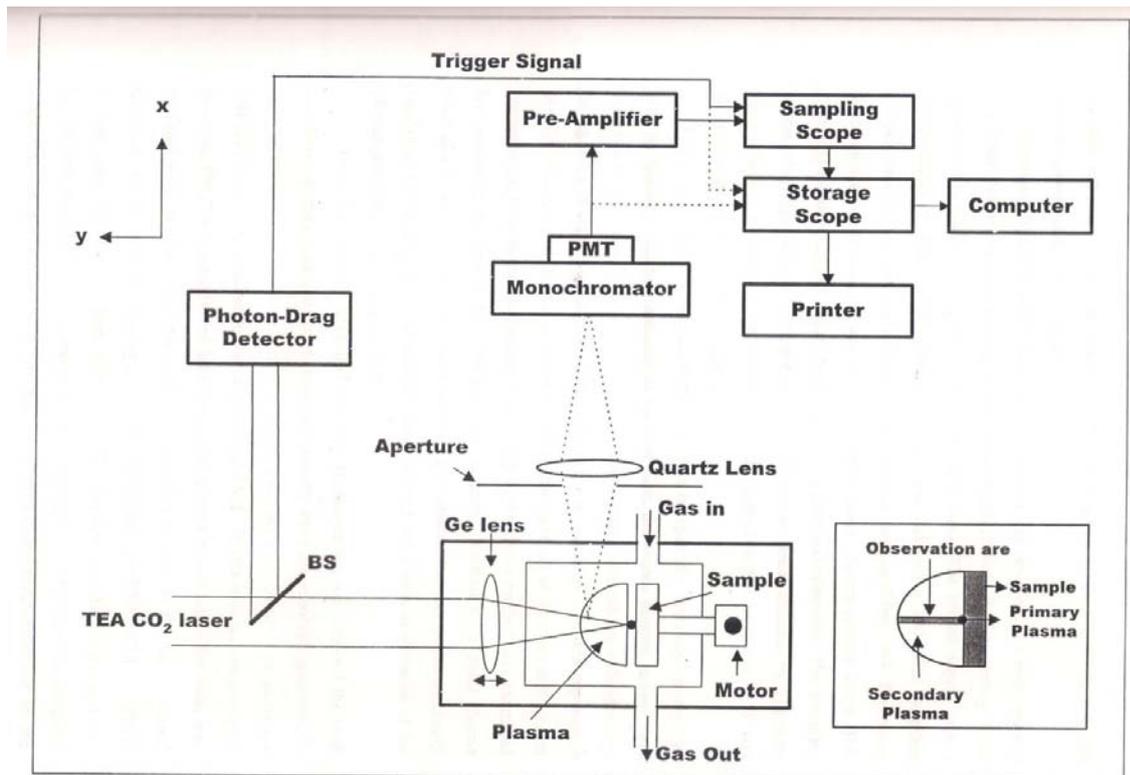
Laser	Panjang gelombang	Lebar pulsa	Energi keluaran/pulsa	Laju repetisi
Free-running ruby laser	694.3 nm	10 μ s – 1 ms	100 mJ – 10 J	0.5 – 10 Hz
Q-switch ruby laser	694.3 nm	10 – 50 ns	50 – 500 mJ	0.5 – 10 Hz
Free-running Nd-YAG laser	1064 nm	10 μ s – 1 ms	100 mJ – 10 J	1 – 20 Hz
Q-switch Nd-YAG laser	1064 nm (fundamental) 532 nm (2 nd harmonic) 266 nm (4 th harmonic)	30 ps – 50 ns	10 – 500 mJ	1 – 20 Hz
TEA-CO ₂ laser	10.6 μ m	100 ns	50 mJ – 10 J	1 – 20 Hz
Excimer laser	193 nm (ArF) 222 nm (KrCl) 248 nm (KrF) 308 nm (XeCl) 351 nm (XeF)	10 – 50 ns	10 – 100 mJ	1 – 100 Hz
N ₂ laser	337 nm	2 – 5 ns	1 – 10 mJ	1 – 10 Hz

Dalam paper ini kami rangkum hasil eksperimen yang telah dilakukan dalam beberapa percobaan menggunakan laser TEA-CO₂, laser Nd-YAG dan laser XeCl. Eksperimen ditujukan untuk mempelajari mekanisme pembangkitan plasma pada lingkungan gas tekanan rendah dan aplikasinya pada analisis kualitatif dan kuantitatif spektrokimia. Percobaan dilakukan di Maju Makmur Mandiri Research Center, jl. Sereningseng raya no 40, Jakarta Barat.

2. Bagan Percobaan

Secara umum bagan percobaan adalah seperti pada gbr 1 dibawah. Berkas laser difokuskan pada permukaan target (padat) melalui sebuah lensa. Target padat ditempatkan dalam tabung logam berukuran 12,5 cm x 10 cm x 10 cm) yang diperlengkapi dengan jendela kaca ZnSe untuk memfokuskan berkas laser dan juga diperlengkapi dengan jendela kaca samping kiri dan kanan untuk pengamatan/perekaman spectrum plasma. Tabung

juga diperlengkapi dengan saluran masuk dan keluar gas dimana tekanan gas dalam tabung diukur dengan digital manometer. Target dan seluruh tabung beserta lensa pemfokus dapat digerakkan dalam dua arah yaitu searah bekas laser dengan step motor dan dengan micrometer sekrup kearah tegak lurus berkas laser. Berkas emisi dari plasma yang dibangkitkan diamati melalui jendela kaca samping dengan monokromator / spectrometer / OMA (optical multichannel Analyzer). Bila menggunakan monokromator maka signal keluaran dari PMT (Photon Multiplier) dikirim ke sampling osiloskop 100 GHz. Sampling osiloskop ditrigger dengan sebagian berkas laser yang diambil dengan pembagi berkas (beam splitter) dan dideteksi dengan photon drag detector. Bila menggunakan spectrometer/OMA maka berkas emisi plasma dikumpulkan dengan fiber optic kemudian dimasukkan ke spectrometer dan keluaran spectrometer/OMA langsung dikirim ke komputer. Spektrometer dan OMA diperlengkapi dengan CCD atau PDA.

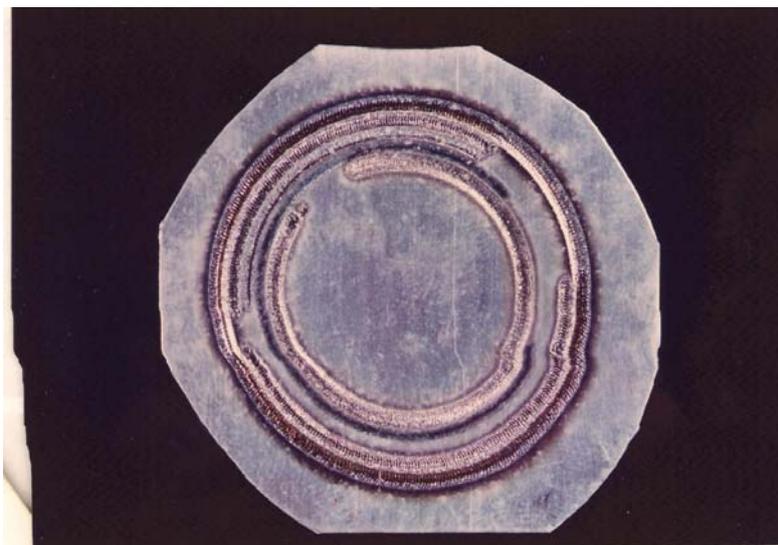


Gambar 1. Diagram percobaan

3. Hasil percobaan

Gambar- 2 menunjukkan bahwa berkas laser mengenai target dan dari target material terablasi. Rata-rata material terablasi dari target dalam orde nano gram per pulsa. Untuk kasus laser TEA-CO₂, untuk target copper (Cu) tidak ada material terablasi walaupun pada tekanan rendah (5 Torr gas He). Tetapi untuk laser Nd-YAG dan XeCl plasma terbentuk walaupun pada tekanan atmosfer. Hal ini

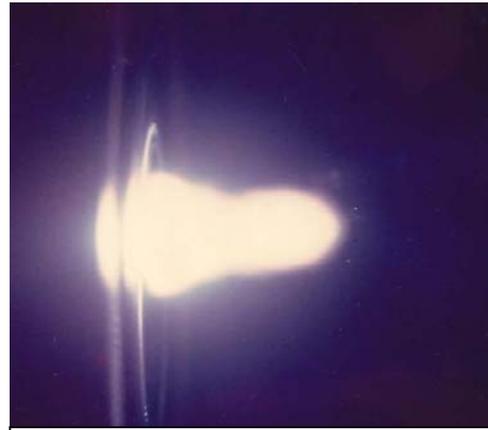
menunjukkan bahwa proses pembangkitan plasma dipengaruhi oleh parameter laser dan target.



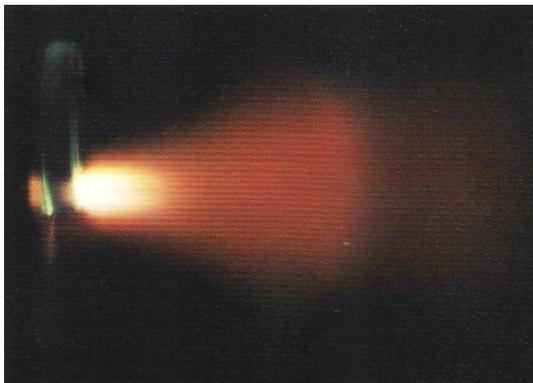
Gambar 2. Salah satu contoh target yang digunakan (Target Zinc) setelah iradiasi dengan laser TEA-CO₂ secara repetisi 5 Hz. Target berputar.¹⁵⁾



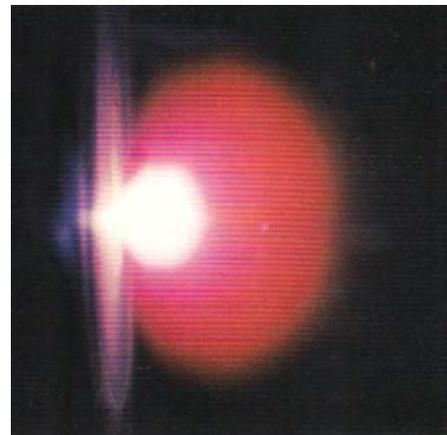
Plasma dari target Zinc pada 0,5 Torr udara dengan laser TEA-CO2



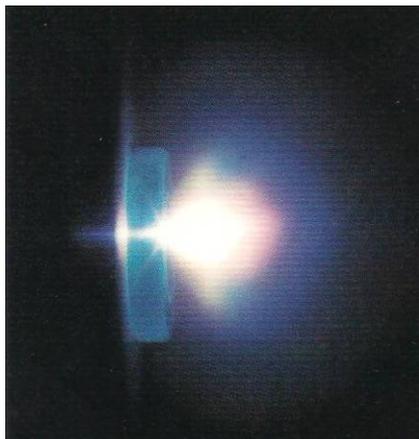
Plasma dari target Zinc pada 1 atm udara dengan laser TEA-CO2



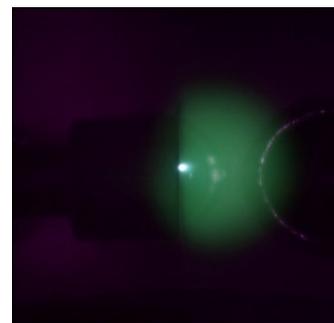
Plasma dari target kaca phosphor (titik leleh rendah) pada 5 Torr udara dengan laser TEA-CO2



Plasma dari target kaca silicon (titik leleh tinggi) pada 5 Torr udara dengan laser TEA-CO2



Plasma dari target kaca phosphor (titik leleh rendah) pada 5 Torr udara dengan laser XeCl

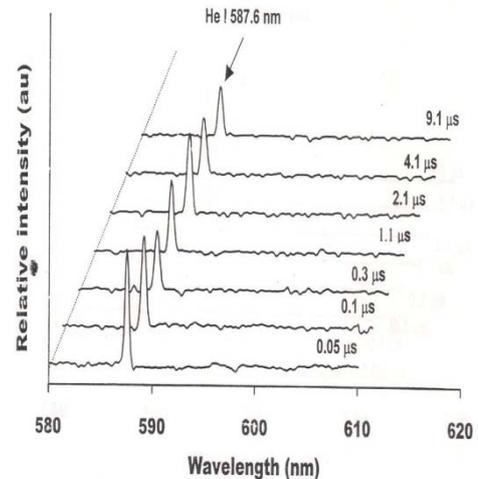
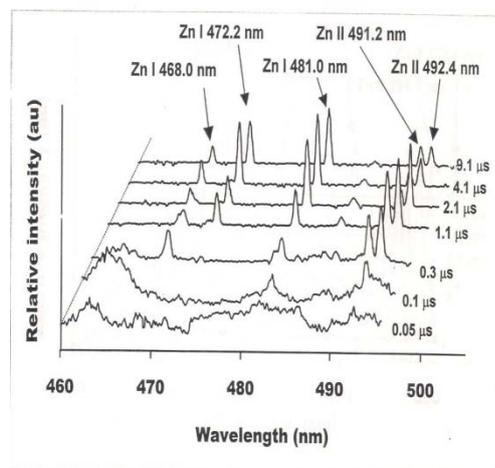


Plasma dari target copper pada 1 Torr He dengan laser Nd_YAG

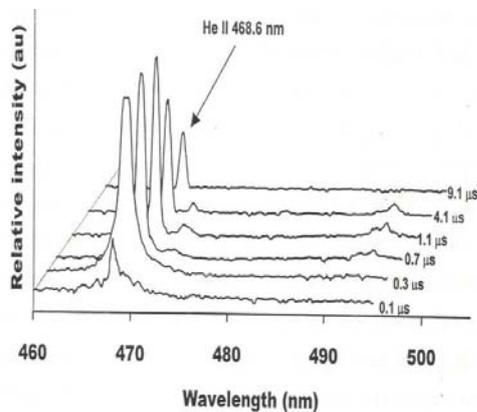
Gambar 3. Foto plasma dari target logam dan bukan logam dengan irradiasi laser TEA-CO2, laser XeCl dan laser Nd-YAG¹⁵⁻¹⁷⁾

Gambar 3 merupakan hasil pemotretan plasma yang dibangkitkan dari target logam dan bukan logam dengan laser TEA-CO₂, laser XeCl dan laser Nd-YAG. Pada kasus TEA-CO₂, saat membangkitkan plasma dari target padat bukan logam dengan titik leleh rendah plasmanya tidak berbentuk setengah bola seperti yang lainnya tetapi agak berbentuk kerucut sementara untuk kasus laser XeCl dan Nd-YAG plasma yang dibangkitkan selalu berbentuk setengah bola. Hal ini menunjukkan pengaruh panjang gelombang laser dan lebar pulsa sangat mempengaruhi bentuk plasma yang dihasilkan. Makin pendek lebar pulsa laser makin baik bentuk plasma yang

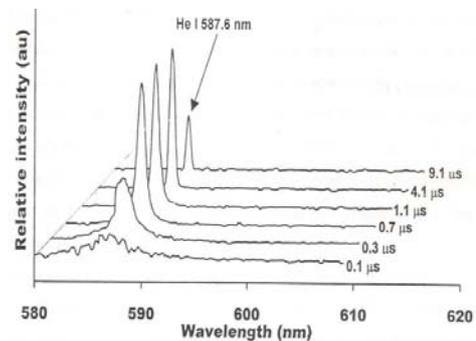
dibangkitkan (setengah bola). Warna plasma yang muncul tergantung pada jenis unsur kandungan target. Pada target Zinc, warna magenta berasal dari emisi Zinc 481.0 nm dan pada target copper warna hijau berasal dari emisi Cu 515.3 nm. Selain itu tekanan gas dan jenis gas lingkungan juga sangat berpengaruh. Pada tekanan rendah (kurang dari 10 Torr) bentuk plasma adalah setengah bola dan plasmanya berwarna sesuai emisi unsur dalam target. Pada tekanan 1 atm hampir semua plasma tidak berbentuk setengah bola dan tidak kelihatan warnanya walaupun kalau direkam spektrumnya warna emisi unsur kandungan target ada.



a



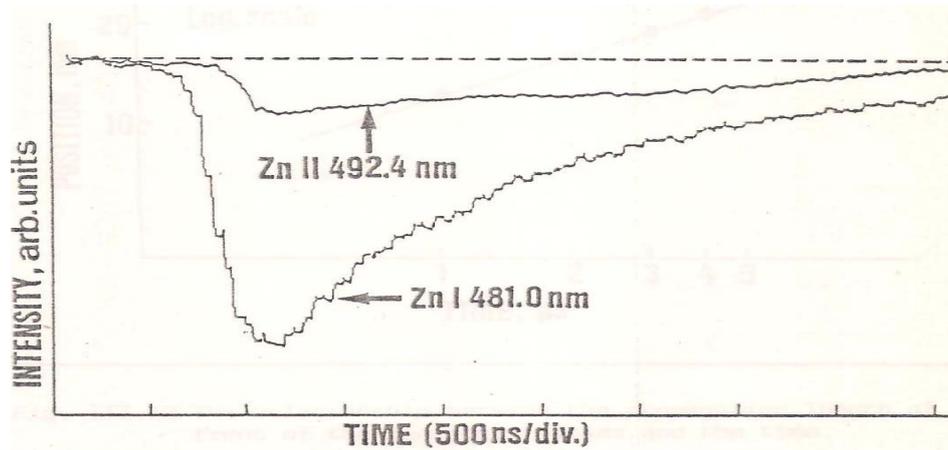
b



Gambar 4. Spektrum terintegrasi ruang cacah waktu dari plasma target zinc pada lingkungan gas He yang dibangkitkan dengan laser TEA-CO₂. a. 10 Torr dan b. 300 Torr¹⁶⁾

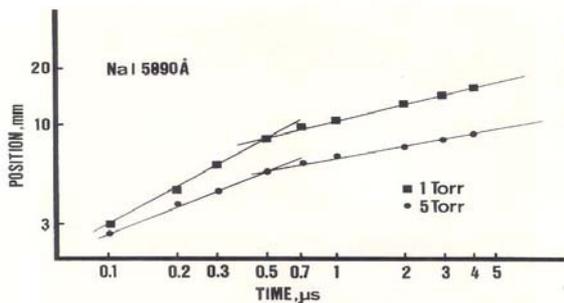
Dari gambar 4, hal yang terbedakan dengan jelas adalah bahwa pada tekanan 10 Torr emisi target yaitu emisi Zn I 481.0 nm teramati dengan jelas tetapi pada tekanan 300 Torr emisi target tidak muncul hal ini menunjukkan bahwa plasma target terbentuk pada tekanan rendah dan hal ini masih teramati sampai 100 Torr. Pada tekanan 300 Torr terbentuk plasma gas dalam hal ini gas He. Dengan menggunakan teknik spektroskopi cacah waktu

teramati bahwa pada awal interaksi hanya emisi kontinu yang teramati sampai 0,1 μs sementara emisi atom target baru muncul pada saat 0,3 μs dan berkembang sampai 4,1 μs dan kemudian menurun sampai 9,1 μs. Juga dapat direkam emisi dari He. Hal ini menunjukkan bahwa plasma yang terbentuk tidak hanya dari target tetapi juga dari gas lingkungan.



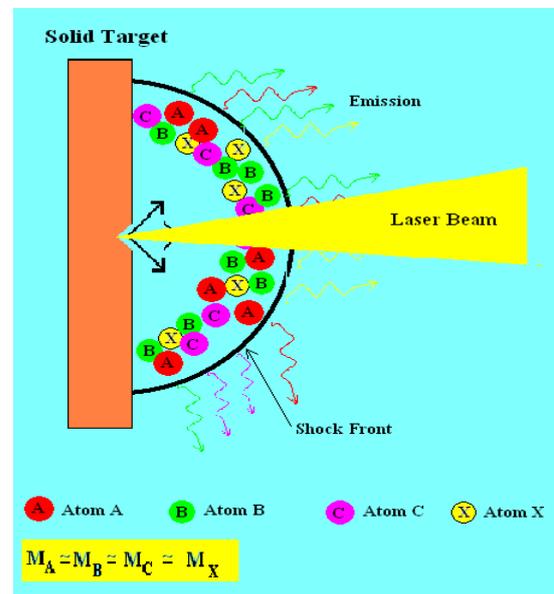
Gambar 5. Profil waktu dari emisi ionic Zn II 492.4 nm dan emisi atom netral Zn I 481.0 nm dengan target zinc pada lingkungan gas He 10 Torr dengan laser TEA-CO₂¹⁵⁾

Dari gambar 5 jelas terdapat bahwa emisi ionic datang setelah emisi atom netral dan meluruh secara eksponensial terhadap waktu. Hal ini menunjukkan bahwa eksitasi atom dalam plasma bukan karena termal ataupun breakdown tetapi karena fenomena gelombang kejut¹⁹⁾.



Gambar 6. Pergerakan dari muka plasma terhadap waktu dengan target kaca silica dan laser XeCl¹⁷⁾

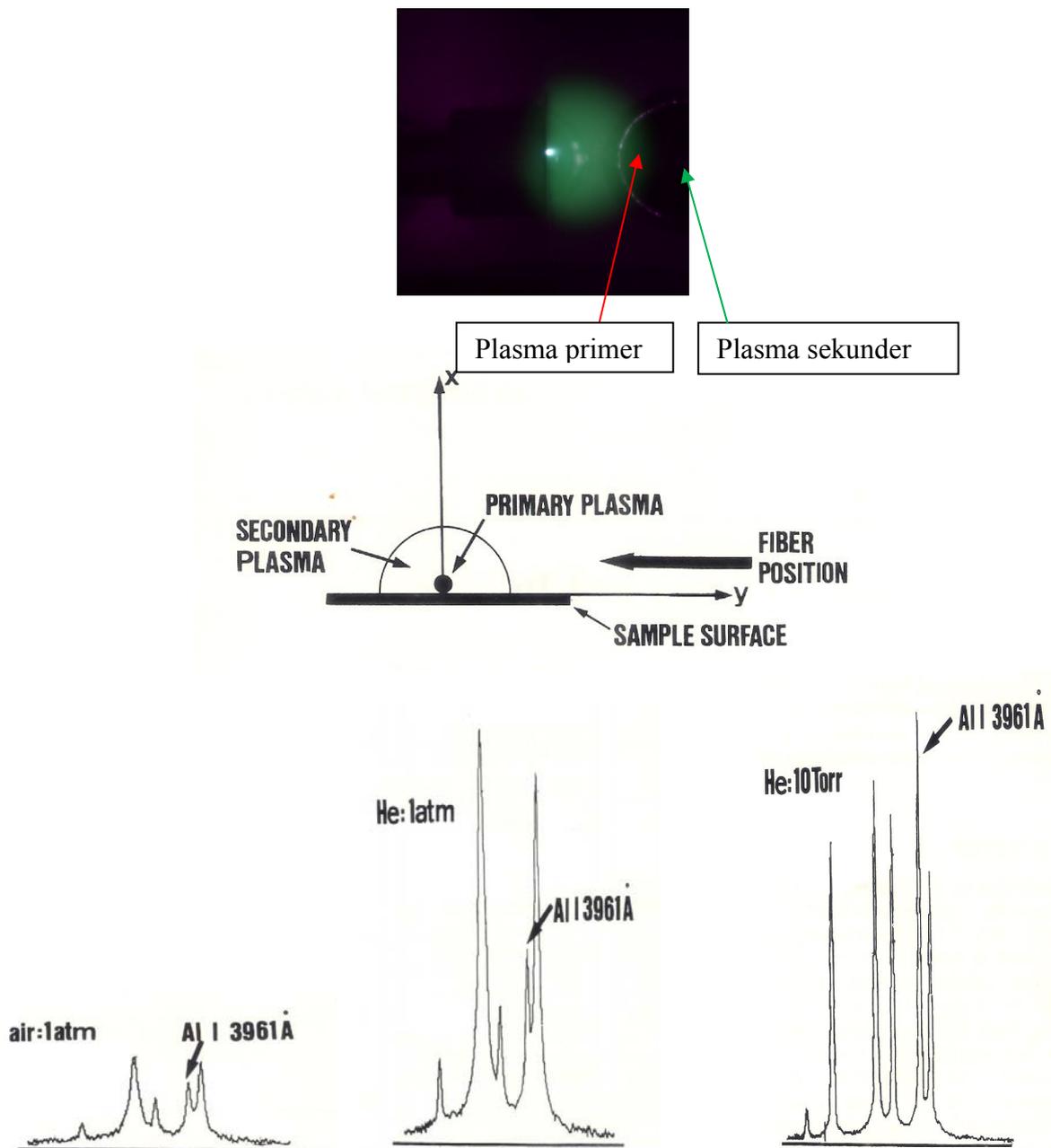
Gambar 6 menunjukkan bagaimana muka plasma bergerak terhadap waktu. Dari gambar ini diperoleh persamaan gerak muka plasma yaitu $r \sim t^{0.4}$. Untuk perambatan gelombang kejut memenuhi persamaan: $r = \left(\frac{E_0}{\alpha \rho}\right)^{0.2} t^{0.4}$. Hal ini menunjukkan bahwa mekanisme pembangkitan plasma dalam interaksi antara laser pulsa daya tinggi dengan target padat memenuhi fenomena gelombang kejut. Dalam beberapa percobaan yang lain dengan laser Nd YAG dan target padat logam dan non logam memiliki trend yang sama. Hal ini mengarahkan bahwa mekanisme pembangkitan plasma itu mengikuti fenomena gelombang kejut. Adapun model pembangkitan plasma gelombang kejut tersebut dapat diilustrasikan sebagai berikut:



Gambar 7. Model pembangkitan laser-plasma dengan gelombang kejut

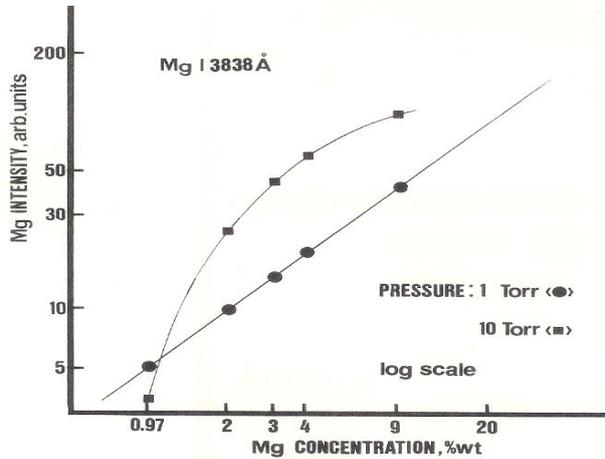
Saat target menyerap energy laser dalam waktu yang sangat singkat (orde ns) material-material (partikel) dari permukaan target terablabasi dengan kecepatan yang tinggi kemudian berkompresi dengan gas sekitar. Hal ini yang menghasilkan gelombang kejut. Hasil kompresi pada awalnya menghasilkan temperature tinggi kemudian mengalami pendinginan dan kelajuan perambatan gelombang kejut menurun. Pada saat awal kompresi atom atom terksitasi ataupun terionisasi. Emisi atom akan teramat sangat tajam saat mulai pendinginan. Pada awal interaksi emisi yang teramat adalah emisi kontinu dan plasmanya disebut lasma primer. Dari plasma primer inilah mengembang terhadap waktu ukuran plasmanya pada saat atom atom mengalami eksitasi/ionisasi. Plasma ini disebut plasma sekunder. Untuk analisis spektrokimia paling tepat merekam spectrum pada plasma sekunder ini karena bebas emisi latar belakang.

Aplikasi untuk analisis spektro kimia



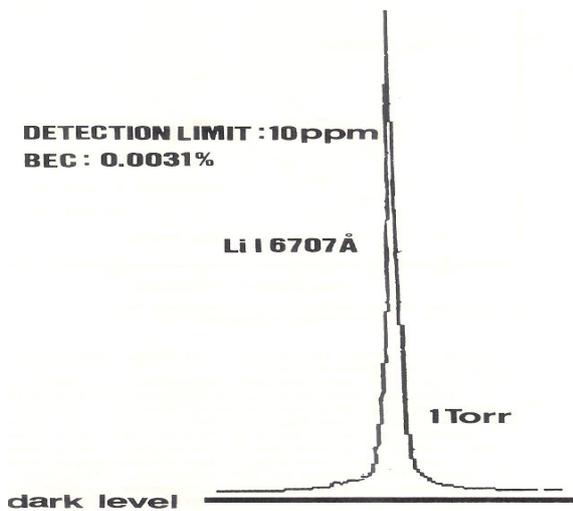
Gambar 8. Spektrum emisi dari plasma kaca Si yang berisi 3,36 % Ca, 4,26 % Al, 0,07 % Mg, 1,07 % F, 68,4 % Si dan unsur lain¹⁷⁾

Dari gambar 8 di atas jelas terlihat bahwa untuk analisis spektrokimia akan lebih baik apabila gas lingkungan adalah He pada tekanan rendah (<10 Torr). Pada tekanan 10 Torr spectrum yang dihasilkan sangat tajam dengan emisi latar belakang yang rendah dibandingkan pada He 1 atm apalagi pada udara 1 atm.

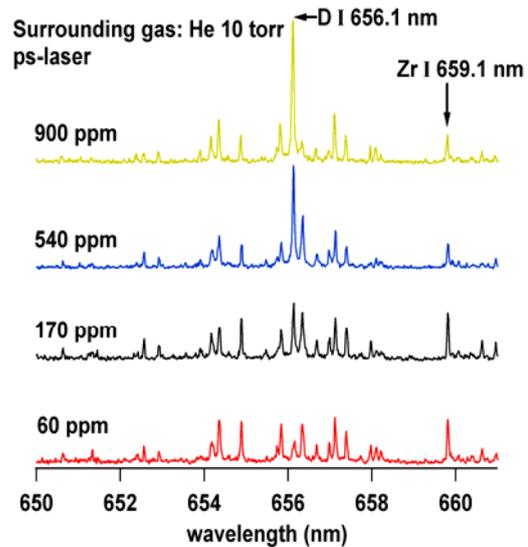


Gambar 9. Kurva kalibrasi untuk analisis kuantitatif. Data diambil dari berbagai kaca yang mengandung Mg dengan konsentrasi yang berbeda dengan menggunakan laser XeCl¹⁷⁾

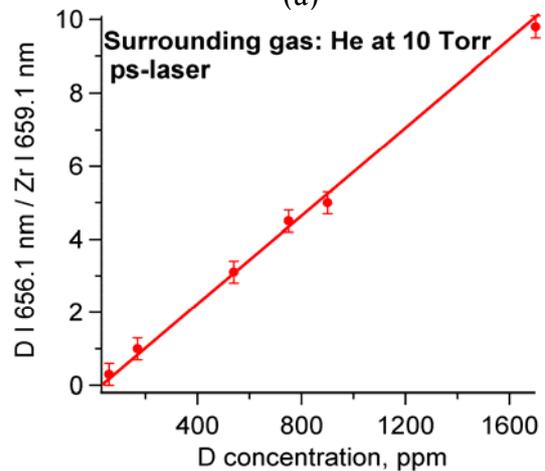
Pada gambar 9 terlihat bahwa pada tekanan gas He 1 Torr kurva kalibrasi yang linier dapat diperoleh tetapi pada tekanan gas He 10 Torr kurva kalibrasinya tidak linier. Pada tekanan yang tinggi kerapatan plasma juga tinggi sehingga terjadi absorpsi diri pada plasma. Untuk analisis kuantitatif diperlukan kurva kalibrasi yang linier. Pada tekanan rendah juga diperoleh emisi latar belakang yang rendah hal ini akan meningkatkan sensitivitas pengukuran. Seperti pada gambar 10 limit deteksi dapat dicapai sampai 10 ppm karena emisi latar belakangnya sangat rendah.



Gambar 10. Profil emisi Li I 670.7 nm¹⁷⁾



(a)



(b)

Gambar 11. a. Spektrum emisi dan b. kurva kalibrasi. Data diambil dari target zircaloy-4 yang mengandung konsentrasi deuterium yang berbeda pada gas He 10 Torr dengan laser Nd-YAG picoseconds. Spektrum direkam dengan OMA dengan delay waktu 10 ns dan integrasi waktu 50 μ s¹⁸⁾

Salah satu keunggulan laser plasma ini untuk analisis spektrokimia adalah baik unsur berat maupun unsur ringan dapat dideteksi. Pada umumnya dengan analisis spektrokimia yang lain (mis AAS) unsure ringan seperti hydrogen sangat sulit dideteksi. Pada tekanan 1 atm baik dilingkungan gas He kurva kalibrasi yang linier sangat sulitdiperoleh. Pada percobaan dengan tekanan gas He yang rendah (10 Torr) kurva kalibrasi untuk deuterium dapat diperoleh seperti ditunjukkan pada gambar 11. Hal inilah keunggulan dari plasma –laser tekanan rendah.

4. Kesimpulan

1. Plasma dengan temperatur yang tinggi dan setengah bola akan dibangkitkan ketika laser pulsa daya tinggi difokuskan ke permukaan target padat pada tekanan gas sekitar yang rendah
2. Karakteristik plasma tergantung pada kualitas laser, jenis dan tekanan gas sekitar dan jenis target yang digunakan
3. Plasma terdiri dari dua daerah yaitu plasma primer dan plasma sekunder. Plasma primer merupakan bagian kecil tepat dipermukaan target yang mengemisikan spektrum kontinu dalam waktu yang singkat. Plasma sekunder mengembang dari plasma primer dengan mengemisikan spectrum atom yang tajam dengan emisi latar belakang yang rendah
4. Plasma sekunder mengembang terhadap waktu mengikuti pengembangan gelombang kejut dengan plasma primer berfungsi sebagai sumber ledakan
5. Eksitasi atom terjadi pada plasma sekunder
6. Plasma sekunder ini sangat cocok untuk analisis spektrokimia baik unsur berat maupun unsur ringan dengan batas deteksi sampai orde ppm

Daftar Pustaka

1. J.F. Ready: *Effects of High Power Laser Radiation*; Academic Press, New York, 1971
2. T.P. Hughes: *Plasmas and Laser Light*, Adam Hilger, Bristol, 1975
3. D.A. Cremers, L.J. Radziemski: *Laser Plasmas for Chemical Analysis*, in *Laser Spectroscopy and Its Application*, Radziemski L.J., Solarz R.W and Paisner J.A., eds, Marcel Dekker, New York 1979 Chapter 5
4. G. M. Weyl : *Physics of Laser-Induced Breakdown*, An Update, in *Laser-Induced Plasma and Application* Radziemski L.J., Cremers D.A. eds, Marcel Dekker, New York, 1989, Chapter 1
5. A. L. Lewis, G.J. Beenen, J.W. Hasck and E.H. Piepmeier: *A Laser Microprobe System for Controlled Atmosphere, Time and Spatially Resolve Fluorescence Studies of Analytical Laser Plumes*; *Appl. Spectrosc.*, 37 (1983) p. 263
6. Yasuo Iida: *Effect of Atmosphere on Laser Vaporization and Excitation Process of Solid Samples*; *Spectrochim. Acta*, 45B(1990) p. 1353
7. W. Sdorra, A. Quentmeier and K. Niemax: *Measurement of Atomic Fine Structure Collision Transfer Cross Section in Laser Produced Vapors*; *J. Phys.D: Atoms, Molecules and Clusters*, 13 (1989) p. 95
8. T. L. Thiem, Y.I. Lee and J. Sneddon: *Laser in Atomic Spectroscopy: Selected Application*; *Microchemical Journal*, 45 (1992) p.1
9. W. Pietsch, A. Petit and A. Briand: *Isotope Ratio Determination of Uranium by Optical Emission Spectroscopy on Laser-Produced Plasma: Basics Investigation and Analytical Results*; *Spectrochim. Acta B* 53 (1998) p. 751
10. K. Song, H. Cha, J. Lee and Y.I. Lee: *Investigation of the Line Broadening Mechanism for Laser-Induced Copper Plasma by Time Resolve Laser-Induced Breakdown Spectroscopy*; *Microchemical Journal*, 63 (1999) p. 53
11. D.A. Cremers, L.J. Radziemski and T.L. Loree: *Spectrochemical Analysis of Liquids Using The Laser Spark*; *Appl. Spectrosc.*, 38 (1984) p. 721
12. H. Kurniawan, N. Ikeda, T. Kobayashi and K. Kagawa: *Emission Spectrochemical Analysis of Halogen Atoms Using Shock Wave Plasma Induced by A TEA CO2 Laser*; *J. Spectrosc. Soc. Japan*, 41 (1992) p. 21
13. D. B. Geohegan: *Diagnostics and Characteristics of Pulsed Laser Deposition Laser Plasmas*, in *Pulsed Laser Deposition of Thin Film*; D.B. Chrisey and G. K. Hubler, Eds, John Wiley & Sons, New York, 1994
14. R. L. McCrory and J. Soares: *Inertially Confined Fusion*, in *Laser-Induced Plasmas and Applications*; Radziemski L.J. and Cremers D.A., Eds, Marcel Dekker, New York, 1989
15. Hendrik Kurniawan: *The TEA CO2 Laser Induced Shock Wave Plasma and Its Application To Spectrochemical Analysis*, PhD Dissertation, Universitas Indonesia, Fakultas Pasca Sarjana, Jurusan Opto Elektro-Teknik dan Aplikasi Laser, 1992
16. Mangasi Alion Marpaung: *The Dynamical Processes of Laser-Induced Shock Wave Plasma Generation at Various Surrounding Gas Pressures*; PhD Dissertation, Universitas Indonesia, Program Pasca Sarjana Opto Elektro-Teknik dan Aplikasi Laser, Fakultas Teknik, 2000
17. H. Kurniawan, S. Nakajima, J.E. Batubara, M.A. Marpaung, M. Okamoto, and K. Kagawa: *Laser Induced Shock Wave Plasma in Glass and Its Application to Elemental Analysis*, *Appl. Spectrosc.*, 49 (1995) 1067
18. Alion Mangasi Marpaung, Marincan Pardede, K. Kagawa and May On Tjia : *Deuterium Analysis In Zircaloy Using PS Laser-Induced Low Pressure Plasma*, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 6 (2011) 110