

PEMODELAN UNTUK ANALISIS DATA PENCACAHAN DAN PENENTUAN DIAMETER PARTIKEL BAHAN BAKAR SFERIS BERBASIS PEREDUPAN LASER

Suwardi

Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir - BATAN
Kawasan Puspiptek Serpong, Tangerang
e-mail: suwardi@yahoo.com
(Diterima 26-10-2010, disetujui 5-11-2010)

ABSTRAK

PEMODELAN UNTUK ANALISIS DATA PENCACAHAN DAN PENENTUAN DIAMETER PARTIKEL BAHAN BAKAR SFERIS BERBASIS PEREDUPAN LASER. BATAN telah mengembangkan fabrikasi partikel sferis untuk pembuatan elemen bakar reaktor maju. Untuk mencapai reliabilitas tinggi elemen bakar, dalam produksinya fraksi partikel cacat pada elemen bakar berbasis partikel berpengungkung TRISO perlu diturunkan. Salah satu upaya adalah dengan sistem pemisah yang berbasis pencirian partikel total dan menyatu dalam proses produksi. Dalam makalah ini disajikan pemodelan analisis data pada alat pencacahan dan penentuan ukuran partikel bahan bakar. Alat masih dalam tahap rekayasa atas biaya program riset insentif peningkatan kapasitas produksi Kementerian Riset dan Teknologi. Prinsip kerja alat ini adalah pada salah satu titik dalam rangkaian proses produksi ditambahkan sistem transpor untuk mengalirkan satu demi satu partikel melalui sel pengamatan dan melewati berkas laser amat tipis melintang lintasan partikel. Berkas laser yang terganggu partikel dimonitor oleh detektor cahaya, dan sinyal terdeteksi dianalisis oleh komputer melalui perantara akuisisi data dengan kemampuan 5 juta data per detik. Perubahan sinyal ini direkonstruksi dengan tiga model penentuan diameter dan penentuan kejadian pencacahan, sehingga dapat diperoleh data cacah dan diameter dengan model minima, model kuadrat dan model integral. Kalibrasi dilakukan dengan hasil evaluasi dengan perbandingan terhadap partikel yang dilakukan penentuan diameter secara pencitraan optik dan evaluasi dengan program analisis citra. Metode kuadrat tampak sedikit lebih baik daripada metode minima. Tipikal ukuran partikel adalah 300-1000 μm dengan kesalahan hitungan kurang dari 0,075%. Alat ini dapat dipasangkan terintegrasi pada rantai produksi, misalnya pada titik kernel keluar dari proses kalsinasi.

KATA KUNCI: laser garis, deteksi cahaya, pencacahan, model diameter, partikel sferis

ABSTRACT

MODELLING FOR ANALYZING COUNTING DATA AND DETERMINATION OF FUEL SPHERICAL PARTICLE DIAMETER BASED ON LASER OBSCURATION.

BATAN has already developed fabrication of spherical particles for producing fuel elements for advanced reactors. To achieve high reliability of fuel element, during production fraction of defect particles in the TRISO coated particles within fuel element must be reduced. One of the efforts is to use window system that is based on imaging total particles and is integrated into the production process. In this paper, modeling of data analysis for the counting equipment and determination of the fuel particle size is presented. The equipment is currently at engineering phase with the fund from the incentive research program on the increasing production capacities from the Ministry of Research and Technology. The working principle of the equipment is a transport system that is added at one point in the fuel production line to allow the particles to pass one at a time through a perception cell and a very thin laser beam perpendicular to the particle path. Laser beam obscured by the passing particle is monitored by a photodetector, and the detected signal is analyzed by computer via fast data acquisition with a capability of 5 million data per second. The change in signal is reconstructed by three models of diameter and count event determinations to obtain count and diameter data with minima, square and integral modes. The calibration is conducted on the evaluation results by comparison with the reference particle whose diameter is determined by optical image and evaluation with image analysis program. The square method appears to be slightly better than the minima method. The typical particle size ranges from 300 – 1000 μm with counting error of less than 0.075%. The equipment can be integrated on the production line, for example, at the point where the kernel leaves the calcination process.

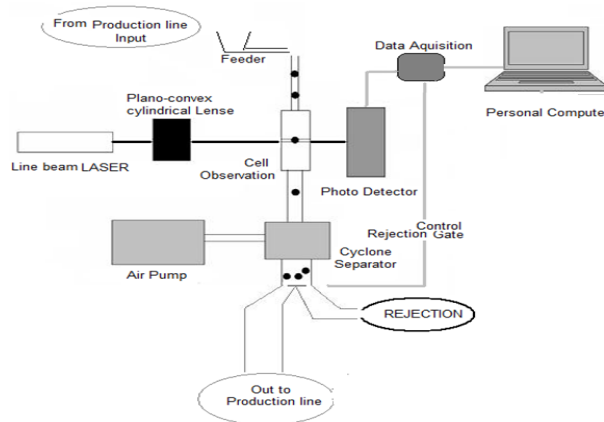
FREE TERMS: line laser, obscuration, counting, diameter model, spherical particle

I. PENDAHULUAN

Reaktor nuklir temperatur tinggi (*High Temperature Reactor*, HTR) melibatkan pemanasan fluida pendingin pada suhu di atas 700 °C, dan dapat mencapai 900 °C. Sedangkan reaktor temperatur amat tinggi (*Very High Temperature Reactor*, VHTR) melibatkan pemanasan fluida pendingin pada suhu di atas 950 °C. Fluida yang menjadi lebih panas dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan tenaga listrik atau digunakan sebagai utilitas energi panas proses. Reaktor ini memiliki keunggulan dalam hal keselamatan, efisiensi energi dan pengelolaan bahan bakar bekas dibanding PLTN yang beroperasi saat ini.

Berbagai variasi dan perkembangan teknologi HTR dan VHTR semua dirancang menggunakan jenis bahan bakar yang berbasis partikel sferis berlapis ganda pengungkung isotropis (BISO, TRISO, QUADRISO berturut-turut untuk 2, 3, dan 4 lapisan). Secara garis besar, ada dua bentuk elemen bakar, yaitu bentuk bola (*pebble*) dan bentuk silindris yang dimasukkan pada blok grafit bentuk prisma. Di dalam teras reaktor jenis elemen bakar *pebble* bergerak dan secara kontinyu dapat diganti dengan yang baru tanpa harus menghentikan operasi reaktor, sedangkan elemen bakar blok prismatic adalah statis. Partikel sferis dengan pengungkung multi lapis ini merupakan basis utama kehandalan HTR dan VHTR.

Elemen bakar bentuk sferis atau *pebble* maupun bentuk silinder terbuat dari sepuluh ribuan partikel sferis berlapis pengungkung isotropis dengan matriks grafit. Partikel dasar ini berlapis 3 macam pengungkung untuk memerangkap radioaktivitas produk fisi. Jenis reaktor nuklir ini adalah dari generasi 4, yang dioperasikan pada suhu gas sekitar 900 °C dan bisa menghasilkan 30% lebih banyak energi, dan juga lebih maju 2 generasi dibandingkan reaktor berpendingin air yaitu generasi 2 yang sekarang merupakan mayoritas PLTN. Lapisan pengungkung berfungsi sebagai pencegah pelepasan hasil pembelahan-inti ke luar TRISO masuk ke dalam matriks grafit di dalam kelongsong elemen bakar bila terjadi kecelakaan reaktor^[1]. Sferisitas kernel berlapis dan kernel multi lapis perlu dikontrol karena sangat berpengaruh pada sifat kimiawi permukaan dan sifat mekanik partikel^[2]. Terkait dengan keseragaman distribusi kerapatan dan keseragaman cacat kristal, penyebaran beban mekanik lebih merata ke dalam bagian partikel seluruhnya, atau ke semua bagian lapisan pengungkung. Oleh karena ukuran / diameter menentukan sifat neutronik partikel dalam elemen bakar, maka ukuran partikel perlu dikontrol^[3]. Pada Gambar 1 disajikan diagram sederhana alat pencacah dan pengukur diameter untuk bahan sferis yang dilengkapi dengan sistem pemilah.



Gambar 1. Diagram sederhana alat pencacah dan pengukur diameter partikel bahan bakar sferis, bila dilengkapi sistem pemilah.

II. TATA KERJA

Pemodelan dilakukan dengan mempelajari berbagai metode pencacahan dan penentuan partikel sferis dari bahan bakar. Pemodelan sinyal laser tereduksi menggunakan bola yang dialirkan melewati bagian pengamatan yang di dalamnya terdapat berkas laser berbentuk pita tipis. Ukuran partikel diperkirakan dengan beberapa metode yaitu metode minima, kuadrat dan integral. Adanya keterbatasan kuantisasi ADC dapat menyebabkan kesalahan (*error*). Kesalahan di dalam metode puncak dipelajari dengan cara simulasi. Efek penyimpangan dan *laser drift* untuk intensitas cahaya dapat dituangkan dengan dua titik. Untuk mengetahui hasil pengukuran, dilakukan simulasi menggunakan bola baja tahan karat diameter 1000 μm .

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

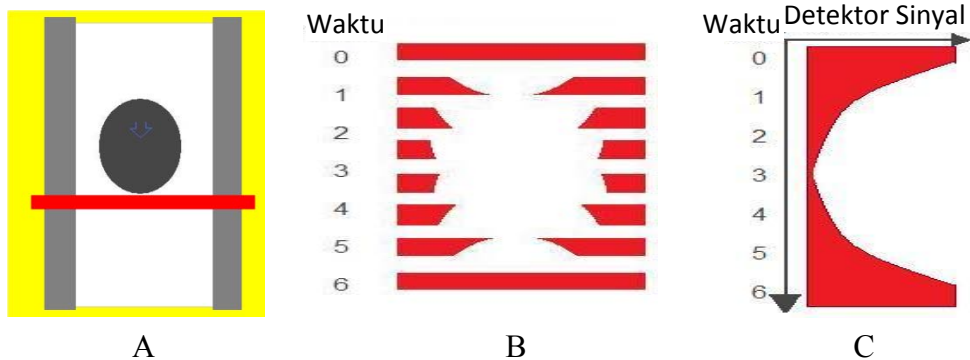
3.1. Metode Pencacahan dan Penentuan Ukuran

3.1.1. Prinsip kerja perangkat keras

Prinsip pengambilan cahaya laser tereduksi oleh sampel tak tembus pandang (*opaque*) yang memotong berkas cahaya dijelaskan dengan diagram sederhana pada Gambar 2 dengan keterangan berikut:

- Gambar potongan melintang sebutir partikel sferis sedang berada dalam bagian ruang pengamatan dinding tembus laser, arah lintasan partikel vertikal, partikel hampir melintas dan memotong berkas laser diam.
- Uji petik urut waktu teratur tapak berkas laser tertangkap pada permukaan detektor cahaya menjelang terpotong, selama dan setelah terganggu oleh partikel *opaque* yang melintas.

c) Kurva kuat sinyal detektor cahaya sebelum, selama dan setelah partikel melintas berkas.



Gambar 2. Prinsip sistem pencacah dan pengukur geometri partikel berdasarkan peredupan laser.

Untuk penerapan dalam sistem produksi, dapat dilakukan langkah-langkah berikut. Dari suatu keluaran unit produksi partikel sferis ditambahkan unit pencacah penentu ukuran satu per satu, diperiksa dengan sistem optik pencacah penentu ukuran berdasarkan peredupan laser, keluar dari alat kembali ke titik keluaran unit produksi.

Alat pencacah dan penentu ukuran partikel merupakan salah satu pengembangan teknologi yang diperlukan untuk pengembangan elemen bakar nuklir. Sebuah survei peralatan komersial menemukan bahwa alat yang telah tersedia memiliki kekurangan pada resolusi dan ketelitian. Oleh karena itu, pilihannya adalah mengembangkan instrumen ini untuk partikel berdiameter antara 300 μm dan 1000 μm dengan tidak merusak. Ketelitian hitungan dan kecepatan tinggi adalah yang diinginkan, dengan satu target menghitung satu *batch* besar dari 1.000.000 selama waktu kira-kira 2 jam dengan kesalahan mendekati 1 setiap 1000 partikel terhitung.

Berbasis pada metode yang digunakan oleh Wallisch dan Koss^[3], digunakan satu konsep penghalang cahaya dimana satu cahaya melewati celah (yang manapun, baik satu tingkap atau satu berkas fokus) adalah ditahan lewat oleh satu partikel. Diasumsikan bahwa celah adalah kecil sehingga hanya terdapat satu partikel tunggal dalam celah di setiap waktu. Pengembangan lain pada saat ini dalam mengukur partikel bulat adalah menampilkan fotografi mikro digital^[4] dan kombinasi ultrasonik, optik dan magnetik^[5].

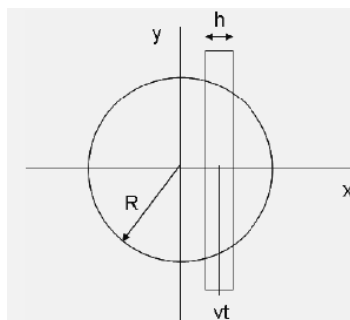
Alat pencacah pengukur partikel terdiri dari satu sistem optik dimana proyek cahaya melalui satu target pengangkutan sel dan mengumpulkan cahaya di atas suatu penerima foto (Gambar 2). Sinyal dari penerima foto melakukan

digitasi oleh satu unit ADC kecepatan tinggi dan proses di dalam waktu nyata (*real time*). Kejadian dihitung dan setiap peristiwa diteliti untuk memperkirakan ukuran dari partikel. Partikel ditarik melalui satu ruang hampa melalui satu bagian kecil dari tabung *tygon*, ditembak laser melalui sel target terpasang dengan satu jendela optik, dan dikumpulkan dengan satu pemisah *cyclonic*.

3.1.2. Pemodelan sinyal teredupkan

Bola yang akan dikarakterisasi dialirkan melintas bagian pengamatan di mana suatu berkas laser bentuk pita tipis (tebal $30\ \mu\text{m}$) bertampang lintang garis melalui celah pada dinding bagian pengamat dan diterima oleh sensor detektor laser. Bidang berkas laser tegak lurus aliran atau lintasan bola. Sebelum ada bola melintas, cahaya yang diterima sensor menghasilkan satu sinyal yang kuat, dan selama bola melintas dan mengganggu – menghalangi sebagian dari berkas laser hingga mulai menyusutkan sinyal detektor ketika bola mulai masuk sel dan menghalangi berkas laser. Semakin penghalangan mendekati tengah bola, peredupan sinyal laser yang diterima detektor meningkat atau semakin menurun berkas laser diterima detektor, kemudian laser yang diterima akan kembali membesar / meningkat ketika penghalangan telah melewati tengah bola, hingga kembali ke besaran tanpa peredupan bola ketika keluar dari medan pengamatan.

Pertama kali, difokuskan pada penentuan suatu ekspresi untuk area tapak berkas laser pada permukaan detektor yang dihalangi oleh sebagian badan bola *opaque* yang sedang melintas celah. Diasumsikan bahwa bola, radius R , sedang pindah ke arah- x dengan kecepatan tetap (v). Misalkan celah mempunyai ketebalan (h) yang lebih kecil dari diameter bola (lihat Gambar 3).



Gambar 3. Celah ukuran h terhalangi sedikit demi sedikit satu lingkaran radius R .

Oleh karena bayangan lingkaran bola dapat dianggap simetris di sekitar poros x , maka simpangan dari celah pada posisi vt dengan lingkaran sebagai integral tertentu pada lingkaran selebar celah dapat dinyatakan dengan persamaan berikut.

$$\int_{vt - \frac{h}{2}}^{vt + \frac{h}{2}} 2\sqrt{R^2 - x^2} dx \quad (1)$$

Dengan mengabaikan daerah di luar radius, bila $|vt| - h/2 > R$, maka solusi pada integral adalah:

$$R^2 \left(\sin^{-1} \left(\frac{vt + \frac{h}{2}}{R} \right) - \sin^{-1} \left(\frac{vt - \frac{h}{2}}{R} \right) \right) + \left(vt + \frac{h}{2} \right) \sqrt{R^2 - \left(vt + \frac{h}{2} \right)^2} - \left(vt - \frac{h}{2} \right) \sqrt{R^2 - \left(vt - \frac{h}{2} \right)^2} \quad (2)$$

Fungsi ini akan berada pada satu maksimum ketika $t = 0$, dan akan mempunyai satu nilai.

$$R^2 \left(2 \sin^{-1} \left(\frac{h}{2R} \right) \right) + h \sqrt{R^2 - \frac{h^2}{4}} \quad (3)$$

Jika h adalah kecil terhadap R , maka nilai-nilai tersebut dapat didekati sebagai berikut:

$$\sin^{-1} \left(\frac{h}{2R} \right) \approx \frac{h}{2R} \quad \text{dan} \quad h \sqrt{R^2 - \frac{h^2}{4}} \approx h \sqrt{R^2}$$

untuk kemudian mendapatkan satu nilai maksimum pada $t = 0$ yaitu $2hR$. Dengan demikian, akan terlihat bahwa minima adalah sebanding dengan diameter. Untuk mengetahui dampak perkiraan, ditentukan sinyal batas apabila h mendekati nol. Misalkan area diredupkan oleh lingkaran adalah didekati menjadi panjang garis tergambar melalui lingkaran, tegak lurus arah lintasan bola. Umpama intensitas cahaya adalah B , panjang celah adalah L , kecepatan v , dan waktu t , maka kuat cahaya adalah:

$$B \left(L - 2\sqrt{R^2 - v^2 t^2} \right), \quad \text{for } |vt| \leq R \quad \text{untuk } B \text{ dan } L \text{ sembarang} \quad (4)$$

Tiga cara dievaluasi untuk memperkirakan ukuran partikel setelah mengurangi ambang garis dasar $B \times L$:

1. Dari ekstrema sinyal yang sebanding dengan R . Ini disebut metode minima.

2. Setelah mengurangkan dari $B \times L$, kuadrat nilai sisanya akan menghilangkan suku dalam akar dan memungkinkan untuk memecahkan satu sistem linier untuk v^2 serta R^2 . Ini disebut metode kuadrat.
3. Integrasi dari persamaan 4 adalah sebanding dengan luas bayangan dari partikel sirkular. Dengan demikian, nilai R dapat dipecahkan dengan cara menjumlahkan seluruh contoh sinyal. Oleh karena nilai integral juga sebanding dengan kecepatan v , maka dalam metode ini harus digunakan suatu perkiraan dari v . Cara ini disebut metode integral.

3.1.3. Keterbatasan kuantisasi ADC

Kesalahan di dalam pengukuran dapat dibatasi oleh resolusi ADC berdasarkan upaya untuk memperkirakan radius dengan intensitas dari peredupan. Perbaikan perkiraan lokasi minima dilakukan dengan cara *fitting* data ke dalam suatu bentuk parabolik. Di dalam perangkat lunak, ini dipenuhi dengan cara menemukan minima kurva sampel, kemudian menempatkan misalnya 80 nilai di sebelah minima. Keseluruhan 161 nilai ini digunakan untuk mencari koefisien kesalahan *least-square* yang sesuai untuk satu kurva parabolik dan memperkirakan nilai “benar” untuk minimum kurva. Karena jumlah nilai yang digunakan telah ditetapkan, perhitungan *least-square* masalah *pseudo-inverse* secara waktu nyata tidak perlu dilakukan. Antisipasi bola berukuran berbeda dilakukan dengan menggunakan nilai *pseudo-inverse* berbeda, karena perkiraan secara parabolik bukan sebaik, menjauh dari minima, dan bola lebih kecil bisa jadi tidak menyediakan 161 nilai untuk perkiraan.

3.1.4. Uji parabolik untuk deteksi salah pencacahan

Sel target dirancang untuk bola ukuran 1000 μm . Ketika bola lebih kecil (800 μm) menerobos sel, beberapa tumpang-tindih (*overlap*) bisa terjadi. Di dalam waktu nyata, ditentukan kesalahan antara suatu pencocokan 3-titik berbentuk parabola dan suatu peristiwa. Kesalahan yang besar menunjukkan kemungkinan beberapa kejadian dalam satu pengintegralan. Ini menyediakan satu metode sederhana dalam menghitung dan menemukan kejadian multi partikel yang mungkin dapat disaring secara manual dengan pertolongan perangkat lunak tambahan. Pencocokan tiga titik terdiri dari pengambilan titik peristiwa dengan jarak sama. Ini adalah cocok untuk satu parabola, kemudian setiap titik ke-100 pada peristiwa yang dibandingkan dengan perkiraan parabolik. Total kesalahan dihitung dan dirata-rata setelah normalisasi menggunakan nilai tanpa peredupan. Dalam rangka untuk menekan jenis

kesalahan, sel target perlu dirancang untuk suatu ukuran partikel yang sedang dikualifikasi.

3.1.5. Kesalahan di dalam metode “puncak”

Dilakukan simulasi untuk mempelajari kesalahan berhubungan dengan menggunakan puncak sinyal maksimum dan menganggap itu sebanding dengan radius. Digunakan persamaan (2) untuk kurva $h = 50, 100, \text{ dan } 150 \mu\text{m}$, dengan ukuran bola berdiameter $300, 500 \text{ dan } 1000 \mu\text{m}$. Kemudian radius divariasi sebesar $\pm 50 \mu\text{m}$ di sekitar diameter kalibrasi, puncak persamaan diukur, dan digunakan puncak kalibrasi serta diameter aktual untuk menimbang nilai. Kesalahan dalam μm diterapkan untuk bola $300 \mu\text{m}$ (skenario kasus terburuk). Dalam semua kasus, nilai adalah kurang dari $2 \mu\text{m}$ untuk $h < 50 \mu\text{m}$. Oleh karena itu, ukuran tebal laser $35 \mu\text{m}$ tidak merupakan satu sumber kesalahan signifikan di dalam penentuan ini.

3.1.6. Penyimpangan dan *laser drift*

Walaupun nilai garis dasar B di dalam persamaan (4) bukan satu fungsi dari waktu, untuk menentukan bagaimana mendeteksi perubahan di dalam B dari waktu ke waktu. Sebagaimana level ini meningkat atau berkurang, cahaya berbasis satu bola yang menghalangi laser akan tampak seperti meningkat atau berkurang, selama level minimum masih melewati sejumlah cahaya. Masalah lain yang bisa timbul adalah bias simpangan, cahaya tidak dilemahkan oleh cahaya berbasis satu bola lewat. $B(t)$ bisa dihilangkan dengan cara membuat sinyal normal oleh satu hitungan sesaat $B(t_0)$, asalkan $B(t)$ bukan merupakan fungsi dari waktu yang dengan cepat berubah.

Efek penyimpangan bisa dihilangkan dengan cara menghitung nilai $B(t)$ sesudah setiap pengukuran dan menguranginya dari keseluruhan hasil. Di sini diterapkan dua teknik untuk menghitung nilai sesaat $B(t_0)$:

- Selayang pandang, dimana beberapa titik diambil sebelum suatu peristiwa teridentifikasi dan dirata-rata untuk menghitung $B(t_0)$.
- Rerata *buffer*, dimana jika suatu *buffer* (50 ribu titik) tidak berisi satu peristiwa, setiap nilai ke-10 dirata-rata (untuk 5.000 total titik data). Ketika satu *buffer* benar-benar berisi satu peristiwa, yang digunakan adalah nilai rerata *buffer* yang sebelumnya dihitung untuk $B(t_0)$.

Secara keseluruhan, diperoleh 10 cara berbeda dalam menghitung ukuran menggunakan nilai minima.

- Metode garis dasar tetap, yang menggunakan nilai terhitung selama tahap garis dasar untuk semua pengukuran.

- b. Metode selayang pandang, untuk menghitung B dan mengurangi nilai minimum dari B.
- c. Metode rerata *buffer*, untuk menghitung B dan mengurangi nilai minimum dari B.
- d. Metode selayang pandang, untuk menghitung B dan membagi sinyal oleh B.
- e. Metode rerata *buffer*, untuk menghitung B dan membagi sinyal oleh B.

Lima metode akhir identik dengan teknik di atas kecuali dengan menggantikan minimum dengan memperkirakan dan minimum dengan menggunakan satu fitting *least-square* terhadap kurva parabolik.

3.1.7. Keseragaman berkas

Untuk mengkaji keseragaman berkas, satu celah disisipkan sebelum detektor cahaya dan memindah-mindahkan: sel target, celah, dan detektor cahaya melintasi berkas untuk mengukur profil. Pada setiap pengukuran titik sinyal diintegrasikan selama 0,01 detik (50.000 titik) untuk menghindari *drift* bergantung-waktu. Kemudian ditentukan daerah terbaik dari kurva dengan masing-masing titik, lalu menentukan sebagai posisi kalibrasi, menghitung satu skala tetap untuk posisi itu, kemudian menerapkan skala tetap untuk profil berkas diukur pada $\pm 0,75$ mm sebelah menyebelah (karena tingkap sel target adalah 1,5 mm). Sementara itu, bila profil keseragaman tidak serupa setiap kali, itu menunjukkan satu bentuk yang sangat serupa dari satu pelaksanaan ke pelaksanaan berikutnya.

3.2. Hasil Pengukuran Menggunakan Simulasi

Simulasi telah dijalankan menggunakan bola baja tahan karat diameter 1000 μm . Dua kumpulan bola inert telah digunakan dengan cacahan 500 dan 95. Kumpulan yang lebih kecil digunakan untuk kalibrasi dengan cara melaksanakan 50 kalibrasi. Pencacahan atas 500 bola berhasil diperoleh secara konsisten untuk 10 percobaan berurutan. Ukuran 95 bola ditentukan dengan mikroskopi optik dan pemrosesan citra yaitu nilai rata-rata 1003,4 dengan satu nilai maksimum 1008 dan nilai minimum 999,1; simpangan baku 1; semua dalam satuan μm .

3.3. Menghitung Akurasi

Untuk memperkirakan kemungkinan dari kesalahan, digunakan satu metode tepat berdasarkan pada agihan binomial untuk jumlah kesalahan kecil [6] untuk satu interval satu sisi. Dalam prosedur ini, upaya untuk mencari batas

kesalahan untuk level kepercayaan $100 \times (1 - \alpha)$, dilakukan dengan memecahkan persamaan (5), dimana N adalah jumlah percobaan dan N_d adalah jumlah “cacat” atau kesalahan.

$$\sum_{k=0}^{N_d} \binom{N}{k} p_u^k (1 - p_u)^{N-k} = \alpha / 2 \tag{5}$$

Untuk kasus ini, $N = 5000$ dan $N_d = 0$. Untuk satu interval kepercayaan 95% maka $\alpha = 0,05$. Oleh karena itu, diperoleh $p_u = 7,4 / 10.000$. Dengan demikian, dapat dikatakan bahwa dengan 95% kepercayaan, sistem akan mempunyai satu kesalahan hitungan kurang dari 0,074%.

3.4. Ukuran Perbandingan Algoritma Estimasi (*Estimation Algorithm Comparison*)

Tahap berikutnya adalah mengevaluasi dan membandingkan tiga algoritma untuk menaksir ukuran. Untuk itu dilakukan satu perbandingan dari minima, bujur sangkar/lapangan dan algoritma integral yang menggambarkan lebih awal dengan dijalankan dari 500 partikel, menggunakan pertama 50 untuk menetapkan satu kalibrasi tetap (dianggap satu ukuran partikel 1000 μm), menerapkan algoritma *off-line*, walaupun hasil yang disimulasikan menunjukkan peningkatan dalam simpangan baku (SD) ketika menggunakan lapangan dan teknik integral. Hasil percobaan yang dilakukan tidak memperlihatkan banyak peningkatan antara algoritma penilaian berbeda. Pada Tabel 1 dapat dilihat hasil evaluasi ukuran dengan tiga algoritma yang berbeda.

Tabel 1. Hasil evaluasi ukuran dengan 3 algoritma berbeda.

Cacah	D Minima	STD Minima	D Kuadrat	STD-Kuadrat	D Integral	STD Integral
450	999,1	11	998,8	10	999,3	10
450	999,9	12	1000,1	12	1000,5	10
450	1000,2	9	1000,1	9	1000,5	8
450	1000,5	11	1000,6	11	1000,8	10
450	999,6	11	999,7	11	1000,1	10
450	999,6	10	1000,2	10	1000,4	9
450	1001,9	10	1001,9	10	1002,3	9
450	1000,0	8	1000,1	8	1000,5	7
450	1001,2	9	1001,6	9	1001,8	8
450	997,2	9	996,9	9	998,1	8

IV. KESIMPULAN

Pemodelan telah disajikan untuk menentukan ukuran partikel atas dasar peredupan laser oleh partikel yang menghalangi sebagian berkas laser selama partikel melintas zona pengamatan. Evaluasi dilakukan berupa pengembangan

untuk pencacahan kecepatan tinggi dan penentuan ukuran dari partikel bulat diameter dari 300 hingga 1000 μm . Diperkirakan ketelitian analisis untuk kesalahan kurang dari 0,075% dengan 95% kepercayaan. Ketelitian pengukuran adalah simpangan baku dalam orde 11 μm untuk bola berdiameter 1000 μm . Sumber utama dari kesalahan dalam pengukuran distribusi ukuran dipercaya berasal dari derau elektronik dan optik dari kurang seragamannya berkas laser. Walaupun simulasi menandakan algoritma alternatif bisa meningkatkan kinerja, namun ditemukan bahwa metode terbaik untuk menaksir ukuran yang lebih sederhana yaitu menggunakan nilai minimum sinyal teredupkan oleh partikel yang diukur. Modifikasi pada algoritma “nilai minima” yang memperhitungkan variasi arah garis dasar yang disebabkan baik oleh penyimpangan perubahan maupun oleh perubahan intensitas laser tidak konsisten, dan lebih baik daripada model sederhana “garis dasar konstan” untuk eksperimen.

V. UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Menteri Riset dan Teknologi yang telah membiayai penelitian ini, melalui Program Riset Insentif.

VI. DAFTAR PUSTAKA

1. ORNL. (2002). Review, 35, 2.
2. Morns, R.N., Petti, D.A., Powers, D.A., & Boyack, D.A. (2004). TRISO-Coated Particle Fuel Phenomenon Identification and Ranking Tables (PIRTs) for Fission Product Transport due to Manufacturing, Operations, and Accidents (NUREG/CR-6844). URL <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/contract/cr6844/>.
3. Wallisch, K., & Koss, P. (1977). Automatic Size Analysis of Coated Fuel Particles. Nuclear Technology. 35, 279-283.
4. Price, J., & Hunn, J. (2004). Optical Inspection of Coated Particle Nuclear Fuel. Proceedings of Machine Vision Applications in Industrial Inspection XII, SPIE , 5303, 137-149.
5. Hockey, R., Bond, L.J., Batishko, C., Gray, J.N., Saurwein, J., & Lowden, R. (2004). Advances in Automated QA/QC for TRISO Fuel Particle Production. Proceedings of ICAPP. Pittsburgh, PA: June 13-17, Paper 4213.
6. NIST Engineering Statistics Handbook. URL <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/prc/section2/prc241.htm>.
7. AWA. (2004). Fabrication and Quality Control of First Loaded HTTR Fuel. IAEA TM on HTGR F. IAEA, Vienna.