

Urania

Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir

Beranda jurnal: <http://jurnal.batan.go.id/index.php/urania/>



PENGARUH DISTRIBUSI UKURAN SERBUK UO_2 PENGAYAAN 2%–5% PADA DENSITAS PELET UO_2

Etty Mutiara¹, Odi Buana Hutapea¹, Winter Dewayatna¹, Tri Yulianto¹

¹Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir – BATAN

Kawasan PUSPIPTEK Serpong Gd. 65, Tangerang Selatan, Banten 15314

e-mail: emutiara@batan.go.id

(Naskah diterima: 28–12–2020, Naskah direvisi: 25–01–2021, Naskah disetujui: 26–02–2021)

ABSTRAK

PENGARUH DISTRIBUSI UKURAN SERBUK UO_2 PENGAYAAN 2%–5% PADA DENSITAS PELET UO_2 . Telah dilakukan studi fabrikasi pelet UO_2 sinter menggunakan serbuk UO_2 pengayaan 2%, 3%, 4% dan 5% untuk mendapatkan pelet UO_2 dengan densitas yang memenuhi syarat sebagai bahan bakar PWR melalui proses kompaksi dan penyinteran. Sepanjang pengetahuan penulis, tidak ada publikasi penelitian tentang hubungan distribusi ukuran serbuk dengan densitas pelet UO_2 pada rentang ukuran serbuk yang dipelajari pada penelitian ini. Untuk itu, melalui penelitian distribusi ukuran serbuk UO_2 dan fraksi berat masing–masing rentang ukuran serbuk dan pengaruhnya terhadap densitas pelet UO_2 akan diperoleh sifat mampu kompak dan mampu sinter masing–masing serbuk UO_2 melalui pengukuran densitas pelet mentah dan pelet sinternya. Penelitian ini diawali dengan proses ayak serbuk UO_2 umpan untuk mendapatkan data distribusi ukuran serbuk beserta fraksi beratnya, dilanjutkan dengan pengukuran densitas curah dan densitas ketuk. Masing–masing serbuk dengan distribusi ukuran dan fraksi beratnya langsung dikompaksi menjadi pelet mentah dengan variasi tekanan 2, 3 dan 4 ton/cm², kemudian disinter pada temperatur 1700 °C selama 3 jam. Hasil pengayakan memberikan data bahwa serbuk UO_2 pengayaan 2% dan 4% mempunyai distribusi ukuran serbuk monomodal sementara serbuk UO_2 pengayaan 3% dan 5% dengan trimodal. Densitas pelet hasil kompaksi serbuk UO_2 pengayaan 2%, 3%, 4% dan 5% pada tekanan kompaksi tertinggi berturut–turut sebesar 54,30%TD, 53,19%TD, 52,45%TD dan 52,33%TD. Densitas pelet sinter dari serbuk UO_2 pengayaan 2% dan 5% masing–masing berada pada kisaran (91,13 – 91,70) %TD dan (75,33–77,57) %TD sementara pelet sinter pengayaan 3% dan 4% semuanya retak/pecah sehingga densitas tidak dapat diukur. Berdasarkan data densitas pelet disimpulkan bahwa serbuk UO_2 pengayaan 2% dengan distribusi ukuran monomodal yang didominasi serbuk berukuran halus yang lebih kecil 75 μ m mempunyai mampu kompak dan mampu sinter yang lebih baik dari serbuk lainnya. Penelitian ini perlu dilanjutkan untuk mengetahui lebih jauh berkaitan pemilihan distribusi ukuran serbuk UO_2 umpan dengan fraksi beratnya sebagai umpan proses kompaksi dalam upaya mendapatkan pelet UO_2 sinter dengan densitas lebih tinggi yang memenuhi persyaratan sebagai bahan bakar PLTN tipe PWR.

Kata kunci: Pelet UO_2 PWR, distribusi ukuran serbuk, densitas, kompaksi, penyinteran.

ABSTRACT

THE INFLUENCE OF 2%-5% ENRICHED UO_2 POWDER SIZE DISTRIBUTION ON UO_2 PELLET DENSITY. A study of UO_2 pellet fabrication using 2%, 3%, 4% and 5% enriched UO_2 powder without conditioning has been carried out. There is no published research on the relationship between UO_2 powder size distribution and UO_2 pellet density in the range of powder sizes studied in this work. Therefore, through this research the influence of size distribution and weight fraction of UO_2 powder on various densities was studied to obtain UO_2 sintered pellet with a density that meets the requirements as PWR fuel. UO_2 pellets were fabricated through cold compaction with variation in pressure of 2, 3 and 4 ton/cm² and sintering process at 1700°C for 3 hours. Each UO_2 feed powder with its size distribution and weight fraction was directly fabricated into pellets without conditioning. The powder sieving process shows that the 2% and 4% enriched UO_2 powders have a monomodal powder size distribution while the 3% and 5% enriched UO_2 powders are trimodal size. The green pellets density of 2%, 3%, 4% and 5% enriched UO_2 powders are 54.3%TD, 53.19%TD, 52.45%TD and 52.33%TD respectively. The density of sintered pellets from 2% and 5% enriched UO_2 powders are 91.13-91.70%TD and 75.33-77.57%TD. The sintered pellets of 3% and 4% enriched UO_2 powders were cracked or broken so that the density could not be measured. Based on the pellet density data, it is concluded that the 2% enriched UO_2 powders with monomodal size distribution that are dominated by fine powder smaller than 75µm has better compaction capability and sintering ability than other UO_2 powders. This research needs to be continued to determine the proper size distribution of the UO_2 powder and its weight fraction as compaction process feed in order to obtain higher sintered pellets density that meet the requirements of PWR fuel.

Keywords: PWR UO_2 pellets, powder size distribution, density, compaction, sintering.

PENDAHULUAN

Pelet sinter uranium dioksida (UO_2) silindris densitas tinggi merupakan bahan bakar reaktor daya atau pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) tipe *Pressurized Water Reactor* (PWR) [1]-[3]. Densitas pelet UO_2 menentukan nilai ekonomis dan umur pakai bahan bakar berkaitan jumlah U^{235} yang terkandung didalamnya [4]. Selain densitas, ukuran butir pelet UO_2 sinter termasuk persyaratan yang harus dipenuhi. Densitas dan ukuran butir digunakan sebagai salah satu indikator kemampuan pelet UO_2 mengungkung hasil fisi karena proses *swelling* dan densifikasi lanjutan pada waktu pelet UO_2 diiradiasi [5]-[9]. Fenomena di atas berpotensi menyebabkan terjadinya deformasi dan keretakan pada pelet UO_2 yang akan meningkatkan probabilitas terlepasnya hasil fisi ke air pendingin reaktor bila kelongsong pecah/sobek. Hal ini dapat menurunkan margin keselamatan PLTN pengguna [5]-[7].

Pelet UO_2 sinter dengan densitas yang memenuhi syarat umumnya diperoleh melalui proses kompaksi serbuk UO_2 menjadi pelet mentah pada temperatur kamar dilanjutkan dengan penyinteran pada temperatur 1700 °C [10]. Densitas yang tinggi dari pelet UO_2 dapat dicapai dengan pengaturan beberapa parameter proses seperti tekanan kompaksi, distribusi ukuran serbuk umpan beserta fraksi beratnya, temperatur, media dan durasi proses sinter. Di laboratorium FFL - PTBBN, umpan proses kompaksi bahan bakar HWR berupa serbuk UO_2 alam jalur konversi ADU pengayaan 0,7% dengan distribusi ukuran serbuk yang berada dalam rentang antara 150 μ m - 800 μ m [10],[11]. Serbuk umpan tersebut merupakan hasil pengkondisian serbuk UO_2 ex-ADU yang berbentuk jarum dan berukuran halus [1]. Pengkondisian serbuk selain bertujuan untuk mendapatkan serbuk dengan distribusi ukuran tertentu, dilakukan juga untuk memperoleh serbuk UO_2 berbentuk mendekati bulat dengan laju alir yang lebih baik [1]. Pengaturan distribusi ukuran dan fraksi berat dari serbuk yang demikian akan memberikan pola pengepakan serbuk yang lebih baik dan meningkatkan efisiensi proses kompaksi [12]. Perbaikan pola pengepakan serbuk akan mereduksi durasi pengisian cetakan ketika dikompaksi, meningkatkan densitas hasil kompaksi dan densitas hasil sinter [1],[10]-[16].

Pola pengepakan serbuk melalui pengaturan distribusi ukuran dan fraksi beratnya dapat diamati melalui pengukuran densitas, antara lain densitas curah (*bulk*

density), densitas ketuk (*tap density*) dan densitas hasil kompaksi. Distribusi ukuran dengan pola pengepakan serbuk yang rapat dan seragam akan memberikan densitas yang tinggi dan seragam di seluruh bagian hasil kompaksi dan hasil sinter [15]. Penelitian untuk sistem serbuk satu ukuran (unimodal/monomodal), sistem dua rentang ukuran (binary/bimodal) dan serbuk dengan tiga rentang ukuran (ternary/trimodal) dengan fraksi beratnya terhadap densitas pengepakan dilakukan oleh Chang dkk. [13]. Serbuk yang didominasi oleh satu rentang ukuran yang sempit dapat diasumsikan sebagai serbuk satu ukuran. Pada sistem serbuk monomodal/unimodal, bila bentuk serbuk sama maka dengan semakin besar ukuran serbuk, densitas curah dan densitas ketuk serbuk akan meningkat [13]. Hal ini dikarenakan serbuk yang lebih besar mempunyai luas muka spesifik yang lebih kecil sehingga friksi antar serbuk menjadi lebih kecil. Serbuk berukuran lebih besar akan lebih mudah mengalir dan menjadi lebih kompak (memadat) sehingga densitas ketuknya lebih tinggi. Fenomena ini akan menjadi lebih kompleks apabila bentuk serbuk tidak sama dan adanya distribusi ukuran serbuk pada rentang tertentu seperti pada serbuk bimodal atau trimodal. Pada sistem demikian, serbuk berukuran lebih kecil akan mengisi ruang kosong yang ada diantara serbuk berukuran lebih besar. Densitas yang dicapai oleh sistem serbuk bimodal dan trimodal akan bervariasi sesuai fraksi volume dari serbuk berukuran tertentu [13]. Densitas sistem serbuk bimodal akan menjadi lebih tinggi dengan mencampur serbuk monomodal berukuran halus ke dalam serbuk monomodal berukuran kasar dengan fraksi serbuk halus sekitar 20% sampai 30% [17],[18].

Penelitian penggunaan umpan serbuk satu ukuran (monomodal) pada proses kompaksi dan penyinteran dilakukan secara eksperimen dan simulasi numerik terhadap serbuk tungsten berukuran 1 μ m sampai 100 μ m [19]. Penelitian tersebut bertujuan untuk mempelajari pengaruh ukuran partikel, struktur pengepakan awal, tekanan kompaksi dan temperatur penyinteran terhadap densitas relatif hasil sinter. Ukuran serbuk berpengaruh pada densitas hasil kompaksi. Pada variasi tekanan kompaksi, dengan semakin besar ukuran serbuk diperoleh densitas hasil kompaksi yang semakin tinggi. Densitas hasil kompaksi tidak dapat ditingkatkan lagi setelah dilakukan kompaksi pada tekanan 520MPa. Densitas tertinggi dicapai oleh serbuk berukuran 100 μ m.

Pola pengepakan serbuk dengan dua distribusi ukuran telah dilakukan terhadap paduan super nikel menggunakan serbuk berdiameter rata-rata 11,5 μ m untuk serbuk halus dan 83,2 μ m untuk serbuk kasarnya [14]. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh pola pengepakan serbuk bimodal terhadap hasil kompaksi dan hasil sinter [14]. Densitas hasil sinter tertinggi dicapai oleh campuran dengan fraksi 70% serbuk kasar dan cacat minimum pada hasil sinter dengan 80% fraksi serbuk kasar [14]. Sementara penelitian pengaruh distribusi ukuran butir serbuk bimodal terhadap unjuk kerja makro dan mikrostruktur hasil kompaksi dan hasil sinter telah dilakukan terhadap serbuk keramik Al_2O_3 [20]. Penelitian tersebut mengungkapkan bahwa mampu sinter serbuk akan meningkat melalui pengaturan fraksi serbuk kasar-halus yang tepat. Penggunaan distribusi ukuran serbuk yang tepat akan memberikan hasil kompaksi dan penyinteran dengan perbaikan pada sifat mekanik, akurasi dimensi dan tingkat kerataan permukaan. Pada fraksi yang tepat, serbuk halus secara efektif akan mengisi ruang kosong antar serbuk kasar. Penelitian lain yang dilakukan terhadap campuran serbuk bimodal mengungkapkan tentang pengaruh rasio ukuran serbuk dan fraksi volume serbuk kasar terhadap densitas pengepakan [21]. Rasio ukuran serbuk yang meningkat akan menurunkan densitas pengepakan secara linier. Sementara peningkatan fraksi volume serbuk kasar sampai harga tertentu akan meningkatkan densitas pengepakan, tetapi bila fraksi tersebut ditingkatkan lagi maka efeknya malah sebaliknya yaitu akan menurunkan densitas pengepakan.

Penelitian sistem pengepakan yang dilakukan pada sistem serbuk trimodal menyatakan bahwa semakin tinggi fraksi serbuk halus sampai batas tertentu akan membuat sistem pengepakan serbuk semakin padat [15],[16]. Pengepakan serbuk yang paling padat dialami oleh sistem serbuk dengan fraksi serbuk halus ($\leq 200 \mu$ m) sampai dengan 45%berat untuk ukuran butir hasil sinter 3mm dan sampai dengan 55%berat untuk ukuran butir hasil sinter 1mm [15]. Densitas secara aksial dan radial akan semakin seragam dengan bertambah besarnya fraksi serbuk halus dan semakin kecilnya fraksi serbuk kasar. Hasil kompaksi dan penyinteran paling padat dengan densitas seragam dicapai oleh serbuk umpan kompaksi dengan distribusi ukuran 65%berat serbuk halus (0-200 μ m), 10%berat serbuk ukuran menengah dan 25%berat serbuk kasar

(500-1000 μ m) [16]. Pada penelitian lainnya, dinyatakan bahwa densitas kompaksi tertinggi dan seragam dicapai oleh serbuk dengan fraksi serbuk halus yang paling tinggi [16]. Fraksi serbuk halus yang tinggi akan memperbaiki transmisi tekanan kompaksi sehingga menghasilkan sistem pengepakan serbuk paling rapat. Hal lain yang dapat dilakukan untuk meningkatkan densitas adalah dengan mengurangi jumlah serbuk berukuran medium [16].

Selain penelitian tentang pengaruh ukuran partikel serbuk tungsten, struktur pengepakan awal dan tekanan kompaksi terhadap densitas relatif hasil sinter, telah diteliti juga dengan tambahan pengaruh pengaturan beberapa kondisi operasi seperti temperatur penyinteran terhadap densitas relatif dan distribusi densitas, stress dan keseragaman void hasil sinter [19]. Hal yang menarik terjadi pada hasil sinter dari kompaksi serbuk tungsten monomodal/unimodal berukuran 1 μ m sampai 100 μ m pada temperatur 1650 °C. Densitas hasil sinter mendekati nilai yang hampir sama untuk semua densitas hasil kompaksi dan ukuran serbuk yang dikompaksi. Hal ini terjadi karena *driving force* untuk densifikasi pada hasil kompaksi yang sudah padat (partikel besar) lebih kecil dibandingkan pada hasil kompaksi yang kurang padat (partikel kecil). Pada hasil kompaksi yang sudah rapat (densitas tinggi) partikel penyusun akan tidak leluasa untuk bergerak saling merapat sehingga peningkatan densitas juga tidak tinggi. Sebaliknya, pada penyinteran hasil kompaksi serbuk kecil, pergerakan partikel penyusun akan lebih mudah dan lebih banyak sehingga densitas yang dicapai akan lebih tinggi. Sementara pada hasil kompaksi serbuk monomodal/unimodal berukuran tertentu, stress akan terkonsentrasi terutama pada struktur berpori dan di batas butir. Stress ini yang menginisiasi retak dan penjalaran retak pada pelet yang disinter. Pada hasil kompaksi serbuk halus, jumlah voidnya sangat besar. Bila void yang besar tersebut menyebabkan konsentrasi stress yang besar pada posisi tertentu maka potensi retak pada hasil sinter akan lebih tinggi [19]. Untuk serbuk sistem bimodal, penelitian yang mempelajari hubungan distribusi ukuran serbuk dengan hasil kompaksi dan hasil sinter menyatakan bahwa kekuatan hasil sinter paling tinggi dicapai oleh kompaksi serbuk dengan fraksi serbuk halus yang paling tinggi dengan diameter serbuk halus lebih kecil dari 1/3 diameter serbuk kasar [22].

Sepanjang pengetahuan penulis, tidak ada publikasi penelitian tentang hubungan distribusi ukuran serbuk UO₂ dengan densitas pelet UO₂ pada rentang ukuran serbuk yang dipelajari pada penelitian ini. Untuk itu, pada penelitian ini dipelajari pengaruh distribusi ukuran serbuk beserta fraksi berat yang dimiliki oleh masing-masing serbuk UO₂ umpan terhadap densitas pelet UO₂. Pada penelitian ini pelet UO₂ bahan bakar PWR dibuat melalui proses kompaksi serbuk pada temperatur kamar dengan variasi tekanan kompaksi dan penyinteran pelet mentah pada temperatur tinggi menggunakan umpan serbuk UO₂ pengayaan (*enrichment*) 2%, 3%, 4% dan 5% [23]. Distribusi ukuran serbuk dan besar fraksi setiap rentang ukuran yang dimiliki masing-masing serbuk diduga mempengaruhi densitas curah dan densitas ketuk dari masing-masing serbuk UO₂, densitas hasil kompaksi dan densitas hasil sinter. Peningkatan densitas terukur dari pelet hasil kompaksi dan pelet sinter akan memberikan gambaran pola pengepakan serbuk UO₂ berdasarkan distribusi ukuran dan fraksi berat yang dimilikinya, sifat mampu kompak dan mampu sinternya. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan masukan untuk perbaikan kualitas pelet UO₂ terkait perlu tidaknya dilakukan pengkondisian serbuk berupa pengaturan ulang besar fraksi serbuk umpan berukuran tertentu dari distribusi ukuran yang dimiliki masing-masing serbuk UO₂ umpan dalam upaya mendapatkan pelet UO₂ sinter yang memenuhi persyaratan sebagai bahan bakar PLTN tipe PWR.

METODOLOGI

Pelet sinter UO₂ pada penelitian ini dibuat melalui proses kompaksi serbuk UO₂ pada temperatur kamar dan penyinteran pelet hasil kompaksi pada temperatur 1700 °C di laboratorium FFL – PTBBN Batan Serpong. Umpan kompaksi berupa serbuk UO₂ pengayaan 2%, 3%, 4% dan 5% [23]. Sebelumnya telah dilakukan proses ayak (*sieving*) terhadap serbuk UO₂ umpan untuk menghasilkan serbuk dalam kelompok ukuran <75 µm, 75–250 µm, 250–500 µm, 500–850 µm dan >850 µm. Berat dari masing-masing kelompok ukuran ditimbang untuk mendapatkan data distribusi ukuran serbuk.

Serbuk UO₂ sebelum dikompaksi terlebih dahulu diukur densitas curah dan densitas ketuknya. Serbuk UO₂ selanjutnya dicampur dengan pelumas padat seng stearat sebanyak 0,4% berat dalam sebuah wadah tertutup dan diputar menggunakan *eccentric*

cage powder mixer selama 30 menit. Campuran tersebut dikompaksi dengan variasi tekanan 2, 3 dan 4 ton/cm² menggunakan mesin kompaksi Komage. Pelet mentah (*green pellet*) hasil kompaksi selanjutnya disinter menggunakan tungku sinter Degussa pada temperatur sinter 1700 °C dengan laju pemanasan 250 °C/jam dan waktu penyinteran 3 jam dalam media campuran gas dengan komposisi 2%volum H₂ dan 98%volum N₂. Karakterisasi pelet mentah dan pelet sinter UO₂ meliputi pengamatan visual dan pengukuran densitas

HASIL DAN PEMBAHASAN

a. Densitas curah dan densitas ketuk serbuk UO₂

Proses ayak yang dilakukan terhadap serbuk UO₂ pengayaan 2–5% memberikan data distribusi ukuran serbuk dengan kelompok ukuran <75 µm, 75–250 µm, 250–500 µm, 500–850 µm dan >850 µm seperti yang ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Distribusi ukuran serbuk UO₂ pengayaan 2%, 3%, 4% dan 5%

Pengayaan	Ukuran serbuk (µm)				
	<75	75-250	250-500	500-850	>850
2%	93	7	0	0	0
3%	3	29	25	38	5
4%	96	4	0	0	0
5%	2	36	22	31	9

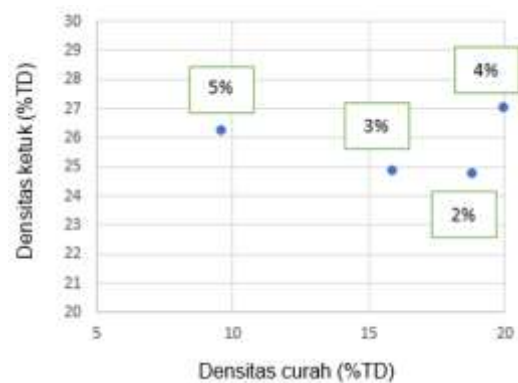
Serbuk UO₂ pengayaan 2% mempunyai distribusi ukuran yang mirip dengan serbuk UO₂ pengayaan 4%, keduanya didominasi oleh serbuk halus berukuran <75µm. Fraksi serbuk halus pada serbuk UO₂ pengayaan 2% sebanyak 93%berat. Pada serbuk UO₂ pengayaan 4%, fraksi tersebut lebih tinggi yaitu sebanyak 96%berat, sisanya adalah serbuk berukuran 75-250 µm.

Serbuk UO₂ pengayaan 3% mempunyai distribusi ukuran serbuk yang mirip dengan yang dipunyai serbuk UO₂ pengayaan 5%. Distribusi ukuran serbuk UO₂ pengayaan 3% dan 5% terutama berada pada rentang 75–250 µm, 250–500 µm dan 500–850 µm. Pada serbuk UO₂ pengayaan 3% dan 5%, kelompok ukuran serbuk yang dianggap halus berbeda dengan kelompok ukuran serbuk halus pada serbuk UO₂ pengayaan 2% dan 4%. Pada serbuk UO₂ pengayaan 2% dan 4%, kelompok ukuran serbuk yang dianggap halus berukuran <75 µm sedangkan pada serbuk UO₂ pengayaan 3% dan 5%, kelompok ukuran serbuk yang dianggap halus berada pada rentang

75–250 μm , pada rentang 250–500 μm dianggap berukuran medium dan pada rentang 500–850 μm merupakan serbuk kasar. Distribusi ukuran serbuk UO_2 pengayaan 3% pada rentang 75–250 μm (halus), 250–500 μm (medium) dan 500–850 μm (kasar) berturut-turut dengan fraksi berat sebesar 29%; 25% dan 38%, sementara serbuk pengayaan 5% dengan fraksi berat masing-masing sebesar 36%; 22% dan 31%. Serbuk UO_2 pengayaan 5% memiliki fraksi paling besar pada rentang ukuran halus 75–250 μm (36%berat) sementara serbuk UO_2 pengayaan 3% memiliki fraksi tertinggi pada ukuran kasar 500–850 μm (38%berat).

Hubungan densitas dari masing-masing serbuk UO_2 dengan distribusi ukuran serbuknya seperti densitas curah (*bulk density*), densitas ketuk (*tap density*), densitas pelet mentah hasil kompaksi serbuk UO_2 dan densitas pelet sinter UO_2 ditampilkan pada gambar-gambar berikut. Semua densitas dinyatakan dalam %TD (*Theoretical Density*) yaitu harga densitas terukur dibagi dengan densitas teoritis UO_2 sebesar 10,97 g/cm³.

Densitas curah dan densitas ketuk dari masing-masing serbuk UO_2 ditampilkan pada Gambar 1. Serbuk UO_2 pengayaan 4% dengan fraksi serbuk halus yang lebih besar, mempunyai densitas curah dan densitas ketuk lebih tinggi dari densitas serbuk UO_2 pengayaan 2%. Apabila kedua serbuk ini dianggap monomodal/unimodal maka densitas curah dan densitas ketuk serbuk UO_2 pengayaan 4% seharusnya lebih rendah dari serbuk UO_2 pengayaan 2% karena fraksi serbuk halus yang lebih besar [13, 18]. Serbuk dengan fraksi halus yang besar akan mempunyai luas muka spesifik dan friksi antar serbuk yang besar sehingga densitas curah serbuk akan turun dengan semakin besar fraksi serbuk halus [18]. Namun, hasil penelitian ini akan sejalan dengan penelitian monomodal/unimodal bila diameter serbuk rata-rata pada serbuk UO_2 pengayaan 4% lebih besar dari yang ada dalam serbuk UO_2 pengayaan 2% [13]. Di sisi lain, apabila pada rentang ukuran yang dominan tersebut diasumsikan bahwa kedua serbuk tersusun dari dua distribusi ukuran (bimodal) dan fraksi serbuk halus pada serbuk UO_2 pengayaan 4% lebih kecil dari yang ada dalam serbuk UO_2 pengayaan 2% maka data ini akan sejalan dengan hasil penelitian C. Sun dkk dan Y. Bai dkk, dengan syarat fraksi serbuk halus pada sistem bimodal tersebut tidak melebihi 30% [17],[18].



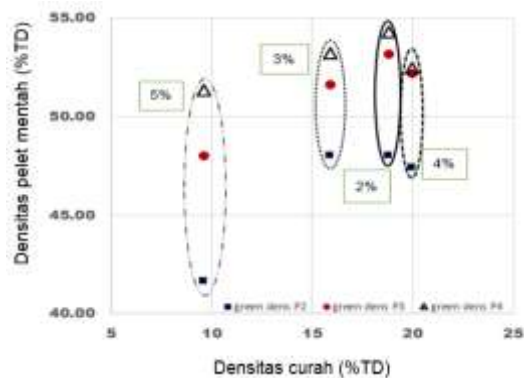
Gambar 1. Densitas curah dan densitas ketuk dari serbuk UO_2 pengayaan 2%, 3%, 4% dan 5%

Hal ini juga akan bersesuaian dengan penelitian bimodal dari C.S. Chang bila rasio diameter serbuk kasar dan diameter serbuk halus pada serbuk UO_2 pengayaan 4% lebih besar dari yang dimiliki serbuk UO_2 pengayaan 2%. Semakin besar rasio kedua diameter tersebut maka densitas pengepakannya akan semakin tinggi [18].

Sementara densitas curah serbuk UO_2 pengayaan 5% lebih rendah dari densitas curah serbuk UO_2 pengayaan 3% tetapi densitas ketuknya sedikit lebih tinggi, dimana kedua serbuk mempunyai distribusi ukuran yang mirip. Fraksi serbuk halus (75–250 μm) pada serbuk UO_2 pengayaan 5% lebih besar dari serbuk UO_2 pengayaan 3% yaitu 36%berat berbanding 29%berat. Fraksi serbuk kasar (500–850 μm) pada serbuk UO_2 pengayaan 3% lebih besar dari serbuk UO_2 pengayaan 5% yaitu 38%berat berbanding 31%berat dan fraksi serbuk medium (250–500 μm) keduanya 25%berat berbanding 22%berat. Berdasarkan hasil penelitian C.S. Chang dkk untuk sistem trimodal, densitas pengepakan tertinggi dicapai oleh tiga variasi fraksi volum campuran serbuk dengan kelompok ukuran kasar:medium:halus sebesar 65%:25%:10%; 10%:50%:40% dan 43%:55%:2% [18]. Bila dibandingkan dengan hasil penelitian C.S. Chang maka densitas curah dan densitas ketuk serbuk UO_2 pengayaan 3% dan 5% akan sebanding bila ditinjau dari fraksi berat serbuk kasar (pengayaan 3%) dan fraksi berat serbuk halus (pengayaan 5%). Bila ditinjau dari besar fraksi serbuk berukuran medium maka densitas serbuk UO_2 pengayaan 3% lebih tinggi dari serbuk UO_2 pengayaan 5%. Pada penelitian C.S. Chang, densitas pengepakan yang tinggi dapat dicapai untuk sistem serbuk trimodal dengan fraksi volum serbuk medium sekitar 50% [18].

b. Densitas hasil kompaksi serbuk UO_2

Densitas pelet mentah dari masing-masing serbuk UO_2 pada variasi tekanan kompaksi ditunjukkan pada Gambar 2. Berdasarkan gambar tersebut, tekanan kompaksi antara 2 ton/cm² sampai 4 ton/cm² memberikan kecenderungan peningkatan densitas pada semua serbuk UO_2 yang dikompaksi dan nilainya seiring dengan peningkatan besar tekanan. Densitas pelet mentah untuk serbuk UO_2 pengayaan 2%, 3%, 4% dan 5% pada tekanan kompaksi 4 ton/cm² berturut-turut sebesar 54,30%TD, 53,19%TD, 52,45%TD dan 52,33%TD. Densitas pelet mentah yang dicapai oleh keempat serbuk pada tekanan tersebut sudah masuk dalam rentang densitas hasil kompaksi (50-60%TD) untuk perolehan densitas pelet sinter yang tinggi.



Gambar 2. Densitas pelet mentah hasil proses kompaksi serbuk UO_2 pengayaan 2%, 3%, 4% dan 5% pada variasi tekanan 2, 3 dan 4 ton/cm².

Densitas pelet mentah tertinggi dicapai oleh serbuk UO_2 pengayaan 2% dengan fraksi serbuk halus yang paling besar. Pada semua variasi tekanan kompaksi, densitas pelet mentah serbuk UO_2 pengayaan 2% (48-54 %TD) lebih tinggi dari densitas hasil kompaksi serbuk UO_2 pengayaan 4% (47-52 %TD) dengan distribusi ukuran serbuk yang mirip. Pada publikasi penelitiannya, Jia menyatakan bahwa untuk sistem serbuk unimodal pada variasi tekanan kompaksi, dengan semakin besar ukuran serbuk diperoleh densitas hasil kompaksi yang semakin tinggi [19]. Bila serbuk UO_2 pengayaan 2% diasumsikan tersusun dari serbuk monomodal/unimodal berukuran lebih besar dari penyusun serbuk UO_2 pengayaan 4% maka hasil penelitian ini bersesuaian dengan penelitian Jia tersebut.

Disisi lain, densitas pelet mentah kedua serbuk akan bersesuaian dengan penelitian J. Fruhstorfer dkk apabila diasumsikan kedua serbuk merupakan sistem bimodal atau trimodal [15,16]. Menurut J. Fruhstorfer dkk, semakin tinggi fraksi serbuk halus maka akan semakin padat sistem pengepakan serbuk bimodal dengan syarat fraksi serbuk halus maksimal 45%berat [16]. Hasil penelitian ini akan sejalan apabila fraksi serbuk halus pada serbuk UO_2 pengayaan 2% tidak melebihi 45% berat dan lebih kecil dari yang ada dalam serbuk UO_2 pengayaan 4% sehingga densitas pelet mentahnya lebih tinggi. Asumsi bahwa serbuk UO_2 pengayaan 2% dan 4% memiliki sistem serbuk unimodal ataupun bimodal dengan fraksi berat tertentu untuk ukuran serbuk tertentu memerlukan pembuktian lebih lanjut.

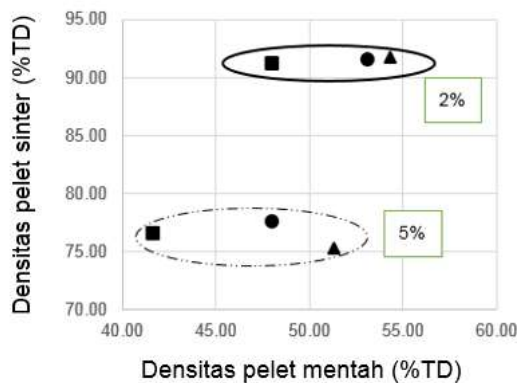
Hasil pengukuran densitas pelet mentah pada tiga variasi tekanan kompaksi dari serbuk UO_2 pengayaan 3% yang ditampilkan Gambar 2 menunjukkan densitas yang lebih tinggi dari densitas pelet mentah serbuk pengayaan 5%. Kedua serbuk merupakan sistem serbuk trimodal dengan fraksi berat yang mirip di tiga rentang ukuran serbuk. Serbuk UO_2 pengayaan 5% dan 3% mempunyai fraksi serbuk halus (75–250 μ m) masing-masing 37,29% dan 31,81% berat, sementara fraksi serbuk medium dari serbuk UO_2 pengayaan 3% dan 5% masing-masing sebesar 25% dan 22%berat.

Pada publikasi penelitian Fruhstorfer dkk. yang diterbitkan pada tahun 2019 dinyatakan bahwa pada serbuk sistem trimodal, pengepakan paling rapat dan perbedaan densitas antar titik dalam pelet yang paling rendah sehingga densitas cenderung seragam berada pada hasil kompaksi untuk jumlah serbuk halus yang tinggi [16]. Hal ini dikarenakan serbuk halus akan mentransmisikan tekanan kompaksi dengan lebih baik sehingga pengepakan menjadi lebih rapat. Selain itu dinyatakan juga bahwa densitas paling tinggi dan seragam dimiliki oleh sistem pengepakan untuk fraksi serbuk medium yang lebih kecil. Berdasarkan penelitian Fruhstorfer maka densitas pelet mentah hasil kompaksi serbuk UO_2 pengayaan 5% seharusnya lebih tinggi dan lebih seragam di seluruh bagian pelet dari densitas hasil kompaksi serbuk UO_2 pengayaan 3% baik ditinjau dari besar fraksi serbuk halus maupun serbuk medium. Pada kenyataannya data hasil eksperimen ini bertentangan bila dianalisis berdasarkan hasil penelitian Fruhstorfer tersebut. Dengan demikian perlu penelitian lebih jauh untuk

mendapatkan perbandingan ukuran serbuk UO_2 dan besar fraksi optimal untuk mendapatkan pola pengepakan serbuk yang memberikan densitas pelet yang tinggi pada serbuk sistem trimodal.

c. Densitas pelet sinter UO_2

Hasil pengukuran densitas pelet sinter yang dikompaksi dari serbuk UO_2 pengayaan 2% dan 5% pada variasi tekanan kompaksi ditampilkan pada Gambar 3. Densitas pelet sinter UO_2 pengayaan 3% dan 4% tidak dapat diukur karena pelet retak atau pecah.



Gambar 3. Densitas pelet sinter dari pelet mentah hasil kompaksi serbuk UO_2 pengayaan 2% dan 5% pada variasi tekanan 2, 3 dan 4 ton/cm^2 .

Pada Gambar 3 dapat dilihat bahwa densitas pelet sinter yang dicapai oleh hasil kompaksi serbuk UO_2 pengayaan 2% pada variasi tekanan kompaksi 2, 3 dan 4 ton/cm^2 , nilainya hampir sama yang berada dalam rentang 91,13 - 91,70 %TD. Densitas tersebut dicapai dengan peningkatan densitas (densifikasi) yang berbeda. Semakin besar tekanan kompaksi, densifikasi yang dialami oleh pelet mentah untuk menjadi pelet sinter semakin kecil. Densifikasi pada tekanan kompaksi 2 ton/cm^2 sebesar 90%, pada tekanan kompaksi 3 ton/cm^2 sebesar 72% dan pada tekanan kompaksi 4 ton/cm^2 sebesar 69%

Data ini sejalan dengan hasil penelitian Q. Jia dkk. yang menyatakan bahwa densitas hasil sinter yang dicapai oleh kompaksi serbuk unimodal pada rentang ukuran 1-100 mikron berada pada nilai yang hampir sama untuk tekanan kompaksi yang divariasikan [19]. Hal ini dikarenakan *driving force* untuk densifikasi pada hasil kompaksi serbuk yang sudah padat lebih kecil dari *driving force* yang ada pada hasil kompaksi yang kurang padat, sehingga densitas akhir

hasil sinter yang dicapai hampir sama [19]. Serbuk penyusun akan lebih leluasa bergerak untuk saling merapat pada pelet yang kurang rapat atau densitas kompaksi lebih rendah. Pada penelitian fabrikasi pelet UO_2 ini dapat dikatakan bahwa *driving force* untuk densifikasi pelet mentah dari serbuk UO_2 pengayaan 2% yang dikompaksi pada tekanan kompaksi 2 ton/cm^2 lebih besar dari yang dialami pelet mentah dari serbuk yang sama dengan tekanan 3 dan 4 ton/cm^2 sehingga densitas akhir dari pelet hasil sinter yang dicapai pada ketiga variasi tekanan kompaksi tersebut hampir sama. Berdasarkan data ini dapat dikatakan bahwa tekanan kompaksi 2 ton/cm^2 sudah cukup efektif untuk parameter proses penyinteran yang digunakan pada penelitian ini untuk kasus pelet dari serbuk UO_2 pengayaan 2%. Namun perlu dilakukan observasi lebih lanjut terkait pengaturan distribusi ukuran butir serbuk dan besar fraksinya untuk mendapatkan densitas hasil sinter yang lebih tinggi. Sementara penyebab pecahnya pelet sinter hasil kompaksi serbuk UO_2 pengayaan 4% dapat dijelaskan melalui hasil penelitian Q. Jia [19]. Pada proses penyinteran pelet mentah hasil kompaksi yang tersusun dari serbuk halus, pada posisi tertentu dalam pelet diduga terdapat konsentrasi stress yang besar karena jumlah void yang besar, hal inilah yang menginisiasi retak dan penjalaran retak pada waktu pelet disinter [19].

Densitas pelet sinter hasil kompaksi serbuk UO_2 pengayaan 5% pada tiga variasi tekanan kompaksi berturut-turut sebesar 76,55%TD; 77,57%TD dan 75,33%TD. Nilai densitas ini berada jauh di bawah nilai densitas yang disyaratkan untuk pelet UO_2 sinter bahan bakar PWR. Pada Gambar 3 terlihat bahwa pelet yang tersusun dari serbuk yang didominasi oleh serbuk berukuran halus (serbuk UO_2 pengayaan 2%) mempunyai mampu sinter lebih baik dibandingkan pelet dari serbuk berukuran lebih kasar (serbuk UO_2 pengayaan 5%). Hasil ini sejalan dengan penelitian D. Sophia dkk. yang menyatakan bahwa hasil sinter memiliki kekuatan paling tinggi untuk kompaksi serbuk dengan fraksi serbuk halus yang paling besar [22].

SIMPULAN

Serbuk UO_2 pengayaan 2% dan 4% memiliki distribusi ukuran serbuk monomodal sementara serbuk pengayaan 3% dan 5% dengan distribusi ukuran trimodal. Densitas pelet sinter dari serbuk UO_2 pengayaan 2% dan 5% pada variasi tekanan kompaksi berada pada rentang (91,13 - 91,70)%TD dan

(75,33-77,57)%TD sementara pelet sinter UO₂ pengayaan 3% dan 4% tidak dapat diukur densitasnya karena pelet retak/pecah. Mampu kompak dan mampu sinter yang paling baik ditunjukkan oleh serbuk UO₂ pengayaan 2% dengan distribusi ukuran serbuk monomodul yang didominasi oleh serbuk halus berukuran <75µm dengan fraksi 93%berat dengan densitas pelet mentah dan densitas hasil sinter tertinggi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pimpinan PTBBN dan seluruh staf yang telah berkontribusi dalam pelaksanaan penelitian dan penyusunan karya tulis ilmiah ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] E. Mutiara, M. Rachmawati, dan Masrukan, "Perbandingan densitas pelet UO₂ hasil peletisasi menggunakan serbuk dan mikrosfir", *Urania Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir*, vol. 22 no. 1, hal. 35-42, 2016.
- [2] E. K. Papynov, et al, "UO₂ fuel pellets fabrication via spark plasma sintering using non-standard molibdenum die", *IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering*, 307 012029, 2018.
- [3] J. Buckley, "The manufacture and characterisation of composite nuclear fuel for improved in-reactor performance," Thesis, University of Manchester, U.K., 2017.
- [4] H. Xiao, C. Long, dan G. Liu, "Microstructure and thermophysical properties of Er₂O₃-doped UO₂ ceramic pellets", *Journal of Nuclear Materials*, 534, 152109, 2020.
- [5] M. E. Cazado and A. C. Denis, "Model of nuclear fuel pellets densification under irradiation and isothermal conditions: Application to UO₂ fuels", *Journal of Nuclear Materials*, 510, 585-595, 2018.
- [6] T. Yao, et al, "TiO₂ doped UO₂ fuel sintered by spark plasma sintering", *Journal of Nuclear Materials*, 469, 251-261, 2016.
- [7] M. Safari, M. Aghaie, dan Gh. Allahyarizadeh, "Numerical study of hyperstoichiometric fuel creep (UO_{2+x}) in fuel clad interaction of WWER1000", *Annals of Nuclear Energy*, 133, 950-959, 2019.
- [8] M. Cooper et al, "Fission gas diffusion and release for Cr₂O₃-doped UO₂: From the atomic to the engineering scale", *Journal of Nuclear Materials*, 545 2020, doi: 10.1016/j.jnucmat.2020.152590
- [9] Y. H. Koo, et al, "Fission gas release in the micro-cell fuel pellet under normal operating conditions: A simplified approach based on UO₂ pellet experience", *Journal of Nuclear Materials*, 527, 151801, 2019.
- [10] T. Yulianto, dan E. Mutiara, "Mikrostruktur dan komposisi fasa pelet sintear UO₂ dengan penambahan dopan logam zirkonium" *Urania Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir*, vol. 24, No. 1, 2018.
- [11] Wijaksana, dan E. Mutiara, "Pengaruh komposisi serbuk halus UO₂ terhadap kerapatan kompakan UO₂", *Prosiding Presentasi Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir III*, PEBN, ISSN 1410-1998, hal 269-279, 1998.
- [12] Y. Bai, G. Wagner, and C.B. Williams, "Effect of Particle Size Distribution on Powder Packing and Sintering in Binder Jetting Additive Manufacturing of Metals", *J. Manuf. Sci. Eng.*, vol.139, no. 8: 081019, 2017.
- [13] C.Chang, and Y. Deng, "A nonlinear packing model for multi-sized particle mixtures", *Powder Technology*, vol. 336, pp. 449-464, 2018.
- [14] X. Ye, Y. Li, Y. Ai, and Y. Nie, "Novel powder packing theory with bimodal particle size distribution-application in superalloy", *Advanced Powder Technology*, vol. 29, no. 9, pp. 2280-2287, 2018.
- [15] J. Fruhstorfer, and C.G. Aneziris, "Influence of particle size distributions on the density and density gradients in uniaxial compacts", *Ceram. Int.*, vol. 43, pp. 13175–13184, 2017.
- [16] J. Fruhstorfer, J. Hubáľková, and C. G. Aneziris, "Particle packings minimizing density gradients of coarse-grained compacts", *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 39, no.10, pp. 3264-3276, 2019.
- [17] Y. Bai, G. Wagner, and C.B. Williams, "Effect of bimodal powder mixture on powder packing density and sintered density in binder jetting of metals," In *2015 Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, vol. 62, pp. 758-771, 2015.
- [18] C. Sun, X. Tian, L. Wang, Y. Liu, C. M. Wirth, J. Günster, D. Li, and Z. Jin, "Effect of particle size gradation on the performance of glass-ceramic 3D printing process", *Ceramics*

- International*, vol. 43, no. 1, Part A, pp. 578-584, 2017.
- [19] Q. Jia, X. An, H. Zhao, H. Fu, and X. Yang, "Compaction and solid-state sintering of tungsten powders: MPFEM simulation and experimental verification", *Journal of Alloys and Compounds*, vol 750, pp. 341–349, 2018.
- [20] Y. Zou, C. Li, J. Liu, J. Wu, and Y. Shi, "Towards fabrication of high-performance Al₂O₃ ceramics by indirect selective laser sintering based on particle packing optimization", *Ceramics International*, vol. 45, no. 10, pp. 12654-12662, 2019.
- [21] H. A. C. K. Hettiarachchi, and W. K. Mamppearachchi, "Effect of vibration frequency, size ratio and large particle volume fraction on packing density of binary spherical mixtures", *Powder Technology*, vol. 336, pp. 150-160, 2018.
- [22] D. Sofia, et al., "Selective laser sintering of ceramic powders with bimodal particle size distribution", *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 136, pp. 536-547, 2018.
- [23] T. Yulianto, "Pembuatan pelet sinter UO₂ diperkaya dan penyiapan komponen perakitan pin uji elemen bakar PWR", *Prosiding Hasil-Hasil Penelitian EBN*, ISSN 0854-551, PTBBN, hal 76-83, 2018