

## PENGARUH KADAR Mo TERHADAP FASA $\gamma$ -UMo, SIFAT TERMAL DAN DENSITAS PADUAN UMo

### EFFECT OF Mo CONTENT ON THE $\gamma$ -UMo PHASE, THERMAL CONDUCTIVITY AND DENSITY OF UMo ALLOY

M Husna Alhasa, Masrukan, Jan Setiawan  
Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir -BATAN  
Kawasan Puspiptek Serpong, Tangerang Selatan  
[mhalhasa@yahoo.com](mailto:mhalhasa@yahoo.com)

Diterima 20 Desember 2016, diterima dalam bentuk perbaikan 22 Februari 2017, disetujui 27 Maret 2017

#### ABSTRAK

**PENGARUH KADAR Mo TERHADAP FASA  $\gamma$ -UMo, SIFAT TERMAL DAN DENSITAS PADUAN UMo.** Paduan uranium-molibdenum hasil peleburan dengan kadar 2%, 5%, 10% dan 15% Mo dalam kondisi vakum dikenai perlakuan panas. Paduan UMo dipanaskan hingga suhu 900 °C pada daerah  $\gamma$  dan didinginkan secara cepat ke daerah suhu kamar dengan media air. Spesimen paduan UMo kemudian dianalisis struktur fasa, konduktivitas termal dan densitas paduan. Hasil analisis pola difraksi sinar X paduan UMo pasca-peleburan dengan kadar 2%, 5% 10% dan 15% Mo menghasilkan puncak puncak fasa  $\alpha$  dan  $\delta$ . Pola difraksi paduan UMo pasca-pendingin cepat dengan kadar 2%, 5%, 10% dan 15% Mo menghasilkan puncak puncak fasa  $\gamma$  dengan bidang hkl 110, 200, 211 dan 220. Pembentukan fasa  $\gamma$  dalam bentuk body centered cubic, BCC merupakan hasil transformasi dari fasa  $\alpha + \delta$  (orthorombik dan tetragonal). Struktur fasa  $\gamma$  relatif stabil dan stabilitasnya semakin meningkat dengan semakin tinggi kadar Mo. Namun demikian konduktivitas termal dan densitas paduan UMo mengalami penurunan dengan meningkatnya kadar Mo. Struktur fasa  $\gamma$ -UMo meta stabil relatif baik di atas kisaran 5-10% kadar Mo.

**Kata kunci:** Kadar Mo, fasa  $\gamma$ -UMo, konduktivitas termal, densitas, quenching.

#### ABSTRACT

**EFFECT OF Mo CONTENT ON THE  $\gamma$ -UMo PHASE, THERMAL CONDUCTIVITY AND DENSITY OF UMo ALLOY.** The U-Mo alloy with 2%, 5%, 10% and 15% wt Mo content, which was produced by melting process under vacuum condition subjected to heat treatment. The UMo alloy was subjected to heat treatment up to 900 °C  $\gamma$ -phase temperature and quenching to room temperature in water. Analysis of the UMo specimen included phase structure, thermal conductivity and density. X-ray diffraction analysis resulted of the as-cast U-Mo specimen with 2%, 5%, 10% and 15% wt Mo content showed the peaks of  $\alpha$  dan  $\delta$  phase. X-ray diffraction pattern of the quenching U-Mo alloy specimen with 2%, 5%, 10% and 15% wt Mo content showed that the peaks of  $\gamma$ -phase with the planes of (110), (200), (211) and (220). The  $\gamma$ -phase form body centered cubic was transformation from fasa  $\alpha + \delta$ . The  $\gamma$ -phase relative stable with increasing Mo content. However, the thermal conductivity and density decreased with increasing Mo content. The metastable  $\gamma$ -phase structure was relatively good over a range of 5-10% wt Mo content.

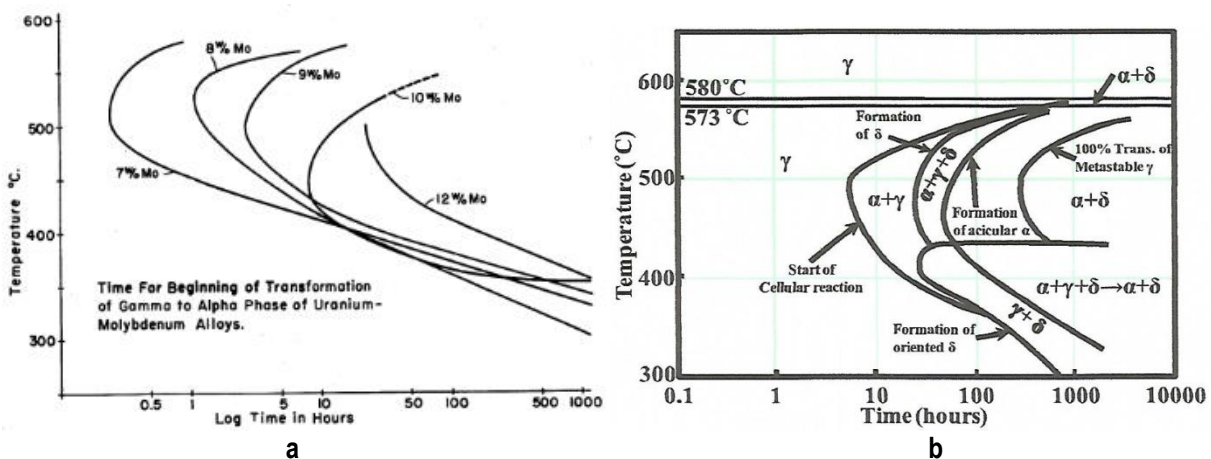
**Keywords:** Mo content,  $\gamma$ -UMo phase, Thermal conductivity, density, quenching.

#### PENDAHULUAN

Pengembangan bahan bakar untuk konsumsi reaktor nuklir harus memenuhi persyaratan sifat bahannya antara lain memiliki ketahanan yang tinggi terhadap pengaruh iradiasi. Bahan bakar uranium dengan unsur pemadu utamanya menghasilkan daerah fasa  $\gamma$  relatif besar cenderung memiliki ketahanan yang tinggi terhadap dampak yang ditimbulkan oleh pengaruh iradiasi. Unsur pemadu utama yang menghasilkan daerah fasa gamma yang lebih besar dan memiliki densitas tinggi antara lain, logam molibdenum (Mo) [1,2]. Paduan uranium dengan

unsur pepadu utama logam Mo berpotensi memperluas daerah fasa  $\gamma$  dan menstabilisasi fasa  $\gamma$  dengan semakin tinggi kadar Mo [3]. Struktur fasa  $\gamma$  paduan U-Mo memiliki sifat yang relatif baik terhadap iradiasi karena berstruktur sel-satuan BCC (*Body Centered Cubic*) dan memiliki kemampuan larut padat yang relatif besar. Kelarutan Mo ke dalam struktur kristal  $\gamma$ -U mencapai 22,5 % berat Mo pada suhu 1285 °C. Struktur fasa  $\gamma$  kesetimbangan dalam bentuk padat berada pada daerah suhu di atas 575 °C dan di bawah 1285 °C yang sangat ditentukan oleh komposisinya, sedangkan di bawah suhu 575 °C merupakan daerah struktur fasa  $\alpha+\delta$ . Struktur fasa  $\gamma$  memiliki sel-satuan BCC dengan parameter kisi  $a = 3,524 \text{ \AA}$ . Struktur fasa  $\gamma$  paduan U-Mo dapat dipertahankan dalam kondisi fasa  $\gamma$  metastabil hingga pada suhu kamar melalui proses rekayasa *heat treatment-quenching*, seperti ditunjukkan pada Gambar 1, yaitu diagram TTT (*Time Temperature Transformation*) [4].

Gambar 1 memperlihatkan bahwa waktu pendinginan sangat tergantung pada kadar Mo dalam paduan. Kadar Mo yang lebih rendah memerlukan waktu pendinginan relatif cepat daripada kadar Mo yang tinggi. Kadar Mo semakin tinggi menunjukkan waktu pendinginan untuk menghasilkan struktur fasa  $\gamma$  metastabil dari suhu  $\gamma$  ke suhu kamar menjadi semakin lama. Penelitian yang dilakukan oleh M. Durazzo, dkk [5] untuk U-10% Mo melalui proses *dehydriding* dapat menghasilkan puncak fasa  $\gamma$  meskipun berlangsung secara natural dengan pendinginan media udara. Selain itu, M.S. Adonis dkk [6] untuk U-10% Mo melalui perlakuan panas *annealing* pada suhu 1000 °C selama waktu 72 jam menghasilkan puncak-puncak fasa  $\gamma$  dan sedikit uranium oksida ( $\text{UO}_2$ ). Proses perlakuan panas paduan U-Mo pada daerah suhu  $\gamma$  dengan waktu tertentu mengakibatkan terjadinya proses transformasi fasa yang diikuti dengan perubahan struktur kisi dan parameter kisi. Struktur kisi fasa yang terbentuk pada daerah suhu  $\gamma$  dipertahankan hingga pada suhu kamar guna mencegah berlangsungnya proses difusi, yaitu dengan menurunkan suhu secara paksa dan mendadak. Penurunan suhu secara paksa dan mendadak ini mengakibatkan atom Mo tidak memiliki cukup waktu untuk berdifusi keluar mengikat U membentuk fasa kedua. Paduan U-Mo hasil *quenching* yang menghasilkan fasa  $\gamma$  relatif lebih stabil terhadap pengaruh termal. Kadar Mo yang relatif tinggi dalam paduan terutama (7-10% berat Mo) semakin meningkatkan stabilitas paduan tersebut terhadap perubahan dimensi dan struktur akibat pengaruh iradiasi [7]. Perubahan dimensi paduan U-Mo baik secara mikro maupun makro akibat pengaruh iradiasi dapat dicegah dengan mempertahankan struktur fasa  $\gamma$  sampai mencapai pada suhu kamar [8]. Selain itu, sifat termal dan densitas paduan U-Mo sangat dipengaruhi pula oleh kadar Mo dalam paduan dan semakin tinggi kadar Mo semakin memberi dampak terhadap perubahan sifat termal dan densitas.



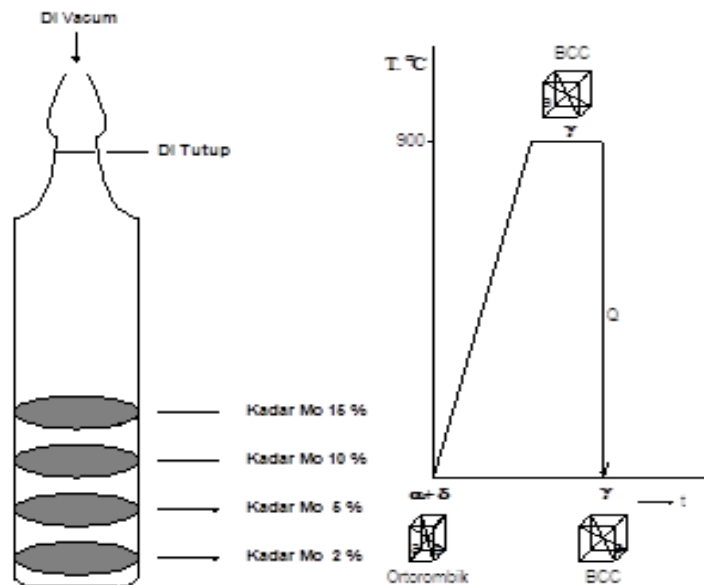
**Gambar 1.** Diagram TTT paduan UMo dengan *quenching* dari suhu  $\gamma$ , a) 7 - 12% berat Mo, b) 10% berat Mo.

Penelitian hasil *quenching* sebelumnya secara terbatas telah mengkaji pengaruh konsentrasi Mo terhadap struktur fasa dan sifat kekerasan [9]. Sementara itu, pada penelitian ini akan mengkaji hubungan dan pengaruh kadar Mo terhadap rekayasa struktur fasa gamma serta terhadap konduktivitas termal dan densitas paduan. Hasil kajian yang dilakukan oleh A.F. Williams serta J.T. Creasy menginformasikan bahwa nilai konduktivitas termal akan mengalami perubahan dengan semakin tinggi densitas dan suhu. Densitas dan suhu semakin tinggi akan mengakibatkan konduktivitas termal meningkat [10,4]. Penelitian ini melakukan rekayasa

struktur fasa paduan U-Mo hasil leburan dengan proses pendinginan cepat (*quenching*). Proses pendinginan cepat diharapkan akan menghasilkan struktur fasa  $\gamma$  dengan struktur kristal *body centered cubic* (BCC). Pengamatan dilakukan terhadap struktur fasa terutama fasa  $\gamma$ -U-Mo yang dihasilkan melalui proses pendinginan cepat. Analisis struktur fasa U-Mo hasil *quenching* diamati berdasarkan pola difraksi sinar X dan konduktivitas termal diamati berdasarkan perhitungan dan pengukuran. Sementara itu, densitas paduan U-Mo dianalisis berdasarkan perhitungan teoritis dan pengukuran secara eksperimen. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan struktur fasa  $\gamma$  paduan U-Mo dengan melakukan rekayasa struktur kristal melalui proses *heat treatment-quenching*. Data hasil kegiatan penelitian ini akan digunakan sebagai data dukung pengembangan bahan bakar reaktor riset U-Mo berdensitas tinggi.

## METODOLOGI

Pemaduan logam uranium dan molibdenum dengan kadar 2%, 5%, 10% dan 15% Mo masing-masing seberat 10 g dilebur dengan menggunakan tungku busur listrik. Paduan uranium-molibdenum hasil peleburan dengan kadar 2%, 5%, 10% dan 15% Mo dalam kondisi vakum, seperti ditunjukkan pada Gambar 1 dipanaskan pada suhu 900 °C selama waktu 100 jam dan kemudian didinginkan di dalam media air bersuhu kamar. Spesimen hasil pendinginan dari daerah suhu  $\gamma$  ke suhu kamar kemudian di analisis perubahan struktur fasa dan fasa yang terbentuk serta perkiraan nilai konduktivitas termal dan densitas paduan. Pengamatan struktur fasa dan pembentukan fasa dianalisis berdasarkan pola puncak difraksi sinar X. Analisis nilai konduktivitas termal paduan UMo dilakukan berdasarkan perhitungan dan pengukuran. Pengukuran densitas paduan dilakukan berdasarkan perhitungan teoritis dan eksperimen.



**Gambar 2.** Spesimen dalam tabung *quarsa* yang dipanaskan pada daerah suhu  $\gamma$  900 °C dan *diquenching*.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

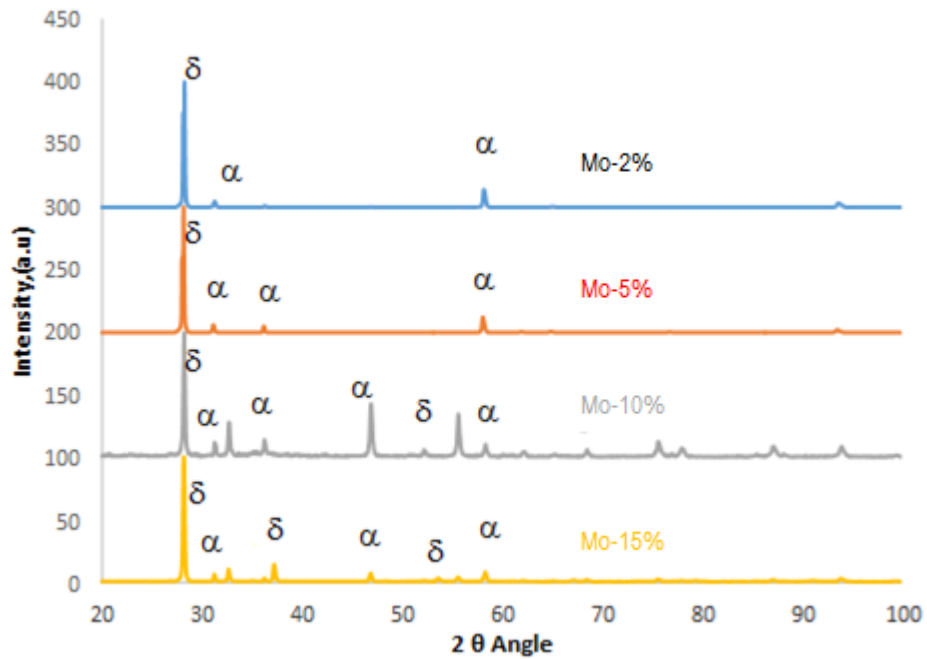
Pola puncak difraksi sinar X spesimen paduan UMo hasil proses peleburan dan perlakuan panas ditunjukkan pada Gambar 3 dan 4. Struktur fasa spesimen UMo hasil peleburan dengan kadar persentase berat Mo dalam paduan dianalisis berdasarkan pola difraksi sinar X ditunjukkan pada Gambar 3. Pembentukan struktur fasa  $\gamma$  paduan UMo hasil rekayasa melalui proses perlakuan panas diperlihatkan pada gambar 4. Nilai

konduktivitas termal dan densitas paduan UMo pada kadar persentase berat Mo yang berbeda dalam paduan ditunjukkan pada Gambar 5 dan 6.

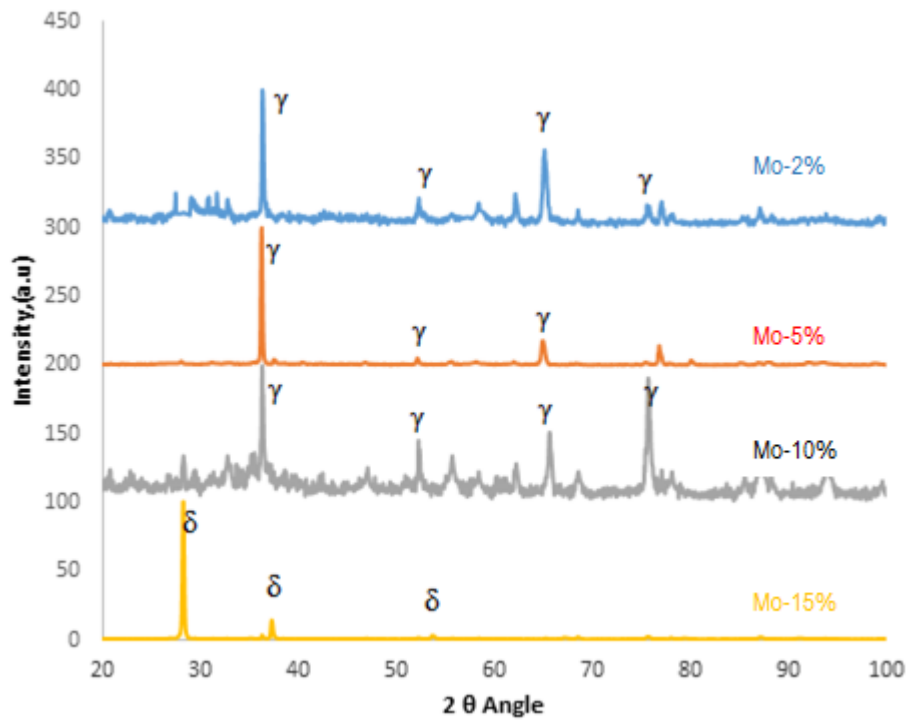
Gambar 3 dan 4 memperlihatkan puncak-puncak pola difraksi paduan U-Mo pasca-peleburan dan pasca-*quenching* dengan kadar 2% Mo, 5% Mo, 10% Mo dan 15% Mo. Gambar 3 menunjukkan pola difraksi sinar X paduan UMo pasca-peleburan dengan kadar 2%, 5% dan 10% Mo menghasilkan puncak-puncak fasa  $\alpha$  dan  $\delta$ . Potensi pembentukan fasa  $\delta$  semakin meningkat dengan semakin tinggi kadar Mo dalam paduan dan memungkinkan seluruhnya bertransformasi dalam bentuk fasa  $\delta$ , seperti tampak pada Gambar 3 dengan kadar 15% Mo. Hal ini sesuai dengan teori diagram fasa biner paduan UMo, yaitu pada daerah komposisi 0 - 16,2% berat Mo di bawah suhu 575 °C akan terjadi pembentukan fasa  $\alpha$  dan  $\delta$ . Fasa  $\delta$  akan mulai terbentuk seluruhnya pada kadar 15 - 16,2% Mo. Fasa ini merupakan hasil transformasi dari fasa  $\gamma$  yang mengikuti reaksi fasa *eutectoid*, yaitu  $\gamma \rightarrow \alpha + \delta$ . Proses ini berlangsung pada saat proses solidifikasi dari suhu titik cair ke suhu kamar yang diiringi dengan dekomposisi fasa  $\gamma$  menjadi fasa  $\alpha + \delta$ . Besarnya fasa  $\alpha$  dan  $\delta$  sangat dipengaruhi oleh kadar Mo sebagai unsur pematu. Kadar Mo semakin tinggi mengakibatkan semakin memperbesar jumlah fasa  $\delta$  dalam paduan, seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Gambar 3 memperlihatkan bahwa paduan dengan kadar 2% dan 5% Mo hasil lebur memiliki puncak fasa  $\alpha$  dan  $\delta$ . Pembentukan fasa  $\alpha$  relatif lebih besar dan lebih dominan daripada fasa  $\delta$ . Hal ini karena sebagian besar Mo larut padat secara substitusi ke dalam uranium dan sisanya yang tidak tertampung cenderung bereaksi dengan uranium membentuk fasa baru yaitu fasa  $\delta$ . Kelarutan padat atom Mo sebesar 2% tidak memberi dampak berarti terhadap perubahan fasa struktur kristal orthorombik. Demikian pula untuk 5% Mo belum menunjukkan perubahan yang cukup berarti terhadap perubahan struktur fasa. Sementara itu, paduan dengan 10% dan 15% Mo menunjukkan bahwa Mo yang tidak larut padat dalam fasa  $\alpha$  lebih besar dan akan bereaksi membentuk fasa  $\delta$  berupa senyawa  $U_2Mo$  dan fasa ini lebih dominan, seperti ditunjukkan pada Gambar 3.

Gambar 4 memperlihatkan pola difraksi paduan UMo pasca-*quenching* dengan kadar 2%, 5% dan 10% Mo memiliki puncak-puncak fasa  $\gamma$  dengan bidang hkl 110, 200, 211 dan 220. Puncak fasa  $\gamma$  untuk masing-masing bidang hkl berada pada sudut  $2\theta$ , yaitu 37°, 53°, 66° dan 76°. Pembentukan fasa  $\gamma$  dalam bentuk BCC (*body centered cubic*) merupakan hasil transformasi dari fasa  $\alpha + \delta$  (orthorombik dan tetragonal) melalui proses perlakuan panas pada suhu 900 °C. Proses perlakuan panas ini memungkinkan berlangsungnya difusi atom secara substitusi melalui kisi kristal yang mengakibatkan terjadinya transformasi struktur kristal orthorombik dan tetragonal ke BCC. Selain itu, semakin tinggi kadar Mo dalam paduan semakin meningkatkan pertumbuhan fasa  $\delta$  dan semakin besar kontribusi struktur kristal tetragonal dalam paduan. Sebagai akibatnya proses pertumbuhan fasa  $\gamma$  dengan kadar 10% Mo relatif akan lebih cepat dan mudah dengan kebutuhan energi yang lebih rendah daripada paduan dengan kadar 2 dan 5% Mo. Hal ini karena pembentukan fasa  $\gamma$  dengan kadar 10% Mo dapat mulai terjadi pada suhu lebih rendah, yaitu berkisar suhu 575 °C dengan komposisi hingga 11% Mo. Sementara itu, paduan UMo dengan kadar 15% Mo akan semakin meningkat kontribusi fasa  $\delta$  berstruktur tetragonal dan energi yang dibutuhkan untuk proses transformasi fasa akan lebih besar daripada dengan 10% Mo. Hal ini karena proses transformasi fasa ke daerah suhu fasa  $\gamma$  semakin tinggi. Selain itu, akibat peningkatan fasa  $\delta$  dan jarak antar atom struktur tetragonal semakin besar akan berdampak terhadap transformasi panas sehingga hantaran kalor menjadi semakin menurun. Kondisi ini memungkinkan proses transformasi fasa  $\gamma$  dengan kadar 15% Mo relatif sukar dan tidak mudah dicapai, seperti ditunjukkan pada Gambar 4. Proses perlakuan panas terhadap paduan uranium dengan kadar 2%, 5% dan 10% Mo dapat menghasilkan rekayasa struktur fasa  $\alpha + \delta$  dengan sel satuan orthorombik dan tetragonal menjadi struktur fasa  $\gamma$  dengan sel satuan BCC, seperti ditunjukkan pada Gambar 4. Struktur fasa  $\gamma$  relatif stabil dan semakin tinggi kadar Mo dalam paduan semakin meningkatkan kestabilan fasa  $\gamma$  terhadap pengaruh termal [11,12]. Namun demikian, sifat termal sebagai transformasi panas terutama konduktivitas termal dan densitas paduan semakin menurun dengan meningkatnya kadar Mo, seperti ditunjukkan pada Gambar 5 dan 6. Berdasarkan kajian yang dikemukakan di atas menunjukkan bahwa rekayasa struktur fasa  $\gamma$  yang optimal, yaitu berkisar di atas 5 - 10% kadar Mo dalam paduan. Selain itu, struktur fasa  $\gamma$ -UMo yang memiliki kadar Mo di bawah 5% relatif kurang stabil, cenderung akan mengalami dekomposisi pada suhu tertentu sebagaimana kajian yang telah dilakukan sebelumnya oleh Durand serta N. Erikson [12,13]. Duran menginformasikan bahwa untuk paduan UMo dengan kadar 2% Mo bila mengalami

pemanasan pada suhu 400 °C selama waktu tertentu akan bertransformasi kembali ke keadaan kesetimbangan menjadi fasa  $\alpha+\delta$ . Sementara itu, paduan UMo dengan kadar 5% Mo berpotensi kembali ke keadaan kesetimbangan menjadi fasa  $\alpha+\gamma$ .

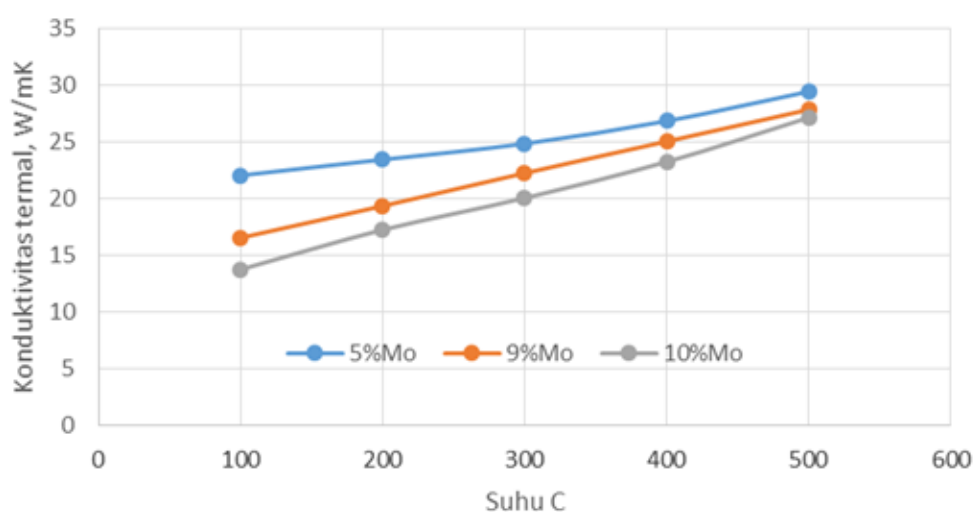


Gambar 3. Pola difraksi sinar X paduan UMo hasil lebur (*as-cast*).



Gambar 4. Pola difraksi sinar X paduan UMo hasil *quenching*.

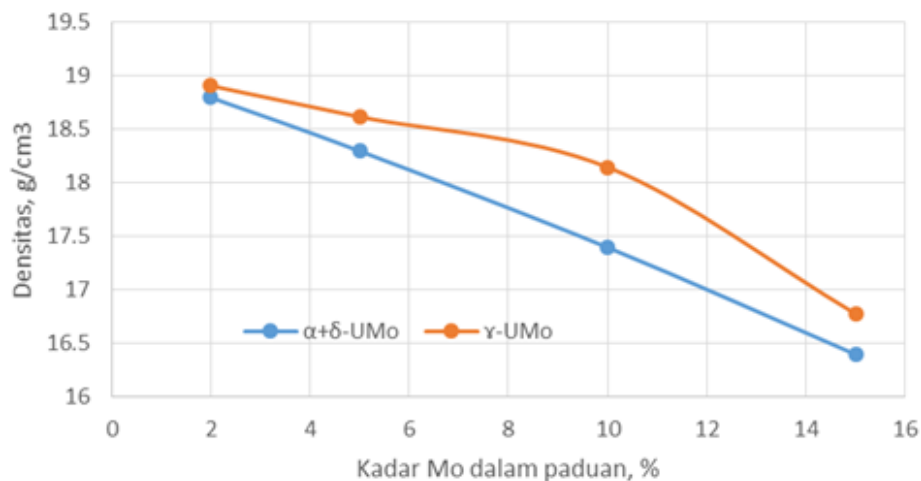
Gambar 5 memperlihatkan nilai konduktivitas termal dengan kadar Mo dan suhu yang berbeda. Konduktivitas termal sangat dipengaruhi oleh struktur material, antara lain kristalinitas, berat atom, ukuran butir, derajat dislokasi dan porositas [14]. Perubahan kadar Mo dalam paduan uranium akan mempengaruhi bentuk kristal, berat atom dan porositas. Kadar Mo semakin tinggi memungkinkan terjadi pembentukan fasa baru dan mengakibatkan perubahan berat atom, ukuran butir dan porositas. Sebagai akibatnya akan berdampak terhadap perubahan konduktivitas termal. Perubahan nilai konduktivitas termal paduan UMo akibat meningkatnya kadar Mo diinformasikan oleh J.H. Creasy [4] seperti pada Gambar 5. Gambar 5 menunjukkan bahwa kadar Mo dan suhu sangat berpengaruh terhadap sifat termal. Konduktivitas termal paduan UMo mengalami penurunan dengan meningkatnya kadar Mo dan mengalami peningkatan dengan semakin tinggi suhu. Hal ini dimungkinkan karena kadar Mo semakin tinggi dalam paduan menyebabkan kontribusi pembentukan fasa  $\delta$  semakin besar. Pembentukan fasa  $\delta$  yang meningkat mengakibatkan struktur kristal tetragonal semakin meningkat pula. Peningkatan fasa  $\delta$  dengan struktur kristal tetragonal yang semakin besar akan berdampak terhadap transformasi panas atau hantaran kalor antar atom menjadi menurun. Hal ini dikarenakan jarak antar kisi atom semakin besar dengan struktur kristal tetragonal yang menyebabkan transformasi kalor secara konduksi menjadi semakin lama dan membutuhkan energi mobilitas elektronnya semakin besar pula. Selain itu, pembentukan fasa kedua dengan struktur kristal tetragonal yang berbeda dengan fasa pertama orthorombik akan berpotensi memacu terbentuknya kekosongan atom dan dislokasi. Peningkatan kekosongan dan dislokasi akan berdampak terhadap sifat termal. Terutama berdampak terhadap proses transformasi kalor atau perpindahan panas bahan. Sebagai akibatnya terjadi perubahan aliran panas dari proses perpindahan panas secara konduksi menjadi konveksi dan radiasi pada daerah yang mengalami kekosongan atom. Kondisi seperti ini mengakibatkan hantaran/perpindahan panas menjadi terhambat atau menurun. Gambar 5 menunjukkan pula bahwa pada daerah suhu yang semakin tinggi nilai konduktivitas termal semakin meningkat. Hal ini dimungkinkan karena pada suhu yang lebih tinggi menghasilkan energi yang lebih besar. Energi yang lebih besar akan berdampak terhadap vibrasi atom semakin meningkat yang mengakibatkan penyerapan panas dan hantaran kalor semakin cepat serta mobilitas elektron semakin tinggi.



**Gambar 5.** Konduktivitas termal paduan UMo fungsi kadar Mo terhadap suhu.

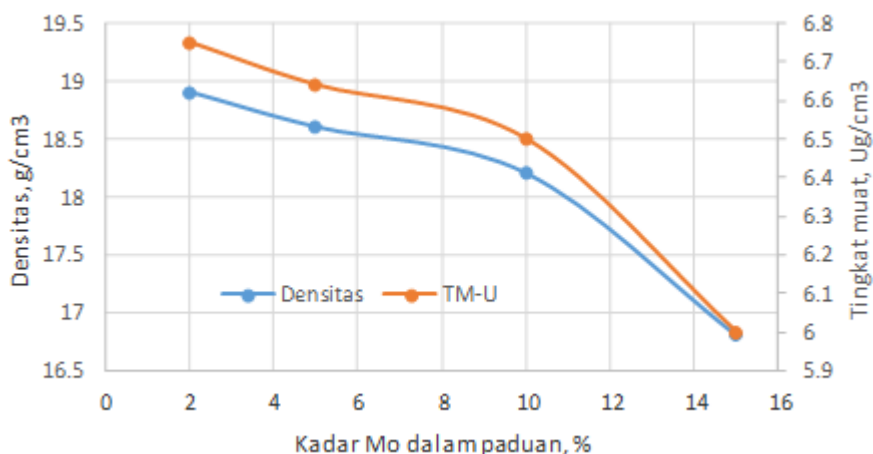
Gambar 6 memperlihatkan hubungan densitas paduan U-Mo sebagai fungsi kandungan persentase berat Mo dalam paduan. Gambar 6 menunjukkan bahwa densitas paduan sangat dipengaruhi oleh kadar Mo. Gambar 6 memperlihatkan bahwa semakin tinggi kadar Mo dalam paduan mengakibatkan terjadinya penurunan densitas paduan. Hal ini terutama karena kadar uranium dalam paduan berkurang dan kadar molibdenum semakin meningkat. Kadar Mo dalam paduan semakin meningkat menyebabkan fasa  $\alpha$  semakin berkurang dan fasa  $\delta$  yang terbentuk semakin besar seiring dengan semakin tinggi kadar Mo. Pembentukan fasa  $\delta$  berupa

senyawa  $U_2Mo$  berstruktur sel satuan tetragonal memiliki parameter kisi relatif lebih besar daripada fasa  $\alpha$ . Hal ini memungkinkan fasa  $\delta$  memiliki volume relatif lebih besar dibandingkan dengan fasa  $\alpha$  berstruktur sel satuan *orthorombic* dengan berat dan jumlah atom relatif lebih besar. Kondisi yang demikian ini mengakibatkan densitas paduan UMo mengalami penurunan seiring dengan semakin tingginya kadar Mo dalam paduan. Gambar 6 memperlihatkan bahwa densitas paduan UMo pada kondisifasa  $\gamma$  relatif lebih tinggi daripada paduan UMo pada kondisi fasa  $\alpha+\delta$ . Hal ini karena paduan UMo mengalami proses transformasi fasa  $\alpha+\delta$  menjadi fasa  $\gamma$ . Transformasi fasa ini sekaligus merubah struktur fasa menjadi *body centered cubic*, BCC. Fasa  $\gamma$  dengan struktur kristal BCC memiliki parameter kisi yang relatif lebih kecil daripada struktur kristal *orthorombik* dan *tetragonal*. Sebagai akibatnya akan berdampak terhadap perubahan volume sel satuan menjadi lebih kecil yang mengakibatkan terjadinya peningkatan densitas paduan. Gambar 6 menunjukkan bahwa paduan  $\gamma$ -UMo dengan kadar 10% Mo tampak perubahan densitas dari fasa *orthorombik* ke fasa  $\gamma$  cenderung lebih besar dari pada 2%, 5% dan 15%. Hal ini karena pada kadar 10% Mo merupakan daerah suhu dan energi terendah terjadinya pembentukan fasa  $\gamma$ . Kondisi ini dimungkinkan struktur kristal fasa  $\gamma$  yang terbentuk cenderung lebih sempurna. Sementara itu, pembentukan fasa  $\gamma$  di atas kadar 10% Mo akan membutuhkan energi yang lebih besar dan suhu yang lebih tinggi daripada kadar 10% Mo. Pembentukan fasa  $\gamma$  pada daerah ini seperti kadar 11 - 15% Mo relatif lebih sukar daripada kadar 10% dan memungkinkan akan berpotensi terbentuknya fasa kedua seiring dengan semakin besarnya kadar Mo dalam paduan.

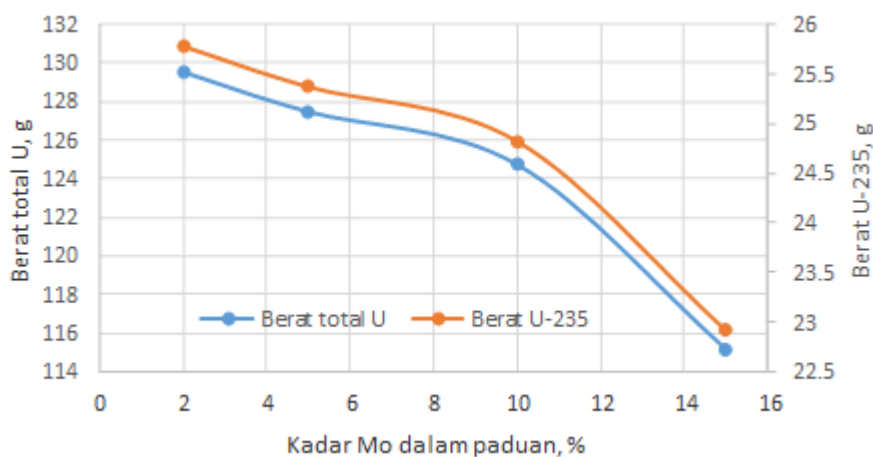


**Gambar 6.** Hubungan densitas terhadap kadar Mo pada paduan U-Mo.

Gambar 7 memperlihatkan hubungan densitas dan tingkat muat yang sangat dipengaruhi oleh kadar Mo. Densitas dan tingkat muat menurun dengan semakin tinggi kadar Mo dalam paduan. Gambar 8 memperlihatkan hubungan berat total U dan  $^{235}U$  dengan kadar Mo. Kadar Mo semakin tinggi berdampak terhadap penurunan densitas sehingga mengakibatkan berat total U dan berat  $^{235}U$  mengalami penurunan. Penurunan jumlah berat uranium dan berat  $^{235}U$  akan berdampak pula terhadap penurunan tingkat muat uranium. Berdasarkan kajian di atas menunjukkan bahwa peranan densitas sangat dominan terhadap perubahan tingkat muat U dan kadar  $^{235}U$ , seperti ditunjukkan pada gambar 7 dan 8. Untuk itu, tingkat muat U dan kadar  $^{235}U$  dapat ditingkatkan lebih tinggi dengan menggunakan densitas fasa yang relatif tinggi, seperti fasa  $\gamma$ -UMo. Fasa  $\gamma$ -UMo merupakan hasil rekayasa struktur melalui proses *quenching* transformasi fasa  $\gamma$  dari struktur *orthorombik-tetragonal* ke BCC. Densitas fasa  $\gamma$ -UMo struktur kristal BCC mencapai densitas hingga 18,9 g/cm<sup>3</sup> dengan kadar 2% Mo. Peningkatan tingkat muat dan jumlah kadar  $^{235}U$  dalam bahan bakar akan menghasilkan fluks neutron relatif besar dan *burn-up* nya semakin tinggi. Sebagai akibatnya pemakaian bahan bakar akan menjadi lebih lama. Meskipun demikian, densitas fasa  $\gamma$ -UMo dengan kadar 2% Mo relatif tinggi daripada 5% dan 10% Mo masih memiliki kekurangan bila ditinjau dari stabilitas termal.



**Gambar 7.** Hubungan densitas dan tingkat muat terhadap kadar Mo pada paduan U-Mo.



**Gambar 8.** Hubungan berat uranium dan U-235 terhadap kadar.

## KESIMPULAN

Paduan UMo di bawah kadar 10% Mo menghasilkan fasa  $\gamma$  metastabil melalui proses pendinginan cepat. Sementara itu, paduan UMo dengan kadar 10% Mo dapat pula dihasilkan fasa  $\gamma$  metastabil melalui proses *annealing*. Fasa  $\gamma$  relatif stabil dan semakin meningkat stabilitas fasa  $\gamma$  dengan semakin tinggi kadar Mo. Namun demikian, muatan uranium, densitas paduan dan konduktivitas termal sebagai transformasi panas atau penghantar kalor semakin menurun dengan meningkatnya kadar Mo. Berkaitan dengan itu, rekayasa struktur fasa  $\gamma$  paduan UMo sebaiknya berada di atas kisaran 5 - 10% kadar Mo.

## UCAPAN TERIMAKASIH

Kami menyampaikan terimakasih kepada segenap pihak atas kerjasama dan bantuan yang telah diberikan baik materil maupun moril terutama pendanaan untuk mendukung kegiatan litbang sehingga makalah ini dapat diselesaikan.



## DAFTAR PUSTAKA

- [1]. N.T.H. Kim-Ngan, S. Sowa, M. Zkrupska, M. Paukov, I. Tkach and L. Havela. "Superconductivity in The Splat-Cooled UMo Alloys", *Journals of Advances in Natural Sciences*, Desember vol 6, 1-6, (2014).
- [2]. F.B. Oliveira, D.A. Andrade, "Relation between Gamma Decomposition and Powder Formation of  $\gamma$ -U8Mo Nuclear Fuel Alloys via hydrogen Embrittlement and Thermal Shock". *Journal of Nuclear Science and Technology*, 4, October, 177-188, (2014).
- [3]. H.J. Ryu, J.M. Park, Y.J. Jeong, K.H. Lee, Y.S. Lee, C.K. Kim, Y.S. Kim. "Post Irradiation Analyses of UMo Dispersion Fuel Rods of Komo test at Hanaro". *Journals of Nuclear Engineering and Technology*, December vol 45, 847-858, (2013).
- [4]. J.T Creasy. Thermal Properties of Uranium-Molybdenum Alloys: Phase Decomposition effects of Heat Treatments, A Thesis of Graduate Studies of Texas A&M University, USA, (2011)
- [5]. M. Durazzo, R.M. Leal Neto, J.R.O. Marques, "Fabrication Procedures for Manufacturing UMo-Al Dispersion Fuel at IPEN", *Proceeding of International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactor*, IAEA, Austria, October, 10-24, ( 2014).
- [6]. Adonis Marcelo Saliba-Silva, Ilson Carlos Martins, Elita Fontenelle Urano De Carvalho, Davilson Gomes Dasilva, Humberto Gracher Riella, Michelangelo Durazzo. "Interdiffusion Studies on Hot Rilled U-Mo/AA1050", *Journal of Materials Research*, 15, 6 July, 964-968, (2012).
- [7]. Hsin Yin Chiang, Material selection of UMo Fuel for Research Reactors: Swift Heavy Ion Irradiation Studies, *PhD Dissertation*, Dissertation of Doctors Program of Technische Universitat Munchen, October, (2014).
- [8]. Emmanuel Perez, Interdiffusion behavior of U-Mo Alloy in contact with Al and Al-Si Alloys, *PhD Dissertation*, Dissertation for The degree of Doctor at The University of Central florida, Orlando, Florida, (2011).
- [9]. M. Husna Al Hasa, Asmedi Suropto, Martoyo, Achmad Paid, "Pengaruh Konsentrasi Mo pada suhu quenching Terhadap Struktur fasa dan Sifat kekerasan Paduan U-Mo", *Prosiding Presentasi Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir VI*, Jakarta 7-8 Nopember, 119-127, (2001).
- [10]. A.F. Williams, B.W. Leitch, N. Wang, "A microstructural Model of The Thermal Conductivity of Dispersion Type Fuels with a Fuel Matrix Interaction layer". *Journals of Nuclear Engineering and Technology*, December, 839-846, (2013).
- [11]. F.B. Oliveira, E.U. Carvalho, H.G. Riella, "Fabrication Results of Gamma Uranium Molybdenum Alloys Fuels", *Proceeding of The International Nuclear Atlantic Conference - INAC*, Rio de Janeiro, Brazil, September 27-October 2, (2009), ISBN 978-85-99141-03-8.
- [12]. J.P. Durand, J.C. Ottne, M. Mahe, G. Ferraz, "LEU Fuel Development at Cerca", *Proceedings the 21th International meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors*, Sao Paulo, (1998).
- [13]. Nicholas Erikson, Phase transformations and Microstructural Evolution in The U-10 wt % Mo Alloy with Various Zr Additions at 900 °C and 650 °C, *Thesis for The Degree of Master Science in The departement of Material Science and Engineering at The University of Central Florida*, Orlando, Florida, (2015).
- [14]. Dita Rahmayanti, Karakteristik sifat termal (DTA-TGA) dan Konduktivitas Termal Keramik Cordierite Berbasis Silika Sekam Padi Dengan Penambahan Alumina(0, 20, 25 da 30 wt %, *Tesis Fakultas FMIPA*, Universitas Lampung, (2016)