

Urania

Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir

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



PEMODELAN DINAMIK PENDINGINAN BAHAN BAKAR NUKLIR BEKAS REAKTOR RISET SECARA NATURAL KONVEKSI PADA PROTOTIPE *DRY CASK STORAGE*

Arifin Istavara^{1,2}, Ratiko³, Hendra Adhi Pratama³, Nasruddin¹

¹Departemen Teknik Mesin – Universitas Indonesia

Kampus Universitas Indonesia, Depok, Jawa Barat 16424

²Direktorat Pengelolaan Fasilitas Ketenaganukliran – BRIN

Kawasan PUSPIPTEK Serpong Gd.31 Tangerang Selatan, Banten 15314

³Pusat Riset Teknologi Daur Bahan Bakar Nuklir dan Limbah Radioaktif – BRIN

Kawasan PUSPIPTEK Serpong Gd.20 Tangerang Selatan, Banten 15314

arifin.istavara@brin.go.id

(Naskah diterima: 27-05-2022, Naskah direvisi: 03-06-2022, Naskah disetujui: 13-06-2022)

ABSTRAK

PEMODELAN DINAMIK PENDINGINAN BAHAN BAKAR NUKLIR BEKAS REAKTOR RISET SECARA NATURAL KONVEKSI PADA PROTOTIPE *DRY CASK STORAGE*. Penelitian ini secara khusus bertujuan untuk menguji kelayakan desain *dry cask storage* dan secara umum memberikan solusi penyimpanan Bahan Bakar Nuklir Bekas (BBNB) di Indonesia. Karena keterbatasan ruang penyimpanan pada penyimpanan tipe basah, maka penelitian ini bertujuan untuk merancang, melakukan eksperimen dan mensimulasikan secara simultan. Pengujian desain canister memvariasikan tegangan *heater* 50 V sampai dengan 125 V dengan kondisi tertutup untuk mengetahui respon canister terhadap tegangan yang sebanding dengan panas peluruhan BBNB. Eksperimen dengan menggunakan ventilasi *dry cask storage* memvariasikan tegangan 100 V sampai dengan 175 V bertujuan untuk menguji *dry cask storage* terhadap pendinginan canister secara natural konveksi. Perhitungan secara teori dan simulasi menggunakan *software* juga dilakukan sebagai pembandingan hasil dari eksperimen dari segi pendinginan secara natural konveksi dan hambatan termal. Hasil eksperimen menunjukkan respon desain *canister* berfungsi dengan baik yaitu semakin besar tegangan listrik yang diberikan, maka temperatur canister bertambah tinggi, yaitu 50 V sampai 125 V merespon 33,4°C sampai 56,6°C. Pengujian pendinginan canister secara natural konveksi menunjukkan hasil yang baik, yaitu antara lain dengan metode buka dan tutup ventilasi *dry cask* menunjukkan penurunan temperatur canister pada tegangan 100 Volt sebesar 16,1°C dan 14,8°C pada 125 Volt. Hasil nilai komparasi antara eksperimen, perhitungan teori dan simulasi pada 175 V temperatur canister yaitu 44,9°C, 49,7°C dan 65°C secara berurutan, untuk *air velocity* yaitu 0,20 m/s, 0,25 m/s dan 0,39 m/s secara berurutan. Hasil perhitungan teori dan simulasi sedikit lebih tinggi dari eksperimen, ini mungkin disebabkan adanya kehilangan panas ke lingkungan saat eksperimen berlangsung. Hasil simulasi diperoleh kontur temperatur dan perilaku aliran natural konveksi didalam *air gap* menunjukkan desain *dry cask storage* berfungsi dengan baik.

Kata kunci : Bahan bakar nuklir bekas, natural konveksi, *canister*, *dry cask storage*.

ABSTRACT

DYNAMIC MODELING OF SPENT NUCLEAR FUEL RESEARCH REACTOR COOLING USING NATURAL CONVECTION IN DRY CASK STORAGE PROTOTYPE. *This study specifically aims to test the feasibility of dry cask storage design as a solution for storing spent nuclear fuel (SNF) in Indonesia. Due to the limited storage space in wet type storage, this research designed, experimented and simulated simultaneously. The canister design test varies the voltage from 50 V to 125 V with closed conditions to determine the response of the canister to the voltage which is proportional to the decay heat of SNF. Experiments using dry cask storage ventilation varying the voltage from 100 V to 175 V which aims to test dry cask storage against convection natural canister cooling. Theoretical calculations and simulations using software were also carried out as a comparison of the experimental results in terms of naturally convection cooling and thermal resistance. The experimental results show the response of the canister design to function properly, the greater the voltage supplied, the higher the canister temperature, 50 V to 125 V responds from 33.4°C to 56.6°C. The canister cooling test by natural convection showed good results, the dry cask ventilation opening and closing method showed a decrease in canister temperature at a voltage of 100 Volts of 16.1 °C and 14.8 °C at 125 V. The canister temperature comparison between experiments, theoretical calculations and simulations at 175 V are 44.9 °C, 49.7 °C and 65 °C respectively, as for velocity are 0.20 m/s, 0.25 m/s and 0.39 m/s respectively. The results of theoretical calculations and simulations are slightly higher than experiments, this is due to heat loss to the environment during the experiment. The simulation results obtained temperature contours and natural convection flow behavior in the air gap, indicating the dry cask storage design is functioning properly.*

Keywords : *Spent nuclear fuel, natural convection, canister, dry cask storage*

PENDAHULUAN

Salah satu produk utama fasilitas nuklir yang memiliki radioaktivitas dan panas peluruhan tertinggi adalah Bahan Bakar Nuklir Bekas (BBNB). Selanjutnya, bahan bakar nuklir yang diganti menjadi bahan bakar nuklir bekas yang memiliki paparan radioaktivitas dan temperatur tinggi, yang berpotensi membahayakan manusia dan lingkungan jika tidak ditangani dengan baik. Pengelolaan BBNB saat ini dilakukan oleh Badan riset dan Inovasi Nasional, meningkatnya jumlah bahan bakar nuklir bekas di gedung kolam penyimpanan tipe basah menyebabkan terbatasnya ruang penyimpanan bahan bakar nuklir bekas di Indonesia [1]-[2]. Mengantisipasi potensi bahaya korosi dan penuaan komponen pada sistem penyimpanan basah juga mendorong penelitian ini untuk dilakukan.

Penyimpanan tipe kering temperatur kelongsong BBNB tidak boleh melebihi batas yang ditentukan sesuai dengan jenis BBNB masing-masing pada penyimpanan bahan bakar nuklir bekas untuk waktu yang lama [3-5]. Jika tidak didinginkan pada temperatur BBNB yang cukup tinggi, kelongsong BBNB berpotensi rusak dan menyebarkan radionuklida yang ada dalam BBNB [3]. Pendingin BBNB tipe *material testing reactor* (MTR) yang baru keluar dari reaktor hingga 4-5 tahun, harus disimpan di penyimpanan basah [6] meskipun biaya pengelolaan lebih mahal dari pada penyimpanan tipe kering [7]-[8]. Setelah panas peluruhan dan radioaktivitas menurun ke nilai tertentu, bahan bakar nuklir dapat dipindahkan dan disimpan dalam sistem penyimpanan kering [1],[9].

Penelitian pendinginan (*heat removal*) pada *dry cask storage* telah banyak dikembangkan. Li dkk melakukan pemodelan termal *dry cask storage vertical* [10], hasilnya menunjukkan bahwa *dry cask storage* dengan konduktivitas termal yang lebih tinggi menghilangkan panas peluruhan dari *dry cask storage* dengan lebih efisien. Wang, Y.H. dkk melakukan analisis karakteristik ventilasi dan kapasitas pembuangan panas *dry cask storage* untuk bahan bakar nuklir bekas. Induksi udara yang dialirkan pada saluran (*air gap*) mempengaruhi aliran udara apung (*bouyancy*), sehingga mempercepat pembuangan panas *dry cask storage* [11]. Ratiko, dkk melakukan analisis terkait *heat removal dry cask storage*, menggunakan

contam software model aliran udara dalam *air gap* dapat mudah diketahui [12]. Alyokhina, S. dkk menganalisis struktur aliran di dalam wadah berventilasi dengan simulasi numerik, mekanisme utama perpindahan panas dan massa yang mengambil bagian dalam pendinginan bahan bakar nuklir bekas dapat mudah diketahui [13]. Penelitian terkait pendinginan BBNB pada *dry cask storage* telah banyak dilakukan di fasilitas nuklir, terutama di pengelolaan limbah radioaktif [11],[14],[15].

Penelitian ini menyajikan pemodelan pendinginan BBNB secara natural konveksi menggunakan prototipe *dry cask storage* dengan skala 1:2, pemodelan dinamik dilakukan antara lain untuk melihat unjuk kerja canister sebagai sumber panas pengganti panas peluruhan BBNB pada eksperimen dengan memvariasikan tegangan, selanjutnya untuk mengamati perilaku aliran udara di *air gap* pada simulasi dan secara umum pemodelan bertujuan untuk memastikan bahwa desain yang akan dibangun dapat berfungsi mendinginkan BBNB didalam *dry cask storage* secara natural konveksi.

Perilaku aliran udara pada *air gap* yang secara signifikan melakukan pendinginan *canister* diamati dan dianalisa, sehingga pendinginan *canister* melalui udara yang mengalir pada *air gap* dapat diketahui dengan baik dari hasil eksperimen dan simulasi ini.

Penelitian ini bertujuan untuk merancang *dry cask storage* sebagai wadah bahan bakar nuklir bekas reaktor riset, studi kelayakan desain untuk pendinginan dengan natural konveksi diamati dan dianalisa, yang bertujuan untuk memastikan bahwa desain berfungsi dengan baik. Hasil penelitian ini diharapkan dapat digunakan sebagai referensi untuk membangun *dry cask storage* dengan skala sesungguhnya (1:1). Mengingat keterbatasan kapasitas penyimpanan tipe basah (*wet storage pool*), mengantisipasi potensi bahaya penuaan komponen, potensi korosi pada sistem *wet storage*, serta pemindahan bahan bakar nuklir bekas untuk perbaikan kolam penyimpanan BBNB (*storage pool*) sehingga sistem *dry cask storage* menjadi kebutuhan yang mendesak di Indonesia. Dengan demikian, melalui penelitian pembuatan penyimpanan tipe kering (*dry cask storage*) ini diharapkan dapat memberikan solusi agar

bahan bakar nuklir bekas dapat dikelola secara memadai dan aman bagi manusia dan lingkungan.

METODOLOGI

Metode penelitian ini dimulai dari melakukan eksperimen menggunakan prototipe desain *dry cask storage* untuk memastikan natural konveksi dalam desain *dry cask storage* berfungsi dengan baik, hasil eksperimen kemudian dibandingkan dengan perhitungan teoritis untuk melihat dan memastikan desain *dry cask storage* beroperasi normal.

Selanjutnya simulasi desain *dry cask storage* menggunakan *ansys fluent software* dilakukan untuk mengamati perilaku aliran udara secara natural konveksi pada permukaan *canister* terhadap aliran udara di *air gap*. Simulasi dilakukan juga untuk memastikan dan melihat kontur temperatur dan *air velocity*, hal ini sangat penting diamati karena untuk membandingkan hasil eksperimen dan simulasi, sebagai dasar bahwa aliran natural konveksi dari desain berfungsi dengan baik.

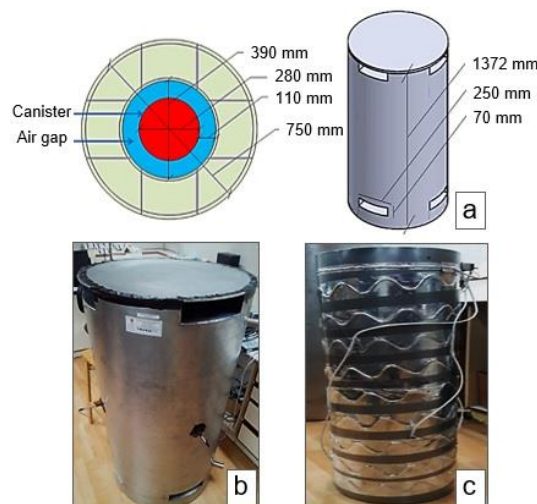
a. Eksperimen

a.1. *Dry cask storage* prototype

Kegiatan eksperimen ini bertujuan untuk memvalidasi perhitungan-perhitungan manual dan pemodelan numerik. Eksperimen menggunakan prototipe penyimpanan *Dry cask storage* untuk bahan bakar bekas MTR dengan setengah skala aslinya (1:2). Ukuran rinci dan fisik sebenarnya dari prototipe ditunjukkan pada Gambar 1.a dan 1.b. Prototipe memiliki empat lubang inlet di bagian bawah, empat lubang outlet di bagian atas, dihubungkan oleh saluran udara (*air gap*) antara permukaan tabung dan permukaan dinding *dry cask storage*.

Prototipe ini memiliki *canister* yang dibalut dengan kawat nikelin pada permukaannya yang berfungsi sebagai pemanas listrik, sesuai Gambar 1.c. Panas dari kawat nikelin ini digunakan untuk

simulasi panas peluruhan bahan bakar nuklir bekas. Kumparan kawat nikelin dihubungkan ke pengatur tegangan (*voltage regulator*) dengan pengaturan tegangan setara dengan panas peluruhan bahan bakar nuklir bekas.



Gambar 1. Ukuran detail prototipe (a); prototipe *dry cask storage* pada ruang laboratorium (b); dan *canister* (c)

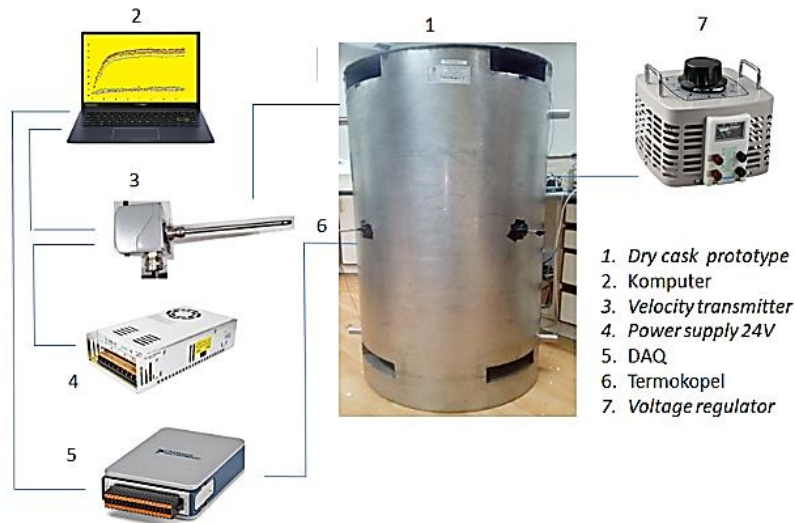
a.2. *Experimental setup*

Pengukuran temperatur dilakukan dengan 9 termokopel pada 9 titik yang berbeda, antara lain 4 titik di *canister*, 4 titik di celah udara dan 1 titik di ruang laboratorium. Eksperimen *setup* ditunjukkan pada Gambar 2.

Pengukuran aliran udara dilakukan dengan alat *velocity transmitter*. *Temperature module hardware* yang digunakan adalah *National Instrument (NI) Data Acquisition (DAQ)* untuk mengambil data pengukuran temperatur dari termokopel. DAQ terhubung ke komputer untuk menganalisis dan merekam data pengukuran, kemudian data ditampilkan di layar komputer menggunakan perangkat lunak *Lab View software*. Spesifikasi alat ukur yang digunakan disajikan pada Tabel 1.

Table 1. *Datasheet* alat ukur yang digunakan

Instrumen	Spesifikasi	Toleransi
<i>Velocity transmitter</i>	<i>Hot film sensor element base</i>	± 0,03 m/s
	Ukuran <i>probe</i> 200 mm <i>Range</i> 0 – 2.00 m/s	
<i>Thermocouple</i>	<i>2 wire type K</i>	± 1,1 °C
	<i>Range</i> 0 – 200 °C Ukuran <i>wire</i> 0.35 mm	



Gambar 2. Eksperimen setup

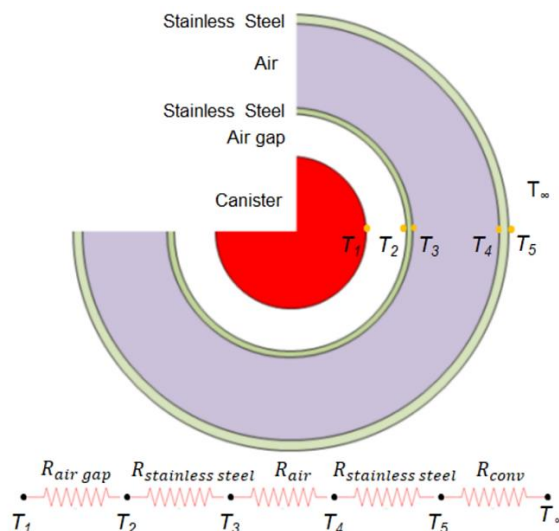
a.3. Hambatan termal

Untuk material dinding *dry cask storage* pada eksperimen ini menggunakan lima lapisan hambatan termal seperti yang

ditunjukkan pada Gambar 3. Perhitungan nilai hambatan termal pada prototipe *dry cask storage* dilakukan dengan menggunakan persamaan 1 dan 2 sebagai berikut.

$$R_{total} = R_{air\ gap} + R_{stainless\ steel} + R_{air} + R_{stainless\ steel} + R_{conv} \tag{1}$$

$$R_{total} = \frac{1}{h_{ag} A_c} + \frac{\ln(\frac{r_3}{r_2})}{2\pi L_{SS} k_{SS}} + \frac{\ln(\frac{r_4}{r_3})}{2\pi L k_{air}} + \frac{\ln(\frac{r_5}{r_4})}{2\pi L_{SS} k_{SS}} + \frac{1}{h_{\infty} A_{SS}} \tag{2}$$



Gambar 3. Konsep hambatan termal material dari prototipe *dry cask storage*.

Perhitungan *heat transfer* untuk *dry cask storage* karena berbentuk *tubular objects* dan luas permukaan perpindahan panas tidak konstan (tergantung pada jari-jari) maka pada benda berbentuk silinder

dinyatakan luas permukaan (*A*) perpindahan kalor konduksi tidak konstan, karena *A* bergantung pada jari-jari (*r*), maka *Q_{cond}* dapat dihitung menggunakan persamaan-persamaan sebagai berikut [16].

$$\int_{r_2}^{r_5} \frac{\dot{Q}_{cond,cyl}}{A} dr = - \int_{T_2}^{T_5} k dT \quad (3)$$

Dengan nilai $A = 2\pi rL$, kemudian persamaan (3) dapat dikonversi ke;

$$\dot{Q}_{cond,cyl} = 2\pi L k \frac{T_2 - T_5}{\ln(\frac{r_5}{r_2})} \quad (4)$$

Maka untuk natural konveksi yang melalui air gap dapat dihitung temperatur pada permukaan *canister* (t_c):

$$\dot{Q} = \frac{t_c - T_{ag}}{R_{total}} \quad (5)$$

Untuk natural konveksi dalam silinder vertikal yaitu pada *dry cask storage*, persamaan bilangan *Nusselt* dapat digunakan; [16] [10]

$$Nu = \frac{hL_c}{k} \quad (6)$$

$$Nu = 0.59 Ra^{1/4} \text{ for } 10^4 < Ra < 10^9 \quad (7)$$

$$Nu = 0.1 Ra^{1/3} \text{ for } 10^9 < Ra < 10^{13} \quad (8)$$

atau

$$Nu = (0.825 + \frac{0.387 Ra^{1/6}}{(1 + (0.492/Pr)^9/16)^{8/27}})^2 \quad (8)$$

untuk;

$$Ra = Gr Pr \quad (10)$$

dengan;

$$Gr = \frac{g \beta (T_s - T_\infty) L^3}{\nu^2} \quad (11)$$

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} \quad (12)$$

Koefisien konveksi eksternal (h_∞) antara udara ambien luar dan dinding *dry cask storage* luar dianggap sebagai konveksi karena faktor kecepatan angin, perpindahan panas ini diatur oleh konveksi dan kecepatan angin eksternal dianggap tetap konstan, untuk menyederhanakan model, dengan ν_∞ sebagai kecepatan angin [17]. Koefisien konveksi eksternal dapat dihitung menggunakan persamaan 13 berikut.

$$h_\infty = 5.7 + 3.8\nu_\infty \quad (13)$$

Selain menggunakan persamaan perpindahan panas konveksi dan konduksi, untuk menghitung perpindahan panas di celah udara *dry cask storage*, dapat digunakan persamaan aliran udara alami yang disebabkan oleh perbedaan temperatur antara dua ruang yang terhubung yaitu antara *inlet* dan *outlet* ventilasi *dry cask storage*.

$$F = C_d A \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (14)$$

Perbedaan tekanan udara pada *air gap* menggunakan persamaan berikut; [18]

$$\Delta P_i = \frac{1}{2} (z_1 + z_2) g (\rho_i - \rho_o) \quad (15)$$

Aliran udara yang masuk dan keluar *dry cask storage* dapat dihitung:

$$F = C_d A \sqrt{(z_2 - z_1) g \frac{(T_i - T_o)}{T_i}} \quad (16)$$

kemudian *velocity* dapat dihitung menggunakan persamaan (17) berikut.

$$v = C_d \sqrt{(z_2 - z_1) g \frac{(T_i - T_o)}{T_i}} \quad (17)$$

a.4. Variasi tegangan

Variasi tegangan dilakukan untuk mengetahui unjuk kerja atau respon temperatur pada permukaan *canister*, pengujian berikutnya adalah dengan melakukan buka dan tutup ventilasi *dry cask storage*. Metode buka dan tutup ventilasi ini untuk memastikan terjadinya aliran udara secara natural konveksi dari ventilasi inlet mengalir melalui *air gap* dan keluar melalui ventilasi outlet. Secara rinci disajikan pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Variasi tegangan pada *canister*

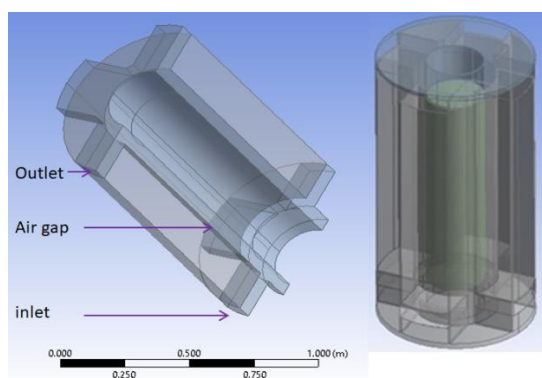
Tegangan (Volt)	Status Ventilasi
50	Tutup
75	Tutup
100	Tutup
125	Tutup
100	Buka
125	Buka
150	Buka
175	Buka

b. Simulasi

Studi dengan metode mengoptimalkan desain *dry cask storage* untuk bahan bakar nuklir bekas di Indonesia pernah dilakukan, sistem pendingin pasif pada *dry storage* yang menggunakan efek *stack* dapat menurunkan temperatur ke parameter yang aman [2]. Desain *dry cask storage* pada penelitian ini menggunakan celah udara, sehingga perpindahan panasnya dilakukan secara natural konveksi. *ANSYS Fluent software* menghitung persamaan antara temperatur dan aliran udara dalam *dry cask storage*, model aliran laminar digunakan dalam simulasi ini.

b.1. Heat removal

Hasil eksperimen digunakan sebagai dasar untuk kegiatan simulasi, nilai yang diperoleh tersebut disimulasikan menggunakan *Ansys fluent software* untuk memastikan dan mengamati perilaku aliran udara panas dari natural konveksi dalam desain *dry cask storage* tersebut berfungsi dengan baik, selain itu simulasi digunakan untuk membandingkan hasil dari eksperimen dan perhitungan matematis, sehingga agar mudah untuk diperoleh hasil analisis yang lebih akurat. Data yang diamati adalah temperatur perpindahan panas dalam °C dan kecepatan aliran dalam m/s. Desain *dry cask storage* yang akan disimulasikan digambar menggunakan *Solidwork software*, Gambar 4 menunjukkan gambar desain *dry cask storage* sesuai prototipe yang digunakan untuk simulasi.



Gambar 4. Desain *dry cask storage* yang digunakan untuk simulasi

b.2. Computational Fluid Dynamics (CFD) setup

Pressure-based solver digunakan untuk menyelesaikan simulasi secara umum dan setting waktu dalam kondisi transient. Perhitungan menggunakan setting *Pressure-based Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations (SIMPLE)*, *Pressure-Velocity Coupling*, *the least-squares cell-based gradients* dan *second-order wind methods* untuk setting momentum dan energi.

Metode inisialisasi yang digunakan adalah standar inisialisasi dengan

perhitungan dimulai dari *inlet*. *Run Calculation* dengan *setting Number of time steps 1000*, *time step size 0,01 s* dan *max iterations / time step 20*.

b.3. Boundary conditions

Simulasi menggunakan ukuran prototipe seperti pada Gambar 1 dan 4, bahan yang digunakan untuk *canister* adalah *stainless steel*, udara digunakan sebagai fluida kerja pada air gap, dan momentum *setup* pada *velocity* spesifik menggunakan metode *magnitude and direction* [19]. Temperatur lingkungan 24,0 °C digunakan untuk *inlet* ventilasi dan *setup* aliran udara hanya menggunakan natural konveksi (tidak memakai aliran paksa). *Heat flux* pada permukaan *canister* 69,77 watt/m² menyesuaikan *heat* yang diberikan pada *canister*. Pengaturan tekanan dan kecepatan udara menggunakan kondisi sekitar/ lingkungan (ruang laboratorium). Outlet ventilasi menggunakan pengaturan default (tidak ada perubahan *outlet setup* ventilasi/ otomatis menggunakan *setup* nilai standar yang sudah disediakan. dan untuk ukuran ventilasi yang digunakan simulasi adalah 250x70 mm.

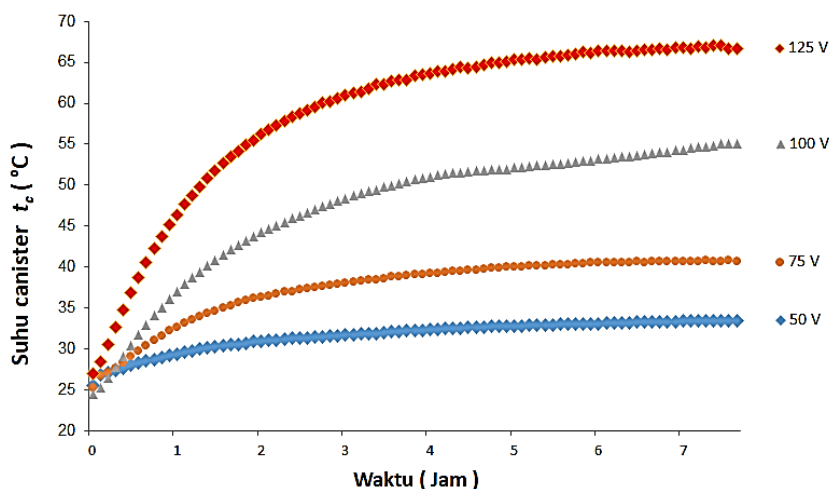
HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis *heat removal* pada penelitian ini dilakukan dengan eksperimen skala laboratorium, perhitungan teoritis dan simulasi menggunakan *ansys fluent software*. Pendinginan secara natural konveksi pada desain ini diamati dan dianalisis, agar kelayakan desain dapat diketahui.

a. Eksperimen menggunakan prototipe *dry cask storage*

a.1. Variasi tegangan dengan ventilasi tertutup

Eksperimen ini dilakukan untuk mengetahui unjuk kerja respon *canister* terhadap panas yang dialirkan dari kawat nikelin, sehingga dari variasi tegangan yang sebanding dengan panas yang diberikan dapat diketahui desain *canister* dengan lilitan kawat nikelin berfungsi dengan baik. Respon *canister* disajikan pada Gambar 5 berikut.



Gambar 5. Respon temperatur canister (t_c) terhadap tegangan dengan ventilasi tertutup.

Gambar 5 menunjukkan bahwa desain canister yang diberi lilitan kawat nikelin berfungsi dengan baik, terlihat respon dengan variasi tegangan yang sebanding dengan temperatur canister menunjukkan kestabilan diantara variasi tegangan tersebut, semakin besar tegangan semakin tinggi temperatur *canister*, sehingga *canister* dapat digunakan untuk mewakili panas peluruhan BBNB dengan temperatur sesuai yang dibutuhkan, temperatur disesuaikan dengan *setting voltage regulator*. Nilai rata-rata temperatur saat stabil setiap tegangan disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Nilai temperatur rata-rata saat stabil dari variasi tegangan dengan ventilasi tertutup.

Tegangan (Volt)	t_c (°C)
50	33,4
75	40,7
100	53,0
125	56,6

a.2. Variasi tegangan dengan ventilasi terbuka

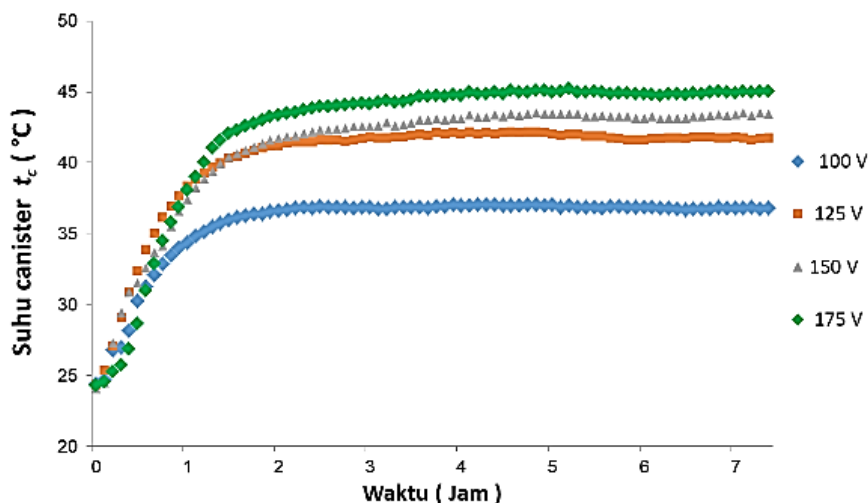
Eksperimen ini menggunakan ventilasi terbuka dengan ukuran 250x70 mm, variasi tegangan dilakukan bertujuan untuk memastikan bahwa terjadi aliran udara secara natural konveksi melalui ventilasi *inlet* mengalir melalui *air gap* yang bersinggungan dengan *canister* (terjadi proses perpindahan panas) kemudian aliran udara keluar melalui ventilasi *outlet*. Respon *canister* terhadap pendinginan secara natural konveksi disajikan pada Gambar 6.

Gambar 6 membuktikan bahwa terjadi aliran udara melalui ventilasi *inlet* kemudian mengalir melewati *air gap* dan bersinggungan dengan *canister*, persinggungan ini yang berpengaruh terhadap penurunan temperatur *canister* dari pendinginan natural konveksi, udara dari *air gap* kemudian keluar melalui ventilasi *outlet*. Nilai rata-rata temperatur saat stabil setiap tegangan disajikan pada Tabel 4

Tabel 4. Nilai temperatur rata-rata saat stabil dari variasi tegangan dengan ventilasi terbuka

Tegangan (Volt)	t_c (°C)
100	36,9
125	41,8
150	43,3
175	44,9

Hasil eksperimen yang disajikan menunjukkan bahwa selain dilakukan secara natural konveksi melalui *air gap*, pendinginan juga dilakukan secara konduksi melalui hambatan termal dinding *dry cask storage* sesuai persamaan (2) (4), aliran udara mendinginkan *canister* secara natural konveksi masuk melalui inlet dan mengalir melalui *air gap* kemudian keluar melalui ventilasi *outlet* dengan *velocity* yang dapat terukur sesuai persamaan (17). Tabel 5 menyajikan perbandingan antara saat ventilasi ditutup dan dibuka, membuktikan aliran udara natural konveksi sangat berpengaruh terhadap pendinginan *canister* secara signifikan. Selisih t_c untuk tegangan 100V senilai 16,1 °C dan 14,8 °C untuk tegangan 125 V.



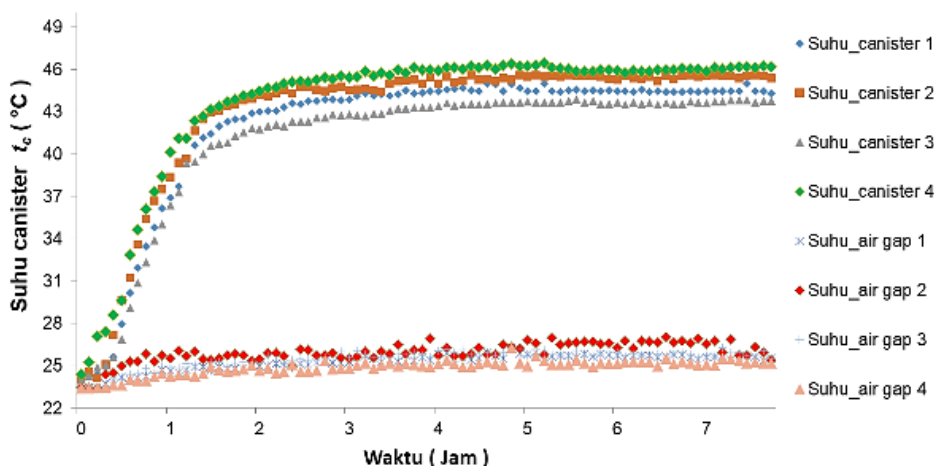
Gambar 6. Respon temperatur canister (t_c) terhadap tegangan dengan ventilasi terbuka

Tabel 5. Perbandingan tutup dan buka ventilasi terhadap temperatur canister

Tegangan (Volt)	Ventilasi tertutup t_c (°C)	Ventilasi terbuka t_c (°C)	Penurunan t_c (°C)
100	53,0	36,9	16,1
125	56,6	41,8	14,8

Dari data eksperimen untuk tegangan 175 V dengan ventilasi terbuka dapat disajikan secara utuh pada Gambar 7 Berdasarkan hasil eksperimen yang

ditampilkan pada Gambar 7 menunjukkan bahwa respon temperatur di dalam *dry cask storage* dengan 8 termokopel, dengan temperatur ambient 23,5 °C sebagai temperatur inlet (t_n), diperoleh temperatur rata-rata saat stabil pada canister (t_c) senilai 44,9 °C dan temperatur air gap (t_{ag}) rata-rata 25,8 °C. Aliran udara secara natural konveksi yang terjadi membuktikan bahwa desain *dry cask storage* berfungsi dengan baik, perilaku aliran natural konveksi dapat dilihat pada Gambar 8 dan 9 dari hasil simulasi sebagai perbandingan.



Gambar 7. Pendinginan natural konveksi dan hambatan termal pada tegangan 175 V.

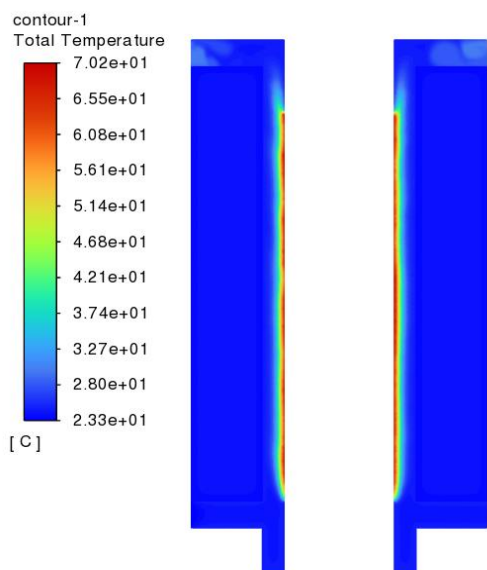
b. Simulasi desain *dry cask storage*

Simulasi ini bertujuan untuk mengamati dan menganalisa aliran udara natural konveksi pada *air gap*, temperatur canister dan *velocity* pada desain *dry cask*

storage. Ukuran ventilasi yang digunakan 250x70 mm sesuai desain pada Gambar 8.

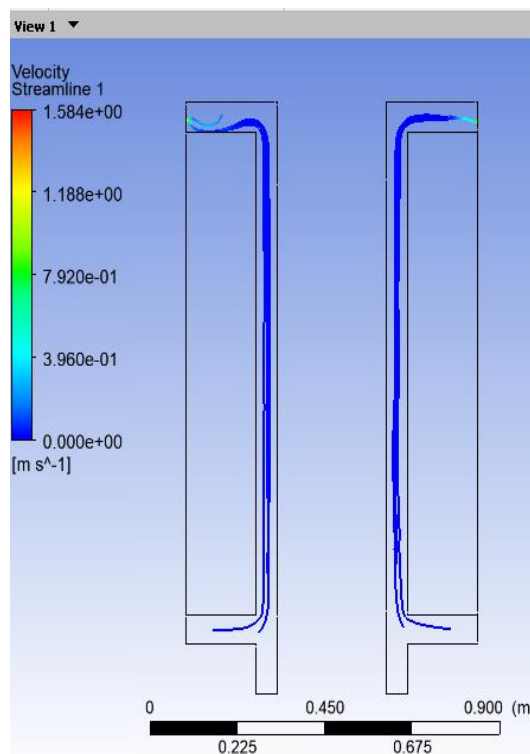
Natural konveksi dapat dilihat pada kontur temperatur yang dihasilkan, aliran udara masuk dengan temperatur 23,5 °C

melalui *air gap* pada kontak *canister* dengan *Heat flux* sebesar 69,77 watt/m². Pada simulasi hasil *CFD Post* dan kontur warna didapatkan temperatur permukaan *canister* rata-rata 65 °C dan *air velocity* pada ventilasi *outlet* rata-rata 0,39 m/s, simulasi *heat removal* menggunakan *Ansys fluent software* ditunjukkan pada Gambar 8 dan 9 berikut.



Gambar 8. Kontur temperatur *canister* dari pengaruh natural konveksi

Sesuai dengan persamaan (2) (4) (15) dan (17), Gambar 8 dan 9 menunjukkan aliran udara masuk dari ventilasi *inlet* kemudian mengalir melalui *air gap* dan udara yang mengalir tersebut bersentuhan dengan *canister*, aliran udara terjadi terus menerus yang berpengaruh terhadap penurunan panas *canister*, udara mengalir keluar melalui ventilasi *outlet*. Pendinginan natural konveksi terjadi di sepanjang permukaan *canister*, dari kontur temperatur terlihat arah aliran udara panas menuju ventilasi *outlet*. Berdasarkan persamaan (2) (4) (15) dan (17), simulasi ini membuktikan bahwa desain *dry cask storage* dapat berfungsi dengan baik dan dapat digunakan sebagai referensi pembuatan *dry cask storage* dengan ukuran sebenarnya.



Gambar 9. Kontur *stream lines* arah aliran *air velocity*

Tabel 6 membandingkan temperatur *canister* eksperimen, perhitungan teori dan simulasi, perhitungan temperatur *canister* (t_c) secara teoritis dihitung menggunakan persamaan (2) (5) dengan R_{total} 0,342 dan t_{ag} rata-rata 25,8°C, perhitungan teoritis untuk *velocity* menggunakan persamaan (17) dengan elevasi ventilasi 1,2 m.

Komparasi antara eksperimen, kalkulasi teori dan simulasi dari nilai temperatur *canister* dan *velocity* pada Tabel 6 menunjukkan nilai kalkulasi teori, dan simulasi sedikit lebih tinggi, ini kemungkinan dikarenakan saat eksperimen terjadi kehilangan panas kelingkungan, dan alasan lain kemungkinan pada perhitungan teori dan simulasi tidak ada asumsi kebocoran pada selongsong alat ukur yang menyebabkan kehilangan panas.

Tabel 6. Perbandingan temperatur rata-rata *canister* dan *velocity* pada eksperimen, perhitungan teori dan simulasi.

	t_c eksperimen (°C)	t_c perhitungan teori (°C)	t_c simulasi (°C)
175 V	44,9	49,7	65
Vent 250x70 mm	v eksperimen (m/s)	v perhitungan teori (m/s)	v simulasi (m/s)
	0,20	0,25	0,39

KESIMPULAN

Unjuk kerja *canister* menunjukkan kinerja yang baik saat merespon variasi tegangan operasi normal, semakin besar tegangan yang diberikan, maka semakin tinggi temperatur pada permukaan *canister*.

Hasil eksperimen menunjukkan bahwa pendinginan *canister* secara natural konveksi sangat efektif dan menurunkan temperatur *canister* secara signifikan. Berdasarkan data eksperimen, perhitungan teori dan simulasi bahwa desain *dry cask storage* ini dapat digunakan sebagai referensi untuk pembuatan *dry cask storage* ukuran sesungguhnya (1 : 1).

Penelitian lebih lanjut untuk menentukan nilai hambatan termal yang berkorelasi dengan material proteksi radiasi perlu dilakukan, sehingga desain *dry cask storage* selain dapat menurunkan temperatur kelongsong BBNB juga dapat menahan radiasi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Laboratorium Teknologi Aerodinamika, Aeroelastika, dan Aeroakustika – BRIN yang telah membantu dalam pelaksanaan simulasi CFD sehingga naskah ini dapat diselesaikan sepenuhnya.

Nomenclatures

T_1 : Temperature surface <i>canister</i> (K)	T_i : Temperature in cask (K)
T_2 : Temperature surface air gap (K)	T_o : Temperature out cask (K)
T_3 : Temperature surface SS1 (K)	N_u : Nusselt number
T_4 : Temperature air (K)	Ra : Rayleigh number
T_5 : Temperature surface SS2 (K)	Pr : Prandtl number
T_∞ : Temperature ambient (K)	Gr : Grashof number
h_{ag} : Air gap thermal conv coefficient (W/m ² K)	C_p : Specific heat (J/kg K)
L_c : The characteristic length of the geometry (m)	β : Expansion coefficient (K ⁻¹)
L_{SS} : Stainless Steel length (m)	g : Gravity (m/s ²)
k : Thermal conductivity (W/mK)	μ : Dinamic viscosity (kg/m s)
k_{SS} : Thermal conductivity SS 14.4 W/mK	t : Temperature (°C)
\dot{Q} : Heat transfer rate (Watt)	C_d : Discharge coefficient
A_c : Surface area <i>canister</i> (m ²)	ρ : Density (kg/m ³)
A_{SS} : Surface area SS (m ²)	ρ_i : Air inlet density (kg/m ³)
T_c : Temperature surface <i>canister</i> (K)	ρ_o : Air outlet density (kg/m ³)
T_{ag} : Temperature air gap (K)	ΔP_i : Pressure difference (Pa)
R : Material thermal resistance (K/W)	z_1 : Elevation 1 (m)
R_{ag} : Air gap thermal resistance (K/W)	z_2 : Elevation 2 (m)
R_{total} : Total thermal resistance (K/W)	v : Velocity (m/s)
r_2 : Outer radius air gap (m)	F : Air flow rate (m ³ /s)
r_3 : Outer radius SS-1 (m)	h_∞ : Thermal coefficient (W/m ² K)
r_4 : Outer radius air (m)	v_∞ : Velocity (m/s)
r_5 : Outer radius SS-2 (m)	h_{ag} : Thermal coefficient (W/m ² K)

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Ratiko, et al., "Current and future strategies for spent nuclear fuel management in Indonesia" *Energy Strategy Reviews*, vol. 32, p. 100575, 2020.
- [2]. Ratiko, et al., "Optimization of dry storage for spent fuel from GA Siwabessy nuclear research reactor", *Int. J. Technol.*, 2018.
- [3]. J. Bae, R. Bean, and R. Abboud, "CFD analysis of a dry storage cask with advanced spent nuclear fuel cask additives", *Ann. Nucl. Energy*, vol.145, p. 107610, 2020.
- [4]. NRC, "Spent fuel project office interim staff guidance," 2003.
- [5]. A. Arkoma, et al., "Calculation chain for the analysis of spent nuclear fuel in long-term interim dry storage," *Ann. Nucl. Energy*, vol.119, pp.129-138, 2018.

- [6]. Ratiko, et al. "Multi-objective optimization of ventilation and air conditioning system at Interim Storage for Spent Nuclear Fuel." *3rd International Conference on Power Generation Systems and Renewable Energy Technologies (PGSRET)*. 2017.
- [7]. C. H. Cho, et al., "Cost comparisons of wet and dry interim storage facilities for PWR spent nuclear fuel in Korea", *Ann. Nucl. Energy*, vol. 38, no.5, pp. 976-981, 2011.
- [8]. M. G. El-Samrah, A.F. Tawfic, and S.E. Chidiac, "Spent nuclear fuel interim dry storage; Design requirements, most common methods, and evolution: A review," *Ann. Nucl. Energy*, vol. 160: p. 108408, 2021.
- [9]. IAEA, Safety Standards SSR-6 (rev.1) Regulations for the safe transport of radioactive material. 2018.
- [10]. J. Li, and Y.Y. Liu, "Thermal modeling of a vertical dry storage cask for used nuclear fuel", *Nucl. Eng. Des*, vol. 301, pp. 74-88, 2016.
- [11]. Y. H. Wang, et al., "Heat removal and hybrid ventilation characteristics of a vertical dry storage cask for spent nuclear fuel", *Nucl. Eng. Des*, vol. 378, p. 111183, 2021.
- [12]. Ratiko, et al., "Theoretical and Experimental Analysis on Influence of Natural Airflow on Spent Fuel Heat Removal in Dry Cask Storage", *Sustainability*, vol.14, no.3, p. 1859, 2022.
- [13]. S. Alyokhina, "Thermal analysis of certain accident conditions of dry spent nuclear fuel storage," *Nucl. Eng. Technol.*, vol.50, no.5, pp.717-723, 2018.
- [14]. D. Shin, U.J., G. Jeun, and S. J. Kim, "CFD Analysis of Natural Convection Flow Characteristics of Various Gases in the Spent Fuel Dry Storage System," *Journal of Fluid Machinery*, vol. 19, pp. 19–28, 2016.
- [15]. S. Alyokhina, and A. Kostikov, "Unsteady heat exchange at the dry spent nuclear fuel storage," *Nucl. Eng. Technol.*, vol. 49, no.7, pp. 1457-1462, 2017.
- [16]. A. Yunus, A.J.G Cengel, "Heat and mass transfer: fundamentals and applications," 2015.
- [17]. A. Wahid, T. Sundari, and R. Ratiko, "Dynamic modeling and controlling of a spent nuclear fuel storage pool under periodic operation and station blackout conditions", *Ann. Nucl. Energy*, vol. 166, p. 108751, 2022.
- [18]. Ratiko, et al., "Quantification of the impact of temperature difference between two connected indoor spaces on ²²²Rn concentration", *Build. Environ.*, vol.149, pp. 322-329, 2019.
- [19]. J.S. Ghani, *U.S.NRC Computational Fluid Dynamics Best Practice Guidelines for Dry Cask Applications*. 2013.