



## Rancang Bangun *Heater Element Segment* pada Rangkaian Sistem *Reactor Cavity Cooling* RDNK

R. Kusumastuti<sup>\*1</sup>, Dedy Haryanto<sup>\*1</sup>, Giarno<sup>\*1</sup>, Bambang Heru<sup>\*1</sup>, Ainur Rosidi<sup>\*1</sup>, Mulya Juarsa<sup>\*1</sup>, Sriyono<sup>\*1</sup>, Hendro Tjahjono<sup>\*1</sup>, Surip Widodo<sup>\*1</sup>, Ign. Djoko Irianto<sup>\*1</sup>, Dwi Yuliaji<sup>\*2</sup>, Edy Marzuki<sup>\*2</sup>

<sup>1</sup> Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir (PTRKN)-BATAN, Gedung 80, Kawasan Puspiptek, Serpong, Tangerang Selatan, Indonesia

<sup>2</sup>Fakultas Teknik, Universitas Ibnu Kaldun, Bogor, Indonesia

### INFORMASI ARTIKEL

#### Riwayat Artikel:

Diterima:

02 Februari 2021

Diterima dalam bentuk revisi:

25 Maret 2021

Disetujui:

04 Mei 2021

#### Kata kunci:

Rancang Bangun

RCCS-RDNK

Pendingin Pasif

HTGR

HES

### ABSTRAK

**RANCANG BANGUN HEATER ELEMENT SEGMENT PADA RANGKAIAN SISTEM REACTOR CAVITY COOLING RDNK.** Proses pendinginan secara pasif menjadi perhatian khusus sejak kecelakaan PLTN Fukushima dan TMI-2, kecelakaan tersebut diakibatkan oleh gagalnya sistem pendingin aktif dimana pompa tidak berfungsi. Kemudian, aliran sirkulasi alam sebagai prinsip kerja sistem pendingin pasif juga digunakan pada model pendinginan di celah antara dinding luar *Reactor Pressure Vessel* (RPV) reactor *High Temperature Gass Cooled Reactor* (HTGR) dan beton penopang RPV. Riset terkait reactor cavity cooling system berbasis pendingin pasif dilakukan dengan membuat Untai Uji *Reactor Cavity Cooling System*-Reaktor Daya Non Komersial (RCCS-RDNK), namun saat dilakukan komisioning fungsi pemanasannya tidak optimal, temperatur yang ingin dicapai yaitu 300°C – 400°C pada permukaan simulator RPV HTGR tidak tercapai, sehingga dilakukan modifikasi pada sistem pemanas dengan heater element segments (HES) berbasis proses radiasi. Tujuan penelitian adalah untuk melakukan analisis pada pengujian pemanasan HES hasil konstruksi hingga mencapai temperatur optimal. Metode eksperimen dilakukan dengan menghidupkan heater dan merekam perubahan temperatur pada titik pengukuran di bagian permukaan insulator brick (BRICK), permukaan dalam RPV (RPVD), permukaan luar RPV (RPVL) dan udara luar. Hasil pengujian menunjukkan, secara umum capaian maksimal temperatur pada bagian permukaan RPV sekitar 400°C, dengan temperatur permukaan brick sekitar 700°C. Hal ini menunjukkan bahwa, konstruksi pemanas HES dapat beroperasi optimal dan memenuhi kriteria simulasi pendingin pada RCCS HTGR

### ABSTRACT

#### DESIGN OF HEATER ELEMENT SEGMENT ON RDNK CAVITY COOLING SYSTEM SERIES.

The passive cooling process has become a special concern since the accident at the Fukushima and TMI-2 NPP, the accident was caused by a failure of the active cooling system where the pump was not functioning. Then, natural circulation flow as the working principle of the passive cooling system is also used in the cooling mode in the gap between the outer wall of the HTGR reactor RPV and the RPV support concrete. Research related to the passive cooling-based reactor cavity cooling system was carried out by making the RCCS-RDNK Test Loop, but when commissioning the heating function was not optimal, the temperature that target of 300°C - 400°C on the surface of the RPV HTGR simulator was not achieved, so modifications to the heating system were made with heater element segments (HES) based on the radiation process. The research objective was to perform an analysis for heating test results to reach the optimal temperature for the HES construction. The experimental method was carried out by turning on the heater and recording the temperature change at the measurement point on the surface of the insulation brick (BRICK), the inner surface of the RPV (RPVD), the outer surface of the RPV (RPVL) and the outside air. The test results show, in general, the maximum temperature achievement on the surface of the RPV is around 400°C, with the brick surface temperature of about 700°C. The results also show that the construction of the HES heater can perform optimally and meet the cooling simulation criteria on the RCCS HTGR.

**Keywords:** Design, HES (Heater Element Segment), RCCS-RDNK, Passive Cooling, HTGR.

## 1. PENDAHULUAN

Berdasarkan amanah yang tertuang dalam undang-undang dan peraturan-peraturan pemerintah, Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) memiliki kewajiban salah satunya adalah untuk mempelajari, menguasai

dan mengembangkan teknologi pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) dengan tingkat keselamatan yang tinggi sebagai prioritasnya [1]. Semua jenis PLTN menjadi bagian kegiatan penelitian dan pengembangan (litbang) yang dilakukan BATAN selama ini, jenis PLTN berpendingin air (*Water Based Cooled Reactor*)

\*Penulis Korespondensi:

Email: rahayu@batan.go.id

hingga PLTN berpendingin gas bertemperatur tinggi (HTGR, *High Temperature Gas-Cooled Reactor*) [2].

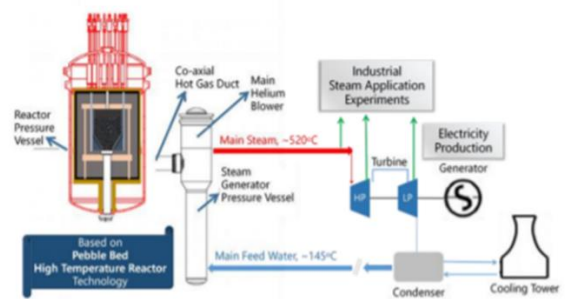
BATAN memiliki pengalaman panjang terkait litbang PLTN jenis berpendingin air dibandingkan PLTN berpendingin gas. HTGR memiliki fitur keselamatan yang lebih unggul daripada PLTN berpendingin air [3]. Khususnya, kondisi pendingin dalam keadaan gas, filosofi keselamatan yang disandarkan pada kualitas material yang disyaratkan lebih unggul daripada fitur PLTN jenis air yang bersandar pada fungsi peralatan penyokong saat kondisi keselamatan [4].

Kasus pada tahun 1979 terjadinya kecelakaan reaktor berpendingin air, PLTN jenis PWR (*Pressurized Water Reactor*): Three Mile Island Unit-2 (TMI-2): Pennsylvania USA [5]. Tahun 2011 PLTN jenis BWR (*Boiling Water Reactor*), Fukushima Daiichi di Jepang menunjukkan kegagalan fungsi pendingin selama kecelakaan berlangsung dan menyebabkan melelehnya teras reaktor [6]. Sehingga, penguasaan teknologi reaktor jenis HTGR terkait filosofi keselamatannya yang unggul, menjadikan pembangunan fasilitas penelitian reaktor HTGR berskala besar, harus dan penting dilakukan oleh BATAN [7].

Terkait dengan upaya untuk merealisasikan tugas pokok BATAN dalam bidang energi nuklir dan amanah undang-undang, maka BATAN merencanakan pembangunan Reaktor Daya Non Komersial (RDNK). Hal tersebut sesuai dengan Undang-Undang Nomor 10 Tahun 1997 tentang Ketenaganukliran dan Peraturan Pemerintah Nomor 2 Tahun 2014 tentang Perizinan Instalasi Nuklir dan Pemanfaatan Bahan Nuklir, dimana BATAN mempunyai wewenang dalam pembangunan, pengoperasian dan dekomisioning reaktor nuklir non komersial [8].

Pembangunan RDNK dilakukan untuk memperkuat kemampuan penelitian dan pengembangan reaktor generasi ke-IV dengan tipe HTGR sebagai tugas dan fungsi dari BATAN dalam bidang energi. Jenis reaktor HTGR berdasarkan tipe bahan bakarnya terbagi dalam dua model, yaitu prismatic dan *pebble-bed reactor* (PBR). Model RDNK yang dipilih menggunakan teknologi jenis PBR, dengan pertimbangan, sangat aman, berfungsi untuk kogenerasi, mempunyai fleksibilitas bahan bakar, telah teruji, harga kompetitif, multiguna,

dapat dikembangkan di seluruh wilayah Indonesia sesuai kebutuhannya, dan untuk memenuhi kebutuhan penyediaan listrik. Skema umum sistem RDNK ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Skema Umum Reaktor Daya Non-Komersial (RDNK) [7].

### Reactor Cavity Cooling System

Filosofi keselamatan dengan moto 3C (*control, cooling, contains*) menjadi pilar utama dalam pengoperasian dan penanganan pasca kecelakaan suatu PLTN di dunia. Salah satu pilar dari 3C adalah *cooling* atau penanganan proses pendinginan di sistem utama reaktor yang dikenal dengan manajemen termal (*thermal management*) yang dikategorikan sebagai bidang termohidrolika termodinamika reaktor [9].

Beberapa kecelakaan reaktor nuklir di dunia, sebagian besar diakibatkan oleh kegagalan dalam manajemen termal. Hal ini terkait dengan sistem pendingin yang tidak berfungsi saat kecelakaan terjadi. Mengacu pada kejadian kecelakaan reaktor Fukushima Daiichi, kegagalan manajemen termal diawali oleh tidak tersedianya sistem pendingin darurat akibat kehilangan daya karena genset sebagai sumber pemasok listrik cadangan terendam air [6]. Kondisi tersebut mengakibatkan pompa pendingin gagal mensirkulasikan air dari teras ke sistem pendingin lainnya, sehingga kalor yang dibangkitkan oleh panas peluruhan di dalam teras terakumulasi dan memicu terjadinya pelelehan teras (*core meltdown*) dan mengarah pada kerusakan bejana tekan reaktor (*Reactor Pressure Vessel*, RPV) [10] [11]. Manajemen termal dengan basis pada sistem pasif sangat penting perannya dalam meminimalkan kecelakaan sebuah reaktor nuklir [12].

Pada jenis reaktor dengan berpendingin gas, *Reactor Cavity Cooling System* (RCCS)

merupakan salah satu sistem keselamatan dengan sistem pendingin pasif atau sirkulasi alami karena akan beroperasi tanpa menggunakan pompa mekanik/listrik [14] [15]. Kalor dari panas sisa reaksi fisi dalam RPV dengan temperatur maksimal 400°C akan diterima oleh sistem RCCS secara radiasi, panas sisa ini dapat mempengaruhi integritas dinding beton gedung[13]. RCCS berperan melindungi dinding beton supaya temperatur tidak mencapai melebihi 70°C pada saat operasi dan 100°C saat terjadi kecelakaan.

Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir membangun suatu fasilitas untaian uji RCCS-RDNK dengan tujuan untuk mempelajari fenomena yang terjadi pada sistem keselamatan reaktor tipe HTGR. Fasilitas RCCS tersebut terdiri dari tiga bagian yaitu, pertama rangkaian *riser* suatu loop tertutup yang terdiri dari pipa-pipa pendingin permukaan, manifold, pendingin (*cooler*), simulator RPV beserta pemanas listriknya (*heater*), tangki ekspansi (*expansion tank*) dan pemipaan. Kedua yaitu sistem instrumentasi pengukuran temperatur dan laju alir. Dan bagian ketiga yaitu sistem kelistrikan, berfungsi untuk memberikan catu daya pada *heater* RPV serta instrumentasi [16], [17].

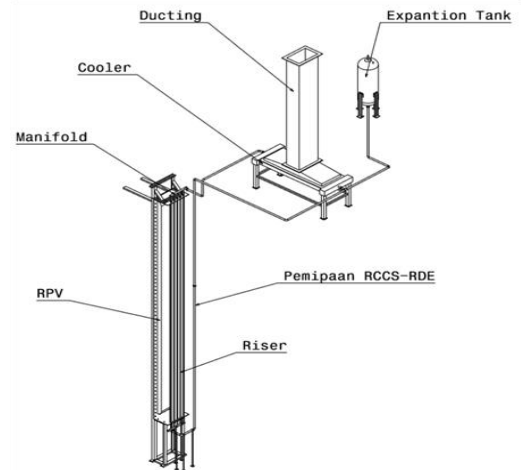
Dalam fasilitas untaian uji RCCS-RDNK, sumber kalor diperoleh dari *Heater Element System* (HES) yang merupakan sistem pemanas listrik. HES dirancang mampu menghasilkan kalor pada temperatur minimal 400 °C dengan menggunakan daya listrik. Pada temperatur minimal 400 °C, sistem pendingin pada RCCS akan dapat mengalir.

Prototipe HES di rancang bangun terlebih dahulu sebelum dipabrikasi sesuai dengan kebutuhan yaitu sebanyak 10 buah. Dilakukan rancang bangun pembuatan Prototipe HES bertujuan untuk mempelajari distribusi kalor pada permukaan dinding dan kemampuan HES memberikan kalor pada permukaan dinding hingga mencapai temperatur yang ditargetkan yaitu minimal 400 °C [18].

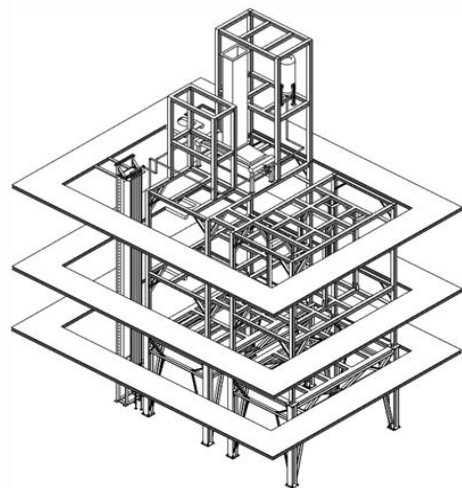
## 2. METODE

Metodologi penelitian ini dilakukan dengan rancang bangun HES sebagai pemanas pada sistem simulator RCCS. Hal ini dilakukan karena sumber kalor RPV pada rangkaian RCCS

tidak optimal dalam menghasilkan panas, hal ini berakibat sistem pendingin tidak akan dapat mengalir optimal. Optimasi temperatur pada HES akan dilakukan dengan melakukan eksperimen pada variasi temperatur: 50°C, 100°C, 150°C, 200°C, 250°C, 300°C, 350°C, 400°C, 450°C, 500°C, 600°C, 700°C. Desain fasilitas untaian uji RCCS RDNK BATAN ditunjukkan pada Gambar 2a dan Gambar 2b.



Gambar 2a. Untaian Uji RCCS RDNK BATAN, terdiri dari RPV, manifold, cooler, ducting, expansion tank, pemipaan RCCS, riser.



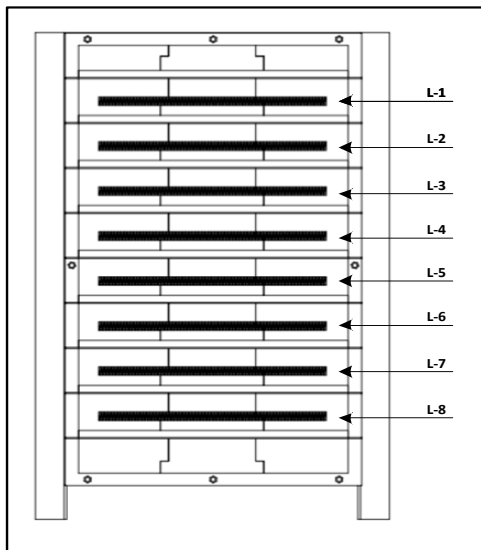
Gambar 2b. Untaian uji dan support beam RCCS RDNK BATAN.

Gambar 2a, menunjukkan untaian uji RCCS RDNK BATAN tanpa sistem penyokong (menggunakan UUTR sebagai penyokong), dimana komponen pokoknya terdiri dari RPV (sebagai sumber kalor), riser (sebagai penyerap kalor), kemudian pemipaan, manifold, *air cooler*, *ducting* dan *expansion tank*. Gambar 2b, menunjukkan fasilitas utuh dari untaian uji RCCS RDNK BATAN dengan ketinggian total fasilitas adalah 14 meter.

Tabel 1. Hasil pengujian komisioning sistem RCCS RDNK.

No heater	Warna Kabel Fasa	Pengukuran resistansi pemanas ( $\Omega$ )				Pengukuran Arus (A)								Temp. Maks	
		Sera h terima	Kom.	Kom.23	Komisioning 31-01-2019					Komisioning 23-04-2019					
					Diukur setiap 5 menit					Awal		Akhir			
					Awal	Akhir	1	2	3	4	5	Heater Fasa	Heater Fasa		
1	merah	3,1	3,30	5,20	5,70	46,2	46,2	46,1	46,1		45,30		38,40	201	
2	kuning	3,2	39,20	38,00	38,70	5,2	5,2				5,38	103,10	5,10	85,90	97
3	hitam	3,2	11,30	10,90	11,50			rusak			19,30		19,30	110	
4	merah	3,1	20,50	18,80	18,80	11,1	10,9	11	10,8	10,8	10,82		10,60	130	
5	kuning	3,00	17,20	30,00	17,00	12,6	12,2				11,99		12,00	131	
6	hitam	3,40	18,60	18,60	18,50	11,2	11,1	11,1	11,1	11	10,99		10,90	121	
7	merah	3,00	6,40	6,50	7,40	36	35,9	35,9	35,8	36,1	34,40	28,4	30,10	28,20	124
8	kuning	2,80	19,00	18,90	19,20	11,7	11,6	11,6			11,37		11,20	86	
9	hitam	3,00	18,70	18,20	19,00	12,2	12,2	12,2	12,1	12	12,04		12,00	56	
10	merah	3,00	19,10	15,60	28,10	13,8	13,5	13,5	13,6	13,6	13,07	35,3	7,00	42,10	62

Pemanas RCCS terdiri dari 10 buah HES, masing-masing HES diharapkan dapat mencapai temperatur 400°C pada dinding luarnya (RPV Wall). Telah dilakukan pembuatan 10 buah HES dan telah dikarakterisasi. Setiap HES terdiri dari 8 lilitan kawat pemanas (L1-L8) seperti terlihat pada Gambar 3.

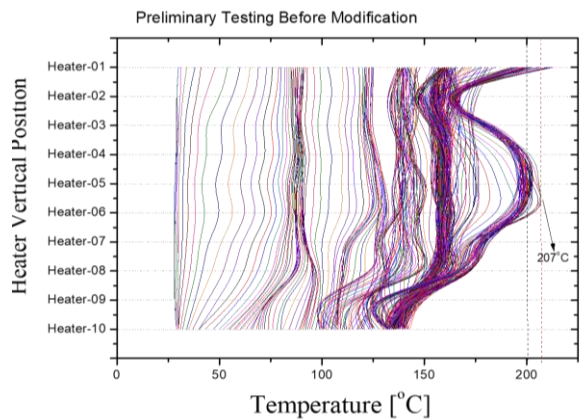


Gambar.3. Desain depan (HES).

Delapan lilitan kawat pemanas dibagi dalam 2 jalur catu daya yang disusun secara paralel, yaitu jalur biru dan jalur merah. Jalur biru terdiri dari L1, L3, L5 dan L7 yang disusun secara seri, sedangkan jalur merah terdiri dari L2, L4, L6 dan L8 yang disusun secara seri. Sebelum masing masing jalur disusun seri terlebih dahulu diukur resistansi dari setiap lilitan kawat pemanas.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada pengujian komisioning sistem RCCS pada laboratorium Termohidrolik PTKRN, diperoleh hasil seperti Tabel 1 dan hasil komisioning pemanas sistem plate seperti yang terlihat pada Gambar.4.



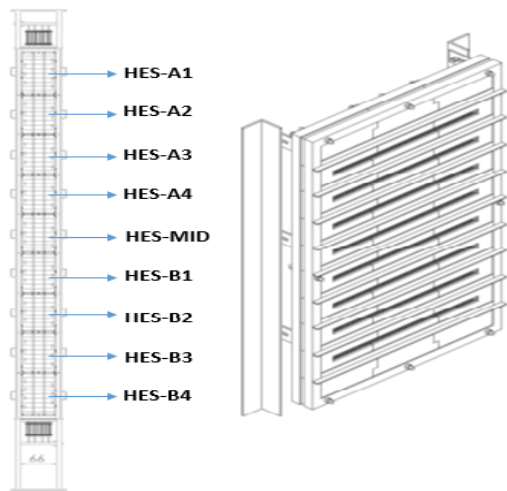
Gambar 4. Grafik hasil komisioning pemanas sistem plate RCCS RDNK.

Hasil pengujian komisioning sistem RCCS RDNK. Dalam pengujian panas tersebut, di kelompokkan menjadi 3 rangkaian arus listrik, kelompok merah merupakan rangkaian 1, kuning rangkaian 2 dan hitam merupakan rangkaian 3.

Dari hasil kegiatan komisioning RCCS tersebut diperoleh panas radiasi yang dihasilkan RPV hanya sebesar rata-rata 111 °C, pemanas RPV wall ini menggunakan heater plate (1 plate 15 kW) berjumlah 10 plate di pasang secara vertical, total daya 150 kW (terlalu besar). Oleh karena itu dikembangkan

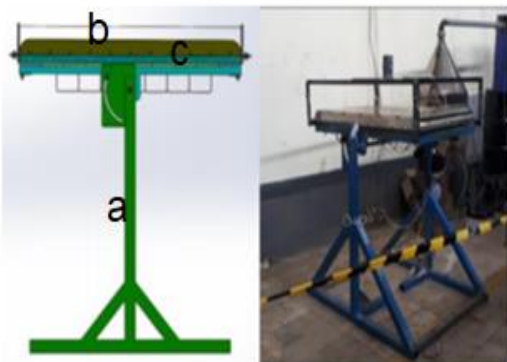
prototipe sistem pemanas pada RPV dengan menggunakan HES yang berjumlah 9 HES.

Bagian sumber kalor untuk RPV-wall disebut “pemanas *RPV-wall*”. HES dibuat dengan menggunakan jenis *open-coil heater wire* (merk Khantal). Daya setiap HES ditetapkan sebesar 5 kW. Sehingga total panas radiasi yang dihasilkan adalah sebesar 45 kW, pengurangan konsumsi daya = 70 %. Rancang bangun HES sebagai sistem pemanas pada RPV terlihat pada Gambar 5.



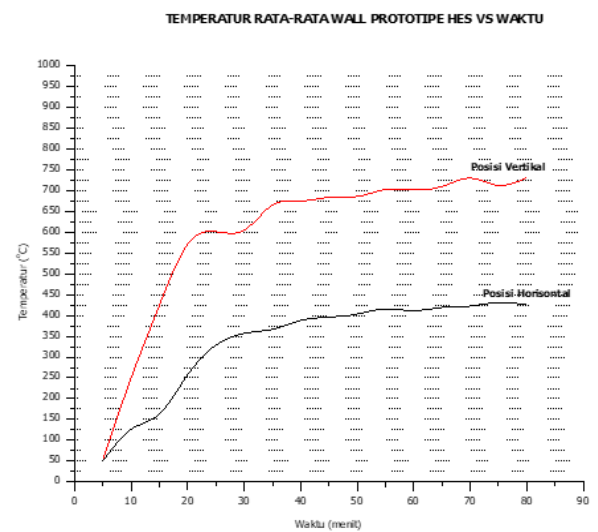
Gambar .5. HES bentuk 3D dan rangkaiannya dalam RCCS.

Sebelum pembuatan HES untuk pemanas RPV-wall, terlebih dahulu dibuat model HES sebagai protitipe HES beserta bagian RPV-wall untuk dilakukan pengujian dan penyelidikan kemampuan pemanasan dengan berbagai posisi vertikal dan horizontal untuk dapat mengetahui panas radiasi optimal yang dihasilkan. Eksperimen juga dilakukan untuk menentukan deformasi pada RPV-wall ketika pemanasan berlangsung hingga temperatur maksimal. Gambar 6. menunjukkan prototipe sistem HES secara satuan.

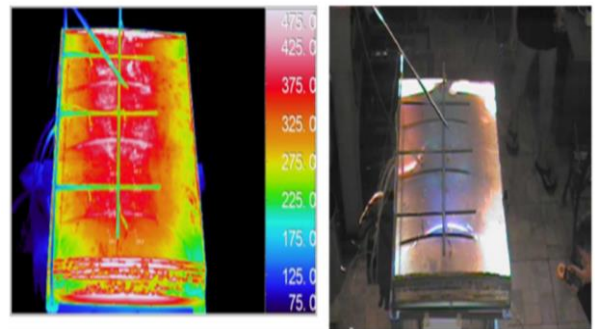


Gambar.6 Prototipe *Heater Element Segment* (HES) posisi horizontal.

Prototipe HES tersebut terdiri dari beberapa bagian, diantaranya a. tiang penyangga. b. *Stainless steel* sebagai penutup element pemanas c. Elemen pemanas sebagai sumber panas listrik. Prototipe HES dapat di atur secara vertikal dan horizontal. Kedua posisi tersebut dapat dihasilkan perbandingan output panas. Gambar 7 memperlihatkan bahwa simulasi pada rentan waktu yang sama dengan posisi vertikal akan menghasilkan panas lebih tinggi dari pada simulasi dengan posisi horizontal.



Gambar.7. Grafik perbandingan panas yang dihasilkan dari posisi vertikal dan horizontal.



Point data

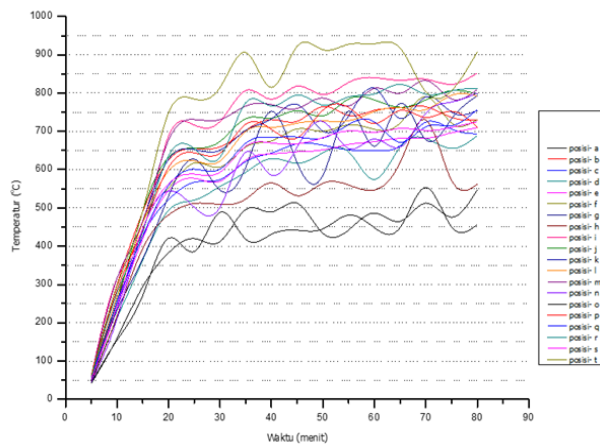
	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j
Temp	495.0	371.7	400.3	389.2	379.5	398.8	381.3	375.6	359.0	335.8
Emiss	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t
Temp	500.0	400.1	398.4	412.8	414.4	438.2	366.0	384.2	387.0	334.0
Emiss	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40

Gambar .8 Pengukuran temperatur *wall prototype* HES [18].

Posisi vertikal akan menghasilkan panas yang lebih optimal daripada posisi horizontal. Data output temperatur ini diperoleh



dari pengambilan temperatur menggunakan *thermal imaging infrared camera*. Gambar 8 merupakan *image* penampakan *thermal image camera infrared*. Gambar 8 memperlihatkan bahwa perbedaan warna mengindikasikan perbedaan temperatur yang dihasilkan oleh elemen tersebut. Warna merah menunjukkan temperatur yang jauh lebih tinggi dari pada temperatur pada elemen yang menghasilkan warna biru.



Gambar.9. Distribusi temperatur pada permukaan *wall prototype* HES.

Gambar 9. menunjukkan distribusi temperatur pada permukaan *wall prototype* HES (ditunjukkan dengan perbedaan warna) dari hasil pengambilan data temperatur sebanyak 20 titik dipermukaan *wall prototype* HES posisi horisontal dan vertikal dengan tegangan listrik sebesar 220-volt dan selang waktu 5 menit. Semakin tinggi temperaturnya ditunjukkan dengan warna terang dan semakin rendah temperaturnya ditunjukkan dengan warna gelap pada *color bar*. Bagian yang terpapar langsung oleh kalor yang dihasilkan oleh kawat kantal

berwarna merah merata daripada dengan bagian lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa bagian tersebut mempunyai temperatur tertinggi dengan distribusi hampir merata.

Data pengukuran temperatur pada *prototype wall heater element segment* RCCS menggunakan *infrared thermal image camera* type TH 9100 pada 18 titik yg berbeda. Dari grafik tersebut dapat di tarik kesimpulan bahwa temperatur akan semakin naik seiring dengan berjalannya waktu proses pemanasan.

### Karakterisasi HES

Pemanas RCCS terdiri dari 10 buah HES, masing-masing HES diharapkan dapat mencapai temperatur 400°C pada dinding luarnya (RPV Wall). Lilitan kawat pemanas dibagi dalam 2 jalur catu daya yang disusun secara paralel, yaitu jalur biru dan jalur merah (sebagai penanda). Jalur biru terdiri dari L1, L3, L5 dan L7 yang disusun secara seri, sedangkan jalur merah terdiri dari L2, L4, L6 dan L8 yang disusun secara seri. Sebelum masing-masing jalur disusun seri terlebih dahulu diukur resistansi dari setiap lilitan kawat pemanas seperti pada Tabel 2.

Berdasarkan data resistansi pada Tabel 2, dapat dihitung arus (*I*) masing-masing jalur dengan tegangan (*V*) sebesar 220 volt (Lihat Tabel 3). Perhitungan arus tersebut digunakan untuk menentukan spesifikasi *Solid State Relay* (SSR) jika diperlukan kontrol temperatur, spesifikasi MCB (*Miniature Circuit Breaker*) sebagai pengaman serta diameter kabel yang diperlukan sebagai penghantar. Selanjutnya dilakukan perhitungan daya masing-masing HES untuk menentukan kebutuhan catu daya total pada jaringan listrik 3 fasa (Tabel 4).

Tabel 2. Tabel pengukuran resistansi.

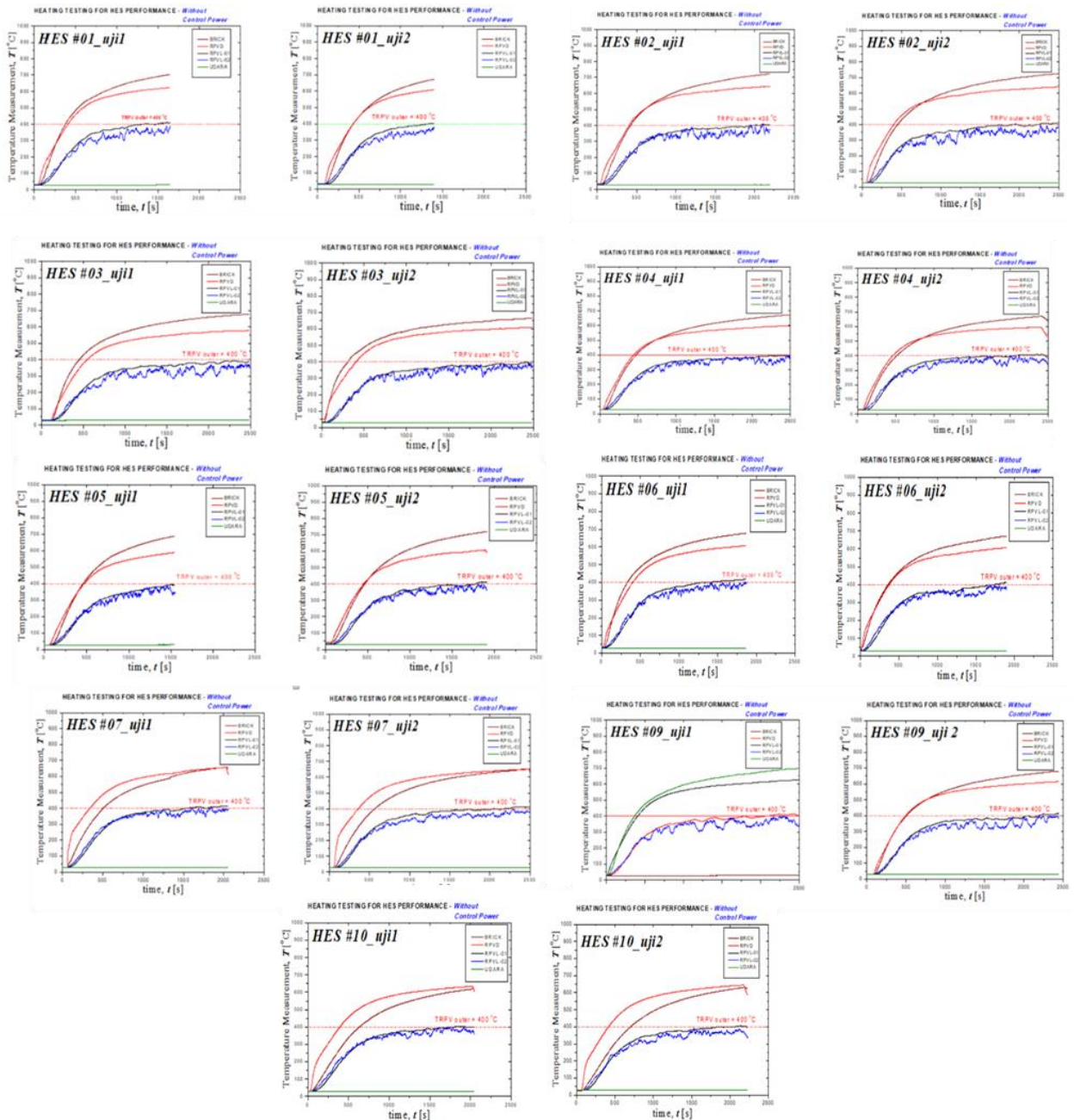
Spiral Pemanas	Resistensi pengukuran HES (Ω)									
	HES. 1	HES. 2	HES. 3	HES. 4	HES. 5	HES. 6	HES. 7	HES. 8	HES. 9	HES. 10
L-1	1,3	1,3	1,4	1,3	1,3	1,2	1,4	1,3	1,3	1,3
L-2	1,4	1,3	1,4	1,4	1,3	1,2	1,4	1,3	1,3	1,3
L-3	1,4	1,4	1,5	1,4	1,2	1,2	1,4	1,4	1,3	1,3
L-4	1,3	1,3	1,5	1,5	1,3	1,2	1,4	1,4	1,4	1,3
L-5	1,3	1,4	1,3	1,4	1,4	1,2	1,4	1,3	1,3	1,3
L-6	1,3	1,2	1,3	1,4	1,3	1,2	1,4	1,4	1,3	1,3
L-7	1,3	1,2	1,5	1,4	1,3	1,2	1,4	1,3	1,3	1,3
L-8	1,3	1,2	1,3	1,4	1,2	1,2	1,4	1,3	1,2	1,3
R-Jalur 1	5,3	5,3	5,7	5,7	5,2	4,8	5,6	5,3	5,3	5,2
R-Jalur 2	5,3	5,0	5,5	5,7	5,1	4,8	5,6	5,4	5,1	5,2
R total (Ω)	10,6	10,3	11,2	11,2	10,3	9,6	11,2	10,7	10,4	10,4

Tabel 3. Perhitungan arus pada HES.

	HES. 1	HES. 2	HES. 3	HES. 4	HES. 5	HES. 6	HES. 7	HES. 8	HES. 9	HES. 10
I (A)- Jalur 1	41,5	41,5	38,6	40,0	42,3	45,8	39,3	41,5	41,5	42,3
I (A)- Jalur 2	41,5	44	40,0	38,6	43,1	45,8	39,3	40,7	43,1	42,3
$I_{total}$	83,0	85,5	78,6	78,6	85,4	91,6	78,6	91,7	84,6	84,6

Tabel 4. Perhitungan daya HES.

	HES. 1	HES. 2	HES. 3	HES. 4	HES. 5	HES. 6	HES. 7	HES. 8	HES. 9	HES. 10
P (watt)- Jalur 1	9.132	9.132	8.491	8.800	9.308	10.083	8.643	9.132	9.132	9.308
P (watt)- Jalur 2	9.132	9.680	8.800	8.491	9.490	10.083	8.643	8.963	9.490	9.308
$P_{total}$	18.264	18.812	17.291	17.291	18.798	20.167	17.286	18.622	18.622	18.615



Gambar 10. Analisis kinerja masing HES untuk mengetahui kemampuan dalam menghasilkan panas.

Tabel 5. Pengukuran resistansi dan daya HES sesudah pengujian.

Jalur Pemanas	HES. 1		HES. 2		HES. 3		HES. 4		HES. 5		HES. 6		HES. 7		HES. 8		HES. 9		HES. 10	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
R <sub>sesudah</sub>	5,5	5,6	5,6	5,5	5,9	5,8	5,8	6,1	5,5	5,3	5,4	5,5	5,8	6,3	5,7	5,7	5,8	5,7	7,4	7,8
R <sub>total</sub> <sub>sesudah</sub>	11,1		11,1		11,7		11,9		10,8		10,9		12,1		11,4		11,5		15,2	
P <sub>sesudah</sub>	8,8	8,64	8,64	8,8	8,2	8,34	8,34	7,93	8,80	9,13	8,96	8,80	8,34	7,68	8,49	8,49	8,34	8,49	6,54	6,20
P <sub>total</sub> <sub>sesudah</sub>	17,443		17,443		16,548		16,279		17,932		17,763		16,027		16,982		16,836		12,746	

Pengujian masing-masing HES, dimaksudkan untuk mengetahui apakah dinding luar RPV wall mampu mencapai panas 400°C seperti yang diharapkan. Pengujian dilakukan dua kali untuk masing masing HES. Bagian yang dipantau temperaturnya adalah brick (T<sub>brick</sub>), dinding dalam RPV (TRPVD) dan dinding luar RPV (TRPVL). Hasil pengujian masing-masing HES dapat dilihat pada Gambar 10.

Berdasarkan hasil pengujian dapat dinyatakan bahwa semua HES dapat mencapai temperatur 400°C sesuai dengan yang diharapkan. Tahap selanjutnya adalah mengukur kembali resistansi setiap jalur pada HES dengan tujuan untuk mengetahui penurunan kinerja HES setelah dilakukan pengujian (Tabel 5). Penurunan kinerja HES dapat ditunjukkan dari kemungkinan penurunan temperatur yang keluaran HES.

Berdasarkan data pada Tabel 5, HES mengalami penurunan daya antara 4,3%-31,53%. Selanjutnya mengatur jalur catu daya HES pada jaringan listrik 3 fasa sehingga diperoleh kesetimbangan beban. Pengaturan jalur HES pada 3 fasa dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Jalur catu daya HES pada jaringan listrik 3 fasa.

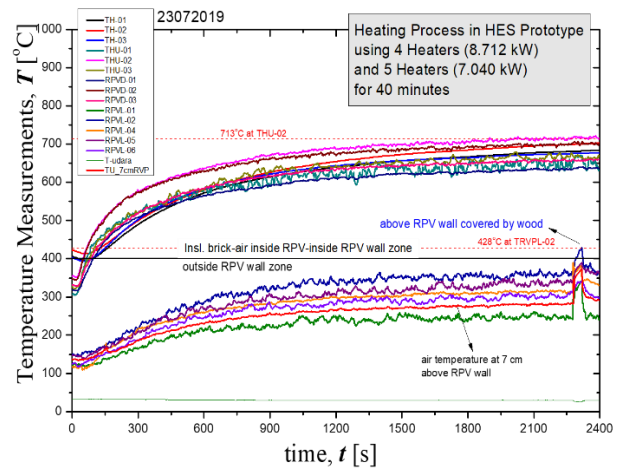
	Fasa RN		Fasa SN		Fasa TN	
HES-10	12.746		HES-09	16.836	HES-08	16.982
HES-07	16.027		HES-02	17.443	HES-01	17.443
HES-04	16.279		HES-05	17.932	HES-06	17.763
HES-03	16.548					
<b>P Total</b>	<b>61.601</b>		<b>P Total</b>	<b>52.211</b>	<b>P Total</b>	<b>52.188</b>

Tahap akhir adalah rekomendasi penyusunan 10 HES sebagai pemanas RCCS sesuai pola daya seperti pada Tabel 7. Eksperimen dilakukan dengan 3 pola daya, pola daya mengecil dimaksudkan bahwa eksperimen dilakukan dengan daya besar kemudian mengecil dari susunan HES paling bawah ke atas. Kedua, pola daya cekung, diartikan bahwa eksperimen kinerja HES dilakukan dengan temperatur besar di susunan HES paling bawah kemudian mengecil di susunan HES tengah dan

temperatur besar kembali pada susunan HES paling atas. Dan pola daya cembung, dilakukan dengan temperatur makin membesar pada susunan HES di tengah.

Tabel 7. Pola daya penyusunan HES sebagai pemanas RCCS.

Susunan HES dari bawah ke atas dengan pola daya mengecil	Susunan HES dari bawah ke atas dengan pola daya cembung	Susunan HES dari bawah ke atas dengan pola daya cekung			
HES-10	12.746	HES-10	12.746	HES-06	17.763
HES-07	16.027	HES-04	16.279	HES-01	17.443
HES-04	16.279	HES-08	16.982	HES-09	16.836
HES-03	16.548	HES-01	17.443	HES-04	16.729
HES-09	16.836	HES-06	17.763	HES-10	12.746
HES-08	16.982	HES-05	17.932	HES-07	16.027
HES-01	17.443	HES-02	17.443	HES-03	16.548
HES-02	17.443	HES-09	16.836	HES-08	16.982
HES-06	17.763	HES-03	16.548	HES-02	17.443
HES-05	17.932	HES-07	16.027	HES-05	17.932



Gambar.11. Analisis temperatur 9 HES, dengan menggunakan kombinasi 4H dan 5H.

Gambar 11 memperlihatkan hasil analisis panas pada HES dengan menggunakan 4 H dan 5 H, temperatur di dalam RPV wall mulai stabil setelah di 713°C pada termokopel THU-02, udara bagian dalam RPV wall. Temperatur stabil di bagian permukaan luar RPV wall sekitar 359°C pada TRPVL-02, naik menjadi 428°C saat bagian atas RPV wall. Rangkaian dengan kombinasi 4H dan 5H



capaian temperatur tertinggi. Permukaan luar RPV wall maksimal 359°C. Sehingga dapat dikatakan bahwa, temperatur capaian berkisar antara 350–400°C.

#### 4. KESIMPULAN

Makalah ini merupakan hasil eksperimen rancang bangun HES yang merupakan sumber kalor pada simulator RCCS RDNK. Tujuan dari eksperimen ini adalah untuk mengetahui bahwa HES dapat menghasilkan panas pada temperatur yang diharapkan, yaitu sekitar 400 °C. Ketahanan HES dilakukan dengan melakukan pengukuran temperatur dengan variasi (50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 500,600, 700) °C. Eksperimen *prototype* HES, diperoleh hasil bahwa output keluaran panas yang dicapai pada RPV wall bagian dalam adalah sebesar 715 °C. Keluaran panas pada luar RPV *wall* adalah sekitar 400 °C. Harapannya, proses sirkulasi sistem pendingin pada rangkaian simulator RCCS akan berjalan baik. Sistem pendingin dapat membawa panas radiasi yang dihasilkan oleh RPV keluar sistem melalui *Heat Exchanger*.

#### SARAN/REKOMENDASI

Hendaknya penelitian ini akan terus dilakukan secara berkesinambungan, hingga diperoleh sistem simulator RCCS yang optimal dalam melakukan sirkulasi pendingin secara natural.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada DIPA-PTKRN 2019 dan Kemenristekdikti yang telah memberikan support dana insinas tahun 2019 untuk kelancaran penelitian terkait sistem RCCS-RDNK hingga makalah ini bisa diterbitkan.

#### DAFTAR ACUAN

[1] Badan Tenaga Nuklir Nasional, 'PERATURAN KEPALA BADAN TENAGA NUKLIR NASIONAL NOMOR 6 TAHUN 2017', 2017.  
 [2] S. Alimah, E. Dewita, S. Ariyanto, M. Prapatan, and J. Selatan, 'Analisis komparasi htgr tipe prismatik dan pebble bed', vol. 16, pp. 11–21, 2014.  
 [3] Y. D. Anggoro, D. Dewi, A. T. Yuliyanto, and M.

Prapatan, 'Kajian Perkembangan PLTN Generasi IV', vol. 15, pp. 69–79, 2020.  
 [4] R. Arindya, Radita; Hermanto, 'Prosiding Seminar Nasional Pengembangan Energi Nuklir V , 2012', in *Studi Keselamatan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir*, 2012, pp. 1–8.  
 [5] R. Marnh, N. Safety, and N. Safety, 'Analysis of Three Mile Island - Unit 2 Accident', 1980.  
 [6] Yukiya Amano, 'The Fukushima Daiichi Accident Report by the Director General', 2011.  
 [7] H. Tjahjono, R. Kusumastuti, and A. S. Ekariansyah, 'Investigation of RDE thermal parameters during DLOFC in the absence of water inside the Reactor Cavity Cooling System Investigation of RDE thermal parameters during DLOFC in the absence of water inside the Reactor Cavity Cooling System', 2020.  
 [8] Bapeten, 'PERIZINAN INSTALASI NUKLIR DAN PEMANFAATAN BAHAN NUKLIR DENGAN', 2014.  
 [9] M. Juarsa, B. Tenaga, and N. Nasional, 'Simulasi Eksperimental Kecelakaan Parah Pada Pemahaman Aspek Manajemen Kecelakaan', no. July 2007, 2015.  
 [10] S. M. Lumbanraja, R. Arum, P. Riyanti, and Y. D. Anggoro, 'Manajemen Keselamatan PLTN Pasca Kecelakaan Fukushima Daiichi Unit 1', vol. 4, pp. 122–130, 2011.  
 [11] M. Juarsa, 'Perhitungan Fluks Kalor Untuk Kurva Didih Selama Eksperimen Quenching Menggunakan Silinder Berongga Dipanaskan', *TriDasaMega*, vol. 8, pp. 127–145, 2010.  
 [12] A. G. Abdullah, N. P. Ardiansyah, and W. Purnama, 'Peningkatan Kinerja Sistem Keselamatan Pasif Pada Reaktor Nuklir Dengan Penambahan Komponen RVAC', vol. 10, no. 2, pp. 168–177, 2014.  
 [13] R. Kusumastuti\*, A. , Sriyono, Mulya Juarsa, Hendro Tjahjono, I. D. Irianto, Topan Setiadipura, D. H. Salimy, and Hafid, 'Reactor Cavity Cooling System with Passive Safety Features on RDE: Thermal Analysis During Accident', *Tri Dasa MegaDasa Mega*, vol. 21, no. 2, pp. 87–93, 2019.  
 [14] R. Swart and R. T. Dobson, 'Thermal-hydraulic simulation and evaluation of a natural circulation thermosyphon loop for a reactor cavity cooling system of a high-temperature reactor', *Nuclear Engineering and Technology*, vol. 52, no. 2, pp. 271–278, 2020.  
 [15] T. Woo and U. Lee, 'Dynamical reliability of the passive system in the very high temperature gas cooled reactor', *Annals of Nuclear Energy*, vol. 36, no. 9, pp. 1299–1306, 2009.  
 [16] L. Capone, Y. A. Hassan, and R. Vaghetto, 'Reactor cavity cooling system (Rccs) experimental characterization', *Nuclear Engineering and Design*, vol. 241, no. 12, pp. 4775–4782, 2011.  
 [17] Dr. Michael Corradini, 'Experimental Studies of NNGP Reactor Cavity Cooling System With Water', 2012.  
 [18] M. J. Dedy Haryanto, Giarno, Joko Prasetyo, G. Bambang Heru, Rahayu Kusumastuti, 'Karakterisasi Prototipe Heater Element System pada Untai Uji RCCS-RDNK menggunakan Kamera Infra Merah', vol. 8, no. 2, pp. 240–466, 2020.