

STUDI PENGARUH PERBEDAAN KETEBALAN FREEZE-VALVE DI MSR (MOLTEN SALT REACTOR) DALAM PENGENDALIAN KECELAKAAN

STUDY OF EFFECT OF DIFFERENCES FREEZE-VALVE THICKNESS IN MSR (MOLTEN SALT REACTOR) IN ACCIDENT CONTROL

Virgo Eben E. M, Mustari A. P. A., Irwanto D., Permana S. dan Pramuditya S.

Departemen Fisika – Institut Teknologi Bandung

Jalan Ganesha No. 10 Bandung 40132

Email : virgo.eemahulae@students.itb.ac.id

Diterima 10 Juli 2020, diterima dalam bentuk perbaikan 20 November 2020, disetujui 8 Desember 2020

ABSTRAK

STUDI PENGARUH PERBEDAAN KETEBALAN FREEZE-VALVE DI MSR (MOLTEN SALT REACTOR) DALAM PENGENDALIAN KECELAKAAN. MSR merupakan sebuah tipe reaktor yang menggunakan bahan bakar cair, yakni garam cair yang sekaligus berfungsi sebagai pendinginnya. Meskipun MSR diakui unggul dari segi keamanan dan menjadi salah satu kandidat reaktor Generasi IV, namun dibutuhkan penelitian lebih lanjut untuk mencegah kecelakaan reaktor akibat peningkatan suhu bahan bakar cair. Sebuah freeze-valve merupakan salah satu sistem keamanan yang sangat berfungsi di MSR. Sebuah freeze-valve didesain untuk meleleh saat suhu bahan bakar mendekati titik leleh dinding reaktor dan membuka jalan bahan bakar menuju subcritical-tank. Sebuah eksperimen sederhana telah berhasil dilakukan pada penelitian ini untuk mempelajari mekanisme kerja freeze-valve tersebut. Penelitian ini dilakukan untuk menganalisa pengaruh perbedaan ketebalan pada freeze-valve (parafin) yang dialiri fluida panas bersuhu 80°C. Variasi ketebalan yang digunakan adalah 10, 13, dan 20 mm dengan diameter yang sama, yaitu 23 mm. Berdasarkan variasi ketebalan tersebut ditemukan bahwa semuanya memiliki kedalaman erosi yang hampir sama, yaitu 7 mm.

Kata kunci : Freeze-valve, parafin, ketebalan, suhu.

ABSTRACT

STUDY OF EFFECT OF DIFFERENCES IN FREEZE-VALVE THICKNESS IN MSR (MOLTEN SALT REACTOR) IN ACCIDENT CONTROL. MSR is a reactor type that using fuel liquid, namely fuel salt which is also used as a coolant. Although recognized superior in terms of safety and become one of the candidates for Generation IV reactors, further research is still needed to prevent reactor accident due to increased fuel temperatures. A freeze-valve is designed to melt when the temperature of the fuel salt approaches the melting point of the reactor wall and opens the fuel path to the subcritical-tank. A simple experiment was successfully carried out in this study to learn the mechanism of the freeze-valve. This research was conducted to analyze the effect of differences in thickness on the freeze-valve (paraffin) which is fed by 80°C hot fluid. The thickness variation used are 10, 13, and 20 mm with the same 23 mm diameter. Based on the thickness variation it was found that all of them had almost the same erosion depth, which is 7 mm.

Keyword : Freeze-valve, paraffin, thickness, temperature.

PENDAHULUAN

Saat ini banyak negara yang sedang mengembangkan konsep reaktor berbahan bakar cair yang pertama kali diperkenalkan pada 1950-an dan 60-an: MSR (Molten Salt Reactor). Percobaan MSR pertama kali dilakukan oleh Oak Ridge National Laboratory [1]. Pada tahun 1960-an, proyek MSR dikembangkan untuk peluang pembiakan produk fisi sehingga diciptakan desain *Molten Salt Breeder Reactor Breeder* (MSBR) [2-4]. Kemudian, pada tahun 1965 hingga tahun 1969, MSR dikembangkan menjadi sebuah *Molten Salt Reactor Experiment* (MSRE) [3]. Desainnya radikal pada zamannya dan menawarkan banyak keuntungan dari berbagai aspek. MSR berbeda dari sebagian besar pembangkit listrik tenaga nuklir lain yang beroperasi saat ini, seperti LWR (*Light Water Reactor*). MSR merupakan salah satu kandidat reaktor Generasi IV karena memiliki aspek keamanan, daya tahan, kehandalan, dan biaya bangunan yang lebih ekonomis [6-9].

Berdasarkan pada definisi keamanan reaktor, terdapat beberapa kemungkinan definisi sebuah “keamanan” reaktor. Yakni jika reaktor menggunakan bahan bakar oksida padat, definisi keamanan yang paling dasar adalah ssatu yakni dapat membuktikan bahwa semua (atau hampir semua) produk fisi tetap di dalam tabung bahan bakar

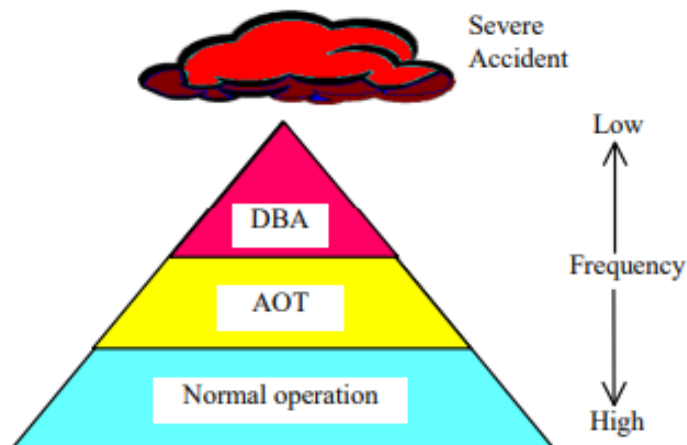
sesuai dengan semua *Postulated Initiating Event* (PIE). Tersirat dalam postulat ini bahwa pelet bahan bakar tidak boleh mencapai kondisi cair [5]. Dalam kasus MSR, pendekatan pendefinisian keselamatan adalah dengan mempertimbangkan bahan bakar dalam bentuk cair sekaligus sebagai pendingin dan aspek keselamatan dari fenomena zat kimia - terkontrol. Artinya bahwa keamanan bergantung jika produk aktinida dan fisi tetap di dalam larutan.

Diambil dari karya Yoshioka dan rekan-rekannya, Yoshioka menganalisis kriteria keamanan MSR dengan membandingkannya terhadap LWR (*Light Water Reactor*). Analisis dimulai dengan membuat tingkatan kerusakan yang dapat terjadi pada LWR dan MSR. Pada lisensi LWR seperti ditunjukkan pada Gambar 1, terdapat empat tingkat kerusakan yang mungkin terjadi, yaitu *Normal Operation*, *Abnormal Operating Transients* (AOT), *Design Basis Accident* (DBA), dan *Severe Accident* (SA) [11, 12]. Keempat tingkatan ini ditentukan berdasarkan besarnya kerusakan yang terjadi pada reaktor tersebut. Dari pengamatan yang dilakukan, MSR diketahui hanya dapat mengalami 2 atau 3 tingkatan terendah dari klasifikasi tersebut.

Keadaan *Normal Operation* yang dimaksud adalah adanya kebutuhan untuk melakukan proses pemadaman reaktor. *Abnormal operating transient* (AOT) adalah sebuah kecelakaan yang terjadi karena adanya malfungsi sebuah peralatan atau sebuah kesalahan dari operator. Kejadian ini diantisipasi untuk terjadi hanya sekali atau lebih selama umur kerja reaktor. Di atas keadaan AOT adalah *design basic accident* (DBA) yang dapat menyebabkan kegagalan bahan bakar. Kecelakaan ini dapat terjadi karena malfungsi dua peralatan atau kesalahan dua operator, atau kombinasi dari keduanya. Kemudian di atas DBA adalah *severe accident* (SA), yakni keadaan yang dapat menyebabkan inti reaktor atau dinding reaktor meleleh sehingga bahan radioaktivitas terlepas ke lingkungan.

MSR menggunakan garam cair sebagai bahan bakar yang sekaligus berfungsi sebagai pendingin. Namun, terdapat kemungkinan terjadinya peningkatan suhu bahan bakar karena kerusakan di bagian sistem pendinginan. Keadaan ini merupakan salah satu contoh kasus dari *design basic accident* (DBA) atau bahkan *abnormal operating transient* (AOT). Untuk menghindari kecelakaan ini, sebuah *freeze-valve* didesain sedemikian rupa untuk dapat membuka aliran menuju *sub-critical tank* [13-16]. Jika suhu fluida meningkat hingga mendekati titik leleh dari dinding reaktor berbahan baja (1473 K), *freeze-valve* diharapkan meleleh dan terbuka sehingga garam cair mengalir menuju *subcritical tank*. *Freeze-valve* dibuat dengan bahan yang sama atau hampir sama dengan garam cair tersebut, yakni FLiBe (*lithium-beryllium fluoride*) [15]. Akan tetapi, saat ini masih sangat dibutuhkan penelitian lebih banyak untuk menentukan desain *freeze-valve* yang paling efektif untuk menjaga MSR dari kecelakaan, yakni *freeze-valve* yang dapat bekerja secara pasif tanpa bantuan alat eksternal.

Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari sebuah sistem *freeze-valve* yang dapat bekerja secara pasif dengan memanfaatkan titik leleh bahan yang digunakan pada *freeze-valve*. *Freeze-valve* tersebut dibuat dari bahan parafin dengan titik leleh 37°C dan fluida yang digunakan adalah air biasa. Penelitian dilakukan dalam eksperimen sederhana dengan memvariasikan ketebalan *freeze-valve* yang dialiri fluida bersuhu 80°C di bagian atasnya. Variasi ketebalan yang digunakan adalah 10, 13, dan 20 mm.



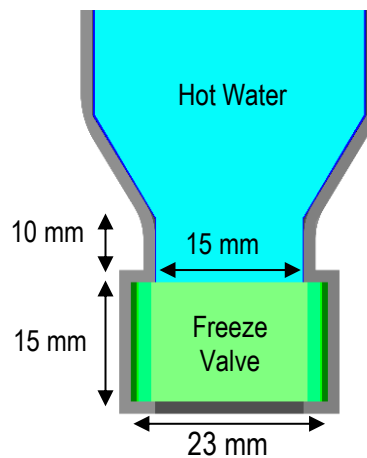
Gambar 1. Klasifikasi tingkat kecelakaan LWR

METODOLOGI

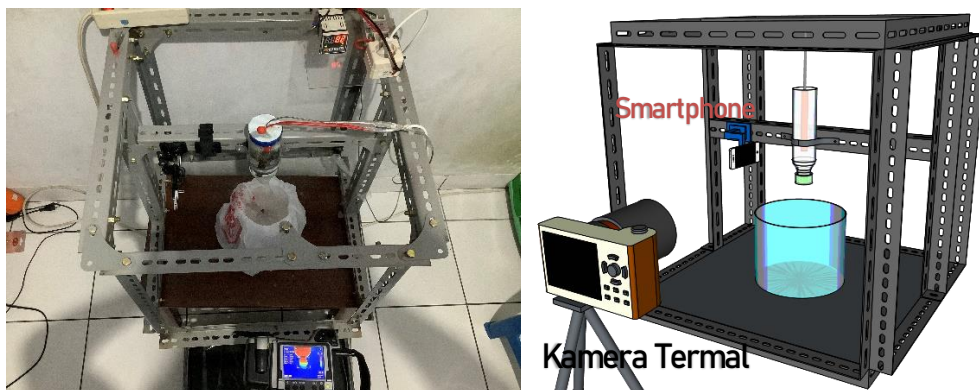
Alat-alat yang digunakan dalam eksperimen ini adalah botol pyrex, kerangka aluminium sebagai kerangka kerja, batang pemanas, termokopel tipe-K, kamera *smartphone*, kamera termal FLIR, dan sistem instrumentasi dan kontrol. Botol pyrex didesain dengan tabung bagian atas memiliki volume kurang lebih 250 ml. *Freeze-valve* akan ditempatkan di bagian bawah (warna hijau) dengan diameter lebih besar dari pipa drainase (lihat Gambar 2). Pada eksperimen ini, terdapat dua desain *freeze-valve* yang digunakan. Pertama, desain dengan diameter *freeze-valve* 23 mm, tinggi 20 mm, diameter pipa drainase 15 mm dan panjangnya 10 mm. Dengan bahan pyrex, objek akan lebih mudah teramati karena transparan dan tahan dengan temperatur tinggi.

Kemudian, botol pyrex akan ditempatkan pada kerangka kerja aluminium. Bahan ini digunakan agar kerangka kerja lebih kokoh, tidak mudah goyang, dan semua alat dapat ditempelkan dengan mudah ke dalam kerangka kerja (lihat Gambar 3). Kamera *smartphone* ditempelkan di samping botol dengan jarak 15 cm dan kamera termal FLIR diletakkan tegak lurus terhadap kamera *smartphone* dengan botol sebagai sumbunya. Kamera termal digunakan untuk menampilkan distribusi suhu pada *freeze-valve* dan akan dibandingkan dengan kamera biasa.

Data temperatur yang ditunjukkan oleh kamera termal cukup sesuai dengan data yang diukur oleh sistem instrumentasi dan kontrol. Termokopel, relay, heater, dan TC4S sebagai kontrol dan display digunakan pada eksperimen (lihat Gambar 5). Pada TC4S diberikan dua input, yaitu input AC dari satu daya dan input suhu dari termokopel, serta satu output DC yang tersambung pada relay. Relay berfungsi sebagai *switch on/off* terhadap heater (sesuai instruksi dari TC4S). Termokopel akan membaca suhu fluida dan apabila suhu yang diinginkan tercapai, TC4S akan menginstruksikan relay untuk memutuskan listrik dan heater berhenti bekerja. Sensor suhu yang digunakan pada eksperimen ini adalah termokopel tipe-K.



Gambar 2. Desain *freeze-valve* (warna hijau) dengan diameter lebih besar.



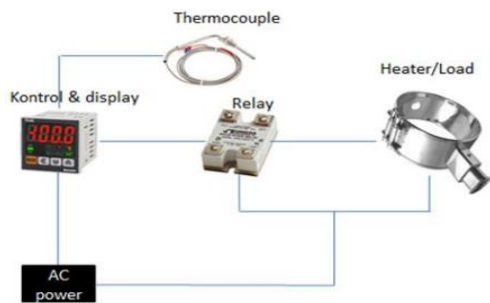
Gambar 3. Skema rangkaian alat eksperimen.



Gambar 4. Kamera termal FLIR

Tabel 1. Spesifikasi FLIR

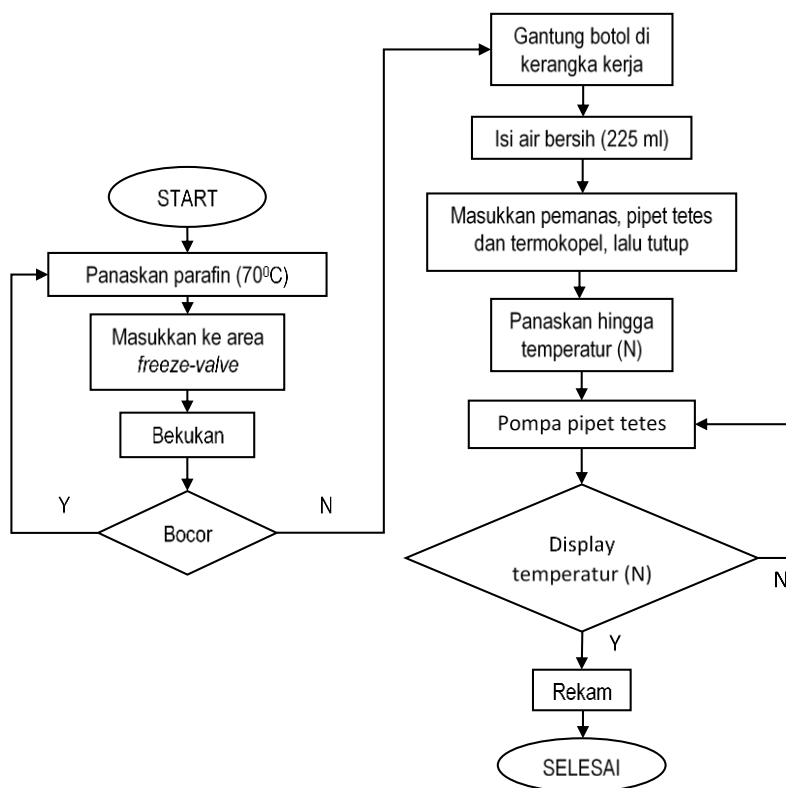
Model	FLIR T425
Serial	456004773
Lensa	FOL 18 mm
Pembuat	Intertek



Gambar 5. Skematika sistem instrumentasi dan kontrol

Tabel 2. Spesifikasi TC4S

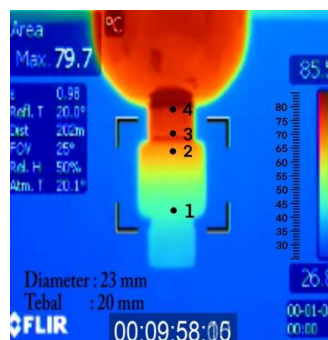
Tipe	<i>Economical Single Display</i>
Catu daya	110 – 220 VAC
Dimensi	48 x 48 mm
Keluaran Kontrol	Relay+SSR (AC/DC power), Relay+SSRP (AC power)
Keluaran Alarm	Alarm1



Gambar 6. Diagram alir prosedur kerja eksperimen



Gambar 7. Skema tata letak pemanas, pipet tetes, dan termokopel



Gambar 8. Empat titik analisis transfer panas

Prosedur kerja yang dilakukan pada eksperimen ini adalah seperti yang ditunjukkan oleh diagram alir di bawah ini (lihat Gambar 6). Parafin terlebih dahulu dilelehkan dengan suhu 70°C hingga mencair. Lalu, parafin cair dimasukkan ke dalam area *freeze-valve* dengan menggunakan pipet tetes dan diisi hingga ruang *freeze-valve* penuh. Kemudian, parafin didiamkan hingga membeku dan setelah membeku, parafin diuji apakah ada kebocoran air. Jika terdapat kebocoran, maka pengisian *freeze-valve* harus diulangi lagi.

Setelah *freeze-valve* benar-benar tidak bocor, botol digantung di tengah-tengah kerangka kerja. Botol digantungkan dengan bantuan pita besi tipis dan sekrup diertatkan. Lalu, air sebanyak 225 ml dimasukkan ke dalam tabung. Batang pemanas, pipet tetes, dan termokopel ditempelkan pada sebuah penutup karet dan dimasukkan ke dalam tabung. Dengan penutup karet tersebut, aliran panas diasumsikan tidak akan keluar dari dalam tabung sehingga keadaannya dapat menyerupai sistem MSR, yakni *High Temperature Confinement*.

Air dipanaskan hingga mencapai temperatur yang diinginkan, misalnya 80°C . Namun dalam eksperimen ini, tidak semua bagian air di tabung dapat dengan mudah mencapai 80°C . Oleh karena itu, pipet tetes digunakan sebagai pompa air dan diasumsikan berperan sebagai pompa *heat exchanger* seperti di MSR (lihat Gambar 7). Pipet tetes dimasukkan sejauh 1 cm ke dalam air, kemudian dipompa secara perlahan atau satu kali dalam 2 detik. Dengan demikian, air di tabung mengalami konveksi paksa karena air mengalir dengan adanya gaya dari luar.

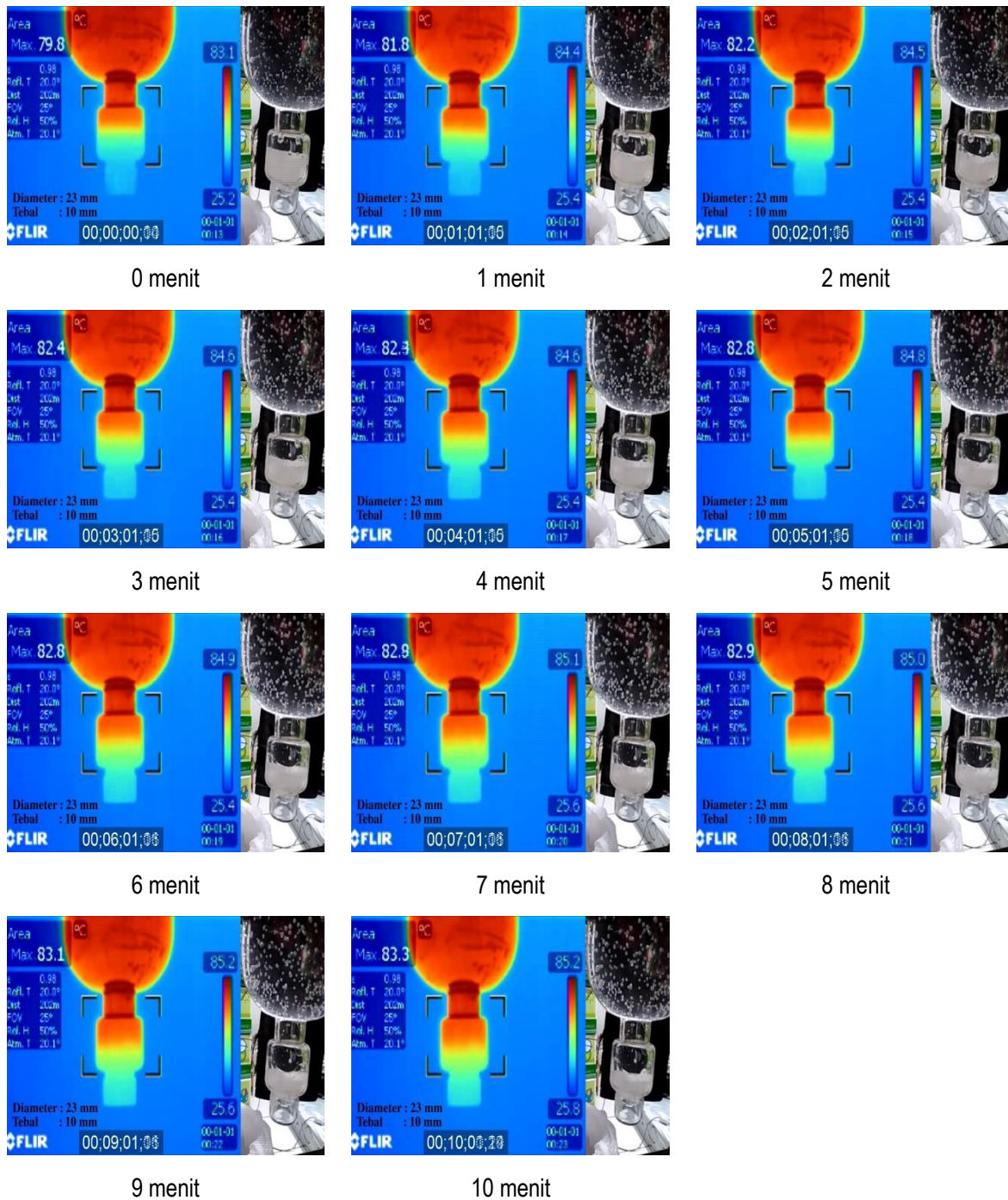
Saat tampilan suhu di kamera termal dan display TC4S sesuai, bagian *freeze-valve* direkam dengan kamera termal dan kamera *smartphone* secara bersamaan. Durasi rekaman dibatasi sampai 10 menit dengan dimulai saat temperatur pada bagian atas mencapai 80°C . Dengan demikian, eksperimen telah selesai. Lakukan cara yang sama untuk variasi diameter dan ketebalan yang lain, yaitu diameter 23 mm dengan ketebalan

Kemudian, hasil kedua rekaman tersebut disatukan dan diekstrak ke dalam format bitmap atau potongan gambar. Gambar 8 merupakan tipikal hasil kamera FLIR dengan informasi distribusi suhu. Untuk menganalisa transfer panas dan perubahan fasa, maka dipilih 4 titik yang tersebar secara vertical di area *freeze-valve*: titik 1, 2, 3, dan 4. Titik 1 merupakan bagian bawah *freeze-valve* dan titik 2 adalah bagian atasnya. Titik 3 merupakan bagian bawah pipa drainase dan titik 4 adalah bagian atasnya. Analisa gambar termal dilakukan dengan menggunakan aplikasi *Procreate* atau aplikasi edit gambar yang lain. Aplikasi edit gambar ini digunakan untuk "*pick warna*" di 4 titik yang sudah ditentukan sehingga diperoleh nilai RGB titik tersebut dan disesuaikan dengan bar temperatur di sampingnya, yakni bar yang berfungsi sebagai skala temperatur berdasarkan warna.

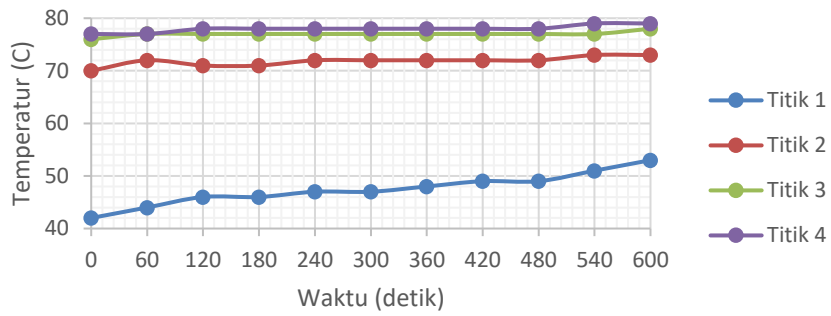
HASIL DAN PEMBAHASAN

Berikut ini merupakan data rekaman 10 menit yang diperoleh dari pengamatan *freeze-valve*. Data yang dikumpulkan merupakan potongan gambar dari rekaman video eksperimen untuk setiap variasi ketebalan. Dengan bantuan kamera termal, distribusi suhu di area kotak dapat terlihat dengan jelas dan dapat dibedakan dari warna yang dihasilkan. Kemudian dari gambar tersebut, transfer panas dapat dianalisa sesuai dengan prosedur yang digunakan sehingga diperoleh grafik yang menunjukkan perubahan suhu di beberapa titik.

Tabel 3. Proses perubahan *freeze-valve* dengan suhu fluida 80°C dan ketebalan awal 10 mm

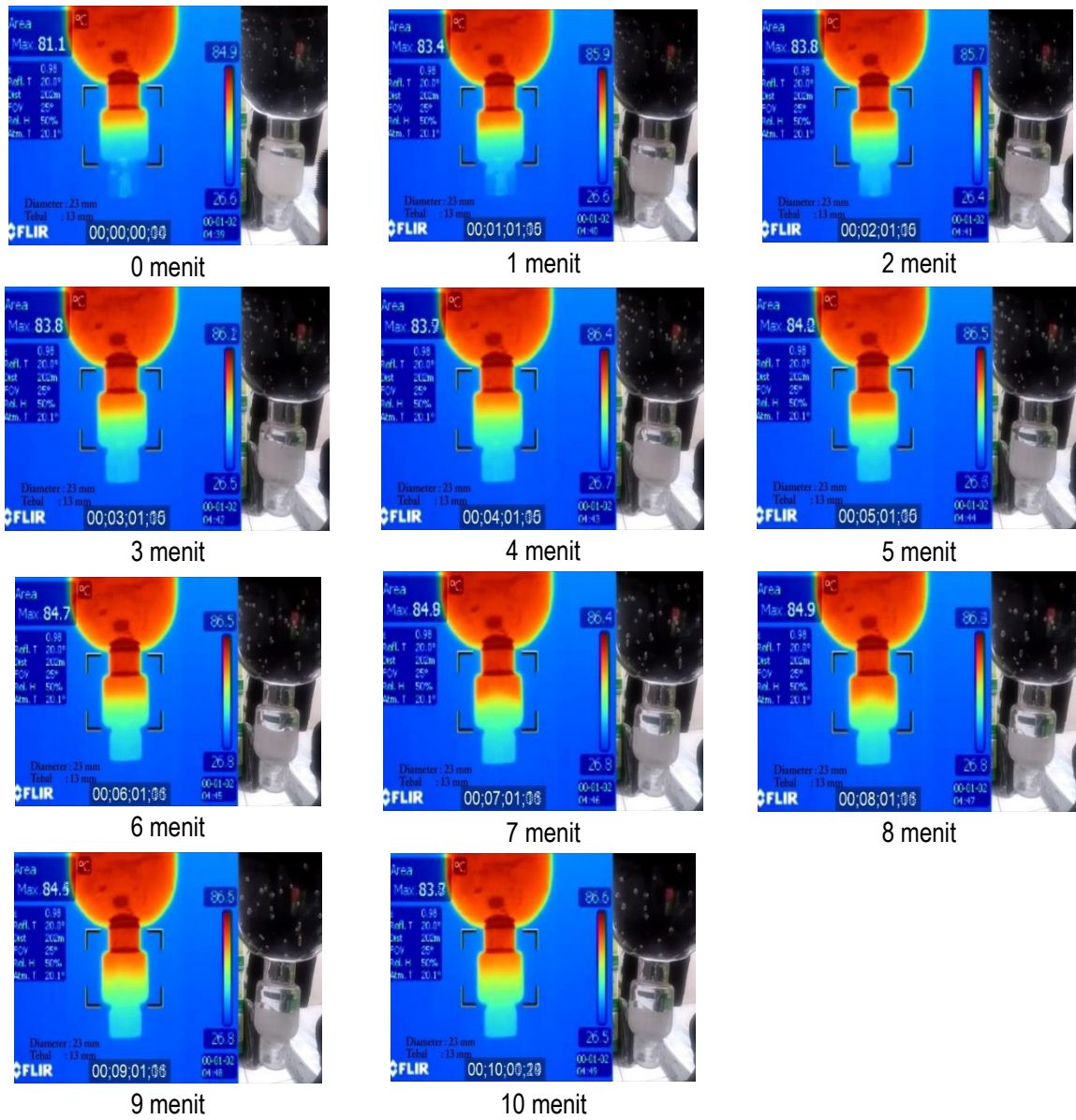


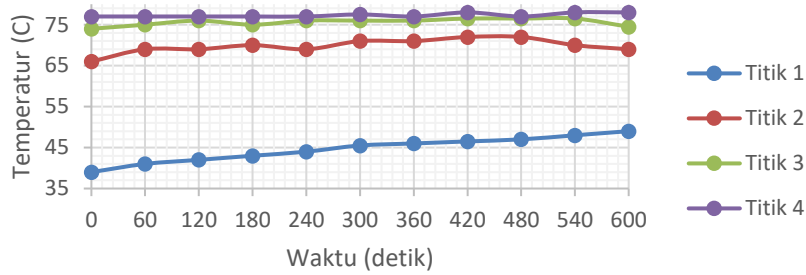
Studi Pengaruh Perbedaan Ketebalan Freeze-Valve di MSR (Molten Salt Reactor)
 Dalam Pengendalian Kecelakaan
 (Virgo Eben E M, dkk)



Gambar 9. Perubahan suhu di 4 titik parafin 10 mm akibat fluida 80°C

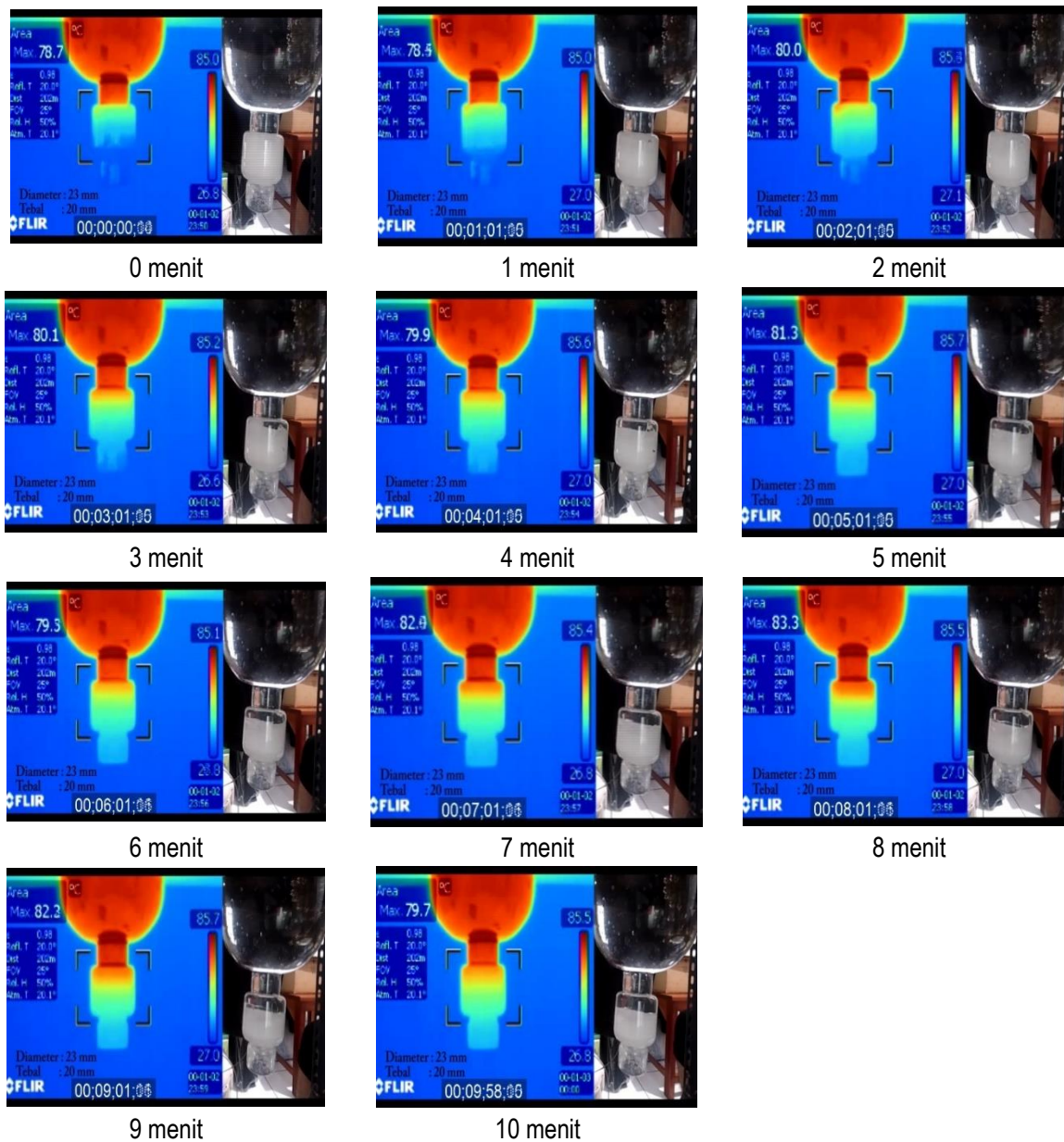
Tabel 4. Proses perubahan freeze-valve dengan suhu fluida 80°C dan ketebalan awal 13 mm

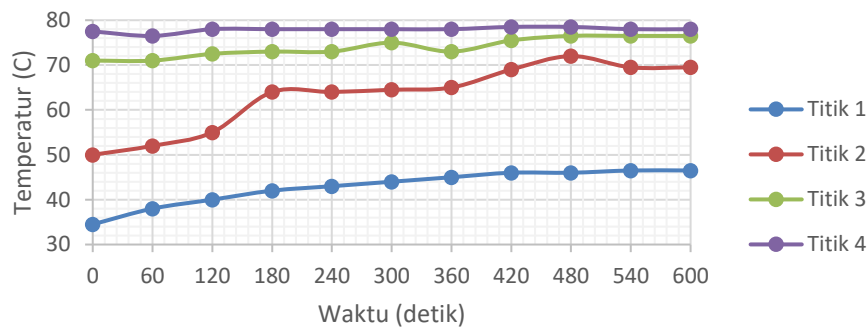




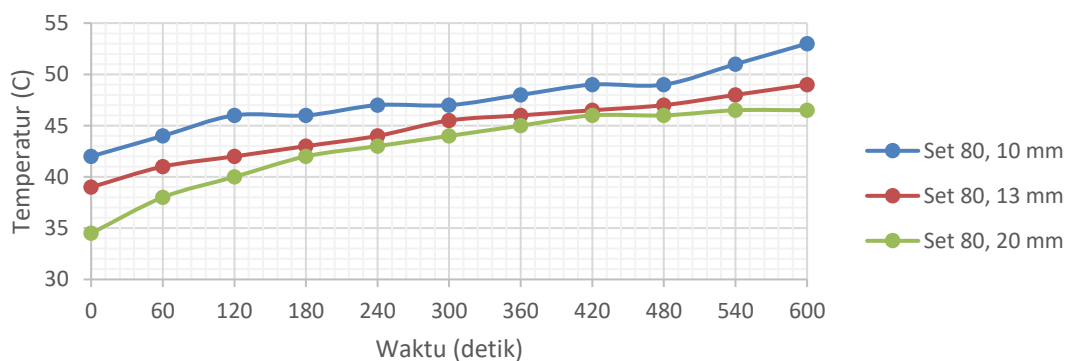
Gambar 10. Perubahan suhu di 4 titik parafin 13 mm akibat fluida 80°C

Tabel 5. Proses perubahan freeze-valve dengan suhu fluida 80°C dan ketebalan awal 20 mm





Gambar 11. Perubahan suhu di 4 titik parafin 20 mm akibat fluida 80°C



Gambar 12. Perbandingan transfer panas dari semua variasi suhu fluida di titik 1

Setelah dilakukan pengamatan, dapat diketahui bahwa kenaikan suhu pada titik 1 cenderung linear di setiap variasi ketebalan. Titik 1 diasumsikan sebagai area freeze-valve yang paling jauh dari kontak langsung dengan fluida. Dari Gambar 9, perbedaan suhu awal dan akhir di titik 1 adalah 11°C (42°C – 53°C). Pada Gambar 10, perbedaan suhu awal dan akhir di titik 1 adalah 10°C (39°C – 49°C). Sedangkan pada Gambar 11, perbedaan suhu awal dan akhir di titik 1 adalah 12°C (34,5°C – 46,5°C). Jika dirata-ratakan, perubahannya suhu di titik 1 untuk semua variasi ketebalan adalah 11°C dalam waktu 10 menit.

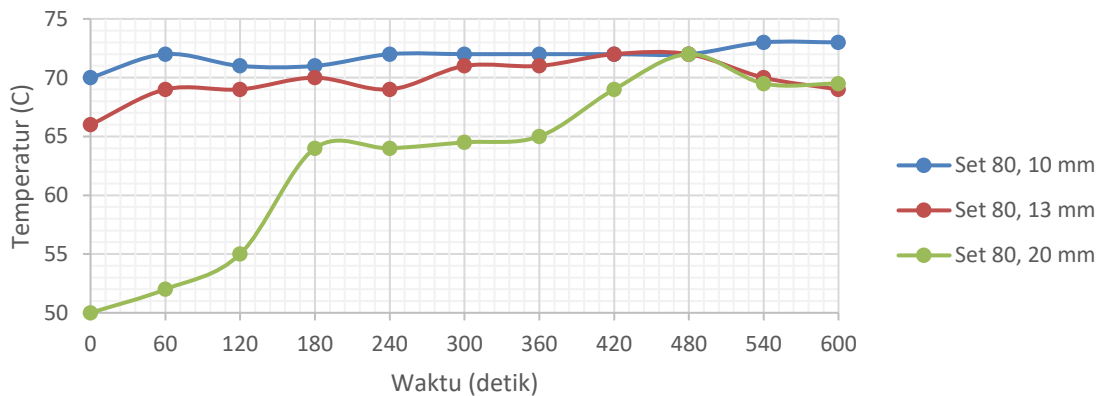
Sementara itu, titik 2 dan 3 dapat diasumsikan sebagai daerah antarmuka freeze-valve dengan fluida. Pada daerah ini, terjadi proses perubahan fasa solid-liquid secara kontinu sehingga daerah tersebut memiliki viskositas yang tinggi. Dikutip dari karya Furutani [7], daerah viskositas tinggi ini disebut dengan pool effect atau bisa juga disebut sebagai mushy zone. Pool effect mengakibatkan viskositas lelehan lebih tinggi sehingga transfer panas dari fluida menuju freeze-valve lebih lambat. Di daerah ini juga terjadi proses pemanasan dan pendinginan yang terjadi secara bersamaan. Keadaan ini lebih jelas teramati pada variasi ketebalan 20 mm. Titik 2 yang sudah ditentukan masih berada di bagian parafin yang belum meleleh atau masih dalam bentuk solid. Sementara itu, pada variasi ketebalan yang lain tinggi parafin tidak mencapai titik 2. Namun, kondisi pool effect tersebut masih dapat teramati meskipun tidak begitu signifikan. Pada Gambar 11, pool effect dapat teramati sejak detik 120. Sebelumnya parafin sudah mulai meleleh dan mulai naik ke atas karena massa jenisnya lebih kecil dari air. Saat parafin tersebut meleleh menjadi fluida seutuhnya, lapisan mushy zone akan terlepas dari bagian parafin sehingga daerah bagian atas parafin atau titik 2 meningkat. Namun karena proses pemanasan tetap berlanjut, mushy zone yang baru akan mulai naik lagi sehingga suhu di bagian atas parafin turun atau tidak mengalami peningkatan. Titik 3 dan 4 juga mengalami dampak yang sama, namun efeknya lebih kecil jika untuk titik yang jauh.

Setelah 10 menit dialiri air panas, perbedaan suhu antara titik 1 dan 2 dari masing-masing variasi secara berurutan adalah 20°C, 20°C, dan 23°C. Jika dirata-ratakan, maka perbedaan suhu untuk semua variasi adalah 21°C. Hal ini terjadi karena jarak antara titik 1 dan 2 pada penelitian tersebut sekitar 15 mm dan tebal parafinnya juga 15 mm, sedangkan pada penelitian ini adalah 20 mm. Lalu, erosi yang terjadi untuk masing-masing variasi secara berurutan adalah 7, 6, dan 8 mm. Jika dirata-ratakan, besar erosi yang terjadi untuk variasi adalah 7 mm.

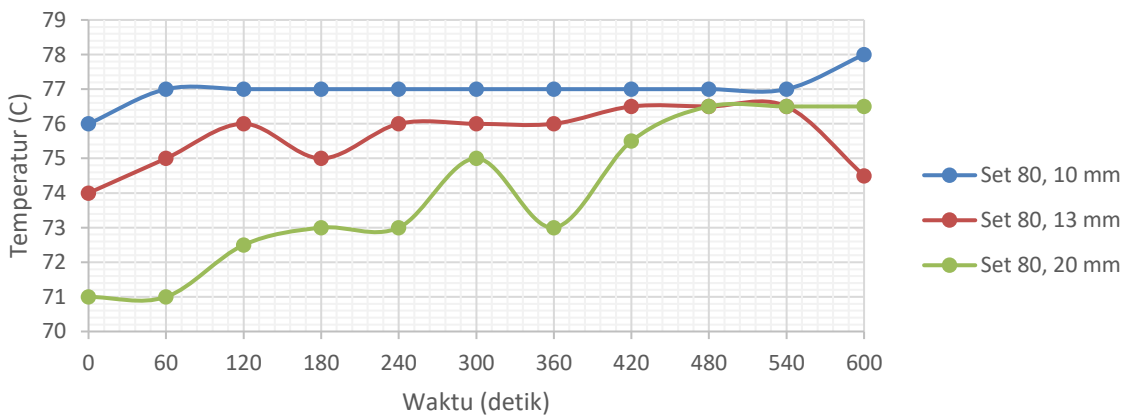
Jika digabungkan, maka rata-rata erosi yang terjadi akibat fluida 80°C adalah sekitar 6.75 mm. Dari analisis tersebut, dapat disimpulkan bahwa jika keadaan kecelakaan didesain pada suhu 80°C maka dibutuhkan freeze-valve dengan tebal sekitar 6.75 mm agar fluida dapat dialirkan menuju subcritical tank setelah 10 menit keadaan kecelakaan dimulai.

Dari Gambar 12, kenaikan suhu di titik 1 untuk variasi cenderung sama-sama linear. Suhu di titik 1 untuk variasi ketebalan 10 mm lebih tinggi karena jaraknya lebih dekat atau parafin lebih tipis dari yang lain sehingga proses konduksi lebih cepat dan besar. Sementara itu, pada variasi ketebalan 20 mm suhu titik 1 lebih rendah karena jaraknya lebih jauh dari fluida dan proses konduksi terjadi lebih lambat.

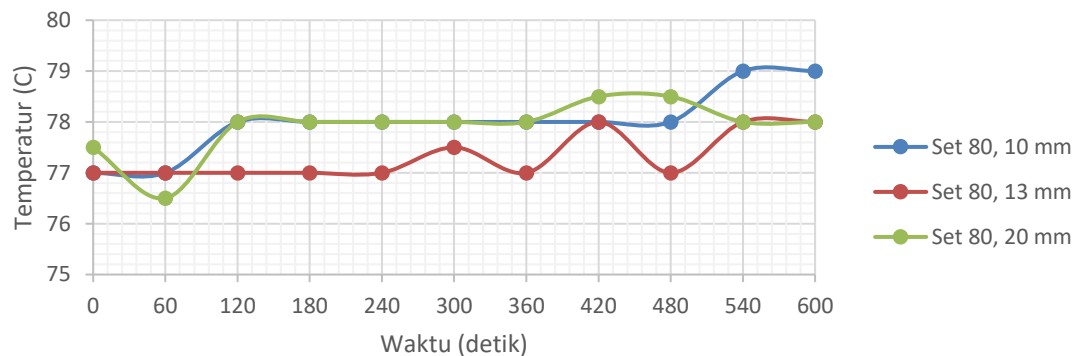
Gambar 13 dan 14 merupakan grafik perbandingan perubahan suhu untuk semua variasi dan titik 2 dan 3 merupakan daerah yang mengalami *pool effect*. Grafik perubahan suhu untuk variasi ketebalan 20 mm lebih rendah dan lebih banyak osilasi suhu (naik-turun suhu) karena jumlah *mushy zone* di sekitar titik 2 dan 3 lebih banyak dibanding dengan variasi yang lain. Jika jumlah *mushy zone* di titik 2 dan 3 semakin banyak, maka aliran panas secara konveksi akan terganggu dan semakin terhambat.



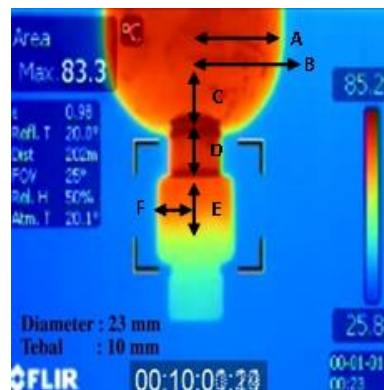
Gambar 13. Perbandingan transfer panas dari semua variasi suhu fluida di titik 2



Gambar 14. Perbandingan transfer panas dari semua variasi suhu fluida di titik 3



Gambar 15. Perbandingan transfer panas dari semua variasi suhu fluida di titik 4



Gambar 16. Analisa transfer panas di semua bagian eksperimen

Gambar 15 merupakan grafik yang menunjukkan perubahan suhu untuk semua variasi ketebalan di titik 4. Suhu di titik ini diharapkan memiliki suhu yang sama dengan suhu fluida di tabung utama atau sama dengan suhu yang sudah ditentukan, yaitu 80°C karena titik 4 merupakan daerah yang paling dekat dengan tabung utama dan batang pemanas. Namun, perbedaan suhu atau pengurangan suhu dapat terjadi karena *pool effect* dan atau diduga karena adanya energi panas yang terbuang selama eksperimen. Jika dilihat dari Gambar 16, terdapat beberapa aliran panas yang mungkin terjadi. Garis A menunjukkan aliran panas yang terjadi secara konduksi dari fluida menuju dinding botol. Garis B menunjukkan aliran panas yang terjadi secara radiasi dari fluida menuju lingkungan yang terjadi. Garis C menunjukkan aliran panas yang terjadi secara konduksi pada fluida menuju parafin. Garis D menunjukkan aliran panas yang terjadi secara konveksi pada daerah *mushy zone*. Garis E menunjukkan aliran panas yang terjadi secara konduksi pada ujung atas parafin menuju ujung bawah parafin. Kemudian, garis E menunjukkan aliran panas yang terjadi secara konduksi dari parafin menuju dinding tabung. Jadi, dari analisa aliran energi panas yang terjadi pada eksperimen ini, dapat diketahui bahwa perbedaan suhu dan perubahan suhu dapat dipengaruhi karena adanya energi yang diserap oleh objek atau bagian yang lain pada eksperimen ini atau karena adanya energi panas yang terbuang menuju lingkungan.

KESIMPULAN

Eksperimen variasi ketebalan parafin telah berhasil dilakukan untuk menjelaskan mekanisme sederhana sebuah *freeze-valve* dari MSR. Eksperimen tersebut dilakukan dengan mengamati interaksi fluida (air panas 225 ml) terhadap *freeze-valve* (parafin, tebal 20 mm) di dalam sebuah botol pyrex yang sudah didesain sedemikian rupa. Dari hasil analisa yang dilakukan, dapat diketahui bahwa besar erosi yang terjadi untuk masing-masing variasi ketebalan adalah 7, 6, dan 8 mm. Dengan rata-rata 7 mm, dapat disimpulkan bahwa jika keadaan kecelakaan didesain untuk fluida bersuhu 80°C, maka dibutuhkan sebuah *freeze-valve* dengan ketebalan 7 mm untuk membuka aliran fluida menuju *subcritical tank* dalam waktu 10 menit setelah keadaan kecelakaan dimulai. Dari analisa aliran energi panas yang terjadi, diketahui bahwa adanya kemungkinan kehilangan energi panas karena terbuang ke lingkungan dan terserap oleh objek lain di dalam botol. Dengan adanya analisa 4 titik di sekitar *freeze-*

valve dapat diamati keberadaan *mushy zone* yang berfungsi untuk menghambat energi panas. Jika *mushy zone* lebih banyak dihasilkan, maka energi panas akan lebih banyak yang terhambat.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini disponsori oleh Program Penelitian, Pengabdian kepada Masyarakat dan Inovasi ITB (P3MI-ITB) tahun 2020.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. G. MacPherson, "The Molten Salt Reactor Adventure," *Nuclear Science and Engineering*, vol. 90, no. 4, pp. 374-380, 1985.
- [2] R. C. Robertson, "Conceptual Design Study of A Single-Fluid Molten Salt Breeder Reactor," Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, 1978.
- [3] s. J and et.al, "The molten salt reactor (msr) in generation iv: Overview and perspectives," *Progress*, vol. 77, p. 308, 2014.
- [4] C. Fiorina, M. Aufiero, A. Cammi, F. Franceschini, J. Krepel and L. Luzzi, "Investigation of the MSFR core physics and fuel cycle characteristics,," *Progress in Nuclear Energy*, vol. 68, pp. 153-168, 2013.
- [5] B. E. Prince, S. J. Ball, J. R. Engel, P. N. Haubenreich and T. W. Kerlin, "Zero-Power Physics Experiment on The Molten-Salt Reactor Experiment," Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, 1968.
- [6] G. Grosch, "<https://www.gen-4.org/gif/>," 23 09 2013. [Online]. Available: https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_9502/generation-iv-goals.
- [7] D. Heuer, E. Merle-Lucotte, M. A. Allibert, M. Brovchenko, V. Ghetta and P. Rubiolo, "Towards the tktorium fuel cycle with molten salt fast reactors," *Annal of Nuclear Energy*, pp. 421-429, 2014.
- [8] O. N. E. A. f. t. G. I. I. Forum, " Technology roadmap update for generation, GIF annual report," 2014.
- [9] R. Sheu, C. Chao, O. Feynberg and Y.-W. Liu, "A fuel depletion analysis of the MSRE and three conceptual small molten-salt reactors for Mo-99 production," *Annals of Nuclear Energy*, vol. 71, pp. 111-117, 2014.
- [10] D. Meneley and A. Muzumdar, "Power Reactor Safety Comparison - A Limited Review," in *Proceedings of CNS 30th Annual Conferences*, Calgary, 2009.
- [11] Y. Ritsuo, K. Mitachi, Y. Shimazu and M. Kinoshita, "Safety Criteria and Guidelines for MSR Accident Analysis," *PHYSOR*, September 2014.
- [12] C. Guerrieri, A. Cammi and L. Luzzi, "An approach to the MSR dynamics and stability analysis," *Progress in Nuclear Energy*, vol. 67, pp. 56-73, 2013.
- [13] M. Richardson, "Development of Freeze Valve for use in the MSRE," (Report ORNL-TM-128). Oak Ridge National Laboratory, 1962.
- [14] O. C. van den Bergh, Emergency drainage of the MSFR, Bachelor thesis, Delft University of Technology, 2016.
- [15] M. B. e. al, "Design-related studies for the preliminary safety assessment of the molten," *Nuclear science and engineering*, vol. 175, p. 329, 2013.
- [16] I. Koks, Melting behaviour of the freeze plug in a molten salt fast reacto, Delft University of Technology, 2016.
- [17] V. Ignatiev and A. Surenkov, "Alloys compatibility in molten salt fluorides: Kurchatov Institute related experience," *Journal of Nuclear Materials*, vol. 441, pp. 592-603, 2013.
- [18] A. Furutani, S. Imahori, K. Sato and M. Saito, "Erosion behavior of a slid plate by a liquid jet - Effect of molten layer," *Nuclear Engineering and Design*, pp. 153-169, 1991.