

PENENTUAN PREDIKSI WAKTU EKSPERIMEN PERPINDAHAN KALOR PENDIDIHAN MENGGUNAKAN BUNDEL UJI QUEEN-1

Giarno, G.Bambang Heru, Joko Prasetyo W

Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir - BATAN

ABSTRAK

PENENTUAN PREDIKSI WAKTU EKSPERIMEN PERPINDAHAN KALOR PENDIDIHAN MENGGUNAKAN BUNDEL UJI QUEEN-1. Bundel uji QUEEN-1 yang terintegrasi dengan Untai Uji BETA adalah fasilitas eksperimen untuk menggambarkan karakteristik bahan bakar pada reaktor nuklir. Sejak dibuat telah banyak dilakukan untuk penelitian teknologi keselamatan nuklir dari aspek termohidrolika antara lain *quenching*, *reflooding*, dll. Fasilitas QUEEN-1 selain digunakan di lingkungan Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir (PTKRN), juga digunakan untuk praktikum Perpindahan Kalor Pendidihan dalam diklat *Reactor Engineering and Safety II*. Untuk mendapatkan kondisi eksperimen yang baik, maka perlu diketahui waktu yang dibutuhkan sehingga tercapai pendidihan. Metode yang dilakukan adalah dengan menghitung secara teori waktu yang diperlukan dengan asumsi energy kalor yang diberikan sama dengan energi kalor yang dikeluarkan atau diserap. Hasil perhitungan teoritis kemudian dibandingkan secara eksperimen. Dari hasil perhitungan diperoleh waktu untuk mendapatkan pendidihan selama 45 menit sedangkan dari hasil eksperimen diperoleh waktu selama 55 menit. Adanya perbedaan antara waktu secara teori dan eksperimen dikarenakan beberapa faktor antara lain belum stabilnya temperatur ketika menaikkan daya listrik.

Kata kunci: prediksi waktu, bundel uji QUEEN-1, eksperimen perpindahan kalor pendidihan

ABSTRACT

TIME PREDICTION DURING BOILING HEAT TRANSFER EXPERIMENT USING THE QUEEN-1 TEST SECTION. The QUEEN-1 test section integrated with the BETA test loop is a experimental facility to simulate the characteristics of the nuclear reactor fuel rods. The facility has been used for various research related to the nuclear safety technology in the thermalhydraulic aspects such as *quenching*, *reflooding*, etc. In addition to the Center for Nuclear Reactor Safety and Technology (PTKRN) as the owner of the QUEEN-1, the facility is also used for the training purposes such as the boiling heat transfer experiment learned in the *Reactor Engineering and Safety II* training course. In order to obtain a suitable experiment condition, it is necessary to predict the time required for the water fluid to achieve the boiling condition. The methodology used is by calculating the theoretical time by assuming that the given heat energy is equal to the released or absorbed heat energy. The calculated time then is compared with the experimental prediction. Based on the theoretical calculations, the time to get boiling is 45 minutes, while the experimental results is about 55 minute. The differences between theoretical and experimental results are due to several factors such as the instability of the temperature during the electricity power increase.

Keywords: time prediction, QUEEN-1 test section, boiling heat transfer experiment.

PENDAHULUAN

Kecelakaan reaktor *Three Mile Island Unit 2 (TMI-2)* di Amerika Serikat tahun 1979 melibatkan berbagai fenomena fisis yang menjadi subyek penelitian untuk meningkatkan keselamatan PLTN. Salah satu penelitian masih terus dilakukan adalah permasalahan yang berhubungan dengan interaksi antara lelehan teras di bagian bawah bejana dengan dinding bejana reaktor, dimana salah satu faktor penyebab melelehnya teras adalah berkurangnya pendinginan bahan bakar yang ditunjukkan oleh terjadinya pendidihan di dalam teras. Dari aspek termohidrolika, perpindahan kalor pada pendidihan yang terjadi pada pendingin primer tersebut harus benar-benar dipahami^[1]. Salah satu kondisi berkurangnya pendinginan bahan bakar teras adalah menurunnya laju alir pendingin atau disebut disebut sebagai kecelakaan kehilangan aliran pendingin (*Loss of Flow Accident, LOFA*). Akibatnya kapasitas pengambilan panas menurun sehingga temperatur teras meningkat karena tidak ada keseimbangan antara pembentukan panas dan pengambilan panas teras. Oleh karena itu reaksi fisi harus dihentikan ke kondisi *shutdown* dengan sistem proteksi yaitu trip reaktor^[2].

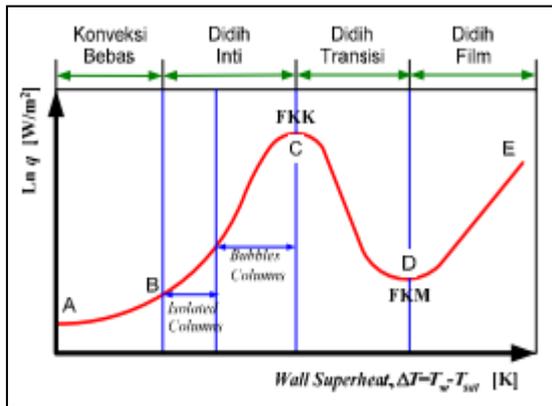
Penelitian tentang keselamatan yang berkaitan dengan aspek termohidrolika telah banyak dilakukan antara lain *Reflooding*, *Quenching*, dll yang dilakukan di Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir (PTKRN). Untuk itu dirancang suatu fasilitas eksperimen di PTKRN yang disebut dengan fasilitas Untai Uji BETA yang dilengkapi de-

ngan bundel uji QUEEN-1. Fasilitas tersebut juga dimanfaatkan pada pelatihan "*Reactor Engineering and Safety II*" yang dilaksanakan oleh PUSDIKLAT yaitu untuk praktikum perpindahan kalor pendidihan (*Boiling Heat Transfer*). Tujuan penelitian dalam makalah ini adalah untuk mendapatkan prediksi waktu selama melakukan praktikum eksperimen *Boiling Heat Transfer* dengan menggunakan bundel uji QUEEN-1 yang terintegrasi dengan Untai Uji BETA. Dengan diketahuinya waktu untuk melakukan eksperimen, maka jadwal praktikum PUSDIKLAT dapat direncanakan dengan baik dan peserta diklat dapat melakukan eksperimen sesuai dengan jadwal.

TEORI

Definisi mendidih adalah proses perubahan bentuk zat dari cair menjadi uap/gas. Pada proses ini diperlukan sejumlah kalor untuk menaikkan temperatur. Kalor yang diperlukan disebut kalor uap sementara temperatur pada saat mendidih disebut titik didih (*boiling point*). Proses mendidih dibedakan dengan proses menguap, dimana mendidih hanya terjadi pada benda yang telah mencapai titik didihnya disertai gelembung-gelembung udara dari seluruh bagian zat cair. Sementara menguap dapat terjadi di permukaan zat cair saja. Ada dua macam tipe pendidihan yaitu pendidihan kolam (*pool boiling*) dan pendidihan aliran (*flow boiling*). Pendidihan kolam adalah permukaan dari zat padat yang dipanaskan kemudian digenangi air. Pendidihan aliran adalah permukaan dari zat padat yang dipa-

naskan kemudian digenangi air yang mengalir^[3]. Pada eksperimen ini peristiwa yang terjadi adalah pendidihan kolom. Sehingga daerah pembahasan fluks kalor yang terjadi ditunjukkan pada rejim I dan rejim II seperti terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Kurva pendidihan air tipe kolom pada tekanan 1 atm^[3].

Untuk mensimulasikan kondisi pendidihan kolom maka dirancang fasilitas Untai Uji BETA yang dilengkapi dengan bundel uji QUEEN-1 untuk mensimulasikan batang bahan bakar pada teras reaktor. Sumber kalor berasal dari batang pemanas yang diberi kawat nikelin di dalamnya. Eksperimen pendidihan dilakukan dengan cara batang pemanas direndam dengan air sehingga terjadi perpindahan kalor dari batang pemanas ke air. Proses perpindahan kalor yang terjadi adalah dengan cara konduksi dan konveksi bebas^[4].

Panas pada batang pemanas diperoleh melalui sumber listrik yang diatur dengan trafo regulator tegangan. Untuk mengetahui daya listrik yang diberikan dari trafo regulator tegangan digunakan persamaan (1) :

$$P = \frac{V}{R^2} \dots\dots\dots(1)$$

dengan :

P = daya listrik (Watt)

V = tegangan (Volt)

R = tahanan kawat pemanas=17,7 (ohm)

Untuk menghitung energi kalor yang dibangkitkan oleh batang pemanas digunakan persamaan (2), sementara untuk kalor yang diterima oleh air digunakan persamaan (3) :

$$Q_{pemanas} = \frac{m_{ss} c_{p(ss)} \Delta T}{\Delta t} \dots\dots\dots(2)$$

$$Q_{air} = \frac{m_{air} c_{p(air)} \Delta T}{\Delta t} \dots\dots\dots(3)$$

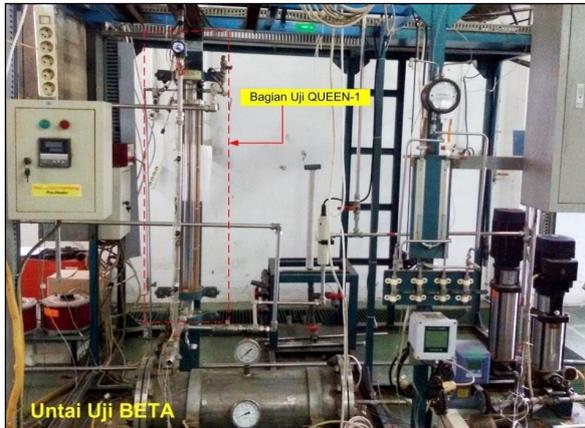
dengan :

Q	=	banyaknya kalor (Watt)
m _{ss}	=	massa stainless steel (kg)
m _{air}	=	massa air (kg)
C _{p_{ss}}	=	kapasitas stainless steel, 460 (J/kg. °C)
C _{p_{air}}	=	kapasitas jenis air, 4200 (J/kg. °C)
ΔT	=	selisih Temperatur = T _{pemanas} - T _{air} (°C)
Δt	=	Selisih waktu = t _{awal} - t _{akhir} (detik)

TATA KERJA

Metode penelitian yang digunakan adalah dengan melakukan perhitungan secara teori terhadap energi kalor yang diberikan sama dengan kalor yang diserap oleh air. Kemudian dengan teknik komparasi, energi kalor hasil perhitungan dibandingkan dengan data hasil eksperimen perpindahan kalor pendidihan kolom (*pool boiling*) dengan menggunakan bundel uji QUEEN-1 yang terintegrasi dengan

Untai Uji BETA seperti ditunjukkan pada Gambar 2 dan 3.



Gambar 2. Fasilitas Untai Uji BETA dan Bagian Uji QUEEN-1



Gambar 3. Batang pemanas

Adapun peralatan yang digunakan untuk kegiatan eksperimen perpindahan kalor adalah:

- Untai Uji BETA (UUB) yang terintegrasi dengan bundel uji QUEEN-1
- Multimeter digital
- Peralatan mekanik
- Tang ampere, pengukur arus
- Trafo daya 5 kVA
- Kamera handycam
- Komputer
- SOP pengoperasian Untai Uji BETA (UUB).

Pada bundel uji *QUEEN-1* terdapat batang pemanas yang terbuat dari bahan SS304 dengan diameter luar 9,55 mm dan tebal 1,2 mm. Batang pemanas terletak dalam tabung kuarsa dengan diameter luar 50 mm dan tebal

2,15 mm dan tinggi 935 mm. Bagian dalam batang pemanas terdapat lilitan elemen pemanas dengan daerah yang dipanasi sepanjang 750 mm.

Pelaksanaan eksperimen sesuai SOP pengoperasian untai uji BETA adalah sebagai berikut:

1. Periksa seluruh Katup Manual (KM) dengan kondisi ON untuk : KM-1
2. Periksa seluruh Katup Manual (KM) dengan kondisi OFF untuk : seluruh KM,
3. Lakukan pengisian air di *pre-heater* sampai penuh,
4. Hidupkan komputer dan jalankan program *LabVIEW* untuk perekaman data,
5. Hidupkan *heater no.2, 5 dan 8*, setting temperatur 60 °C pada *heater* otomatis,
6. Setelah temperatur di *pre-heater* mencapai 60 °C, buka katup manual ke bundel uji *QUEEN-1* dan KM-1, sampai level teratas, lalu tutup KM-1,
7. Hidupkan travo daya regulator 5 kVA, naikkan tegangan 10 Volt setiap 5 menit dan ukur arus dengan tang amper, lakukan sampai tegangan mencapai 100 Volt,
8. Setelah temperatur di *QUEEN-1* mencapai 90 °C, amati proses pendidihan dan rekam dengan kamera,

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan karakterisasi daya pada trafo tegangan. Untai Uji BETA maka eksperimen pendidihan dibatasi tegangan maksimum 100 Volt. Eksperimen dilakukan setelah keluaran dari *preheater* mencapai temperatur 60 °C setelah itu air dialirkan ke bundel uji

QUEEN-1 sampai level atas. Pada saat trafo tegangan mulai dihidupkan terlihat temperatur di bundel uji *QUEEN-1* menunjukkan temperatur air 55,7 °C. Hal tersebut terjadi akibat penurunan temperatur karena temperatur di *QUEEN-1* lebih dingin, sementara itu temperatur di batang pemanas menunjukkan 52,3 °C. Selanjutnya eksperimen dimulai dengan menaikkan tegangan sebesar 10 Volt dan diukur arusnya sebesar 0,4 Ampere. Langkah selanjutnya adalah menaikkan tegangan sebesar 10 Volt selama 5 menit (300 detik) dan data temperatur direkam di komputer. Adapun data tegangan, arus dan perhitungan daya listrik ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Data tegangan dan arus

No.	Waktu (detik)	Tegangan (V)	Arus (A)	Daya termal (W)
1	300	10	0.4	4
2	600	20	0.7	14
3	900	30	1.1	33
4	1200	40	1.4	56
5	1500	50	1.7	85
6	1800	60	2.1	126
7	2100	70	2.5	175
8	2400	80	2.8	224
9	2700	90	3.2	288
10	3000	100	3.4	340

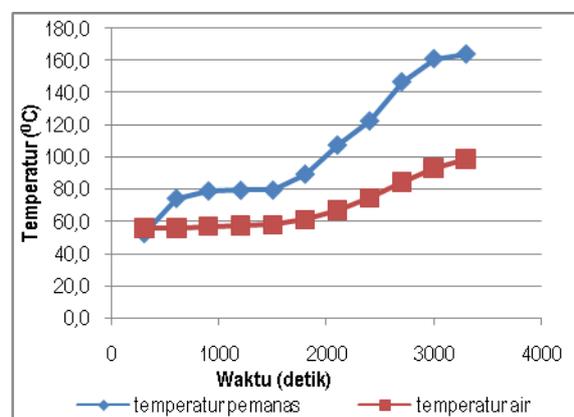
Eksperimen dilakukan sampai mencapai kondisi pendidihan. Ketika itu tegangan mencapai 100 Volt, temperatur air menunjukkan 93,5 °C, tetapi temperatur di batang pemanas telah menunjukkan 161 °C. Pada kondisi itu penambahan daya dihentikan walaupun titik pendidihan belum terjadi. Sumber daya tetap hidup sehingga temperatur air bertambah dan terjadi pendidihan pada temperatur 99,1°C, dengan ditandai gelembung (*bubble*). Data kenaikan

temperatur ketika terjadi pendidihan ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Data saat pendidihan

No.	Waktu, (detik)	Temperatur pemanas, (°C)	Temperatur air (°C)
1	300	52.3	55.7
2	600	74.1	55.9
3	900	78.8	56.9
4	1200	79.2	57.6
5	1500	79.4	58.0
6	1800	89.3	61.1
7	2100	107.4	67.0
8	2400	122.4	74.7
9	2700	146.8	84.6
10	3000	161.2	93.5
11	3300	164.1	99.1

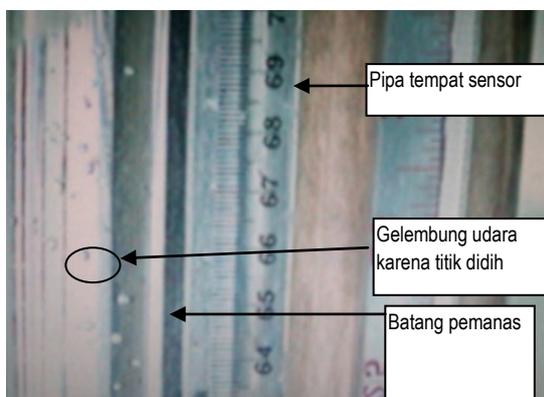
Kurva pendidihan tidak dapat dibuat dikarenakan sumber daya listrik tidak ditambah ketika mencapai titik didih. Dari data temperatur batang pemanas dan air dibuat grafik temperatur air dan batang pemanas terhadap waktu seperti ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Grafik perubahan temperatur batang pemanas dan air terhadap waktu

Dari Gambar 4 terlihat dalam waktu sama terdapat perbedaan temperatur yang signifikan. Pada waktu 2100 detik (35 menit) temperatur batang pemanas telah mencapai temperatur 107 °C, dimana pada visualisasi *QUEEN-1* terlihat ada gelembung yang menempel

di dinding batang pemanas. Sementara itu temperatur air masih menunjukkan temperatur 67°C , sehingga secara visual belum terlihat gelembung di air. Ketika daya termal ditambah dengan menaikkan tegangan dari trafo regulator sampai 100 Volt, temperatur batang pemanas telah mencapai 161°C dan temperatur air $93,5^{\circ}\text{C}$, namun air belum mendidih, seperti ditunjukkan pada Gambar 4. Setelah tegangan mencapai 100 Volt, daya termal tidak ditambah tetapi seiring waktu bertambah, kalor yang diberikan dari batang pemanas terus bertambah. Pada waktu 3300 detik (55 menit) temperatur air menunjukkan $99,1^{\circ}\text{C}$, yang berarti telah terjadi pendidihan dengan timbulnya gelembung di air terus menerus, seperti ditunjukkan pada Gambar 5 dan Gambar 6.



Gambar 5. Batang pemanas mulai terjadi pendidihan

Pada Tabel 3 ditunjukkan nilai daya termal atau daya listrik pada elemen pemanas yaitu zat yang melepaskan kalor, sedangkan zat yang menerima kalor adalah batang pemanas dan air. Hasil dari perhitungan antara kalor yang dilepas



Gambar 6. Terjadi pendidihan di air

dan kalor yang diterima kemudian dibandingkan dan hasilnya ditunjukkan pada Tabel 4. Hasil perbandingan terdapat simpang *error* terbesar pada waktu 1500 detik (25 menit) yaitu 62%. Hal tersebut dapat dijelaskan dengan melihat pada kalor yang diserap batang pemanas dan air sebesar 23 Joule dan 9 Joule, sementara itu kalor yang dilepas oleh daya termal sebesar 85 Joule. Ada beberapa faktor yang menyebabkan hal tersebut terjadi, salah satunya adalah adanya aliran air dingin dari atas kebawah karena terdorong air panas dari batang pemanas mengingat tipe pendidihan adalah sistem kolam atau air tergenang.

Tabel 3. Data perhitungan kalor

No.	Waktu (detik)	Daya termal (Q_1 , Watt)	Kalor pemanas (Q_1 , Watt)	Kalor air (Q_2 , Watt)	Jumlah kalor (Q_1+Q_2 , Watt)
1	300	4	2	4	6
2	600	14	18	4	23
3	900	33	22	21	43
4	1200	56	22	15	37
5	1500	85	23	9	32
6	1800	126	30	64	94
7	2100	175	44	125	169
8	2400	224	56	160	216
9	2700	288	74	209	283
10	3000	340	85	187	272
11	3300	340	87	118	205

Tabel 4. Data hasil komparasi kalor

No.	Waktu (detik)	Daya termal, (Q, Watt)	Jumlah kalor, (Q1+Q2, Watt)	Simpang error, %
1	300	4	6	50
2	600	14	23	57
3	900	33	43	30
4	1200	56	37	34
5	1500	85	32	62
6	1800	126	94	25
7	2100	175	169	3
8	2400	224	216	4
9	2700	288	283	2
10	3000	340	272	20
11	3300	340	205	40

Simpang *error* terkecil terjadi pada waktu 2700 detik (45 menit) sebesar 2%, yang terjadi karena semakin lama temperatur air yang lebih panas mengalir keatas dan lebih banyak menerima kalor. Pada menit ke 55 atau 3300 detik terjadi pendidihan dengan ditandai dengan timbulnya gelembung pada air pada temperatur 99,1 °C. Berdasarkan hasil eksperimen maka diperoleh prediksi waktu untuk eksperimen perpindahan kalor pendidihan yaitu 3300 detik (55 menit).

KESIMPULAN

Berdasarkan karakteristik daya termal dari trafo regulator tegangan, perhitungan energi kalor dan dari data hasil eksperimen telah diperoleh prediksi waktu untuk eksperimen perpindahan kalor pendidihan selama 55 menit dengan temperatur awal 60 °C sebelum masuk bundel uji QUEEN-1.

UCAPAN TERIMAKASIH

Terima kasih kepada Kepala Bidang Pengembangan Fasilitas Keselamatan Reaktor dan teman-teman Subbidang Fasilitas Termohi-

hidrolika, yang telah membantu bagi keberhasilan dan kelancaran kegiatan penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- MULYA JUARSA, ANHAR R. ANTARIKSAWAN, "Penelitian Fenomena Perpindahan Panas Pendidihan Dalam Peristiwa Kecelakaan Reaktor Nuklir *Three Mile Island Unit 2*", Sigma Epsilon, ISSN 0853-9103. Vol. 11 No. 2 Mei 2007.
- SUHARNO, "Mekanisme Pendinginan Teras Kondisi Kehilangan Aliran Pendingin Pada Reaktor Daya PWR", Sigma Epsilon, ISSN 0853-9103, Vol. 11, No. 3 Agustus 2007.
- MULYA JUARSA, KISWANTA, EDY S, "Fenomena Perpindahan Panas Pendidihan Berdasarkan Peristiwa LOCA dan Kecelakaan Parah", Jurnal Sains dan Teknologi Nuklir Indonesia, Indonesian Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. XI, No. 1, Februari 2010: 01-12.
- JAMES R. WELTY, CHARLES E. WICKS, ROBERT E. WILSON, GREGORY RORRE, "Fundamentals of Momentum. Heat and Mass Transfer. fourth edition", John Wiley & Sons. Inc. 2001.