G biFENOMENA PERPINDAHAN PANAS PENDIDIHAN BERDASARKAN PERISTIWA LOCA DAN KECELAKAAN PARAH

Mulya Juarsa, Kiswanta, Edy S., Joko P.W., Ismu H., Puradwi I.W.
Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir - BATAN
Gd.80 Kawasan PUSPIPTEK Serpong
Tangerang 15310 Banten
juars@batan.go.id

ABSTRAK

FENOMENA PERPINDAHAN PANAS PENDIDIHAN BERDASARKAN PERISTIWA LOCA DAN KECELAKAAN PARAH. Penelitian dan pengembangan berdasarkan kejadian pada kasus kecelakaan PLTN TMI-2 telah banyak mengarah pada penelitian terkait performa teras dan bejananya. Penelitian yang paling banyak dilakukan mengarah pada fenomena perpindahan panas pendidihan, semenjak teras reaktor mengalami kehilangan pendinginan (post-LOCA) hingga kecelakaan parah (Severe Accident), yaitu lelehnya teras. Studi perpindahan panas pendidihan telah dilakukan melalui simulasi proses penggenangan teras dari bawah dan pendinginan pada celah sempit. Hasil penelitian secara eksperimental yang dilakukan BATAN terkait LOCA dan kecelakaan parah memberikan gambaran yang jelas bagaimana fenomena perpindahan panas pendidihan terjadi selama sekuen kecelakaan pada reaktor nuklir, khususnya kecelakaan TMI-2. Pemetaan perpindahan panas selama pendidihan, berdasarkan data temperatur transien dibuat dalam bentuk kurva pendidihan yang menunjukkan perbedaan fluks kalor pada tiga rejim pendidihan. Simulasi eksperimenal LOCA menunjukkan nilai CHF (67,31 kW/m^2) yang lebih kecil dibandingkan nilai CHF (262 kW/m^2) untuk peristiwa kecelakaan parah.

Kata kunci: kecelakaan parah, pendidihan, LOCA, fluks kalor

ABSTRACT

BOILING HEAT TRANSFER PHENOMENON BASE ON THE EVENT OF LOCA AND SEVERE ACCIDENT. Research and development base on TMI-2 NPP accident mostly directed to vessel and core performance. The majority of research was conducted which aimed on boiling heat transfer phenomenon, begin by loss of coolant accident (LOCA) until severe accident, in which core meltdown. Study on boiling heat transfer has been done by simulation on core bottom re-flooding process and a narrow gap cooling. The results of experimental research which was conducted by BATAN concerning LOCA and severe accident are giving a clearly picture, in how boiling heat transfer phenomenon was occurs during sequent of nuclear reactors accident, especially TMI-2 accident. The mapping of heat transfer base on transient temperature data was created in boiling curve form which was shown the differences of heat flux in three boiling regimes, both in pool boiling and flow boiling. The experimental simualtion of LOCA shown that the CHF value (67.31 kW/m^2) is small than the CHF value of severe accident (262 kW/m^2).

Key word: severe accident, boiling, LOCA, heat flux

1. PENDAHULUAN

Keselamatan merupakan kata kunci dalam hampir semua bidang kehidupan manusia, baik menyangkut keselamatan masyarakat maupun lingkungan. Di sisi lain, aplikasi teknologi dalam bidang industri senantiasa mengandung risiko yang dapat membahayakan keselamatan manusia dan lingkungan. Oleh karena itu, di fasilitas industri senantiasa diupayakan adanya sistem dan prosedur keselamatan yang memadai. Pengawasan terhadap sistem

keselamatan pun menjadi obyek inspeksi yang diutamakan. Hal yang sama juga berlaku untuk aplikasi teknologi nuklir, khususnya aplikasi dalam bidang pembangkitan energi. Pada Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN), keselamatan merupakan kata kunci yang senantiasa dievaluasi dan ditingkatkan terus menerus.

Kejadian kecelakaan reaktor nuklir yang diasumsikan dalam evaluasi keselamatan nuklir adalah kehilangan pendinginan reaktor atau perubahan pada keadaan teras reaktor yang serius. Peristiwa tersebut antara lain, kecelakaan kehilangan pendingin (l*oss of coolant accident*, LOCA), kecelakaan kehilangan aliran pendingin (l*oss of flow accident*, LOFA), kerusakan pompa pendingin reaktor, pecahnya pipa air umpan utama dan pecahnya pipa uap utama, insersi reaktivitas tidak normal atau perubahan yang sangat cepat pada daya reaktor akibat lontaran (*ejection*) batang kendali hingga terjadinya kecelakaan parah (*severe accident,* SA), yaitu terjadinya pelelehan teras reaktor. Salah satu kecelakaan PLTN di dunia yang menjadi dasar pemikiran dan perubahan akan paradigma keselamatan PLTN adalah kecelakaan reaktor nuklir Three Mile Island unit 2 (TMI-2), Pensylvania USA, pada bulan Maret 1979 (1). Reaktor tersebut dari jenis reaktor air tekan (*PWR*, *Pressurized Water Reactor*) dan termasuk kategori kecelakaan parah. Dalam peristiwa kecelakaan tersebut sebagian teras yang terdiri dari bahan bakar, batang kendali dan struktur lainnya yang berada di dalam bejana tekan reaktor (r*eaktor pressure vessel, RPV*) mengalami pelelehan dan sekitar 20 ton lelehan panas atau *debris* bertemperatur sekitar 1130°C terkumpul pada bagian bawah *plenum* (*lower plenum*) RPV. Akibat keadaan tersebut, pada bagian bawah *plenum* mengalami kelebihan pemanasan (*over heated*) sekitar 30 menit. Kecelakaan TMI-2 meninggalkan beberapa hal penting yang masih perlu diteliti untuk memperbaiki prosedur keselamatan dan manajemen kecelakaannya. Meskipun demikian, hingga saat ini, desain PLTN sebenarnya telah menunjukkan tingkat keselamatan yang sangat baik, terbukti dari catatan kecelakaan dan korban yang ditimbulkannya (2).

Dalam kaitannya dengan kecelakaan pada TMI-2, perhatian peneliti tertuju pada proses pendinginan lelehan teras oleh air yang tersisa di bagian bawah bejana dan melibatkan fenomena perpindahan panas pendidihan. Semenjak kecelakaan itu, banyak penelitian dilakukan untuk mempelajari fenomena tersebut, baik secara analitis maupun eksperimental. Penelitian terkait peristiwa LOCA telah dilakukan semenjak tahun 2003 oleh penulis, yang ditekankan pada perpindahan panas pendidihan selama proses *bottom reflooding*, hasil penelitian disajikan dalam bentuk kurva pendidihan. Kemudian semenjak tahun 2007, penelitian terkait perisitiwa kecelakan parah telah dimulai dengan konstruksi dan pengujian pada bagian uji HeaTiNG-01. Penelitian diarahkan pada investigasi fenomena perpindahan panas pendidihan pada celah sempit anulus, hasil penelitian juga disajikan dalam bentuk kurva pendidihan. Makalah ini bertujuan untuk menyampaikan hasil studi fenomena perpindahan panas pendidihan, khususnya

menekankan pada perbedaan nilai fluks kalor kritis (c*ritical heat flux, CHF*) menggunakan kurva didih, berdasarkan simulasi eksperimen post-LOCA dan kecelakaan parah (SA). Hasil penelitian ini dapat memberikan informasi terkait proses pendinginan berdasarkan perbedaan kuantitas uap dan air, serta perbedaan area hidrodinamik.

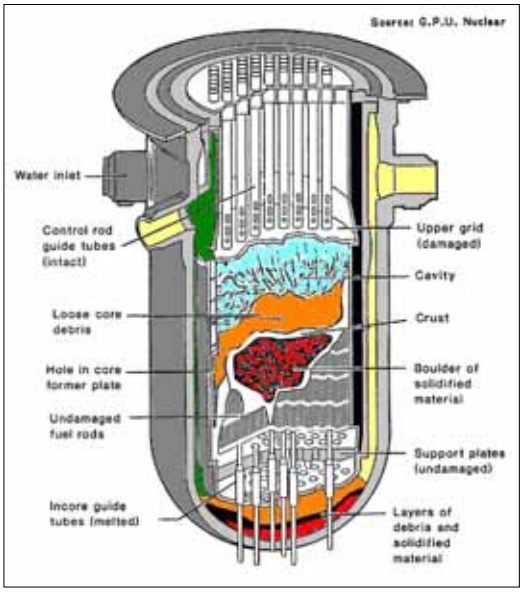
2. TEORI

Kecelakaan yang terjadi pada PLTN jenis PWR TMI-2 (3) diawali dengan penghentian pompa air-umpan (*make-up pump*) yang kemudian disusul reaktor *shutdown* dan turbin *trip* (berhenti) pada sistem sekundernya. Akibat tidak adanya aliran pada sistem sekunder dan tidak terdistribusikannya panas secara merata melalui proses sirkulasi, maka dengan serta merta keadaan ini meningkatkan pula tekanan pada sistem primer. Peningkatan tekanan pada sistem primer yang melampaui batas operasinya (160 bar) menyebabkan terbukanya katup pembebas uap (*relief valve*) pada tabung penekan (*pressurizer*). Setelah uap terlepas maka tekanan dalam sistem primer biasanya akan turun kembali ke keadaan normal. Akan tetapi, pada kasus TMI-2 tekanan adalah tetap dan terbukanya *relief valve* menjelma menjadi awal kecelakaan yang sebenarnya. Pada keadaan ini tekanan sistem primer turun secara cepat hingga berada di bawah tekanan saturasinya. Pendidihan terjadi disebagian sistem primer, terutama pada teras, meskipun reaktor telah *shutdown* panas peluruhan masih tetap ada. Pendidihan yang timbul terjadi di teras dan pada bagian bahan bakar, yang mengarah pada berkurangnya volume air dalam teras karena air keluar dalam bentuk uap melalui katup pembebas uap pada tabung penekan. Keadaan ini diperparah oleh gagalnya sistem air-umpan (*make-up water system*) yang baru bekerja setelah 8 menit kecelakaan berlangsung. Dikarenakan teras mengalami pendidihan dan gelembung uap telah menyelimuti permukaan kelongsong bahan bakar (*fuel cladding*) dalam bentuk *film boiling* (didih film) yang berlangsung lama, maka pada akhirnya temperatur telah melebihi titik leleh material di teras reaktor dan kemudian menyebabkan lelehnya bahan bakar dan sebagian teras.

Berdasarkan pengamatan terhadap kecelakaan tersebut dapat disimpulkan bahwa, pemicu kecelakaan parah adalah, hilangnya sebagian besar air pendingin di sistem primer, dimana kejadian ini dapat dipersamakan dengan peristiwa kecelakaan kehilangan air pendingin untuk kebocoran skala kecil (*small break* LOCA). LOCA tidak terkendali akibat sistem air-umpan tidak bekerja dan menyebabkan lelehnya teras, dimana kejadian ini merupakan kecelakaan parah. Kondisi akhir RPV reaktor TMI-2 akibat kecelakaan diperlihatkan pada Gambar 1, sebagian lelehan teras tertahan di *lower plenum*.

2.1. Proses Pendidihan

Pada prinsipnya pendidihan akan terjadi apabila temperatur air memiliki nilai yang lebih tinggi dari temperatur saturasinya pada tekanan tertentu.

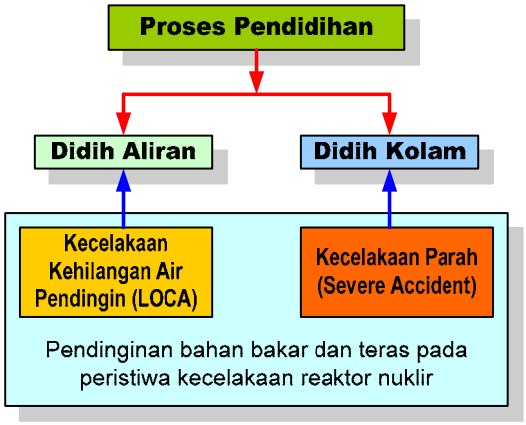


Gambar 1. Keadaan akhir bejana pada kecelakaan TMI-2 (3)

Demikian juga pola peristiwa kebalikannya, yaitu pada proses penurunan tekanan. Jika tekanan air tiba-tiba turun dan berada di bawah tekanan saturasinya, maka air dengan seketika akan mendidih tanpa adanya inputan kalor, yang dikenal dengan peristiwa *flashing*. Proses pendidihan sendiri (Gambar 2) terbagi dalam dua kondisi fluida pendinginnya, yaitu didih aliran dan didih kolam.

Peristiwa didih kolam terjadi jika benda berada dalam air dan kemudian mengalami pemanasan hingga pendidihan terbentuk, atau benda panas tiba-tiba dimasukkan ke dalam air (*immersed*). Sedangkan jika ada benda panas yang tiba-tiba dialiri oleh air sebagai pendingin, maka pendidihanpun akan terbentuk.

Kecelakaan kehilangan air pendingin memiliki pola didih aliran saat pendinginan teras oleh air yang diinjeksikan ke teras melalui sistem pendingin teras darurat (*emergency core cooling system, ECCS*), pendinginan akan bergantung kepada laju aliran airnya. Sedangkan pada kecelakaan parah, seperti dinginnya debris dalam kecelakaan TMI-2, debris didinginkan oleh air yang masih tersisa di bagian bawah teras.



Gambar 2. Alur proses pendidihan pada kecelakaan PLTN

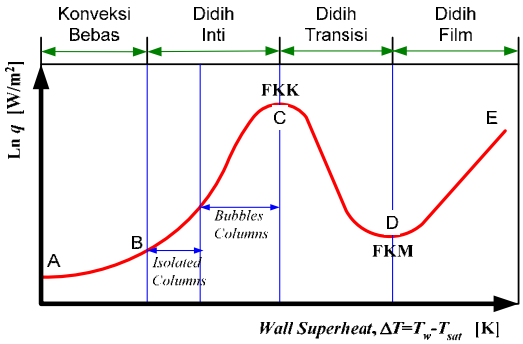
Pada peristiwa tersebut, air yang tersisa terdorong oleh volume debris dan kemudian kembali lagi ke bawah karena gravitasi melalui celah sempit yang terbentuk antara debris dan dinding dalam bagian bawah *plenum*.

2.2. Kurva Pendidihan pada Didih Kolam

Kurva pendidihan (*boiling curve*) dan kurva perubahan temperatur terhadap waktu di dalam penelitian ini dihasilkan untuk mempelajari watak perpindahan panas pada celah sempit. Definisi rejim pendidihan telah dihasilkan oleh Nukiyama (4) berdasarkan eksperimen pada pendidihan kolam (*pool boiling*), kurva pendidihannya diperlihatkan pada Gambar 3.

Rejim A-B: panas dipindahkan melalui konveksi bebas (*free convection*) fase tunggal. Fluks kalor $\boldsymbol{q}$ pada daerah ini adalah ($\Delta T_s^{5/4}$). ***Rejim B-C***: air yang berada di dekat dinding panas adalah air panas

lanjut (*superheated*) dan cenderung untuk menguap, membentuk gelembung di lokasi-lokasi yang terdapat guratan atau lubang-lubang kecil di sekitar permukaan dinding panas. Gelembung-gelembung mengangkut panas laten penguapan dan juga menaikkan perpindahan panas konveksi. Mekanisme pendidihan pada daerah ini disebut didih inti (*nucleate boiling*) dan ditunjukkan dengan laju perpindahan panas yang sangat tinggi hanya pada perbedaan temperatur yang kecil. Pada daerah didih inti, fluks ***q*** merupakan fungsi $(\Delta T_s)^n$, secara umum nilai ***n*** berkisar dari 2 hingga 5.



Gambar 3. Kurva rejim didih pada didih kolam (5)

Ketika populasi gelembung uap menjadi terlalu tinggi pada titik ***C*** yaitu fluks kalor tertinggi, gelembung yang terlepas dari permukaan menghalangi jalur masuknya air. Uap selanjutnya membentuk selimut penyekat yang menutupi permukaan pemanas dan selanjutnya menaikkan temperatur permukaan. Kondisi ini disebut krisis pendidihan (*boiling crisis*), dan fluks kalor maksimum sesaat sebelum mencapai kritis adalah fluks kalor kritis, FKK (c*ritical heat flux, CHF*) yang dapat terjadi pada peristiwa didih kolam.

Pada ***rejim C-D***: setelah *FKK* tercapai secara cepat pendidihan menjadi tidak stabil dan mekanisme ini disebut didih film parsial (*partial film boiling*) atau didih transisi (*transition boiling*). Secara bergantian, permukaan ditutupi oleh selimut uap dan lapisan air, menghasilkan temperatur permukaan yang berosilasi.

Selanjutnya, ***rejim D-E***: suatu film uap stabil telah terbentuk pada permukaan panas dan laju perpindahan panas mencapai suatu nilai minimum pada titik ***D*** dan peristiwa ini disebut didih film (*film boiling*). Titik D menunjukkan juga fluks kalor minimum, FKM (m*inimum heat flux, MHF*). Selanjutnya, terjadi kenaikan temperatur dinding dan perpindahan panas berlangsung melalui radiasi termal.

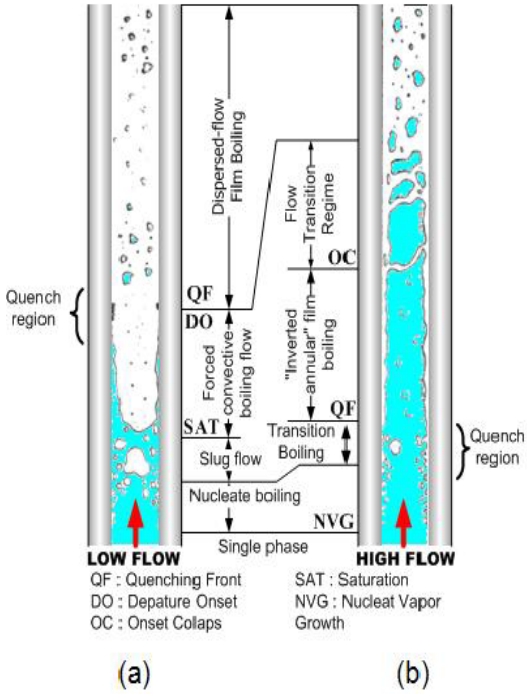
2.3. Didih Aliran

Berbeda dengan pendidihan kolam (*pool boiling*), rejim perpindahan panas pada pendidihan aliran (*flow boiling*) ditentukan oleh berbagai variabel: laju alir massa, jenis fluida, geometri sistem, fluks panas dan distribusi aliran (6). Aliran fluida yang mengalir ke atas secara konveksi paksa dalam tabung akan mengalami pemanasan serba sama pada arah aksial.

Fluida masuk ke dalam tabung pada kondisi *sub-cooled* dan sepanjang tabung temperaturnya akan naik karena fluks panas yang diterima. Pada ketinggian tertentu, fluida yang berada dekat dinding akan mencapai temperatur saturasi dan gelembung uap mulai terbentuk. Akan tetapi karena temperatur bulk masih *sub-cooled*, gelembung tersebut segera kolaps (terkondensasi). Daerah ini disebut pendidihan *sub-cooled* (*sub-cooled boiling*).

Ketika temperatur bulk mencapai temperatur saturasi, pembentukan gelembung semakin nyata sehingga disebut rejim pendidihan inti saturasi (*saturation nucleate boiling*). Gelembung-gelembung uap pada saat tertentu akan bergabung menjadi kantung-kantung uap. Aliran fluida pada daerah tersebut dinamakan *slug* atau *churn flow*. Kantung-kantung uap tersebut akan bergabung sehingga di tengah saluran terdapat daerah uap yang disebut *vapor core*. Di dalam daerah tersebut, tersebar butiran-butiran fluida cair yang terbentuk akibat *entrainment* lapisan film fluida. Sepanjang daerah tersebut temperatur dinding praktis konstan. Semakin ke atas, film fluida makin tipis dan pada titik tertentu, film fluida tersebut hilang. Kondisi ini disebut *dry-out*. Perpindahan panas pada daerah ini sangat buruk sehingga temperatur dinding mendadak naik. Setelah titik *dry-out*, butiran-butiran zat cair yang masih ada dapat membentur dinding dan mengambil panas sehingga temperatur dinding menurun sedikit. Tetapi setelah butiran tersebut teruapkan, temperatur dinding kembali naik.

Seperti telah disebut di atas, rejim pendidihan aliran bergantung pada berbagai parameter, sehingga konfigurasi rejim dapat berbeda seperti contoh di atas. Walaupun demikian, karakteristik dasar tetap sama. Pada kasus proses didih aliran, temperatur dinding telah lebih tinggi dari temperatur minimal didih film (T_{mfb}), sehingga film uap akan segera terbentuk pada saat awal. Gambar 4 memperlihatkan skema proses didih aliran oleh *ECCS* untuk aliran dari bawah dengan laju alir rendah (Gambar 4a) dan laju alir besar (Gambar 4b).



Gambar 4. Contoh rejim pendidihan pada proses didih aliran (7)

Gambar 4 juga menunjukkan persamaan rejim pendidihan di belakang batas basah dan perbedaan terlihat pada posisi batas basah. Untuk laju alir rendah (Gambar 4a), terlihat seolah batas basah mendahului massa fluida. Sebaliknya, untuk laju alir tinggi (Gambar 4b), batas basah berada di belakang massa fluida yang terdorong lebih dahulu.

3. PERALATAN EKSPERIMEN

Dalam mempelajari fenomena perpindahan panas pendidihan yang berdasarkan kecelakaan reaktor nuklir TMI-2, penulis telah memulai dengan melakukan simulasi eksperimental hingga sekarang. Studi perpindahan panas pendidihan dilakukan berdasarkan dua keadaan,

 ISSN 1411 – 3481

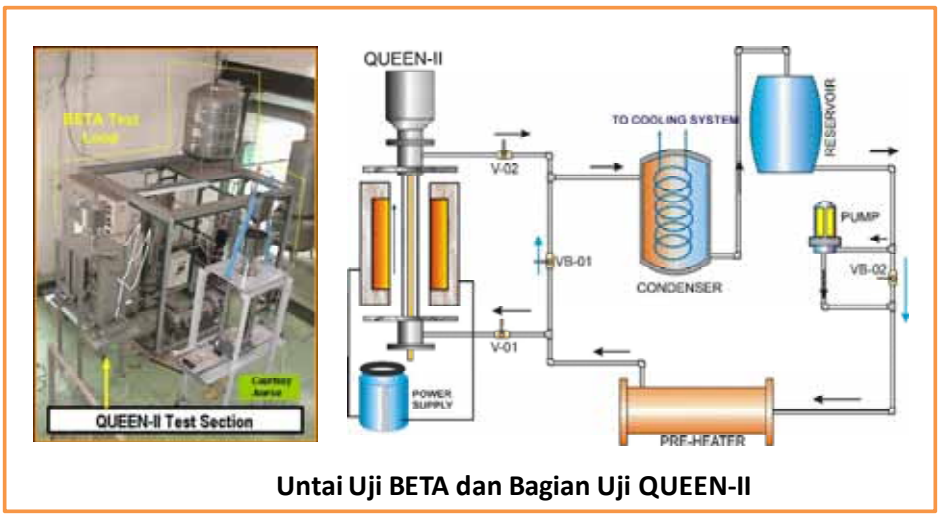
pertama adalah studi fenomena perpindahan panas pendidihan selama proses penggenangan dari bawah (*bottom reflooding*) untuk simulasi peristiwa LOCA. Kedua, studi fenomena perpindahan panas pendidihan pada celah sempit (*narrow gap*) untuk simulasi peristiwa kecelakaan parah (*SA*).

Kedua studi tersebut dilakukan secara eksperimental dengan menggunakan fasilitas eksperimen yang didesain dan dikonstruksi sendiri. Parameter pokok yang menjadi dasar analisis adalah temperatur awal batang panas, selain temperatur air pendingin. Eksperimen dilakukan pada tekanan atmosfer (1 bar).

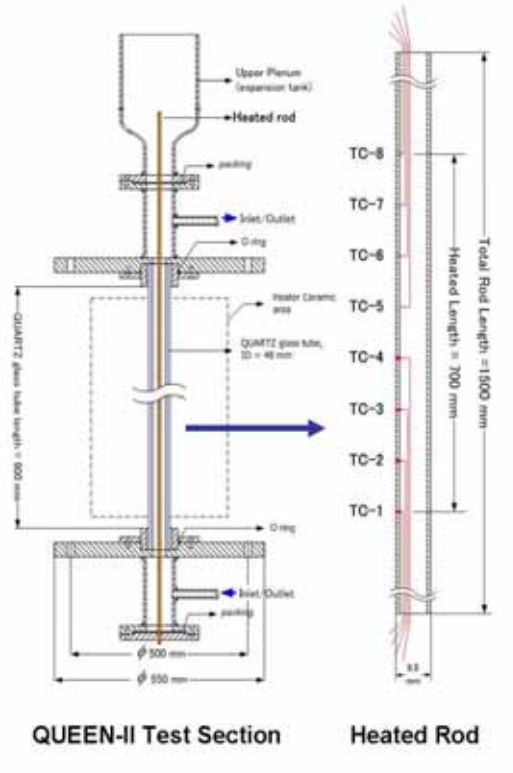
Peralatan eksperimen untuk melakukan eksperimen simulasi pendinginan pada batang bahan bakar dalam peristiwa LOCA dibuat dalam dua tahap, tahap pertama untai uji BETA yang terkoneksi dengan bagian uji QUEEN-I dan tahap kedua, untai uji BETA yang terkoneksi dengan bagian uji QUEEN-II, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.

LOCA menggunakan bagian uji QUEEN-II

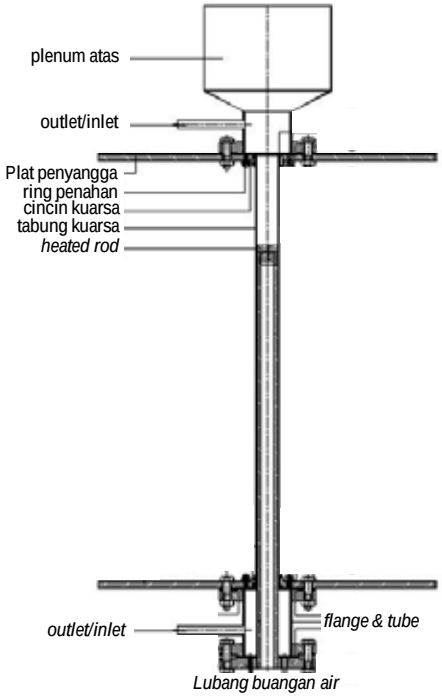
Kedua bagian uji tersebut digunakan berdasarkan kriteria pengembangan hasil evaluasi eksperimen yang telah berlangsung. Bagian uji QUEEN-II dirancang untuk eksperimen bertemperatur tinggi dengan capaian temperatur 900°C. Pada prinsipnya, kedua bagian uji dapat memberikan gambaran tentang bagaimana fenomena perpindahan panas pendidihan terjadi. Gambar 6 menjelaskan ukuran panjang dan geometri bagian uji QUEEN-II. Batang panas terbuat dari SS316 dengan diameter luar 9,8 mm dan tebal 0,7 mm



Gambar 5. Deskripsi peralatan eksperimen

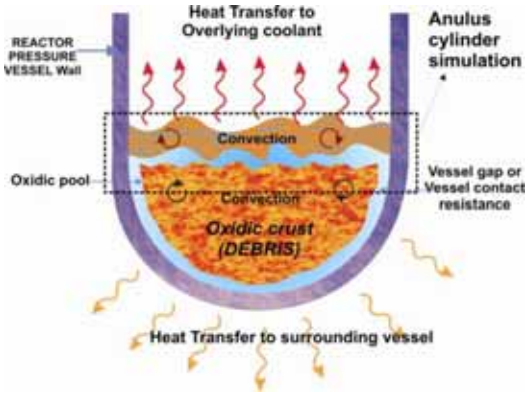


Gambar 6. Deskripsi bagian uji QUEEN-II



Gambar 7. Deskripsi bagian uji HeaTiNG-01

Studi perpindahan panas pendidihan pada celah sempit dilakukan dengan menggunakan alat eksperimen yang didesain untuk mensimulasikan pendinginan pada celah sempit dengan temperatur awal batang panas hampir mencapai 900°C. Gambar 7 menjelaskan deskripsi bagian uji HeaTiNG-01, dimana panjang area batang yang dipanaskan adalah 700 mm. Bahan yang digunakan adalah SS316 dengan diameter luar 37 mm dan tebal 8 mm. Bentuk silinder annulus merupakan simulasi bagian vertikal pada bagian bawah plenum RPV, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Deskripsi keadaan akhir lelehan teras pada kecelakaan parah TMI-2[1]

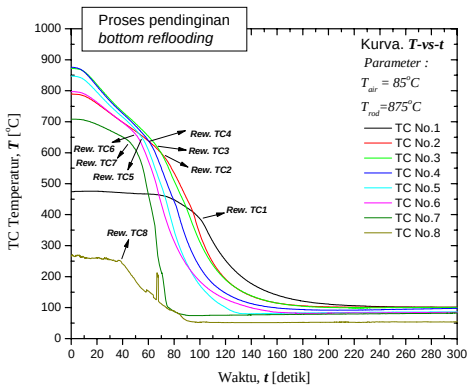
4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Eksperimen untuk Simulasi Pendinginan pada LOCA

Simulasi eksperimen untuk menyelidiki keadaan pendinginan pasca LOCA telah difokuskan untuk studi perpindahan panas dan kecepatan *rewetting* selama proses penenggelaman batang panas dari arah bawah (8). Dapat disimpulkan bahwa, laju aliran massa air

tidak secara cepat pula menghilangkan kapasitas panas yang tersimpan dalam batang panas (lihat Gambar 9). Pada awal pendinginan penurunan temperatur batang panas terjadi dengan gradien yang lebih kecil dibanding gradien temperatur setelah *rewetting* (rew). Kemudian secara perlahan gradien temperatur semakin mengecil setelah keadaan didih transisi tercapai.

Untuk eksperimen menggunakan bagian uji QUEEN-II menunjukkan bahwa performa laju penuruan temperatur selama pendinginan agak berbeda dengan hasil menggunakan bagian uji QUEEN-I, disebabkan perbedaan temperatur awal batang panasnya.



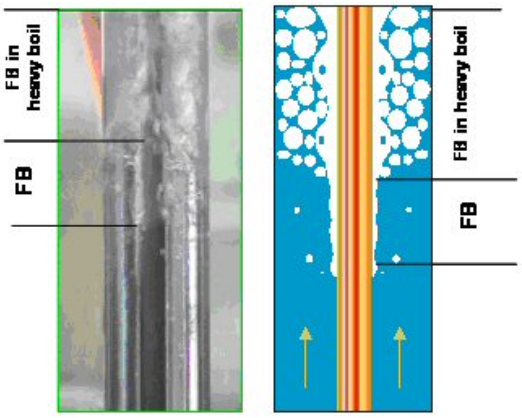
Gambar 9. Evolusi temperatur simulasi LOCA dengan bagian uji QUEEN-II (8)

Gambar 9 menjelaskan kurva pola penurunan temperatur secara transien dengan kemiringan (slope) diawali oleh radiasi dari detik ke-6 hingga detik ke-56. Kemudian slope *rewetting*, dari detik ke-56 sampai detik ke-64. Slope ini dikatakan sebagai area rejim didih film, kemudian disusul pada slope ketiga, area didih transisi dan didih inti, dari detik ke-64 hingga detik ke-160. Keadaan ini sangat berbeda dengan riset terdahulu dengan menggunakan bagian uji QUEEN-I pada temperatur awal 600°C (9).

Terbentuknya rejim didih film, didih transisi dan didih inti jelas terlihat selama eksperimen berlangsung. Kurva pada Gambar 9 menunjukkan temperatur transien selama proses pendinginan *bottom reflooding* pada temperatur awal batang panas 875°C. *Rewetting* terjadi secara berturut-turut dari arah bawah ke atas dan terjadi pada temperatur yang berbeda sepanjang arah vertikal batang panas. *Rewetting* pada TC8, terjadi pada detik ke-38 dan pada temperatur 250°C. Pada TC1, *rewetting* terjadi pada temperatur 385°C di detik ke-100. Kecepatan rata-rata *rewetting* dapat dihitung berdasarkan waktu ketika rewetting terjadi pada TC8 dan TC1, diperoleh nilai kecepatan rata-rata *rewetting* adalah 9,68 mm/detik. Jika dibandindingkan dengan laju aliran air pada operasi dingin (tanpa pemanasan batang panas), yaitu 15,67 mm/detik, dengan kecepatan aliran selama proses pendinginan, maka terjadi hambatan akibat timbulnya didih film. Temperatur MFB (*minimum film boiling*) terjadi pada selang temperatur 250°C – 700°C.

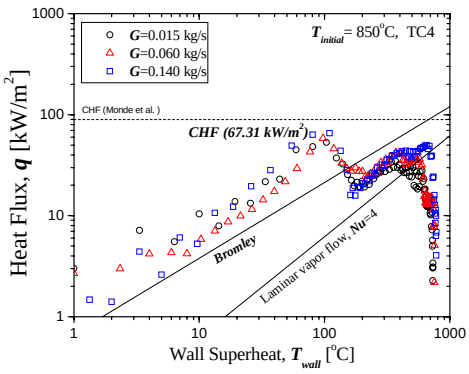
Gambar 10 memperjelas pemahaman, bahwa proses pendinginan yang berlangsung memunculkan fenomena didih film yang teramati. Keadaan ini hanya mungkin tercapai, jika temperatur air telah mencapai saturasi. Selain itu, fenomena khusus yang muncul adalah adanya daerah didih film yang terbagi menjadi dua keadaan. Keadaan pertama adalah didih film stabil (FB), dimana di sekitar batang

panas selimut uap berada pada kondisi yg stabil. Sedangkan daerah didih film kedua adalah didih film dengan golakan didih yang kuat (*heavy boil*), selimut uap yang mengelilingi batang patan berada dalam kondisi yang tidak stabil. Golakan kuat terjadi di sekitarnya, banyak gelembung uap yang terlepas dari daerah didih film.



Gambar 10. Foto pengamatan pendinginan untuk G = 0,14 kg/detik (8)

Dengan mengambil data evolusi temperatur pada titik TC4, kemudin dihitung sehingga diperoleh harga fluks kalor dan *wall superheat* seperti ditunjukkan pada Gambar 11.

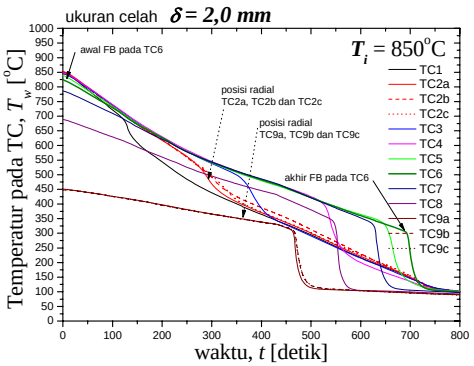


Gambar 11. Kurva didih simulasi LOCA dengan bagian uji QUEEN-II (8)

Harga fluks kalor kritis (CHF) untuk laju aliran massa air 0,140 kg/detik adalah q_{CHF}=67,31 kW/m^2. Terlihat bahwa, daerah didih film pada kurva didih berada di antara garis Bromley (didih kolam) dan garis aliran uap laminar (kasus pendidihan pada celah sempit).

4.2. Eksperimen untuk Simulasi Kecelakaan Parah

Gambar 12 menunjukkan secara jelas proses pendinginan untuk celah ukuran 2,0 mm dengan temperatur awal batang panas 850°C.

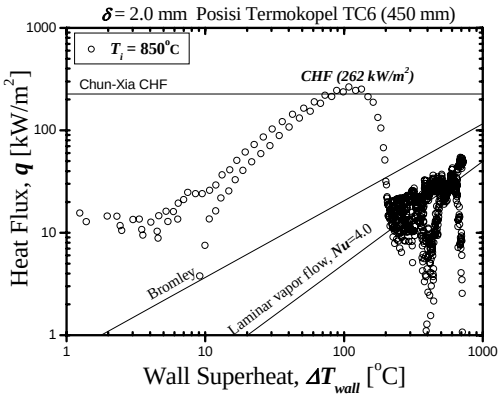


Gambar 12. Evolusi temperatur simulasi kecelakaan parah dengan bagian uji HeaTiNG-01 (10)

Pada saat awal, perpindahan panas terjadi hanya karena radiasi, sehingga tampak kurva lebih landai. Kemudian pada saat temperatur permukaan batang panas turun hingga mencapai temperatur di bawah temperatur minimum didih film, permukaan batang terbasahi air (*wetting*) dan perpindahan panas terjadi secara konveksi dua fasa (rejim pendidihan transisi dan inti).

Gambar 13 memperlihatkan kurva pendidihan hasil perhitungan berdasarkan data temperatur yang tercatat oleh TC6. Sumbu ordinat menunjukkan fluks panas

yang dihitung, sedangkan sumbu absis adalah *wall superheat*, yaitu selisih temperatur dinding dengan temperatur saturasi.

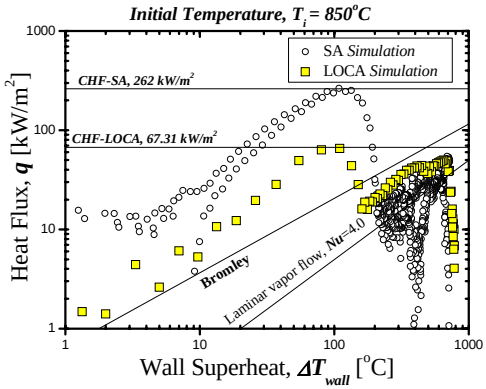


Gambar 13. Kurva didih simulasi SA dengan bagian uji HeaTiNG-01 (10)

Kondisi eksperimen terbaca pada sumbu tersebut dari sebelah kanan ke sebelah kiri yang menggambarkan proses pendinginan. Pada saat air mulai mengaliri kanal, fluks panas naik dengan cepat dan pendidihan film berlangsung. Proses pendidihan film berlanjut hingga kondisi temperatur pendidihan film tercapai. Ketika itu, proses *quenching* terjadi dan fluks panas meningkat pesat. Saat itu, pendidihan terjadi pada rejim pendidihan transisi hingga mencapai fluks panas maksimum yang dikenal sebagai fluks panas kritis (*critical heat flux, CHF*).

Nilai CHF (10) untuk kasus simulasi eksperimen kecelakaan parah adalah 262 kW/m^2. Selanjutnya, fluks panas akan turun kembali dan pendidihan terjadi pada rejim pendidihan inti dan pendidihan satu fasa sampai mencapai temperatur kesetimbangan dengan air.

Gambar 14 menunjukkan kurva didih yang membandingkan simulasi eksperimen untuk kecelakaan parah (SA) dan LOCA. Terlihat bahwa bagian kotak-kotak menunjukkan pola fluks kalor Post-LOCA, khususnya untuk daerah didih film, menunjukkan fluks kalor yang lebih tinggi dibanding simulasi SA, namun fluktuasi fluks kalornya tidak sebesar kejadia SA.



Gambar 14. Kurva pendidih untuk simulasi SA dan LOCA

Fluktuasi pada SA menunjukkan kerapatan yang tinggi dan hal ini mengindikasikan film uap yang berlangsung cukup lama dan batang panas mengalami perlakuan panas yang tinggi.

5. KESIMPULAN

Simulasi eksperimental yang dilakukan untuk memahami proses perpindahan panas pendidihan selama kondisi post-LOCA dan kecelakaan parah (SA) telah memberikan kontribusi yang jelas terkait rejim pendidihan yang terbentuk selama pendinginan, khusunya untuk didih film. Baik untuk peristiwa didih aliran (untuk LOCA) maupun pendidihan pada celah sempit (untuk kecelakaan parah), kurva didihnya menunjukkan eksistensi keberadaan rejim didih film,

kemudian rejim didih transisi dan diakhiri oleh rejim didih inti. Fluks kalor kritis pada kasus kecelakaan parah memiliki nilai yang lebih besar yakni 262 kW/m^2 dari fluks kalor kritis pada kasus LOCA sebesar 67,31 kW/m^2, sehingga keadaan ini memperjelas pula pengaruh aliran terhadap pendinginannya serta geometri hidroliknya. Disimpulkan juga bahwa, daerah didih film untuk LOCA agak mendekati garis Bromley yang menunjukkan eksistensi air yang lebih besar dari uap. Sedangkan untuk SA lebih tepat berada di garis aliran uap laminer yang menunjukkan eksistensi uap pada celah sempit.

6. UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis menyampaikan terimakasih kepada Kepala PTRKN dan DIPA KNRT 2007 untuk Program Insentif.

7. DAFTAR PUSTAKA

1. Broughthon JM et al. A Scenario on the Tree Mile Island Unit 2 accident. Nucl Tech 1989; 87(1).
2. How the safety of NPP is secured in policy term: hopes to make safe more secured. NPP safety demonstration analysis. ANRE & MITI ; 2001.
3. The accident at Three Mile Island. US NRC 2007 . Availlable : http:/ www.nre gov.
4. Nukiyama S. Maximum and minimum values of heat transmitted from metalic boiling water under atmospheric pressure. J Japanesse Socie of Mech Eng 1934; 37:367.
5. Satish G, Shoji M, Vijay K, Dhir. Handbook of phase change: boiling and condensation. Taylor and Francis; 1999: p. 64.
6. Todeas NE and Kazimi MS. Nuclear system I: thermal hydraulic fundamental 1 st ed. Hemingsphere Publishing; 1990.
7. Lienhard IV JH and Lienhard V JH. A Heat transfer tex book 3 rd ed. Phlogiston Press; 2002.
8. Juarsa M et al. Study on boiling phenomena during reflooding simulation experiment. JSTNI 2008; IX(2).
9. Juarsa M et al. Experimental study of quencing process during bottom reflooding using QUEEN test section. Atom Indonesia 2005; 31:1.
10. Juarsa M dkk. Penelitian experimental perpindahan panas pada celah sempit anulus. J Tekn Peng Limbah 2007; 10 :2

.