

EVALUASI DISAIN SISTEM PENDINGIN REAKTOR TRIGA MARK II BANDUNG DAYA 2 MW

Oleh : Anhar R. Antariksawan, Aliq, Puradwi, Ismu Handoyo

ABSTRAK

EVALUASI DISAIN SISTEM PENDINGIN REAKTOR TRIGA MARK II BANDUNG DAYA 2 MW. Telah dilakukan evaluasi terhadap disain sistem pendingin reaktor TRIGA Mark II Bandung 2000 kW. Evaluasi dilakukan untuk sistem pendingin primer dan sekunder baik untuk kondisi operasi normal (tunak) ataupun kondisi tak normal (transien). Pada kondisi operasi normal temperatur bahan bakar maksimum 569,7°C. Analisis berbagai skenario kecelakaan LOFA dan LOCA menunjukkan bahwa sistem pendinginan dan ECCS dapat mempertahankan temperatur bahan bakar di bawah 970°C, sehingga integritas bahan bakar tetap terjaga. Analisis dengan codes yang tervalidasi masih diperlukan untuk mendukung analisis keselamatan yang telah dilakukan.

ABSTRACT

EVALUATION OF REACTOR COOLANT SYSTEM OF DESIGN OF BANDUNG TRIGA MARK II 2 MW REACTOR. An evaluation of reactor coolant system of Bandung TRIGA Mark II has been carried out. The evaluation is conducted for primary and secondary system, both for steady state and transient conditions. The evaluation is based on the analysis results done by the operator. In the steady state (i.e. normal operation), the maximum temperatur of fuel element is 569.7C. A series of analysis covering various accident scenarios of LOFA and LOCA shows that the coolant system and ECCS able to maintain the fuel temperature less than 970C, then the fuel integrity is kept safe. However, the detail analysis using validated codes is still needed to support the actual safety analysis.

PENDAHULUAN

Reaktor TRIGA Mark II Bandung (dibuat oleh General Atomic Co, San Diego, CA, USA) di Puslitbang Teknik Nuklir (P3TN) dirancang dan dibangun dengan daya 250 kW. Reaktor ini mencapai kritis pertama kalinya pada 10 Oktober 1964. Sejak itu reaktor dioperasikan pada daya maksimum 250 kW.

Pada tahun 1971, seiring dengan meningkatnya kegiatan, daya reaktor ditingkatkan menjadi 1000 kW. Hingga tahun 1996, atau sekitar 32 tahun dari saat kritis pertama kali, reaktor telah beroperasi secara aman. Operasi reaktor TRIGA Mark II berlangsung lancar, teratur tanpa mengalami gangguan yang berarti.

Oleh karena tuntutan masyarakat dan Pemerintah akan keselamatan dan keamanan kerja serta lingkungan semakin meningkat, di pihak lain kebutuhan akan radioisotop, baik dari dalam maupun luar negeri, semakin meningkat, maka diperlukan reaktor dengan kemampuan memproduksi radioisotop yang cukup. Reaktor tersebut sekaligus sebagai penyangga Reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy, sehingga kesinambungan pasokan radioisotop dapat terjamin. Pembangunan reaktor baru yang dikhususkan untuk itu banyak menemui kendala. Oleh karena itu, alternatif yang dipilih adalah melakukan up-grading reaktor TRIGA Mark II Bandung dengan menaikkan dayanya menjadi 2000 kW.

Peningkatan daya yang melibatkan perubahan susunan teras, penambahan perisai dan sistem pendingin harus tetap menjaga, atau bahkan meningkatkan margin keselamatan. Salah satu yang terkait erat dengan aspek keselamatan adalah disain sistem pendingin primer dan sekunder. Tulisan ini akan berisi hasil evaluasi terhadap disain sistem pendingin primer dan sekunder reaktor TRIGA Mark II daya 2000 kW. Pembahasan akan melingkupi disain sistem pendingin untuk kondisi operasi normal (tunak) maupun kondisi tak normal (transien). Data terutama diperoleh dari dokumen Laporan Analisis Keselamatan Peningkatan Daya Reaktor TRIGA Mark II Bandung 2000 kW [1].

DESKRIPSI SISTEM PENDINGIN

Sistem Pendingin Operasi Normal

Komponen utama sistem pendingin primer adalah pompa sirkulasi dan penukar panas. Pompa sirkulasi yang dipakai dari jenis pompa sentrifugal dengan daya 40 kW, kapasitas 950 gpm (sekitar 60 liter/s), total head 15 m. Pompa sentrifugal ini mengalirkan air pendingin yang keluar dari penukar panas menuju ke

tangki reaktor dan dibagi dalam dua keluaran. Aliran utama mempunyai keluaran yang diletakkan disamping permukaan radial reflektor bagian luar. Aliran yang ke dua disalurkan lewat suatu pembaur dan diletakkan di atas teras. Air pendingin yang telah lewat teras akan dibelokkan oleh aliran dari pembaur ini dan mengakibatkan waktu tempuh ke permukaan bertambah. Dengan cara ini N^6 yang terbentuk pada waktu fluida melalui teras sebagian besar akan meluruh.

Keluar dari tangki reaktor, sekitar 10 gpm air pendingin dilewatkan melalui suatu unit *demineralizer* untuk mempertahankan kualitas air pendingin. Sedangkan sebanyak 940 gpm air pendingin dilewatkan penukar panas jenis plat dari bahan SS304, SS306 dan Titanium. Pada kondisi operasi daya 2000 kW, air keluar tangki reaktor pada temperatur sekitar 42,2°C. Keluar dari penukar panas temperatur air pendingin menjadi sekitar 32,2°C. Pada temperatur ini, air kembali ke tangki reaktor. Sedangkan, temperatur bahan bakar dapat dipertahankan di bawah 569,7°C. Perlu dicatat bahwa ujung pipa masuk teras berada pada dasar tangki reaktor.

Air yang keluar dari penukar panas akan dicampur dengan air pendingin yang dilewatkan unit *demineralizer* sebelum kemudian dialirkan ke tangki reaktor kembali. Gambar 1 menunjukkan skema diagram alir sistem pendingin primer. Sistem pendingin primer menggunakan pipa berdiameter 15,24 cm.

Di sisi pendingin sekunder, air mengalir sebesar 1187,5 gpm (75 l/s) yang dialirkan oleh pompa sentrifugal 75 kW. Air tersebut masuk ke penukar panas pada temperatur 27°C dan keluar pada temperatur sekitar 35°C. Di sisi lain air pendingin sekunder didinginkan menggunakan dua buah menara pendingin. Gambar 2 memperlihatkan skema diagram alir sistem pendingin sekunder.

Sistem Pendingin Teras Darurat

Sistem Pendingin Teras Darurat (*Emergency Core Cooling System, ECCS*) diperlukan apabila karena sesuatu hal sistem pendingin operasi normal tidak dapat difungsikan. ECCS ini juga dapat berfungsi sebagai penambah air tangki reaktor. Syarat disain yang utama ECCS ini adalah bahwa dalam kondisi apapun sistem pendinginan darurat tetap dapat menjaga integritas bahan bakar yang berada di teras reaktor (temperatur maksimum bahan bakar di bawah 970°C).

Pasokan ECCS diperoleh dari tangki air sebesar 15m³ yang terletak 10,7 m di atas kisi atas teras. Dengan laju alir ECCS berkisar 0,5 liter/detik, ECCS dapat

dioperasikan selama 6,2 jam. Aliran terjadi secara gravitasi. Catu daya listrik hanya diperlukan untuk membuka katup solenoid.

EVALUASI KONDISI TUNAK

Sistem Pendingin Primer

Peningkatan daya dari 1000 kW menjadi 2000 kW menuntut pula peningkatan kemampuan pendinginan. Oleh karena itu laju alir pendingin primer juga harus ditingkatkan. Dari perhitungan neraca panas dibutuhkan laju alir sebesar 48 liter per detik. Pompa primer yang tersedia mampu mengalirkan air hingga 60 liter/detik, atau sekitar 20% lebih tinggi dari hasil perhitungan. Dengan laju sebesar itu, harga kenaikan temperatur air pendingin yang melalui teras tidak melebihi 10°C. Dengan menggunakan perangkat lunak STAT, disainer telah melakukan perhitungan untuk mengetahui harga DNBR (*Departure to Nucleate Boiling Ratio*), yaitu perbandingan fluks lokal dengan harga fluks kritis. Hasil yang diperoleh adalah angka DNBR sebesar 1,34. Harga ini dianggap cukup untuk batas keselamatan. Hasil perhitungan kondisi tunak untuk daya 2000 kW diberikan pada Tabel 1.

Seperti yang diberikan pada LAK Revisi 3, untuk disain, kenaikan temperatur di teras dibatasi 10°C, sehingga diperoleh harga laju alir air pendingin primer yang besar yaitu 47,8 kg/s. dalam kaitannya dengan sistem proteksi, temperatur maksimum air pendingin adalah 49°C. Melebihi harga tersebut reaktor akan terpancung (*scram*).

Untuk memindahkan panas yang dibangkitkan di teras, dipergunakan penukar panas jenis pelat (*plate heat exchanger*). Kapasitas pemindahan panas sesuai yang diberikan oleh pemasok adalah 2,488 MW. Tetapi hasil evaluasi Tim *up-grading* menghasilkan kapasitas 2,275 MW. Perbedaan ini dapat diterima mengingat masih pada batas toleransi (hanya sekitar 10% perbedaan) [2].

Tabel 1 Hasil Perhitungan Kondisi Tunak 2000 kW [1].

Besaran	Batang rerata	Batang maksimum
Laju alir rerata pada kanal (kg/s)	0,10	0,12
Kehilangan tekanan total (Pa)	75,84	141,3
Temperatur pendingin keluaran (°C)	79,61	98,94
Fluks panas maksimum (W/cm)	56,21	95,55
Kecepatan maksimum aliran (cm/s)	9,2	25,24
Temperatur maksimum kelongsong (°C)	131,8	134,7

SISTEM PENDINGIN SEKUNDER

Pada operasi kondisi normal daya penuh (2000 kW), seluruh panas yang dibangkitkan di teras dan diambil oleh pendingin primer ditransfer ke pendingin sekunder melalui suatu alat penukar panas jenis pelat. Selanjutnya, dua menara pendingin disiapkan untuk membuang panas dari pendingin sekunder ke udara lingkungan. Penurunan temperatur pendingin fluida setelah melalui menara pendingin adalah 8°C. Pendingin sekunder melibatkan laju alir pendingin yang lebih besar daripada sistem primer. Untuk menganalisis kekuatan struktur penyangga sistem perpipaan, telah dilakukan analisis menggunakan SAP90 [3]

EVALUASI KONDISI TRANSIEN

Di dalam dokumen LAK telah dilakukan analisis beberapa jenis kecelakaan yang terkait dengan aspek termohidraulika reaktor pada umumnya dan sistem pendingin primer pada khususnya. Beberapa kejadian awal yang ditinjau adalah:

a. Kecelakaan kehilangan aliran pendingin (LOFA)

Yang termasuk dalam kategori ini adalah kejadian awal pompa primer gagal, katup gagal, penyumbatan, pompa sekunder gagal. Beberapa kejadian awal lain dimasukkan dalam kategori ini tetapi sesungguhnya tidak tepat, yaitu: ECCS gagal, pipa primer pecah dan distribusi daya tidak merata.

b. Kecelakaan kehilangan air pendingin (LOCA)

Kejadian awal yang termasuk dalam kategori kecelakaan ini adalah: pipa primer pecah, beam tube putus, tangki reaktor pecah.

c. Kecelakaan kehilangan daya listrik

Kejadian awal listrik PLN padam, pompa primer dan sekunder gagal.

Kecelakaan Kehilangan Aliran Pendingin (LOFA)

Kehilangan aliran pendingin pada reaktor TRIGA Mark II dapat terjadi, baik pada sistem pendingin primer maupun sekunder. Keduanya berakibat pada kenaikan temperatur pendingin dan, dalam beberapa hal yang tidak dikehendaki, temperatur bahan bakar di teras. Pada sistem primer hal tersebut dapat terjadi karena: gagalnya pompa sistem primer, kegagalan katup, penyumbatan pada pipa atau penukar panas. Sedangkan, pada sistem sekunder penyebabnya adalah kegagalan pompa sekunder atau kegagalan pembuang panas akhir (*ultimate heat sink*).

Analisis LOFA telah dilakukan untuk kondisi daya penuh 2000 kW [4]. Analisis ini menggunakan pendekatan kondisi "tunak"; seluruh energi yang dibangkitkan panas peluruhan hingga interval waktu tertentu (misalkan 1 hari)

dibandingkan dengan energi yang dibutuhkan untuk menguapkan seluruh air di atas teras dan menaikkan temperatur air di teras dan lower plenum hingga temperatur saturasi. Hasil perbandingan itu menunjukkan bahwa akumulasi panas peluruhan tidak akan mampu untuk menguapkan air tersebut. Berdasarkan hasil tersebut dapat diketahui bahwa kondisi teras akan tetap terendam air, dan dapat dikatakan aman. Meskipun demikian, analisis akan lebih komprehensif apabila dilengkapi dengan perhitungan transien. Dalam hal ini dapat dipergunakan *code* PARET. *Code* ini telah banyak dipergunakan untuk analisis transien reaktor riset, salah satunya adalah di RSG GAS [5].

Analisis Kehilangan Air Pendingin (LOCA)

Terdapat beberapa skenario kecelakaan kehilangan air pendingin pada reaktor TRIGA Mark II ini, yaitu: pipa pendingin primer pecah (*hot leg* atau *cold leg*), pipa *beam tube* putus dan tangki reaktor pecah. Walaupun dimasukkan pula dalam LAK, skenario tangki reaktor pecah dapat dikategorikan kejadian hipotetis, yang kebolehjadiannya sangat kecil.

Pada kejadian pipa pendingin primer pecah, kejadian pada pipa *hot leg* (pipa sebelum *heat exchanger*) tidak berakibat separah kejadian pada pipa *cold leg* (pipa setelah *heat exchanger*). Pecahnya pipa *cold leg* dapat mengakibatkan air tangki reaktor terkuras habis [1]. Hal ini disebabkan ujung pipa *cold leg* terletak di bawah teras reaktor. Terkait dengan hal ini, perbaikan disain sesungguhnya harus dilakukan, yaitu misalnya dengan memasang *check valve* pada ujung keluar pipa *cold leg* ini. Terlepas dari hal tersebut, sistem proteksi dan pendinginan teras darurat telah dipersiapkan untuk mengantisipasi kejadian ini.

Integritas bahan bakar terhadap kegagalan sistem pendingin dianalisis berdasarkan kenaikan tekanan gas dalam bahan bakar dan batas temperatur leleh kelongsong dan bahan bakar [4]. Dalam analisis ini parameter yang diperhatikan adalah asumsi skenario yang diambil. Apabila air tangki reaktor habis dalam waktu seketika dan pada kondisi daya puncak (yaitu kerapatan daya maksimum 34 kW), temperatur kelongsong dapat mencapai 1400°C (lihat Gambar 3) yang berarti melebihi temperatur leleh dan tegangan luluh bahan (Gambar 4).

Sedangkan temperatur kelongsong maksimum yang tercapai bergantung pada skenario kejadian. Pada prinsipnya, untuk kasus kecelakaan air pendingin, pendinginan bertumpu pada ECCS. Oleh karena itu, telah dilakukan analisis kinerja sistem pendinginan darurat [6]. Analisis membagi kejadian dalam tiga tahap: tahap

teras masih terendam air ($0 < t < 103$ detik), teras mulai terbuka ($103 < t < 22536$ detik), dan teras didinginkan oleh udara ($22536 < t < \infty$). Pada tahapan ke 2, teras praktis hanya bertumpu pada pendinginan ECCS. ECCS berfungsi pada detik ke 103 dan air teras telah habis pada detik ke 180. Hasil analisis tersebut menunjukkan bahwa sejak teras masih terendam air hingga hanya didinginkan oleh udara, temperatur bahan bakar menurun dari 591°C hingga $189,6^{\circ}\text{C}$. Kenaikan sesaat temperatur terjadi pada saat ECCS berhenti bekerja (mencapai 280°C dari sekitar 140°C), namun demikian temperatur turun kembali.

Perhitungan yang dilakukan untuk analisis ini banyak menggunakan asumsi dan pendekatan yang perlu dikaji kembali, misalnya asumsi temperatur permukaan kelongsong tetap dan penggunaan harga parameter rerata. Mengingat bahwa fenomenanya berlangsung secara transien dan dapat bersifat lokal, verifikasi perhitungan dengan menggunakan code yang tervalidasi diperlukan. Hal ini terutama untuk melakukan justifikasi terhadap asumsi dan pendekatannya. Evaluasi yang dilakukan pada kegiatan ini tidak dapat melaksanakan hal tersebut.

Namun demikian, karena pada umumnya asumsi skenario kejadian yang diberikan adalah sangat pesimistis dan diyakini sangat kecil kemungkinannya, pendekatan perhitungan yang telah diperoleh dapat dijadikan prediksi awal yang baik.

Kegagalan Sistem pendingin Sekunder

Kegagalan sistem pendingin sekunder dapat terjadi karena: pompa sekunder mati (tidak berfungsi), pipa sekunder pecah atau ketiadaan pendinginan akhir. Pada dasarnya kegagalan sistem sekunder ini tidak berakibat signifikan pada integritas teras. Kegagalan sistem pendingin sekunder akan mengakibatkan kenaikan temperatur pendingin primer. Analisis kecelakaan di sisi primer menunjukkan bahwa konveksi alamiah di tangki reaktor dapat berfungsi sebagai sistem keselamatan yang baik, sehingga tidak dikhawatirkan adanya kenaikan temperatur bahan bakar.

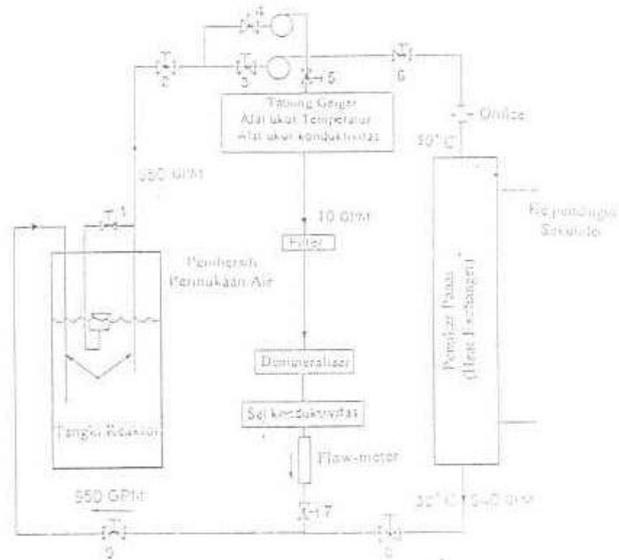
KESIMPULAN DAN SARAN

Hasil analisis seperti yang dilakukan di LAK tersebut menunjukkan bahwa parameter keselamatan memenuhi kriteria aman, sistem keselamatan menunjukkan kinerja yang baik sehingga temperatur maksimum bahan bakar ataupun pendingin tidak terlampaui (di bawah 950°C).

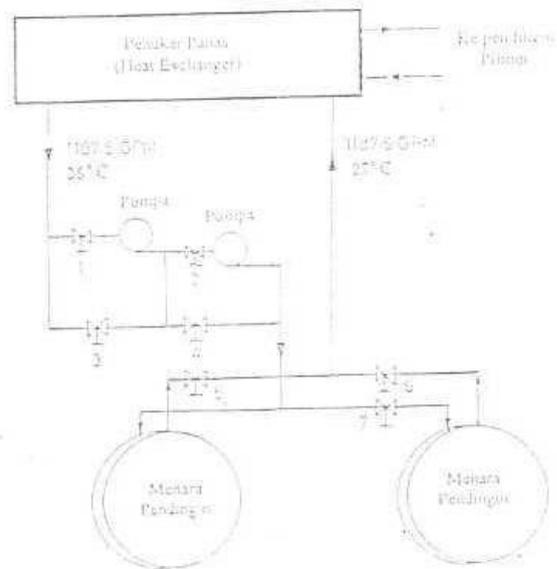
Walaupun demikian, perbaikan disain perlu dipikirkan untuk mencegah air tangki terkuras habis pada saat pipa cold leg pecah, misalkan dengan memasang *check valve*. Verifikasi perhitungan transien menggunakan codes yang tervalidasi perlu juga dilakukan mengingat perhitungan yang ada masih menggunakan beberapa asumsi dan pendekatan parameter global.

ACUAN

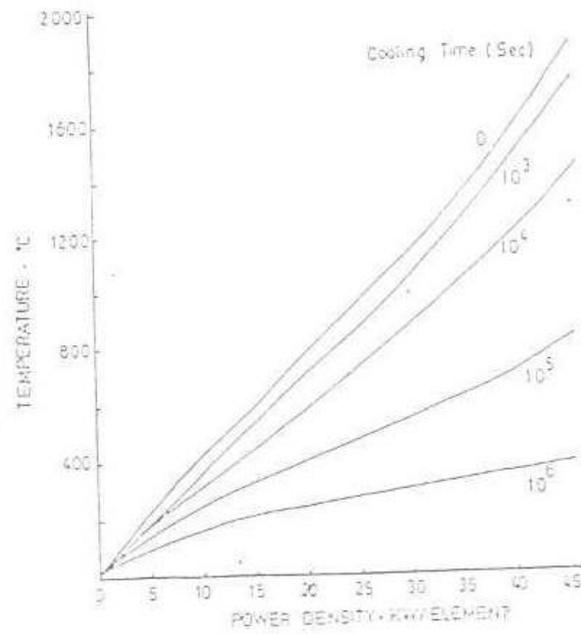
1. ---, Laporan Pendahuluan Analisis Keselamatan Peningkatan Daya Reaktor TRIGA MARK II Bandung 2000 kW, Revisi 3, Februari, 1997.
2. Efrizon Umar, Analisis dan Evaluasi Rancangan Penukar Panas Reaktor Triga Mark II-2 MW Bandung, Prosiding Seminar Sains dan Teknologi Nuklir, Bandung, 19-20 Maret, 1997.
3. Efrizon Umar dan H.E. Fitradi, Analisis Kekuatan Penyangga Sistem Perpipaan Sekunder Reaktor TRIGA Mark II Bandung, Prosiding Seminar Sains dan Teknologi Nuklir, Bandung, 19-20 Maret, 1997.
4. Efrizon Umar, Analisis Kehilangan Aliran Pendingin dan Integritas Elemen Bakar Reaktor TRIGA MARK II untuk daya 2 MW, Proceedings Seminar Sains dan Teknologi Nuklir, PPTN-Bandung, 12-13 Maret, 1996.
5. R. Pribadi Agung S, Analisis Transien Termohidraulika Teras RSG GA Siwabessy Menggunakan Code Program PARET/ANL, Skripsi Jurusan Teknik Nuklir, FT UGM, 1991.
6. Dudung A. Razak dan Sudjatmi K.A, Analisis Termohidraulik Sistem Pendingin Teras Darurat Untuk Reaktor TRIGA Mark II 2000 kW, Prosiding Seminar Teknologi dan Keselamatan PLTN Serta Fasilitas Nuklir IV, Serpong, 10-11 Desember, 1996.



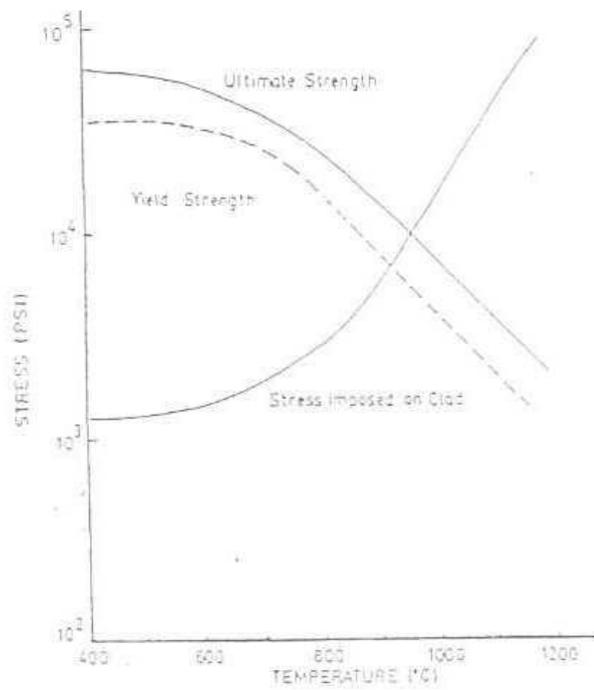
Gambar 1. Skema Sistem Pendingin Primer Operasi Normal



Gambar 2. Skema Sistem Pendingin Sekunder



Gambar 3. Temperatur Bahan Bakar vs. Rapat Daya



Gambar 4. Tegangan vs. Temperatur Kelongsong