

# PENGEMBANGAN BAJA UNTUK APLIKASI PADA POWER PLANT

Eddy Agus Basuki

Kelompok Keahlian Teknik Metalurgi  
Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan  
Institut Teknologi Bandung  
basuki@metallurgy.itb.ac.id

## ABSTRAK

*Material yang didisain untuk pemakaian pada temperatur tinggi, seperti untuk tabung dan pipa 'boiler power plant', harus memiliki sifat yang lebih dibanding dengan yang disyaratkan untuk pemakaian temperatur rendah. Selain kekuatan dan keuletan, material seperti ini harus juga memiliki ketahanan perayapan (creep resistance), kestabilan struktur mikro dan ketahanan korosi serta oksidasi untuk waktu pemakaian yang lama di lingkungan yang korosif pada temperatur tinggi. Tuntutan terhadap efisiensi energi yang semakin tinggi dan penurunan emisi gas yang berpengaruh terhadap efek rumah kaca memaksa 'power plant' beroperasi pada temperatur yang semakin tinggi. Dalam makalah ini akan dibahas pengembangan baja yang telah dilakukan dan arah pengembangan kedepan untuk aplikasi di 'power plant' pada temperatur operasi yang semakin tinggi. Pembahasan difokuskan pada kriteria disain dan hasil-hasil pengembangan yang telah dilakukan hingga saat ini.*

**Kata kunci:** *power plant, ketahanan perayapan (creep resistance), ketahanan oksidasi dan korosi temperatur tinggi, baja tahan perayapan (creep resistant steels).*

## I. PENDAHULUAN

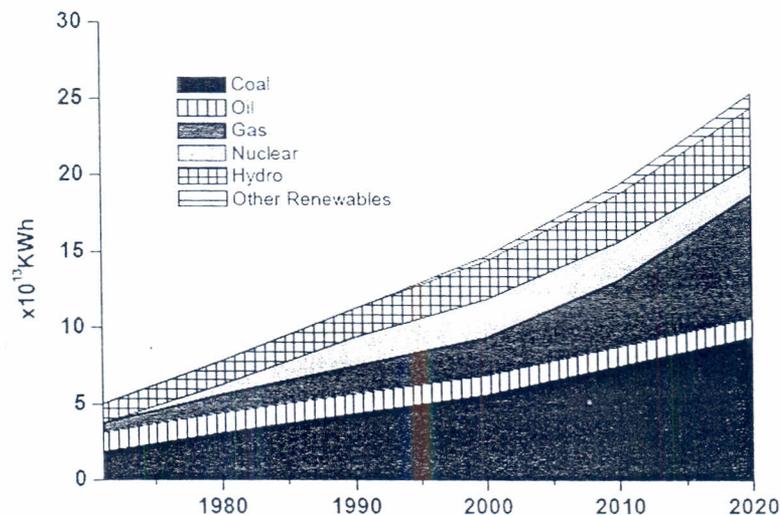
Prinsip dari PLTU adalah memproduksi listrik dengan membakar bahan bakar, seperti batubara, minyak, biomassa atau sampah. Listriknya dihasilkan dengan proses pemanasan air di dalam sebuah *boiler* untuk menghasilkan uap. Dibawah tekanan, uap tersebut dipanaskan ke temperatur tinggi di dalam *superheater*, dan kemudian mengalir ke turbin yang menggerakkan generator untuk menghasilkan listrik.

Sejak krisis energi tahun 1970-an telah banyak permintaan untuk meningkatkan efisiensi PLTU, yaitu meningkatkan jumlah listrik yang dihasilkan dengan konsumsi bahan bakar yang sama. Menurut prinsip termodinamika, efisiensi turbin uap pada power plant dapat ditingkatkan dengan cara meningkatkan temperatur operasi menurut persamaan 1.

$$Efisiensi = \frac{T_H - T_L}{T_H - 0} \quad (1)$$

Dimana  $T_H$  dan  $T_L$  masing-masing adalah temperatur absolut tertinggi (maksimum) dan terendah (minimum) dalam siklus operasi. Karena efisiensi 100% hanya bisa dicapai bila temperatur terendah adalah  $0^\circ\text{K}$  dan hal ini tidak mungkin dapat terjadi, maka peningkatan efisiensi dapat dilakukan dengan pemakaian fluida dengan temperatur yang semakin tinggi. Oleh sebab itu, karena *power plant* konvensional yang beroperasi dalam keadaan subkritikal dengan parameter uap  $535^\circ\text{C}$  dan 185 bar hanya memiliki efisiensi kira-kira 40%, maka pemakaian tekanan yang tinggi pada kondisi superkritikal atau ultra superkritikal dapat meningkatkan efisiensi *power plant*.

Pada waktu yang sama, beberapa prediksi menunjukkan bahwa kebutuhan listrik global akan terus meningkat pada rata-rata 2% pertahun hingga tahun 2020. Untuk memenuhi kebutuhan kapasitas ini, konsumsi batubara global diperkirakan meningkat 60% hingga 2020, seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Batubara merupakan bahan bakar yang relatif murah sehingga perannya akan tetap bertahan sebagai bahan bakar disebagian besar PLTU. Untuk sistem pembakaran batubara, temperatur hingga  $720$  atau bahkan  $760^\circ\text{C}$  dengan tekanan 35 MPa sedang dalam penyiapan atau pengembangan di Eropa, Amerika Serikat, Jepang dan China, Gambar 2. Tujuannya adalah untuk menghasilkan efisiensi termal senilai 60% hingga tahun 2015.



Gambar 1. Tren produksi listrik dunia dari 1971 hingga 2020 (6)

Pipa pada *boiler* merupakan komponen paling kritis pada *boiler* pembangkit listrik tenaga uap berbahan bakar fosil, termasuk batubara. Material untuk pipa *boiler* ini mendapat tegangan dari tekanan uap di dalam pipa dan juga berinteraksi dengan lingkungan yang oksidatif di bagian dalam pipa dan yang korosif pada bagian luar pipa dari hasil pembakaran batubara, dan kesemuanya berlangsung pada temperatur tinggi.

4. Terjadinya rekristalisasi dan pertumbuhan butiran (*grain growth*). Untuk baja yang mengandalkan kekuatan dari deformasi plastis atau pengerasan regangan (*strain hardening*) dan struktur martensit maka perubahan struktur mikro ini akan menyebabkan penurunan kekuatan material.
5. Partikel endapan penguat mengalami pengkasaran (*coarsening*) dimana partikel endapan kecil larut sedangkan yang besar meningkat ukurannya sehingga menurunkan kekuatan material.
6. Berlangsungnya korosi temperatur tinggi termasuk oksidasi, sulfidasi, karburisasi & *metal dusting* serta *hot corrosion* sebagai *corrosion mode* yang sebagian tidak terjadi pada temperatur rendah.

Oleh sebab itu, pengembangan paduan logam untuk aplikasi pada temperatur operasi yang semakin tinggi harus diarahkan untuk mampu meminimalisasi permasalahan diatas.

### III. BAJA UNTUK BOILER PADA POWER PLANT

Tabel 1 menunjukkan beberapa baja tahan perayapan (*creep resistant steels*) yang umum digunakan pada *power plant* hingga saat ini. Baja tahan perayapan yang konvensional memiliki kandungan Cr hingga 3%, sedangkan baja hasil pengembangan pada akhir 1999 hingga awal tahun 2000-an mengandung Cr hingga 9%. Baja konvensional yang paling sedikit komposisinya memiliki struktur mikro ferit *alotriomorp* dan perlit, tetapi kebanyakan mengandung struktur mikro bainitik dan martensitik dalam kondisi ternormalisasi. Untuk pemakaian pada temperatur yang semakin tinggi kandungan chromium dalam baja semakin tinggi sehingga umumnya baja untuk tabung dan pipa *boiler* pada *power plant* modern dibuat dari baja yang berada dalam bagian bawah Tabel 1. Khusus untuk baja 2¼Cr1,6W yang baru dikembangkan untuk aplikasi *boiler* dimana perlakuan panas pasca pengelasan (*post-weld heat treatment*) tidak diperlukan. Paduan ini merupakan modifikasi dari baja 2¼Cr1Mo dengan penggantian Mo dengan W dan V, penurunan karbon mendorong pembentukan struktur mikro bainit yang tidak sekeras martensit sehingga tidak diperlukan perlakuan panas pasca pengelasan.

Umumnya baja tersebut ditemper sebelum diaplikasikan agar dapat dihasilkan karbida atau partikel endapan penguat lainnya. Beberapa fasa endapan yang umum ditemukan adalah epsilon ( $Fe_{2,4}C$ ), sementit ( $Fe_3C$ ), chi ( $Fe_2C$ ),  $M_2X$ ,  $M_6C$ ,  $M_{23}C_6$ ,  $M_7C_3$ , Laves, MX,  $M_5C_2$  dan Z-phase, dimana M merupakan campuran unsur logam dalam paduan. Jenis, ukuran dan distribusi fasa-fasa ini dalam matriks martensit, bainit atau ferit akan menentukan struktur mikro dan pada akhirnya menentukan sifat perayapannya, mengingat bahwa mekanisme deformasi perayapan pada baja ini adalah panjatan

dislokasi (*dislocation climb*). Oleh sebab itu keberadaan partikel ini mengontrol deformasi perayapannya.

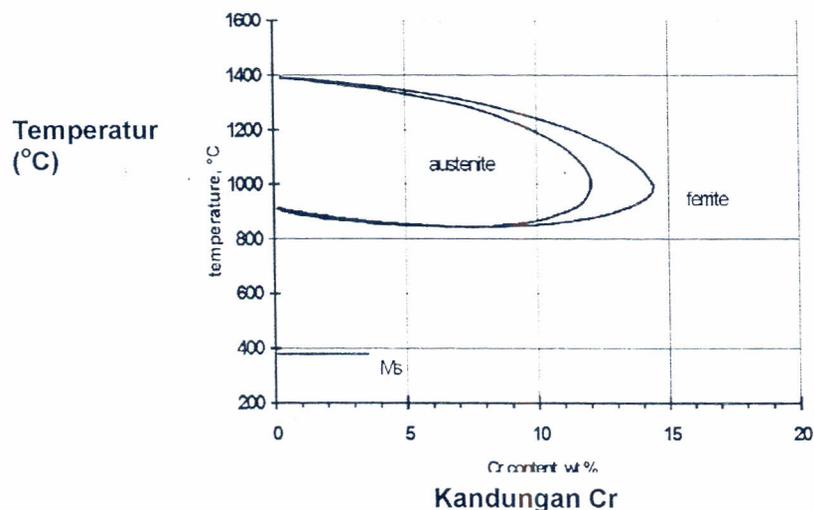
Baja 2,25Cr1Mo dengan struktur mikro bainitik dan ditemper pada 700°C selama 100 jam menghasilkan partikel endapan karbida jenis  $M_2C$  dengan dominant M adalah Mo dan  $M_{23}C_6$  dengan dominant M adalah Cr. Selain membentuk karbida, Cr juga memberikan ketahanan oksidasi dengan pembentukan lapisan protektif spinel yang mengandung  $Cr_2O_3$ , meskipun hanya hingga temperatur operasi 565°C saja.

**Tabel 1** Komposisi kimia (%berat) beberapa baja tahan perayapan (*creep-resistant steels*) (1,3)

Nama		Komposisi Kimia (%berat)							
European Designation	ASTM	Cr	C	Si	Mn	Mo	V	Ni	Lain2
1Cr½Mo		0,95	0,15	0,25	0,50	0,6	-	-	-
¼CrMoV		0,30	0,15	0,25	0,50	0,50	0,25	0,05	-
½Cr½Mo¼V		0,45	0,12	0,25	0,50	0,6	0,25	-	-
1CrMoV		1,10	0,25	0,25	0,75	1,0	0,35	0,7	-
2¼Cr1Mo		2,30	0,15	0,25	0,50	1,0	-	0,1	-
Mod 2¼Cr1Mo		2,30	0,10	0,05	0,5	0,16	0,25	0,16	Ti=0,03, B=0,0024
2¼Cr1.6WV		2,20	0,05	0,20	0,50	0,1	0,2	-	W=1,6 Nb=0,05
3Cr1½Mo		3,0	0,1	0,2	1,0	1,5	0,1	0,1	-
9Cr1Mo		9,0	0,1	0,6	0,4	1,0	-	-	-
Mod 9Cr1Mo		8,75	0,1	0,35	0,40	0,95	0,022	0,05	Nb=0,08 N=0,05 Al<0,04
9Cr½MoWV		9,0	0,11	0,04	0,45	0,50	0,20	0,05	W=1,84 Nb=0,07 N=0,05
	P9	8,5- 10,5	Max 0,15	0,2- 0,65	0,8- 1,3	1,7- 2,3	0,2- 0,4	Max 0,3	Nb=0,3- 0,45
	P91	8,1	0,1	0,38	0,46	0,92	0,18	0,33	Nb=0,073 Al=0,034
	E911	9,16	0,105	0,20	0,35	1,01	0,23	0,07	W=1,0 Nb=0,068 N=0,072
	P92	9,07	0,124	0,02	0,47	0,46	0,19	0,06	W=1,78 Nb=0,063 B=0,003 N=0,043 Al=0,002

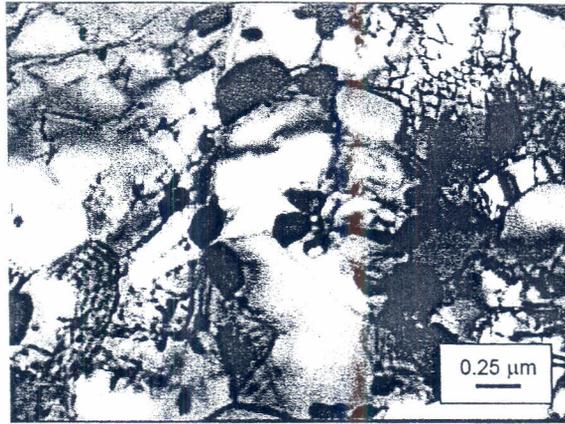
Untuk temperatur yang lebih tinggi, kandungan Cr di dalam baja harus ditingkatkan. Bila mengacu pada diagram fasa Fe-Cr, Gambar 3, baja dengan komposisi Cr kira-kira 9% akan berada dalam fasa austenit pada selang 820-1200°C. Hal ini memungkinkan untuk melakukan austenisasi pada selang temperatur ini dan mendapatkan struktur martensit saat pendinginan. Perlu dicatat disini bahwa karena tingginya kandungan unsur padu yang memiliki *hardening multiplying factor* lebih dari 1 (satu) maka hanya dengan pendinginan udara telah dapat dihasilkan struktur martensit. Struktur *lath-martensite* ini mengandung dislokasi dengan kerapatan tinggi dan terdapat sedikit *retained austenite* diantara *lath-boundaries*-nya. Selain dislokasi, di dalam *lath martensite* terdapat pula karbida-karbida besi, seperti (Fe<sub>2,4</sub>C), sementit (Fe<sub>3</sub>C), chi (Fe<sub>2</sub>C). Saat austenisasi pada 970°C beberapa partikel karbida M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> tidak larut dan baru akan larut seluruhnya pada temperatur diatas 1070°C.

Tempering pada temperatur sekitar 750°C akan menyebabkan beberapa perubahan struktur mikro. Pertama, pemulihan (*recovery*) menyebabkan penurunan kerapatan dislokasi disertai dengan pembentukan sub-butiran, yang menurunkan kekuatan dan ketahanan perayapan. Kedua, terjadi pengendapan partikel-partikel fasa karbida, nitrida, karbonitrida, terutama dari Nb dan V, seperti partikel halus membulat M(C,N) kaya Nb dan karbida M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> kaya Cr (Gambar 4) yang menambah ketahanan perayapan baja, misalnya di P92 dan E911, Gambar 5. Selain juga terlibat dalam beberapa karbida, unsur W dan Mo meningkatkan penguatan larutan padat (*solid solution strengthening*). Gambar 5 menunjukkan secara ringkas peningkatan ketahanan perayapan dengan adanya modifikasi unsur padu dalam baja 9%Cr.

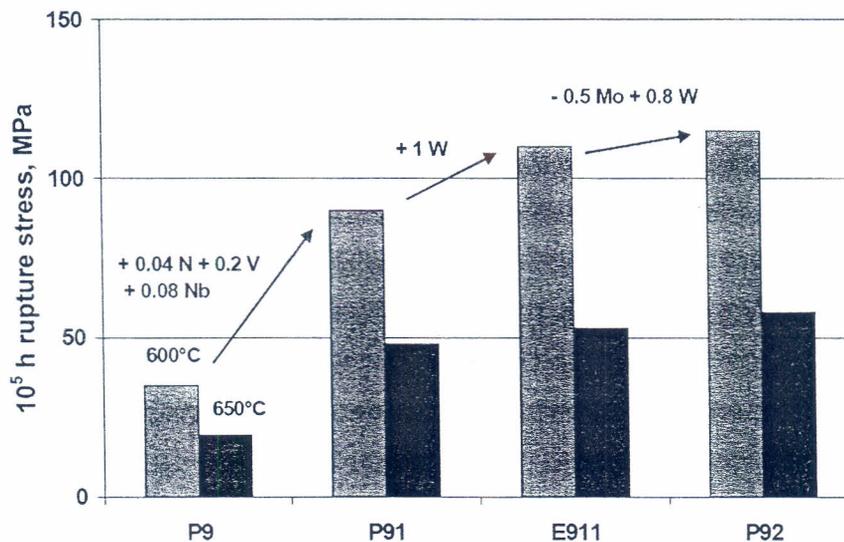


**Gambar 3.** Bagian diagram fasa Fe-Cr yang menunjukkan daerah kestabilan fasa austenit.

Catatan: Ms = *martensite start*.



**Gambar 4.** Foto TEM yang menunjukkan partikel  $M_{23}C_6$  (berukuran relatif besar) terdistribusi pada batas sub-butiran (*sub-grain boundaries*) dan partikel halus  $M(C,N)$  di dalam sub-butiran pada baja P92 yang diaustenisasi pada  $970^{\circ}C$  selama 2 jam dan ditemper pada  $775^{\circ}C$  (3).



**Gambar 5.** Peningkatan *rupture stress* dalam pengembangan baja khrom 9% (3).

#### IV. KRITERIA DISAIN UNTUK MATERIAL PIPA BOILER

##### 4.1. Ketahanan Perayapan (*Creep Resistance*)

Material yang digunakan untuk boiler harus mampu menahan beban atau tegangan pada temperatur tinggi. Meskipun tegangan yang bekerja lebih rendah dari tegangan luluh materialnya, deformasi yang menerus yang disebabkan oleh aktivasi termal meskipun dalam kecepatan yang relatif lambat tetap dapat terjadi hingga suatu waktu tertentu komponen dapat mengalami kegagalan (*rupture*). Peristiwa seperti ini disebut sebagai perayapan.

Mekanisme yang dimanfaatkan untuk meningkatkan ketahanan perayapan pada dasarnya mirip dengan yang digunakan untuk memperbaiki kekuatan paduan logam pada temperatur kamar, seperti penguatan larutan padat (*solid solution strengthening*) dan penguatan pengendapan (*precipitation strengthening/hardening*). Perbedaan dalam ketahanan perayapan suatu material dengan material lainnya dengan meningkatnya temperatur kemudian tergantung pada kegigihan mekanisme penguatannya.

Ketahanan perayapan umumnya meningkat dengan penguatan larutan padat meskipun sumbangannya tidak terlalu besar. Namun demikian sebenarnya paduan-paduan yang melibatkan unsur-unsur di dalam larutan padat biasanya tidak dimaksudkan untuk meningkatkan kekuatan saja, melainkan juga untuk tujuan lain seperti meningkatkan ketahanan oksidasi dan korosi, serta kemampuan pengerjaan (*mechanical working*) dan fabrikasi. Paduan-paduan yang dikembangkan untuk pemakaian pada temperatur tinggi lebih banyak mengandalkan pada mekanisme penguatan lain yang lebih efektif, seperti partikel endapan fasa kedua, seperti karbida, nitrida, karbonitrida atau senyawa intermetalik.

Larson dan Miller telah memperkenalkan konsep untuk menggabungkan faktor waktu dan temperatur dalam proses perayapan yang dikenal sebagai Larson-Miller Parameter (LMP). Plot antara tegangan terhadap LMP memungkinkan untuk memprediksi sifat perayapan suatu material. Karena perayapan merupakan proses yang diaktivasi termal, maka kecepatan perayapan dapat dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$\dot{\varepsilon} = A_0 \sigma^n \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad (2)$$

Atau

$$\dot{\varepsilon} = A_1 \exp\left(\frac{-B_1}{T}\right) \quad (3)$$

Untuk waktu patah (*time to rupture*) juga dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan Arrhenius berikut:

$$t_r = A_2 \exp\left(\frac{B_2}{T}\right) \quad (4)$$

Dimana:  $\sigma$  = tegangan  
 $Q$  = energi aktivasi  
 $A_0, A_1, A_2, B_1$  dan  $B_2$  = tetapan.

Dengan demikian persamaan (4) dapat ditulis dalam bentuk persamaan berikut;

$$\frac{B_2}{2,3} = T(\log t_r - \log A_2) \quad (5)$$

Sehingga LMP menjadi sbb:

$$LMP = f(\sigma) = T(\log t_r + K_1) \quad (6)$$

Meskipun terdapat metoda lain dalam mempresentasikan hasil-hasil uji perayapan dan untuk prediksi ketahanan perayapan, namun demikian LMP masih sering digunakan untuk prediksi sifat perayapan material untuk aplikasi pada temperatur tinggi.

#### 4.2. Stabilitas Strukturmikro

Struktur mikro baja yang didisain untuk memberikan ketahanan perayapan sedapat mungkin harus dapat dipertahankan hingga umur pakai. Stabilitas struktur mikro ini terutama berkaitan dengan mempertahankan ukuran partikel-partikel penguat seperti karbida, nitrida atau karbonitrida dalam baja feritik, bainitik dan martensitik serta partikel penguat intermetalik untuk baja-baja austenit dan sedapat mungkin menghindari pembentukan fasa-fasa yang merugikan.

Untuk partikel endapan penguat tertentu, misalnya karbida  $M_{23}C_6$ , dan untuk menyingkat disebut  $\theta$ , yang terdispersi di dalam matriks ferit  $\alpha$ , maka konsentrasi setimbang unsur terlarut, yaitu Cr di dalam ferit akan tergantung pada ukuran partikel. Untuk dua partikel berukuran  $r_1$  dan  $r_2$ , dimana  $r_2 > r_1$ , maka menurut Gibbs dan Thompson konsentrasi unsur terlarut di dalam matriks  $\alpha$  dalam kesetimbangan lokal dengan partikel berukuran  $r_1$  yaitu  $C_{r_1}^{\alpha\theta}$ , lebih besar dibanding dengan konsentrasi unsur terlarut di dalam matriks  $\alpha$  dalam kesetimbangan lokal dengan partikel berukuran  $r_2$  yaitu  $C_{r_2}^{\alpha\theta}$ , menurut persamaan 7 dan 8 dan yang secara skematika ditunjukkan pada Gambar 6.

$$C_{r_1}^{\alpha\theta} = C_{r_{\infty}}^{\alpha\theta} + \exp\left(\frac{-\Delta G_m}{r_1 RT}\right) \quad (7)$$

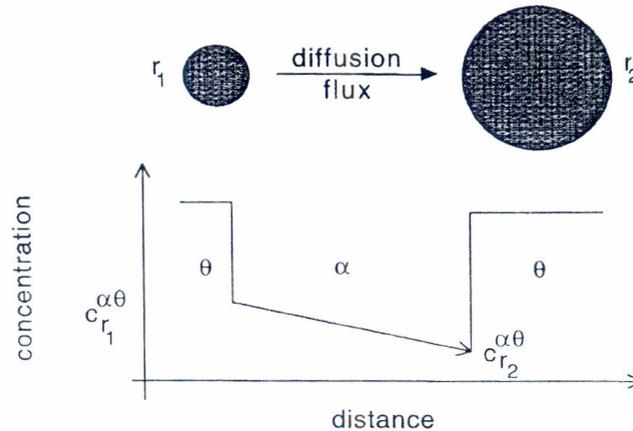
$$C_{r_2}^{\alpha\theta} = C_{r_{\infty}}^{\alpha\theta} + \exp\left(\frac{-\Delta G_m}{r_2 RT}\right) \quad (8)$$

Dimana:

$C_{r_{\infty}}^{\alpha\theta}$  = konsentrasi unsur terlarut di dalam matriks  $\alpha$  dalam kesetimbangan lokal dengan partikel berukuran tak hingga.

$\Delta G_m$  = energi aktivasi untuk migrasi atom unsur terlarut pembentuk partikel.

T = temperatur operasi ( $^{\circ}\text{K}$ )  
 R = tetapan gas.



Gambar 6. Model pengkasaran partikel endapan (1)

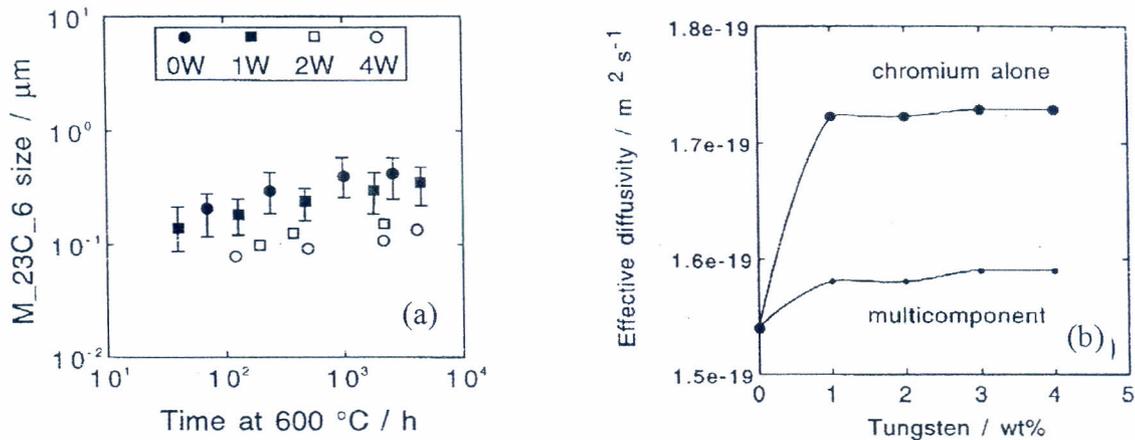
Akibat dari gradien konsentrasi tersebut maka saat pemakaian pada temperatur tinggi, dimana atom-atom unsur terlarut teraktivasi, menyebabkan difusi atom unsur ini dari antarmuka  $\alpha/\theta$  partikel  $r_1$  ke antarmuka partikel  $r_2$  dan menyebabkan partikel berukuran kecil ( $r_1$ ) larut sedangkan partikel berukuran besar ( $r_2$ ) semakin besar terhadap waktu. Peristiwa ini disebut dengan pengkasaran (*coarsening*) atau *ripening*. Kinetika proses pengkasaran ini diberikan oleh persamaan 9.

$$\bar{r}_t^{-3} - \bar{r}_0^{-3} = \frac{3DV_m C_{r\sim}^{\alpha\theta} \sigma}{2RT} t \quad (9)$$

Dimana :  $\bar{r}_t^{-3}$  = ukuran rata-rata partikel penguat pada waktu pemanasan t.  
 $\bar{r}_0^{-3}$  = ukuran rata-rata partikel penguat saat awal pemanasan  
 D = koefisien difusifitas unsur terlarut pembentuk partikel  
 $\sigma$  = energi antarmuka matriks dan endapan  $\alpha/\theta$ .  
 $V_m$  = volume molar

Akibat dari peristiwa pengkasaran ini adalah berkurangnya jumlah partikel penguat sehingga jarak antar partikel menjadi semakin lebar, padahal kekuatan dan ketahanan perayapan berbanding terbalik dengan jarak antar partikel penguat, atau halangan terhadap pergerakan dislokasi menjadi berkurang dan hal ini menyebabkan menurunnya ketahanan perayapan dari material. Stabilitas partikel endapan penguat dapat ditingkatkan dengan modifikasi unsur dalam baja yang dapat menurunkan harga D,  $\sigma$  dan  $C_{r\sim}^{\alpha\theta}$ .

Abe (2) telah meneliti pengaruh penambahan W terhadap kinetika pengkasaran partikel karbida dalam baja Fe-9Cr-W seperti ditunjukkan pada Gambar 7. Terlihat jelas bahwa penambahan unsur W kedalam baja ferit meningkatkan kestabilan karbida pada temperatur tinggi. Unsur-unsur seperti Ti, Zr dan Hf membentuk karbida MC yang sangat stabil dan Cr, Mo dan W membentuk beberapa karbida jenis karbida  $M_{23}C_6$ ,  $M_2C$ ,  $M_7C_3$  yang kestabilannya sedikit lebih rendah.



Gambar 7. (a) Pengaruh penambahan W terhadap kinetika pengkasaran baja feritik, (b) Pengaruh W terhadap penurunan koefisien diffusifitas (2).

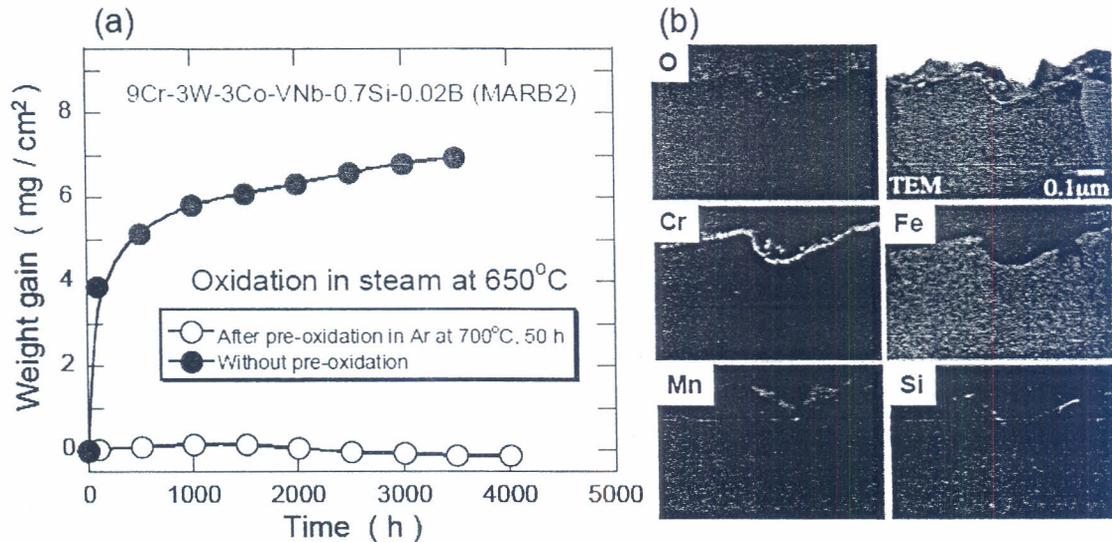
#### 4.3. Ketahanan Oksidasi dan Korosi Temperatur Tinggi

Tergantung pada jenis bahan bakarnya, pembakaran bahan bakar fosil dapat menghasilkan gas panas yang terdiri dari campuran  $O_2$ ,  $CO_x$ ,  $SO_x$ , HCl,  $H_2O$  dan  $NO_x$  dengan konsentrasi yang bervariasi sehingga beberapa bentuk korosi temperatur tinggi dapat terjadi. Selain itu, tergantung pada temperatur tube atau pipa, dapat pula dihasilkan padatan atau cairan abu (*ash*) dan garam yang menempel pada permukaan pipa *superheater*. Untuk PLTU berbahan bakar batubara, endapan pada permukaan pipa *superheater* ini umumnya mengandung sodium sulfat dan potassium sulfat ( $Na_2SO_4$  dan  $K_2SO_4$ ).

Idealnya, dalam lingkungan yang bersih hanya mengandung udara saja, lapisan oksida protektif dapat terbentuk pada permukaan paduan logam yang dapat bertindak sebagai barrier / lapisan protektif terhadap oksidasi lebih lanjut. Gambar 8 menunjukkan bahwa dengan pembentukan  $Cr_2O_3$  awal pada permukaan baja 9Cr-3W3Co-VNbSi (MARB2) hasil pra-oksidasi dapat meningkatkan ketahanan terhadap oksidasi di uap pada 650°C.

Pertumbuhan lapisan oksida lebih lanjut dimungkinkan oleh transport ion logam (kation) atau ion oksigen (anion) melewati lapisan oksida atau kerak yang

terbentuk. Namun demikian, dalam praktek, oksida logam bisa saja memiliki pori atau retakan yang menyebabkan transport ion menjadi lebih cepat atau bahkan lapisan keraknya menjadi terkelupas sehingga lapisan oksida tersebut menjadi tidak protektif lagi. Apabila lapisan kerak dapat dijaga kompak, tanpa pori dan tidak mudah retak atau terkelupas, lapisan kerak ini masih dapat rusak bila ada lelehan endapan garam dipermukaan lapisan kerak tersebut.



Gambar 8. Pengaruh praoksidasi baja 9Cr-3W3Co-VNbSi (MARB2) terhadap oksidasi di uap pada 650°C (2).

Pengotor yang ada di dalam batubara yang dapat menyebabkan korosi temperatur tinggi diantaranya adalah: belerang (S), sodium (Na), potassium (K) dan klorin (Cl). Selain itu batubara juga mengandung mineral yang akan menghasilkan abu (ash) selama pembakaran dan sebagian menjadi abu terbang (*fly ash*). Abu terbang yang mengandung S, Na, K dan Cl tsb dapat mengendap di *furnace wall* dan *superheater/reheater* menyebabkan serangan korosi terhadap komponen logamnya. Lelehan garam ini dapat melarutkan lapisan kerak protektif. Peristiwa kerusakan seperti ini disebut sebagai hot corrosion. Korosi yang terjadi akibat dari pengendapan abu atau garam ini jauh lebih berbahaya dibanding oksidasi, karena sifat serangannya berupa sumuran (*pitting*), tidak seperti halnya bila oksidasi yang terjadi merata. *Hot corrosion* merupakan degradasi material/logam akibat interaksinya dengan lelehan endapan garam Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> hasil reaksi berikut.



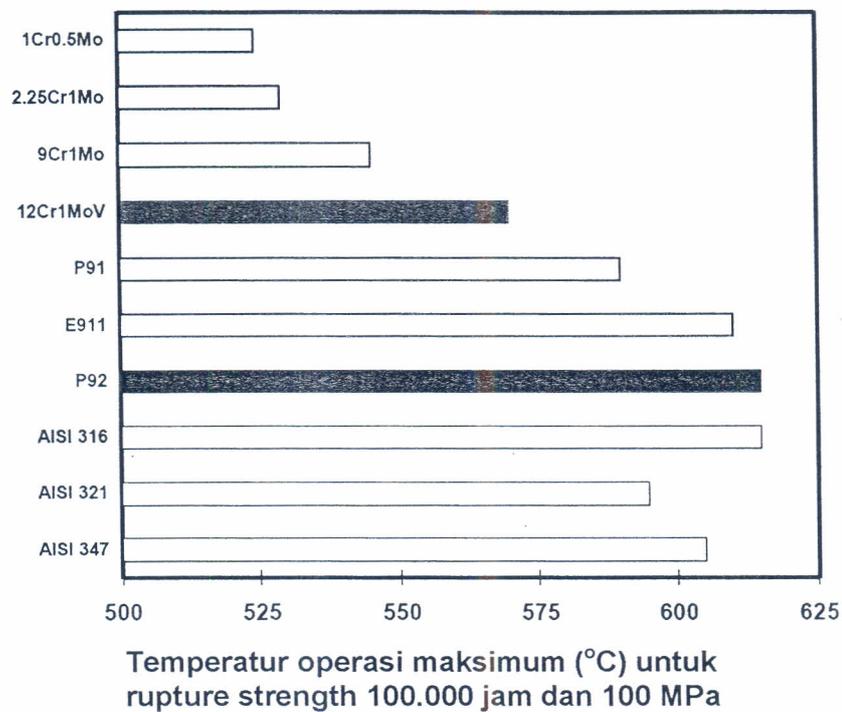
Senyawa belerang dan pengotor lain seperti sodium dan vanadium dapat membentuk garam leleh. Selama pembakaran pengotor ini meleleh atau menguap dan terkondensasi pada komponen bila temperaturnya dibawah temperatur kondensasi garam-garam tersebut. *Sodium vanadyl vanadate* ( $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{V}_2\text{O}_4 \cdot 5\text{V}_2\text{O}_5$ ) yang leleh pada temperatur yang relatif rendah ( $550^\circ\text{C}$ ) merupakan lelehan endapan yang mungkin terbentuk di *superheater* PLTU.

## V. PENGEMBANGAN MATERIAL

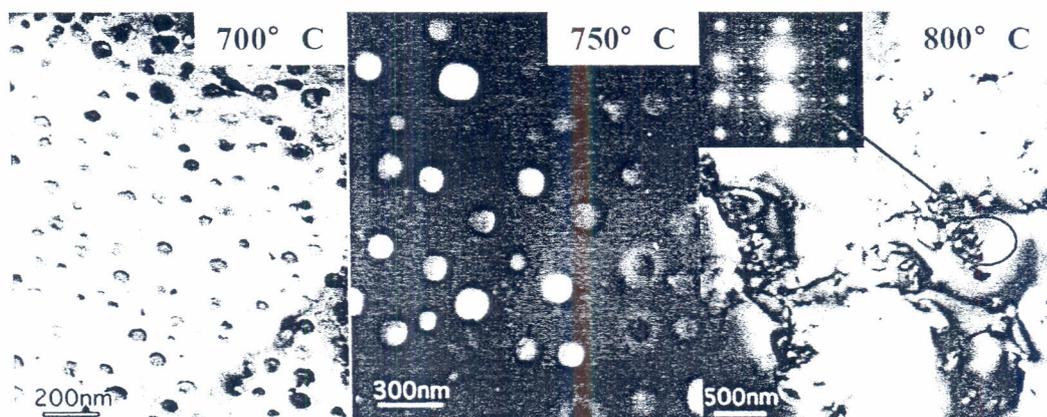
Saat ini sedang dilakukan pengembangan baja untuk pipa boiler *power plant* yang mampu dioperasikan untuk menghasilkan efisiensi lebih dari 50%. Untuk pemakaian pada temperatur yang semakin tinggi baja perlu ditingkatkan kandungan Cr-nya, lebih dari 9%, hingga 12%. Namun demikian hal ini menyebabkan daerah kestabilan austenit yang dapat digunakan untuk *austenizing* menjadi semakin sempit sehingga semakin sulit untuk menghasilkan struktur martensit. Selain itu, pada temperatur yang semakin tinggi maka stabilitas partikel penguat karbida, nitrida dan karbonitrida semakin rendah, sehingga cepat terjadi pengkasaran partikel dan kekuatan serta ketahanan perayapan menjadi cepat turun. Oleh sebab itu orang berpikir untuk menambahkan unsur penstabil austenit seperti Ni, Co, Mn dan N untuk mengkompensasi penambahan Cr sebagai penstabil ferit. Penggantian baja khrom martensit dengan baja austenit seperti 316 yang lebih mahal karena kandungan Ni nya relatif banyak, ternyata tidak lebih baik dibanding dengan baja khrom martensit P92 yang lebih murah, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9.

Namun demikian, karena baja-baja austenitik yang diperkuat oleh fasa endapan intermetalik memiliki ketahanan terhadap perayapan yang paling tinggi dari kelas baja kemungkinan baja jenis ini dapat dijadikan alternatif untuk operasi temperatur yang lebih tinggi. Baja ini dipadu dengan Cr, Mo, atau W dan penambahan Al, Ti, Nb dan Ta serta diperkeras setelah perlakuan pelarutan (*solution treatment*) dan penuaan (*aging*), yaitu perlakuan pelarutan pada  $1100-1200^\circ\text{C}$  dan dilanjutkan dengan penuaan pada  $700-750^\circ\text{C}$  untuk waktu yang bervariasi, tergantung dari ukuran partikel penguat yang diinginkan. Paduan dengan logam dasar Fe-Ni tersebut diperkuat dengan karbida dan endapan intermetalik dalam matriks FCC. Partikel penguat  $\gamma'(\text{Ni}_3\text{Al})$  ini relatif lebih stabil pada temperatur tinggi dibanding dengan partikel karbida karena antarmukanya yang koheren sehingga lebih baik dalam memberikan ketahanan perayapan pada temperatur tinggi untuk waktu yang lebih lama. Gambar 10 menunjukkan distribusi partikel penguat  $\gamma'(\text{Ni}_3\text{Al})$  yang terdistribusi di dalam matriks austenit Fe-Ni. Selain dengan Al, perbaikan baja austenit untuk aplikasi pipa *boiler* juga dilakukan dengan penambahan Si. Modifikasi ini meningkatkan ketahanan oksidasi pada temperatur tinggi dengan mempercepat

pembentukan kerak protektif dibagian luar  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  dan bila terdapat aluminium maka akan ada back-up internal oksida  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Gambar 11. Oksida protektif  $\text{SiO}_2$ -nya terdistribusi pada batas butiran seperti ditunjukkan pada Gambar 12.

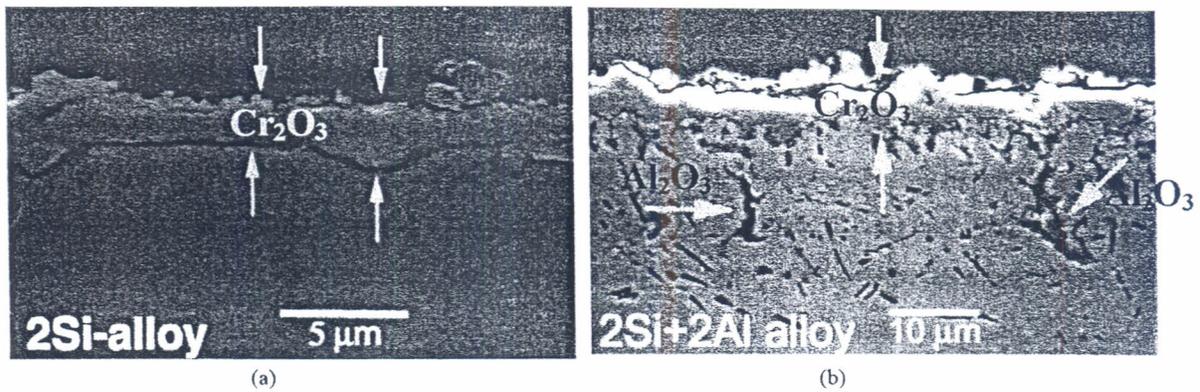


**Gambar 9.** Temperatur operasi maksimum beberapa baja yang digunakan saat ini dan beberapa yang barusaja dikembangkan untuk *power plant* yang *rupture* setelah 100.000 jam pada operasi 100 MPa (3).

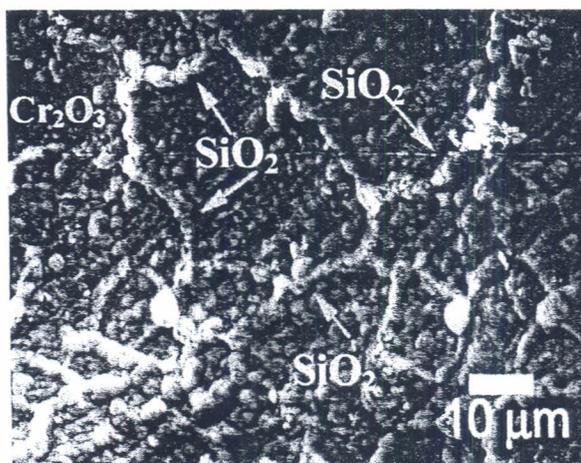


Sumber: Shingledecker, J.P., and Swindeman, R.W., Oak Ridge National Laboratory, TN, USA.

**Gambar 10.** Partikel  $\gamma'$ ( $\text{Ni}_3\text{Al}$ ) dalam paduan FeNi yang di panaskan pada 700, 750 dan 800°C selama 3000 jam



Gambar 11. Pembentukan oksida pada baja paduan (a) Fe-16Cr-16Ni-2Mn-1Mo-2Si, dan (b) Fe-16Cr-16Ni-2Mn-1Mo-2Si-2Al, setelah uji oksidasi di lingkungan atmosfer pada 800°C selama 1000 jam (4).

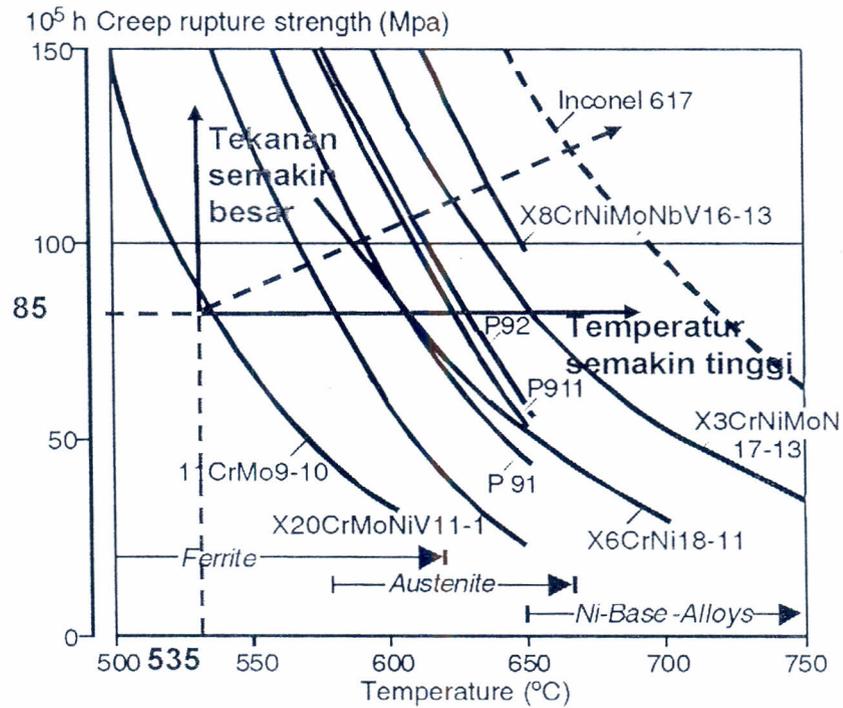


Gambar 12. Morfologi permukaan lapisan oksida pada baja Fe-16Cr-16Ni-2Mn-1Mo-2Si setelah oksidasi pada 800°C selama 1000 jam di lingkungan atmosfer yang menunjukkan pembentukan oksida SiO<sub>2</sub> pada batas butiran diantara lapisan oksida Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (4).

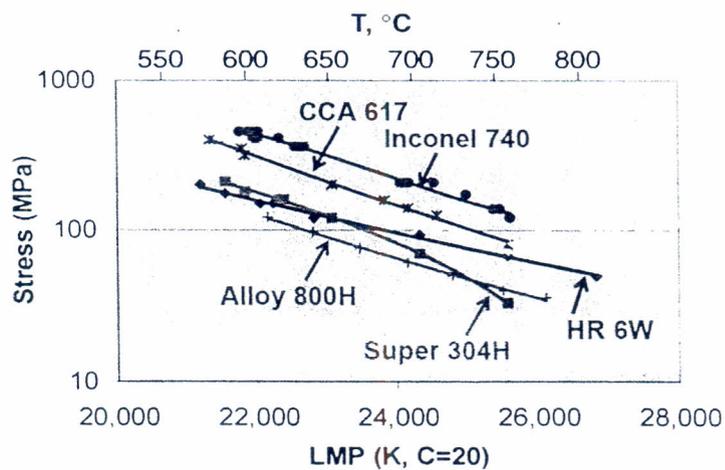
Beberapa baja paduan yang mengandung Ni dan dapat mengendapkan  $\gamma'$  oleh penambahan Ti dan Al yang menghasilkan fasa  $\gamma'\{Ni_3(Al,Ti)\}$  dapat dipandang sebagai baja tahan karat diperkeras endapan (*precipitation hardened (PH) stainless steel*). Paduan ini lebih baik dibanding dengan baja tahan karat austenitik seperti 304 dan 316 dalam hal ketahanan perayapan dan ketahanan oksidasi pada temperatur tinggi hingga sedikit diatas 650°C. Namun demikian, nampaknya dimasa mendatang baja akan menghadapi tantangan dari rivalnya yang terberat yaitu paduan dasar nikel untuk aplikasi pada temperatur yang semakin tinggi, misalnya pengoperasian boiler pada temperatur uap hingga 750°C, seperti ditunjukkan pada Gambar 13 dan 14, untuk memenuhi keinginan menghasilkan *power plant* dengan efisiensi lebih dari 60%.

Walaupun demikian, masih terdapat peluang untuk melakukan pengembangan baja martensitik dan bainitik berbasis khrom dengan penambahan unsur-unsur refraktori lainnya yang memiliki afinitas tinggi terhadap karbon dan nitrogen untuk membentuk berbagai variasi partikel penguat serta meningkatkan stabilitas struktur mikronya. Demikian pula untuk baja austenitik. Variasi partikel penguat dari jenis senyawa intermetalik lainnya

masih dapat dilibatkan untuk meningkatkan ketahanan perayapan pada temperatur yang semakin tinggi, sebelum memutuskan untuk menggunakan paduan berbasis nikel, karena bagaimanapun juga selain faktor lingkungan yaitu tuntutan untuk menekan serendah mungkin emisi gas CO<sub>2</sub> untuk produksi power tertentu, maka faktor ekonomi juga menjadi penentu mengingat volume tube dan pipa dalam boiler dalam suatu pembangkit listrik tenaga uap tidaklah sedikit, tidak seperti halnya yang ada dalam pembangkit listrik tenaga gas yang menggunakan turbin gas.



Gambar 13. Material untuk pipa uap utama di *power plant* (2), menunjukkan arah pergeseran pemakaian material untuk aplikasi pada temperatur dan tekanan uap yang semakin tinggi.



Gambar 14. *Creep rupture strength* 10<sup>5</sup> jam beberapa kandidat untuk material *power plant* mendatang (2).

## VI. KESIMPULAN

Berdasarkan paparan di muka dapat disimpulkan bahwa baja untuk aplikasi pada pipa *boiler power plant* telah mengalami pengembangan dari baja feritik yang sederhana, yaitu 1Cr½Mo yang hanya mampu dioperasikan untuk mendapatkan efisiensi sebesar 40% saja. Pengembangan lebih lanjut mengarah pada pemakaian baja dengan 9%Cr dan ditambah unsure-unsur pembentuk kuat karbida dan nitrida seperti Nb dan V serta penguat larutan padat martensit yaitu Mo dan W yang dapat memberikan struktur martensit dan setelah ditemper memberikan partikel-partikel endapan jenis karbida, nitrida dan karbonitrida, sehingga dapat dioperasikan pada temperatur dan tekanan yang lebih tinggi serta memberikan efisiensi hingga kira-kira 50%. Pengembangan baja austenitik yang dimodifikasi dengan unsur-unsur Co, Si, dan Al mungkin dapat meningkatkan efisiensi hingga 55%. Akan tetapi untuk mengejar target mendapatkan efisiensi sebesar 60% hingga tahun 2015 nampaknya harus mengarah pada paduan berbasis nikel yang tentu saja menjadi mahal. Walaupun demikian masih terbuka peluang untuk memperbaiki lebih lanjut baja feritik-martensitik berbasis Fe-12 Cr dan austenitik berbasis Fe-Ni yang lebih murah dari paduan nikel untuk mendapatkan target peningkatan efisiensi sehingga kekhawatiran terhadap efek rumah kaca dari emisi CO<sub>2</sub> dapat semakin diminimalisir.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Bhadeshia, H.K.D.H., Design of Ferritic Creep-Resistant Steels, ISIJ International, Vol. 41, No. 6, pp. 626-640, 2001.
2. Abe, F., High Performance Creep Resistant Steels for 21<sup>st</sup> Century Power Plants, Recrystallization and Related Phenomena, Proceeding 4-th International, Sakai, T. and Suzuki, H.G. (eds.), JIM, Sendai, 1999.
3. Ennis, P.J. and Czyrska-Filemonowicz, A., Recent Advances in Creep Resistant Steels for Power Plant Applications, OMMI, Vol. 1, No. 1, April 2002.
4. Alman, D.E., et.al., Improved Austenitic Steels for Power Plant Applications : <http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/02/materials/alman.pdf>.
5. Klotz, U.E., et a., Martensitic-Austenitic 9-12%Cr Steels-Alloy Design, Microstructural Stability and Mechanical Properties, Materials Science and Engineering A, 476, 2008.
6. Tancret, F., and Bhadeshia, H.K.D.H., An Affordable Creep-Resistant Nickel-base alloy for power plant, Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Charles Parsons Turbine Conference, Engineering Issues in Turbine Machinery, Power Plant and Renewables, Strang, A., et.al., (eds.), Institute of Materials, London, 525-535, 2003.
7. Ingo von Hagen, Bendick, W., Creep Resistant Ferritic Steels for Power Plant, [http://www.cbmm.com.br/portug/sources/techlib/science techno/table content/sub\\_4/images/pdfs/040.pdf](http://www.cbmm.com.br/portug/sources/techlib/science techno/table content/sub_4/images/pdfs/040.pdf)
8. Masuyama, F., Advanced Heat Resistant Steels for Power Generation, Vismanathan, R and Nutting, J. (eds), The Institute of Materials, London, .708, 1999.

9. Gagliano, M.S., Hack, H, and Stanko, G., Fireside Corrosion Resistance of Proposed USC Superheater and Reheater Materials, 33-th International Technical Conference on Coal Utilization and Fuel Systems, Clearwater, FL, USA, 2008.
10. Viswanathan, V., Purgert, R., and Rawls, P., Coal-Fired Power Materials, Advanced Materials and Processes, August, 2008.
11. Viswanathan, R., Damage Mechanisms and Life Assessment of High temperature Components, ASM International, Metal Park, Ohio, 1989