

**HIBAH BERSAING
Tahun Anggaran 2013**



LAPORAN AKHIR PENELITIAN

**PENELITIAN LANJUT PENGEMBANGAN METODE PERBAIKAN BLOK MESIN DAN
KEPALA SILINDER (*CYLINDER HEAD*) UNTUK MENINGKATKAN PERFORMANSI,
KEANDALAN, DAN DAYA SAING**

Tim Peneliti:

**Dr. Ir. Muki Satya Permana (Ketua Tim)
Prof. Dr. Ir. Rochim Suratman (Anggota)
Dr. Ir. Budi Hartono Setiamarga (Anggota)**

**UNIVERSITAS PASUNDAN
DESEMBER 2013**

**Dibiayai oleh DIPA Kopertis Wilayah IV Kementerian Pendidikan dan Kebudayaan
sesuai dengan Surat Perjanjian Pelaksanaan Hibah Penelitian
Nomor: 0257/K4/KL/2012 tanggal 6 Februari 2012**

DAFTAR ISI

	Halaman
PROFIL PROGRAM PENELITIAN	iii
ABSTRAK	iv
I. PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Tujuan	2
1.3 Lingkup	3
II. STUDI PUSTAKA & STUDI PENDAHULUAN//HASIL YANG SUDAH DICAPAI	5
2.1 STUDI PUSTAKA	5
METODE-METODE PERBAIKAN YANG TELAH DIKEMBANGKAN	6
2.2.1 Las Busur Listrik	6
2.2.2 <i>Oxyfuel Welding</i>	7
2.2.3 Metode <i>Ultrasonic Inset Casting</i>	7
2.2.4 <i>Metallock and Stitch</i>	8
2.2.5 <i>Friction Welding</i>	9
2.2.6 <i>Discharge Joining</i>	9
2.2 URAIAN TENTANG KEBAHARUAN DALAM BIDANG PENELITIAN	11
2.3 STUDI PENDAHULUAN & HASIL YANG SUDAH DICAPAI	12
Penjelasan Metode-metode Perbaikan.....	6
2.3.1 Metode Pouring	12
2.3.2 Metode Powder Filling	13
2.3.3 Metode Droplet Spray	17
2.3.4 Metode Turbulence Flow Casting	17
III METODE PENELITIAN	21
IV HASIL YANG TELAH DICAPAI DAN PEMBAHASAN	24

	Modul Pelatihan Perbaikan Cacat dengan Menggunakan Metode TFC.....	24
V.	KESIMPULAN.....	31
VI.	RESUME PELAKSANAAN KEGIATAN PENELITIAN.....	32
VII.	DAFTAR PUSTAKA	42

PROFIL PROGRAM PENELITIAN

1. Judul Penelitian:
PENELITIAN LANJUT PENGEMBANGAN METODE PERBAIKAN BLOK MESIN DAN KEPALA SILINDER (*CYLINDER HEAD*) UNTUK MENINGKATKAN PERFORMANSI, KEANDALAN, DAN DAYA SAING

2. Ketua Peneliti
 - a) Nama Lengkap : Dr. Ir. Muki Satya Permana
 - b) Jenis Kelamin : Laki-laki
 - c) NIP : 151.100.85
 - d) Jabatan Struktural : Koordinator Laboratorium
 - e) Jabatan Fungsional : Lektor Kepala
 - f) Fakultas/Jurusan : Teknik/Teknik Mesin
 - g) Pusat Penelitian : Lemlit – Universitas Pasundan
 - h) Alamat : Jurusan Teknik Mesin, Universitas Pasundan,
Jl. Setiabudi 193, Bandung-40153.
 - i) Telepon/Faks : (022) 2019352/(022) 2019329
 - j) Alamat Rumah : Jl. Puskesmas 44 (Terusan Buah Batu)
Bandung
 - k) Telpon/Faks/E-mail : 081320699949/-/mkpermana@yahoo.com

3. Jangka Waktu Penelitian : 3 tahun

4. Pembiayaan
 - a. Jumlah biaya yang diajukan ke Dikti : Rp. 147.520.000,-
 - b. Jumlah biaya tahun ke 3 : Rp. 49.200.000,-
Biaya tahun ke 3 yang diajukan ke Dikti : Rp. 49.200.000,-
Biaya tahun ke 2 dari Institusi Lain : Rp. -

Bandung, 1 September 2013
Dekan FT – UNPAS

Ketua Peneliti,

Dr. Ir. Yudi Garnida, MS
NIY: 151. 102. 29

Dr. Ir. Muki Satya Permana, MT
NIY : 151 100 85

ABSTRAK

Pembangkit listrik tenaga diesel (PLTD) di Indonesia menggunakan mesin diesel yang berjumlah sekitar 23.500 unit dan harganya mencapai ratusan juta rupiah per unit. Pada awalnya komponen-komponen yang rusak saat beroperasi diganti dengan yang baru. Mengingat volume komponen yang sangat besar dan tingginya biaya produksi maka proses perbaikan komponen mulai dipandang sebagai solusi yang sangat menguntungkan. Proses perbaikan pada komponen besi cor selama ini menggunakan pengelasan SMAW dan *Flame Spray*, namun cara ini mengandung resiko yang tinggi karena sangat rentan terhadap retak.

Tujuan jangka panjang dari penelitian ini adalah menerapkan metode perbaikan yang bermanfaat baik bagi industri maupun masyarakat luas. Tujuan khususnya adalah menyusun SOP perbaikan, mengusulkan standar perbaikan melalui SII, dan hak paten. Untuk mencapai tujuan tersebut, diajukan metode penyelesaian masalah secara eksperimen yang mempertimbangkan aspek-aspek perpindahan panas, aspek beban kerja, desain material dan proses, pengembangan alat, serta otomatisasi proses.

Penelitian ini merupakan kelanjutan dari penelitian terdahulu yaitu pengembangan metode baru perbaikan komponen sejak tahun 2003. Penelitian lanjutan ini direncanakan berlangsung selama tiga tahun. Di tahun pertama, kegiatan diitik-beratkan pada penentuan metode *preheat*, tahun kedua melakukan perbaikan komponen *cylinder head* PT PLN (Persero) dan di tahun ketiga melakukan uji komponen *cylinder head* di lapangan hasil perbaikan di tahun kedua.

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Penelitian yang diusulkan pada hibah bersaing ini merupakan penelitian lanjutan dari hasil-hasil penelitian terdahulu tentang Pengembangan Perbaikan Cacat Permukaan pada Komponen yang Terbuat dari Besi Cor Kelabu. Penelitian ini telah berhasil melahirkan metode baru yang diberi nama TFC (*Turbulence Flow Casting*). Sebagai gambaran, keuntungan penerapan metode TFC dibandingkan dengan metode konvensional (SMAW dan *Flame Spray*) adalah metode ini mampu menghasilkan kualitas sambungan yang serupa dengan logam induk. Biaya penghematan produksi dengan metode TFC sebesar 95% dan waktu perbaikan relatif cepat yaitu dapat memperbaiki 10 komponen bahkan lebih dalam waktu satu hari. Sedangkan perbaikan dengan metode konvensional memiliki kelemahan yaitu kualitas sambungan yang relatif rendah karena terjadi retak dan sambungan yang rapuh.

Hasil penelitian terdahulu telah memberikan kontribusi yang sangat berharga terutama bagi industri manufaktur di Indonesia. Terlebih lagi, hasil penelitian ini dapat diajukan untuk memperoleh hak paten dan dapat diusulkan pula untuk dijadikan standar perbaikan SII di Indonesia. Namun demikian, penyempurnaan proses TFC masih harus dilakukan mengingat aspek praktis ke arah aplikasi industri dan keterulangan proses (*reproduceability*) masih harus diuji dan dibuktikan kebenarannya. Oleh sebab itu, maka masalah yang ingin dipecahkan dalam usulan penelitian ini adalah bagaimana membangun metode *preheat* untuk berbagai komponen komersial di industri dengan menggunakan metode baru TFC sehingga laju pendinginan rendah dan memiliki kualitas sambungan yang sama dengan komponen awal.

Strategi penyelesaian masalah dilakukan melalui kaji ekperimental. Pendekatan ekperimental dititikberatkan pada upaya pencapaian ide yang dituangkan dalam bentuk alternatif rancangan proses *preheat* dan penentuan selubung (*cover*) yang mampu menahan laju perpindahan panas ke lingkungan serendah mungkin. Pencarian solusi atas masalah ini akan dilakukan dengan mengambil kasus di PLTD (Pembangkit Listrik Tenaga Diesel) Indonesia berupa komponen *cylinder head* sebagai bahan kajian. Hal ini dilakukan agar hasil penelitian ini dapat langsung diuji dan diterapkan di lapangan.

1.2 Tujuan

Tujuan jangka panjang dari penelitian yang diusulkan antara lain : 1) memperoleh dan mengerti pengetahuan dalam analisis dan proses perbaikan komponen blok mesin dan kepala silinder atau komponen mesin yang sejenis (sejenis dalam material dan proses pembuatan), 2) mengembangkan metodologi perbaikan komponen blok mesin dan kepala silinder untuk mempertajam kriteria perbaikan kerusakan pada blok mesin dan kepala silinder atau komponen mesin yang sejenis (sejenis dalam material dan proses pembuatan).

Lebih spesifik lagi, tujuan jangka pendek dari penelitian yang diusulkan adalah :

1. Mereview karakteristik mekanik material komponen blok mesin dan kepala silinder atau komponen yang sejenis (sejenis dalam material dan proses pembuatan),
2. Menentukan modus kerusakan pada komponen blok mesin dan kepala silinder,
3. Menentukan parameter-parameter proses perbaikan terhadap cacat permukaan pada komponen blok mesin dan kepala silinder,
4. Mengembangkan prototipe percobaan perbaikan komponen dengan sasaran pengaturan parameter-parameter perancangan, manufaktur dan perbaikan, misalnya parameter temperatur & waktu preheat, dan waktu pencairan,
5. Melakukan rancang-bangun metode *preheat & covering* yang ditujukan pada penurunan laju pendinginan,
6. Penerapan metode perbaikan pada komponen blok mesin dan kepala silinder dan komponen komersial lainnya,
7. Melakukan pengujian di lapangan,
8. Mengembangkan “*framework*” untuk penelitian yang akan datang dalam bidang perbaikan komponen mesin sehingga diperoleh metode perbaikan yang lebih efisien, hasilnya lebih baik dan lebih mudah dilakukan,
9. Publikasi ilmiah dalam Jurnal Nasional dan Jurnal Internasional,
10. Mengusulkan standar perbaikan melalui SII, dan
11. Mengusulkan untuk memperoleh paten (HKI).

1.3 Lingkup

Penelitian ini merupakan bagian dari program peningkatan kualitas penelitian dan peningkatan kualitas dosen di Jurusan Teknik Mesin Universitas Pasundan. Lingkup luas dari penelitian ini meliputi baik aspek teori maupun aspek praktis dari metode perbaikan komponen blok mesin dan kepala silinder yang meliputi aspek analisis sistem beban pada blok mesin & kepala silinder, analisis material, analisis kekuatan, dan kegagalan yang terjadi, sebagai bagian dari aktivitas akademik.

Keuntungan yang akan diperoleh dari penelitian yang diusulkan adalah dapat meningkatkan kemampuan analisis, perancangan, manufaktur dan aplikasi dari metode perbaikan komponen blok mesin dan kepala silinder, sekaligus dapat mengusulkan standar SII untuk perbaikan komponen blok mesin dan kepala silinder yang memang sangat banyak jumlahnya. Hasil lain dari penelitian ini dapat dimanfaatkan dan dapat meningkatkan kemampuan IKM dalam melaksanakan perbaikan komponen blok mesin dan kepala silinder. Hasil penelitian ini akan dipublikasikan dalam seminar dan journal ilmiah.

Sebagai refleksi dari sasaran di atas, terlihat bahwa penelitian yang diusulkan sangat potensial untuk mengembangkan iklim akademis, kualitas penelitian, peningkatan kualitas penelitian dosen khususnya di bidang teknik mesin, manufaktur dan material.

Dari kedalaman dan lingkup penelitian yang dijelaskan di atas, penelitian yang diusulkan sangat potensial untuk dijadikan penelitian bersama antara perguruan tinggi dan industri.

Dari tujuan yang diuraikan di atas terlihat jelas bahwa penelitian ini akan :

1. Menghasilkan terobosan baru dalam ilmu pengetahuan dan teknologi, khususnya pada bidang perbaikan komponen blok mesin dan kepala silinder atau komponen mesin yang sejenis (sejenis dalam material dan beban yang dialami)
2. Meningkatkan kemampuan dan mutu pendidikan di bidang teknik mesin
3. Meningkatkan mutu penelitian di Jurusan Teknik Mesin Universitas Pasundan

Dengan demikian maka beberapa keutamaan dari rencana penelitian ini adalah :

- a. Mengembangkan proses perbaikan yang secara praktis dapat diterapkan di lapangan.
- b. Mengurangi masuknya produk impor dan mengurangi pengeluaran devisa negara khususnya di industri-industri pemerintah seperti PT. PLN (Persero) dan PT. PINDAD (Persero).

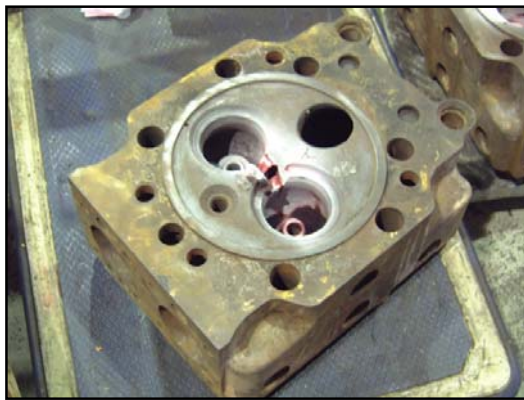
- c. Mengusulkan standar SII untuk perbaikan komponen blok mesin dan *cylinder head* yang jumlahnya cukup banyak.
- d. Hasil dari penelitian ini dapat dimanfaatkan untuk meningkatkan kemampuan IKM dalam melaksanakan perbaikan komponen-komponen yang terbuat dari besi cor kelabu.
- e. Membuka gerbang baru teknik perbaikan dan memberikan sumbangan yang sangat berharga dalam meningkatkan efisiensi produksi.
- f. Terbuka lebar bagi peneliti, praktisi maupun instansi seperti B4T untuk memberikan pelatihan yang berguna bagi semua pihak yang berkepentingan dan merupakan ajang pertukaran informasi di bidang ilmu pengetahuan dan teknologi baik di dalam maupun di luar negeri.
- g. Menjelaskan fenomena metalurgi yang terjadi di daerah sambungan sebagai terobosan baru dalam perbaikan welding untuk memperbaiki metode lama yang selama ini sudah dikembangkan.

II. STUDI PUSTAKA & STUDI PENDAHULUAN/HASIL YANG SUDAH DICAPAI

2.1 STUDI PUSTAKA

Besi cor kelabu adalah besi yang dipadukan dengan 2 – 4.5% unsur karbon dan 1 – 3% unsur silikon. Struktur mikronya mengandung grafit serpih bercabang-cabang seperti ranting pohon yang berada pada matriks ferit, perlit, atau campuran keduanya.

Gambar 1 memperlihatkan komponen *cylinder head* yang mengalami kerusakan di antara dua buah lubang klep.



(a)



(b)



(c)

Gambar 1. Kerusakan pada *cylinder head*, terbentuk rongga diantara dua lubang klep. (a). Sebelum diperbaiki, (b). Rongga diperbesar dengan menambahkan saluran air, (c). Setelah diperbaiki dengan pengelasan SMAW dan lubang dihaluskan dengan proses bubut dalam.

Kerusakan ini terjadi akibat terhambatnya aliran air pendingin oleh kotoran di dalam mesin. Selanjutnya daerah tersebut mengalami *overheat* dan membentuk cacat rongga akibat kikisan aliran fluida kerja berupa gas dari dan ke dalam ruang bakar.

METODE-METODE PERBAIKAN YANG TELAH DIKEMBANGKAN

1. Las busur listrik,
2. Las Oksi-asetilen dan Flame Spray
3. Ultrasonic insert casting.
4. Metallock & Stitch
5. Friction Welding
6. Discharge Joining

2.1.1 Las busur listrik

Kiser dan Irving [19], membuat perbandingan empat jenis proses pengelasan dan tiga diantaranya termasuk kedalam kategori las busur listrik yaitu SMAW, GMAW, dan FCAW. Dari tabel 1 dibawah, besi cor kelabu ditandai oleh garis terputus-putus. Semua metode las busur listrik yang ada, penggunaannya sangat terbatas (*limited*) bahkan ada yang tidak direkomendasikan. Sekalipun las listrik SMAW lebih umum digunakan, namun pemakaiannya dibatasi mengingat heat input yang tinggi dan kompensasi elongation sangat rendah, antara 0 dan 2%. Hal ini berarti daerah sambungan sangat rentan terhadap retak dan adanya perubahan kecilpun, akibat penyusutan, tidak diinginkan.

Tabel 1. Penggunaan las busur listrik dan las gas untuk berbagai jenis besi cor dan pengaruhnya terhadap weldability.[19]

Matrix (microstructure)	Graphite Morphology (form)	Approximate % Elongation	Weldability			
			OFW	SMAW	GMAW	FCAW
Cementite (white iron)	none	0	no	no	no	no
Martensite	none	0	no	no	no	no
Pearlite	flakes	0	yes	limited	no	no
Pearlite/Ferrite	spheroids	2-4	yes	limited	no	no
	flakes	0	yes	limited	limited	limited
	rosettes	4-6	yes	yes	limited	limited
Ferrite	spheroids	6-15	yes	yes	yes	yes
	flakes	1-2	yes	limited	limited	limited
	rosettes	8-12	yes	yes	yes	yes
	spheroids	18-22	yes	yes	yes	yes

Ket.: OFW = Oxyfuel Welding, SMAW = Shielded Metal Arc Welding,
GMAW = Gas Metal Arc Welding, FCAW = Flux Core Arc Welding.

Tingginya heat input dengan menggunakan las busur listrik karena demikian hebatnya tumbukan elektron pada sisi anoda, menyebabkan kutub ini menjadi lebih tinggi temperaturnya dibanding katoda.[2,21] Beberapa literatur menyebutkan temperatur katoda berkisar 3800°C dan anoda sekitar 5000°C . [4,5,20] Kenyataannya temperatur tersebut bisa lebih tinggi tergantung dari jenis elektroda, gas pelindung, dan selang arus yang digunakan. [11,12]

2.1.2 *Oxyfuel Welding*

Dari tabel 1, *oxyfuel welding* (Las Oksi-asetilen dan Flame Spray) memberikan hasil yang paling baik. Namun pengelasan yang diterapkan dengan cara ini, masih melibatkan pencairan logam induk yang berarti masih menghasilkan penggetasan di daerah sambungan. Selain itu pengelasan dengan OFW, hanya digunakan untuk memperbaiki cacat yang relatif kecil.[22]

Salah satu teknik pengelasan dalam kategori OFW adalah las oksiasetilen. Las oksiasetilen memberikan peluang yang paling baik karena laju pemanasan dan pendinginan relatif rendah dibandingkan dengan las busur listrik sehingga dapat mengurangi terbentuknya martensit dan fissures.[13,22]

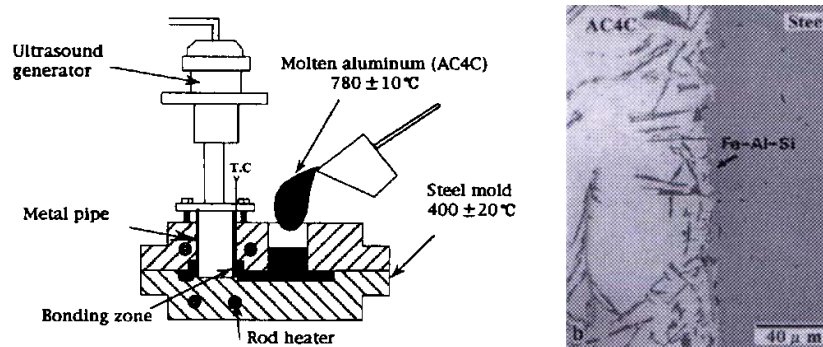
Temperatur di ujung api las (dekat torch) hanya sekitar 3200°C dan temperatur di benda kerja yang mencair sekitar 1600°C . [22] Namun begitu, semua perbaikan yang melibatkan dilusi tidak dapat menjamin sambungan terbebas dari efek penggetasan. Oleh karena itu dalam usulan penelitian ini, peralatan las oksiasetilen akan dimodifikasi dengan menambah peralatan tambahan. Api las dari teknik ini akan dimanfaatkan untuk mencairkan logam pengisi sehingga pengisian weldpool seolah-olah mirip dengan penuangan logam cair ke rongga cacat. Proses penyambungan ini bersamaan dengan adanya tekanan hembusan gas oksiasetilen ke dalam logam cair.

2.1.3 *Metode Ultrasonic Insert Casting*

Metode perbaikan dengan cara penuangan telah dikembangkan oleh Pan & Co-workers pada tahun 2000, yaitu dengan menggunakan metode *Ultrasonic insert casting* (gambar 3a).[7] Metode ini tidak melibatkan adanya pencairan logam induk. Proses perbaikan, dilakukan dengan menuangkan logam cair ke permukaan cacat dan selama itu dibangkitkan getaran ultrasonik (high-power ultrasound). Getaran ultrasonik digunakan untuk menghilangkan *oxide-layer* yang timbul akibat panas yang terbawa oleh logam cair saat penuangan ke permukaan cacat dilakukan.

Metode ini masih mempunyai kelemahan karena tidak mudah diterapkan di lapangan (no practicable), relatif mahal, belum pernah diterapkan pada besi cor, dan dimensi cacat permukaan yang dapat diperbaiki relatif kecil.

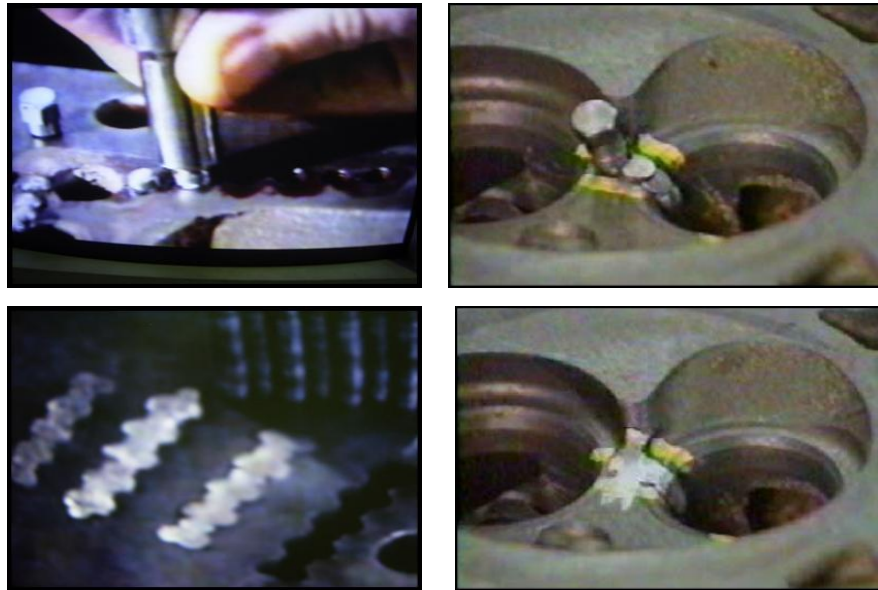
Struktur mikro yang terlihat pada gambar 3b, adalah contoh perbaikan cacat pada baja dengan menuangkan logam cair aluminium. Contoh ini merupakan gambaran interface yang terbebas dari fusion zone dan HAZ. Fenomena ikatan yang terjadi pada besi cor kelabu diperkirakan akan lebih kompleks karena grafit mudah berdifusi pada temperatur tinggi. Bila laju pendinginan tinggi maka fenomena penggetasan dapat terjadi sebagaimana terjadi pada pengelasan SMAW.



Gambar 3. a. Sketsa metode perbaikan dengan menggunakan metode ultrasonic insert casting
b. Struktur mikro, memperlihatkan sambungan di interface.[7]

2.1.4 Metallock and Stitch

Metode ini menggunakan penyambungan dengan cara mekanik yaitu dengan memberikan logam isian yang di-insert langsung ke daerah cacat. Metode ini mempunyai kelemahan karena sebenarnya proses perbaikan ini tidak memberikan efek penyambungan antara logam induk dengan logam pengisi. Ilustrasi proses perbaikan dengan cara ini diperlihatkan pada gambar 4.



Gambar 4. Perbaikan dengan menggunakan metode *Metallock and Stitch*

2.1.5 Friction Welding

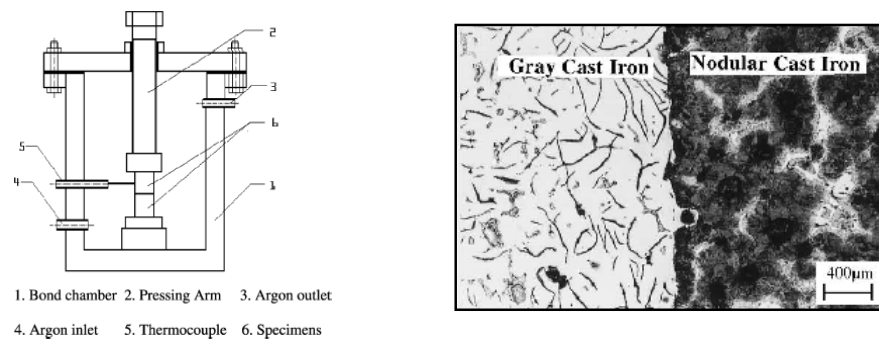
Proses penyambungan dengan metode ini dilakukan dengan cara menekan material yang akan disambung dan diberi putaran hingga terjadi gesekan dan timbul panas. Shinoda *et al.* (1996) menjelaskan bahwa metode *Friction Welding* dapat diterapkan pada penyambungan besi cor sejenis maupun tak sejenis (*dissimilar welding*) sekalipun tanpa pemberian *preheat*. Pada percobaan ini Shinoda mencoba melakukan penelitian penyambungan besi cor dengan baja tahan karat austenitik. Dari percobaan tersebut disimpulkan bahwa penyambungan antara FCD 450 dengan SUS 304 menghasilkan sambungan yang baik tanpa menghasilkan porositas dan penggetasan. Kekuatan tarik sambungan bervariasi antara 100 MPa hingga 450 MPa tergantung pada parameter proses yang diterapkan yaitu tekanan, putaran dan waktu proses.

2.1.6 Discharge Joining

Sebagai pengganti proses las dalam penyambungan besi cor, Ozdemir *et al.* (2003) telah mengembangkan metode penyambungan besi cor kelabu dengan besi cor nodular secara

diffusion bonding. Pada prinsipnya spesimen yang akan disambung dipanaskan pada temperatur antara 900-1000⁰C kemudian diberi tekanan sebesar 15 MPa selama 50 – 150 menit di dalam lingkungan gas argon. Sketsa peralatan percobaan dan struktur mikro hasil penyambungan ditunjukkan pada gambar 5.

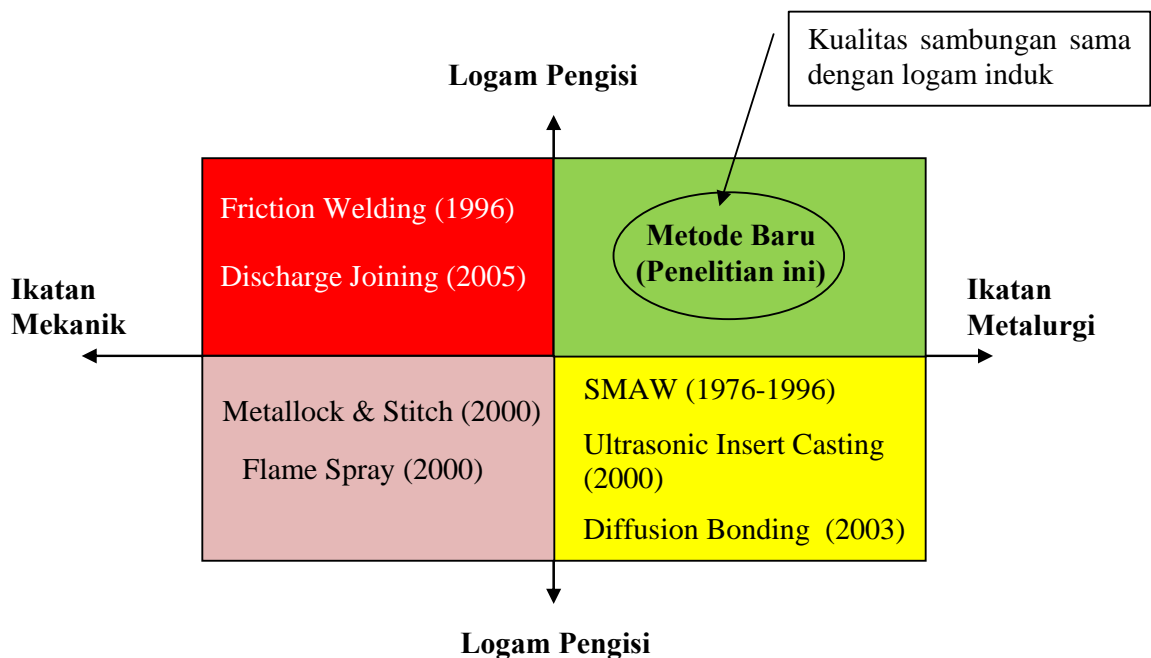
Metode ini cocok khususnya bagi logam-logam yang tidak dapat disambung secara konvensional yaitu dengan mencairkan logam seperti pada proses pengelasan. Hanya saja kelemahan metode ini adalah sulit untuk menyambungkan komponen-komponen besar dan disamping sulit melakukan pengujian secara merusak.



Gambar 5. a. Sketsa proses perbaikan dengan menggunakan metode *Discharge Joining*, Ozdemir *et al.* (2003).
b. Struktur mikro di *interface* hasil perbaikan.

2.2 URAIAN TENTANG KEBAHARUAN DALAM BIDANG PENELITIAN

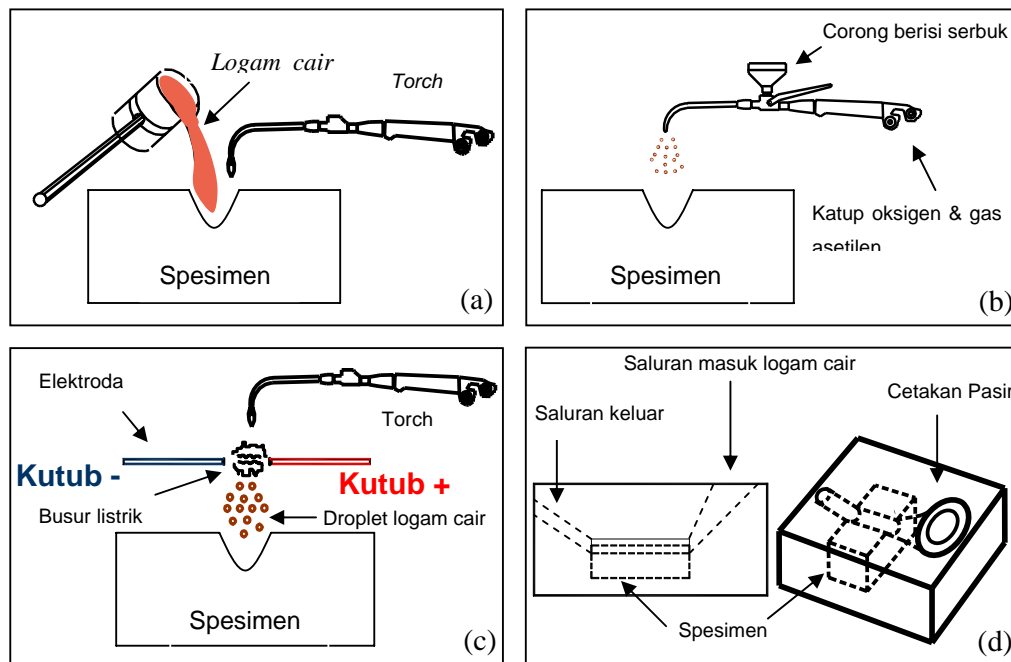
Dari sejumlah literatur dan journal (dalam & luar negeri), belum ditemukan adanya metode yang dapat menghasilkan ikatan metalurgi yang baik dan mempertahankan kesamaan sifat serta originalitas material antara logam pengisi/elektroda dengan logam induk besi cor kelabu. Dengan demikian, posisi penelitian yang diusulkan yang berkaitan dengan metode baru penyambungan komponen besi cor kelabu ini merupakan kebaruan dari hasil penelitian ini. Posisi penelitian ini dapat digambarkan melalui diagram sebagaimana terlihat pada gambar 6.



Gambar 6. *State of the art* dari penelitian yang diusulkan

2.3 STUDI PENDAHULUAN DAN HASIL YANG SUDAH DICAPAI

Penelitian terdahulu telah berhasil membangun empat buah metode yaitu metode-metode *Pouring*, *Powder Filling*, *Droplet Spray* dan *Turbulence Flow Casting (TFC)*. Sketsa proses perbaikan dengan menggunakan metode-metode tersebut di atas dapat dilihat pada gambar 7. Satu diantaranya telah memenuhi tujuan penelitian yaitu metode *TFC* dan sketsa proses *TFC* yang lebih jelas dapat dilihat pada gambar 10.



Gambar 7. Alternatif proses perbaikan hasil studi pendahuluan.

(a). Metode *Pouring*, (b). Metode *Powder Filling*,

(c). Metode *Droplet Spray*, (d). Metode *Turbulence Flow Casting*

Penjelasan Metode-metode Perbaikan

2.3.1 Metode *Pouring*

Proses perbaikan dengan menggunakan metode *pouring* dilakukan dengan cara menuangkan besi cor cair ke permukaan rongga cacat. Besi cor cair tersebut diperoleh dari bongkahan kecil besi cor kelabu yang dicairkan didalam tungku induksi berkapasitas 5 kg (Laboratorium Teknik

Metalurgi, Program Studi Teknik Mesin ITB). Sketsa perbaikan dengan metode *pouring* ditunjukkan pada gambar 7a.

Bahan Baku dan Peralatan (Metode *Pouring*)

- (1) Tungku Induksi dan Las Oksi-asetilen
- (2) Sistem pemanas (kompor dan bata tahan api) untuk pemberian pemanasan mula (*preheat*)
- (3) Termometer digital & termokopel
- (4) Anti-oksidan jenis boraks

Urutan langkah eksperimen pada metode *pouring*

- a. Siapkan spesimen IV
- b. Siapkan tungku pemanas untuk pemberian *preheat*
- c. Letakan spesimen diatas tungku pemanas
- d. Taburkan boraks di permukaan cacat
- e. Pemberian pemanasan mula di permukaan cacat dibantu dengan menggunakan *torch* oksiasetilen bersamaan dengan memanaskan boraks hingga mencair.
- f. Setelah permukaan cacat mencapai temperatur 900°C, tuangkan besi cor cair ke rongga cacat.
- g. Pemanasan dari *torch* oksiasetilen diteruskan selama 1 jam.
- h. Proses diatas diulang untuk berbagai temperatur permukaan cacat hingga permukaannya mencair.

2.3.2 Metoda *Powder Filling*

Metode ini telah dikembangkan dan digunakan oleh berbagai kalangan khususnya di industri manufaktur. Pada penelitian ini, metode *Flame Spray* dimanfaatkan kembali dan dikembangkan lebih lanjut karena prinsip pengisian rongga cacat mirip dengan cara penuangan. Pengembangan metode dilakukan dengan cara mengatur parameter proses dan menggunakan logam pengisi yang sejenis dengan logam induk. Serbuk besi cor kelabu dibuat sendiri dengan proses penggerindaan dan alat *Centrifugal Atomizer*.

Prinsip pengisian rongga cacat dilakukan dengan mencairkan serbuk logam langsung ke permukaan cacat dengan bantuan *torch* oksiasetilen yang dilengkapi dengan *powder cup*. Sketsa proses *Powder Filling* ditunjukkan pada gambar 7b.

Bahan Baku dan Peralatan *Powder Filling*

Bahan baku dan peralatan yang digunakan pada eksperimen *Powder Filling* adalah :

- a. Las Oksi-asetilen
- b. Sistem pemanas (kompor dan bata tahan api) untuk proses *preheat*
- c. Thermometer digital & termokopel
- d. Serbuk besi cor kelabu dan serbuk nikel
- e. Boraks, asam boriks, natrium fosfat, fluks silikon

Proses Pembuatan Serbuk Besi Cor Kelabu

Banyak kendala yang dihadapi ketika membuat serbuk dari besi cor kelabu. Kriteria serbuk yang digunakan harus berbentuk bulat dan mempunyai angka kehalusan butir tertentu dengan komposisi sebesar 67 GFN sebanyak 70%, 150 GFN sebanyak 20%, dan 210 GFN sebanyak 10%. Untuk membuat serbuk dengan kriteria diatas memerlukan mesin khusus *atomizer*. Untuk membuktikan keberhasilan perbaikan dengan metode *Powder Filling*, dalam eksperimen ini telah dicoba membuat serbuk dengan menggunakan proses sederhana yaitu proses penggergajian, proses *drilling*, proses atomisasi sentrifugal.

Pembuatan Serbuk dengan Proses Penggergajian

Ukuran gergaji yang digunakan untuk membuat serbuk ini ada dua jenis, yaitu :

- a. Gergaji ukuran ½ in untuk gergaji manual. Serbuk yang dihasilkan cukup halus. Kekurangan dari penggergajian manual ini memerlukan waktu yang cukup lama.
- b. Gergaji ukuran 1½ in menggunakan mesin. Serbuk yang dihasilkan kasar dan memerlukan beberapa kali penyaringan. Kelebihan dari penggergajian ini waktu yang diperlukan lebih singkat.

Pembuatan Serbuk dengan Proses *Drilling*

Bongkahan FC-25 dilubangi dengan menggunakan pahat *drill* pada berbagai ukuran, diantaranya ukuran 10 mm dan 12 mm. Gambar III.4 memperlihatkan serbuk hasil proses *drilling*.



Bongkahan besi cor kelabu



Serbuk hasil gergaji & *drilling*

Gambar 8. Bongkahan besi cor kelabu dan serbuk hasil proses penggergajian dan *drilling*

Gerak makan dan gerak potong *drill* tersebut divariasikan sesuai dengan ukuran serbuk yang dihasilkan, kasar atau halus. Kelebihan dari cara ini, serbuk FC-25 dapat dihasilkan dengan waktu yang relatif singkat dan kehalusan yang maksimal.

Proses pembuatan serbuk dengan proses Atomisasi

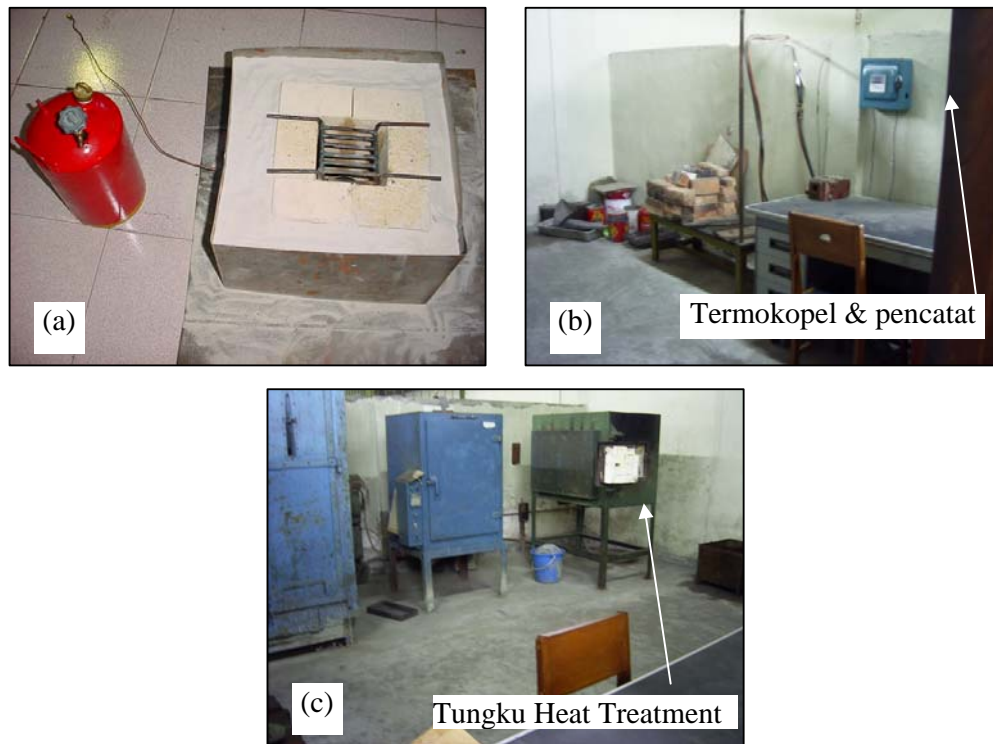
Atomisasi adalah salah satu teknik pembuatan serbuk logam dimana logam cair yang terbuat dari material yang diinginkan dihamburkan atau didisintegrasikan menjadi butiran-butiran yang kemudian membeku menjadi serbuk. Dengan demikian proses atomisasi terdiri dari dua tahapan proses, yaitu pencairan logam kemudian penghamburan cairan logam tersebut menjadi serbuk.

Benda kerja yang terbuat dari besi cor kelabu (material yang akan dijadikan serbuk) dihubungkan ke kutub positif mesin las listrik melalui sikat karbon, sehingga benda kerja tersebut berfungsi sebagai anoda. Sedangkan batang tungsten dihubungkan ke kutub negatif mesin las oleh pemegang elektroda mesin las busur listrik sehingga batang tungsten tersebut berfungsi sebagai katoda. Benda kerja merupakan elektroda terumpan yang akan cair sewaktu terjadi busur listrik. Selanjutnya, benda kerja diputar dengan kecepatan antara 1000 sampai dengan 5000 rpm oleh motor listrik. Pembuatan serbuk dengan cara atomisasi dinyatakan gagal karena serbuk yang dihasilkan masih terlalu besar. Untuk itu maka perlu dilakukan penelitian khusus untuk mendapatkan ukuran serbuk sesuai dengan yang diinginkan.

Peralatan Pendukung yang Digunakan pada Eksperimen *Powder Filling*

Peralatan pendukung yang digunakan, antara lain :

- (1) Dua buah tabung yang berisi gas oksigen dan oksiasetilen
- (2) Tungku *preheat*
- (3) Termokopel
- (4) Tungku *Heat-Treatment* dan peralatan *safety guard* pengelasan



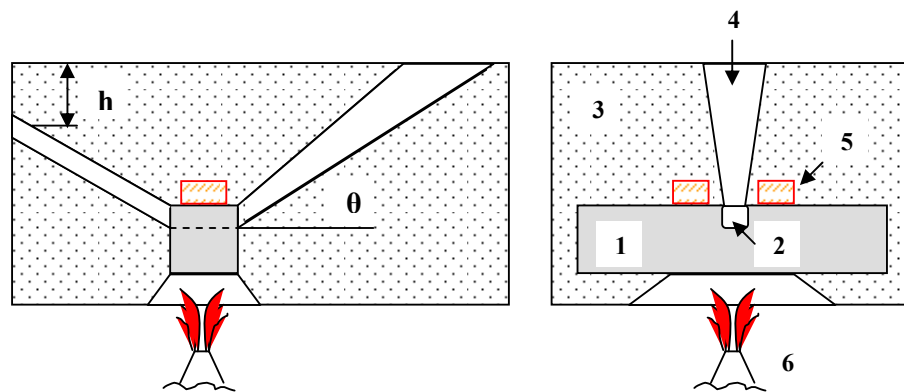
Gambar 9. Peralatan pendukung proses perbaikan dengan menggunakan *Powder Filling*. (a). Tungku *preheat*, (b). Termokopel dan pencatat, (c). Tungku *heat treatment*

2.3.3 Metode *Droplet Spray*

Metode *Droplet Spray* pertama kali diilhami oleh metode *Powder Filling* yang menyemburkan serbuk besi cor kelabu ke permukaan cacat. Pada metode ini, serbuk logam digantikan oleh tetesan logam yang juga disemburkan ke permukaan cacat. Diharapkan semburan tetesan logam cair (*molten metal droplet*) akan mempermudah penyambungan karena temperatur awal *droplet* sudah tinggi. Semburan terjadi karena adanya dorongan gas dari api las oksiasetilen ke bagian penghasil *droplet*. Tetesan logam cair dihasilkan oleh adanya loncatan listrik dari dua buah elektroda yang dipasang pada dua buah kutub yang berbeda. Kedua kutub elektroda diperoleh dengan memanfaatkan transformator las busur listrik pada arus yang tinggi. Sketsa proses tersebut diperlihatkan pada gambar 7c.

2.3.4 Metode *Turbulence Flow Casting*

Proses perbaikan dengan metode *Turbulence Flow Casting* mirip dengan proses pengecoran. Bedanya pada proses ini logam cair yang masuk kedalam cetakan dibiarkan mengalir keluar sehingga logam cair terbuang. Spesimen berada didalam cetakan dimana logam cair mengalir di permukaan cacat. Produk yang diinginkan dari proses ini adalah sisa logam cair yang tidak ikut terbuang dan membeku sebagai *weld pool* di rongga cacat. Logam cair dituangkan kedalam cetakan melalui saluran masuk, mengalir melalui permukaan cacat dan keluar cetakan melalui saluran keluar dan sisanya membeku di permukaan cacat sebagai *weld pool*. Sketsa proses perbaikan dengan metode *Turbulence Flow Casting* ditunjukkan pada gambar 7d dan 11.



Gambar 10. Sketsa proses perbaikan dengan metode *Turbulence Flow Casting*
(1). Spesimen besi cor kelabu, (2). Rongga cacat, (3). Cetakan pasir
(4). Saluran masuk/keluar, (5). Pemanas listrik, (6). Pemanas api

Bahan Baku dan Peralatan yang digunakan pada Proses *Turbulence Flow Casting*

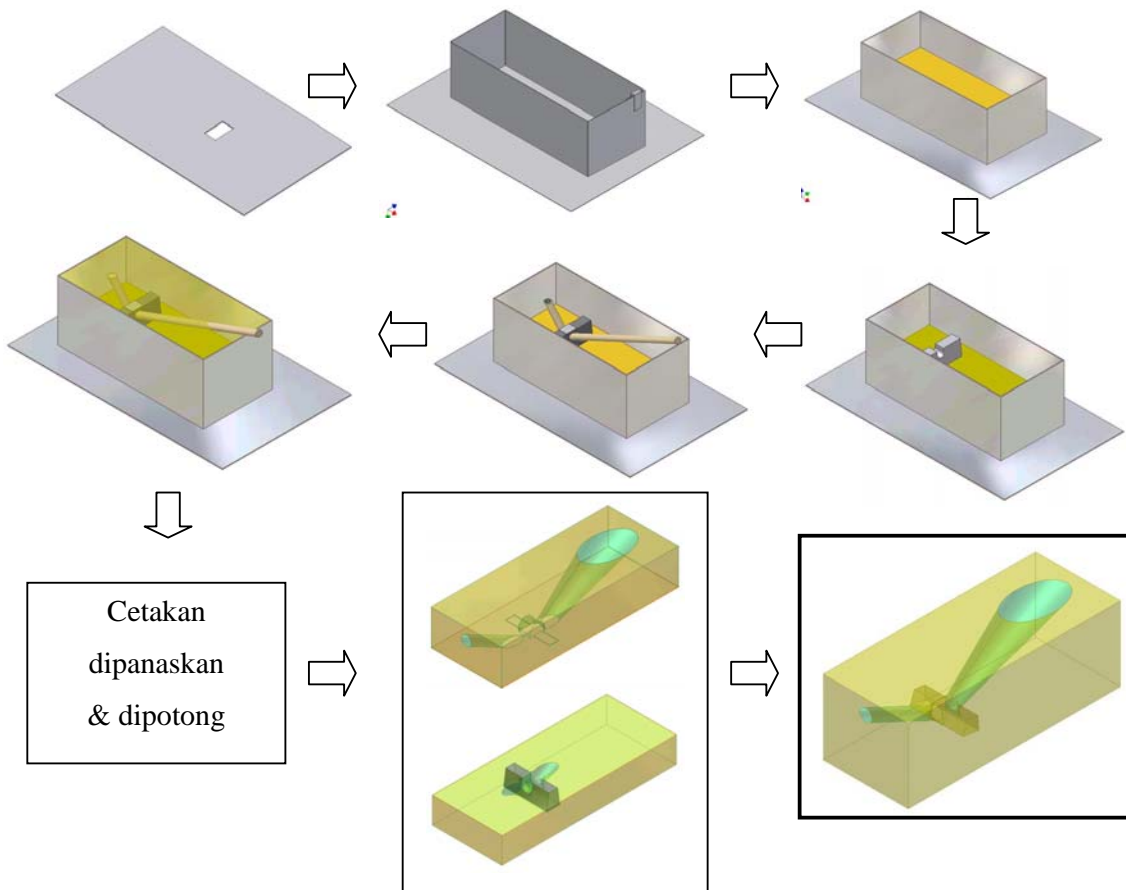
Bahan baku dan peralatan yang digunakan antara lain RCS (*Resin Coated Sand*), pasir silika (*Green Sand*), tungku *heat treatment*, pola kayu, cetakan dan alas, perlengkapan las oksiasi-asetilen, kompor gas, tungku Induksi kapasitas 500 kg (PT. Baramulti Metalika, Rancaekek-Bandung dan PT. Pindad (Persero), Bandung)

Proses Pembuatan Cetakan

Dalam pembuatan cetakan, jenis yang digunakan adalah pasir RCS (*Resin Coated Sand*) dan pasir silika.

a. Cetakan dari pasir RCS - J 8300

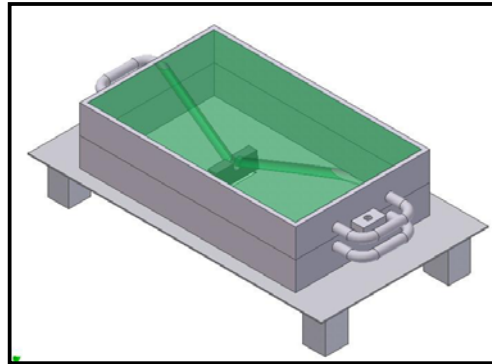
- Sediakan alas berlubang
- Siapkan flask & letakan diatas alas
- Isi *flask* dengan pasir kira-kira setengah tinggi *flask*
- Letakan spesimen diatas pasir
- Atur pola saluran masuk/keluar dan pola cacat
- Tutup pola tersebut dengan pasir hingga permukaan *flask*
- Panaskan cetakan antara 150-200°C
- Lepaskan *flask* dan potong cetakan dibagian tengah
- Lepaskan pola dan kedua bagian pola disatukan kembali & direkatkan dengan lem kayu



Gambar 11. Urutan proses pembuatan cetakan pada proses perbaikan dengan metode *Turbulence Flow Casting*

b. Cetakan dari pasir Pasir Silika

Urutan proses sama dengan gambar 11. Pada eksperimen ini digunakan dua buah *flask* yang berfungsi sebagai *cup* dan *drag*. Dalam hal ini tidak diperlukan pola cacat karena pada saat kedua *flask* dipisahkan, permukaan cacat yang terisi pasir dapat dibersihkan. Disamping itu pengambilan pola kedua saluran dengan dua *flask* lebih mudah. Dengan menggunakan dua buah *flask* ini persiapan cetakan proses jauh lebih praktis jika dibandingkan dengan menggunakan pasir RCS. Sistem cetakan dan spesimen ini dapat dilihat pada gambar 12.



Gambar 12. Cetakan pasir silika dan rangka cetak pada eksperimen *Turbulence Flow Casting*.

Hasil yang telah dicapai dalam perbaikan *cylinder head* berukuran kecil dengan metode TFC dapat dilihat pada gambar 23. Secara praktis, faktor yang turut menentukan keberhasilan proses TFC adalah pemberian *preheat* (pemanasan mula) terhadap komponen yang akan diperbaiki. Untuk itu maka teknik pemberian *preheat* perlu dikembangkan lebih lanjut terutama pada komponen-komponen berdimensi besar dengan ketebalan di atas 500 mm. Walaupun demikian, prinsip utama yang harus diperhatikan dalam pemberian *preheat* adalah masukan panas harus dapat menghasilkan laju pendinginan yang rendah.

III. METODOLOGI PENELITIAN

Untuk mencapai tujuan di atas (sub-bab 1.2), metode penelitian dan kegiatan yang dilakukan dibagi menjadi beberapa tahap sebagai berikut : 1) tahap persiapan dan review pengembangan metode perbaikan, 2) tahap pemilihan/penentuan parameter dan daerah harga parameter proses TFC, 3) tahap penentuan dan pengembangan metode preheat 4) tahap penerapan metode TFC (*Turbulence Flow Casting*) pada spesimen dan cylinder head berukuran kecil (< 500 mm), 5) tahap pengembangan metode perbaikan cylinder head di PLN berukuran > 500 mm dan 6) tahap penerapan/aplikasi metode perbaikan di industri.

3.1 Tahap Persiapan dan Review Pengembangan Metode Perbaikan

Kegiatan pada tahap persiapan dan studi literatur meliputi :

- Studi pendahuluan untuk mempelajari karakteristik operasi dan material cylinder head.
- Melengkapi data-data tentang kerusakan pada blok mesin dan kepala silinder
- Melengkapi informasi/data tentang set-up percobaan perbaikan cacat yang sudah dibuat sebelumnya.
- Melakukan penentuan metode preheat dan pengembangan alat preheat
- Identifikasi kemungkinan pembuatan Standar industri Indonesia tentang perbaikan komponen blok mesin dan kepala silinder.

3.2 Pemilihan/Penentuan Parameter dan Daerah Harga Parameter Proses *TFC*

Proses *TFC* yang telah dilakukan dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu faktor geometri dan dimensi saluran serta kemiringan saluran yang berhubungan dengan kecepatan aliran. Optimasi lanjut terhadap proses *TFC* dilakukan dengan menguji perbaikan terhadap metode *TFC* pada specimen berdimensi 150 x 30 x 20 mm. Selanjutnya metode *TFC* dicoba digunakan untuk memperbaiki produk komersial *cylinder head*.

Dari hasil percobaan terdahulu telah diperoleh bahwa beberapa parameter proses TFC adalah temperatur penuangan, waktu penuangan, temperatur *preheat*, *sand ratio*, laju aliran massa (kecepatan aliran) dan diameter saluran. Daerah harga parameter tersebut adalah :

1. Temperatur penuangan : 1350 – 1400⁰C
2. Waktu penuangan : 5 - 30 detik

3. Temperatur *preheat* : 25 – 700⁰C
4. *Sand ratio* : 5 – 6
5. Laju aliran massa : 1,2 kg/s
6. Diameter saluran rata-rata : 25 mm

Setelah memahami karakteristik dari parameter-parameter di atas terhadap metode perbaikan yang ada, berikutnya proses perbaikan akan dilakukan dengan menentukan suatu harga parameter yang diperoleh dari studi pendahuluan.

3.3 Tahap Penentuan dan Pengembangan Metode Preheat

Penentuan metode *preheat* ditetapkan salah satu atau gabungan dari ketiga metode berikut:

1. Kompor pemanas gas LPG
2. Logam cair sebagai *firewall* pada cetakan
3. *Heating coil* yang diletakan di sekitar rongga cacat

3.4 Tahap Penerapan Metode TFC (*Turbulence Flow Casting*)

Penerapan metode TFC (*Turbulence Flow Casting*) akan dilakukan pada spesimen berdimensi 150 x 30 x 20 mm dan cylinder head berukuran kecil (< 500 mm). *Pretrial* pada spesimen bertujuan untuk mempelajari pengaruh waktu dan temperatur preheat serta penerapan parameter proses TFC sebelum perbaikan diterapkan pada cylinder head. Selain itu juga untuk mempelajari tingkat kesulitan penggunaan salah satu atau gabungan metode preheat yang diterapkan.

3.5 Tahap Pengembangan Metode Perbaikan pada *Cylinder Head* di Industri

Pada tahap ini proses perbaikan akan dilakukan pada tahun kedua yaitu dengan studi kasus berupa cylinder head untuk PLTD. Sasaran dari penerapan metode perbaikan adalah memperoleh pengetahuan karakteristik dari parameter-parameter dalam perbaikan komponen blok mesin, kepala silinder atau komponen sejenis yang lebih komprehensif, secara analisis dan praktis, agar diperoleh metode yang lebih baik lagi dengan cara anatara lain mengatur parameter-parameter:

- Geometri dan dimensi cacat
- Variasi dimensi benda kerja

- Pengembangan alat preheat yang lebih *applicable*

3.6. Tahap Penerapan/Aplikasi Metode TFC pada Komponen Komersial di industri

Pada tahap ini penelitian sudah diarahkan pada penerapan yang lebih praktis dan ekonomis dengan tujuan akhir adalah menyusun prosedur operasi standar perbaikan yang dapat digunakan oleh praktisi IKM dan institusi lainnya, sebagai cikal bakal penyusunan SII. Beberapa hal yang dilakukan antara lain:

- Pengembangan alat kearah otomasi proses
- Penerapan pada dimensi dan bentuk benda yang berbeda-beda
- Penyusunan prosedur operasi standar perbaikan (SOP)

IV. HASIL YANG TELAH DICAPAI DAN PEMBAHASAN

Penelitian yang telah dicapai pada tahun ketiga ini dibagi menjadi tiga bagian yaitu penyusunan modul pelatihan, usulan patent, dan usulan aturan proses perbaikan pada komponen besi cor.

Modul Pelatihan Perbaikan Cacat dengan Menggunakan Metode TFC

Isi:

1. Lingkup
2. Tujuan
3. Prosedur
 - a. Persiapan permukaan
 - b. Pemeriksaan retak
 - c. Penandaan retak
 - d. Penggerindaan retak
 - e. Data material dan pengamatan metalografi
 - f. Persiapan proses perbaikan
 - g. Perbaikan
 - h. Pembongkaran cetakan
 - i. Pembersihan, pemotongan, dan pemesinan
 - j. Pemeriksaan hasil perbaikan (*Dye Penetrant* dan *Pressure Test*)

Lingkup:

Prosedur operasi ini berisikan penjelasan tentang cara perbaikan retak di permukaan *cylinder head* yang terbuat dari besi cor kelabu.

Tujuan:

Memperbaiki retak dengan menerapkan metode *Turbulence Flow Casting* dan dengan menggunakan logam pengisi besi cor kelabu.

Persiapan permukaan

Permukaan komponen dibersihkan dengan menggunakan sabun, dibersihkan dengan air dan dibilas dengan menggunakan alkohol atau aseton, dan dikeringkan.

Pemeriksaan retak

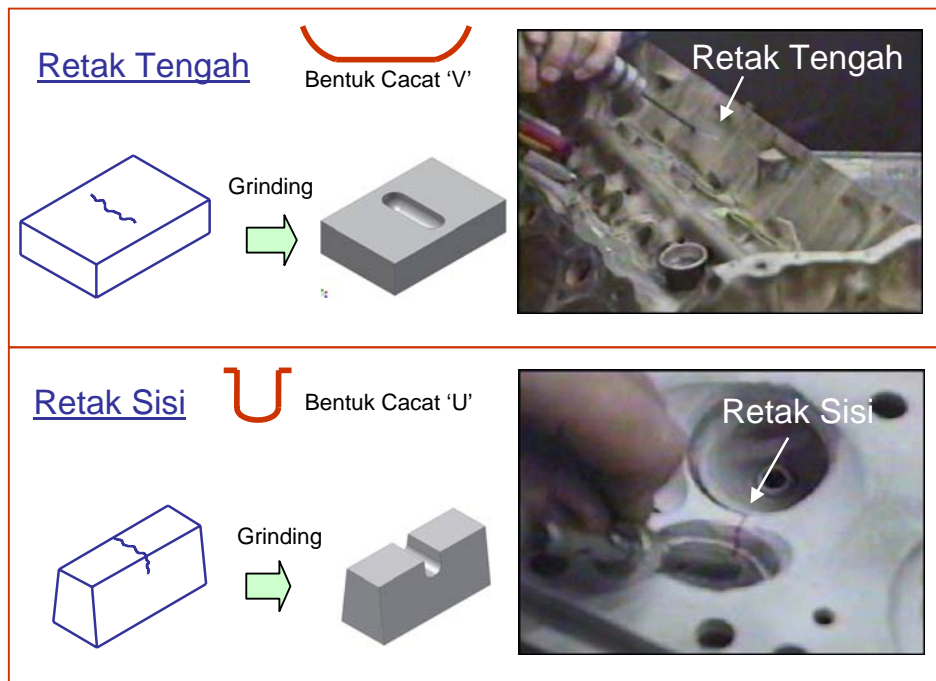
Mendeteksi permukaan terhadap adanya retakan dilakukan dengan *Dye Penetrant* atau jika tersedia dengan *Magnetic Particle Inspection*.

Penandaan retak

Adanya retakan di permukaan komponen ditandai dengan kapur.

Penggerindaan retak

Benda kerja yang retak atau mengalami cacat rongga, dibentuk dengan proses gerinda sehingga membentuk huruf 'V' atau 'U'.



Gambar 1. Geometri cacat

Identifikasi komposisi kimia material yang akan diperbaiki

1. Data material dari dokumen
2. Jika data material tidak tersedia, lakukan *in-situ metallographic observation*.
3. Komposisi kimia logam pengisi sama dengan komposisi logam induk

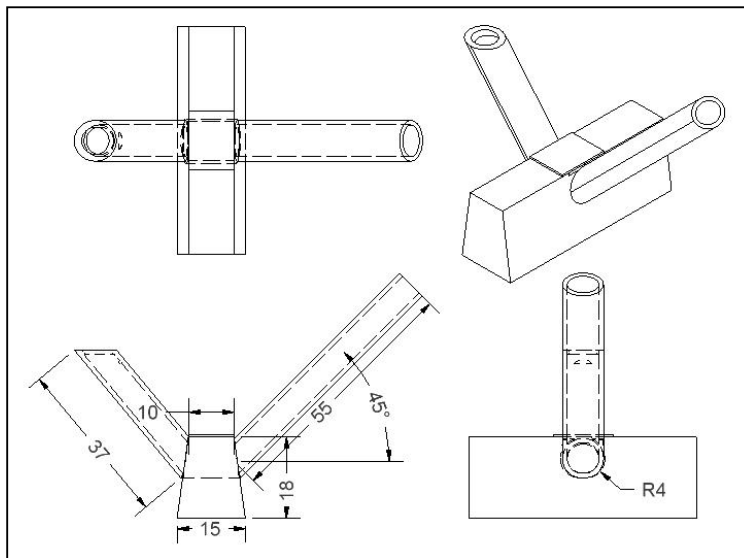
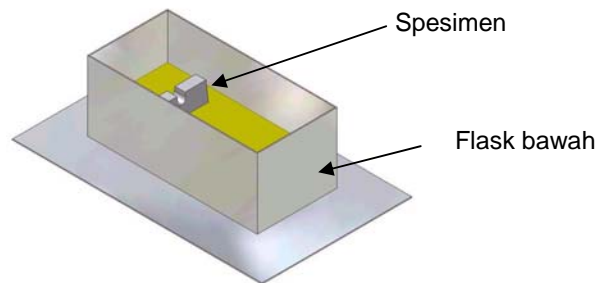
Persiapan proses perbaikan

Tahap preparasi terdiri atas :

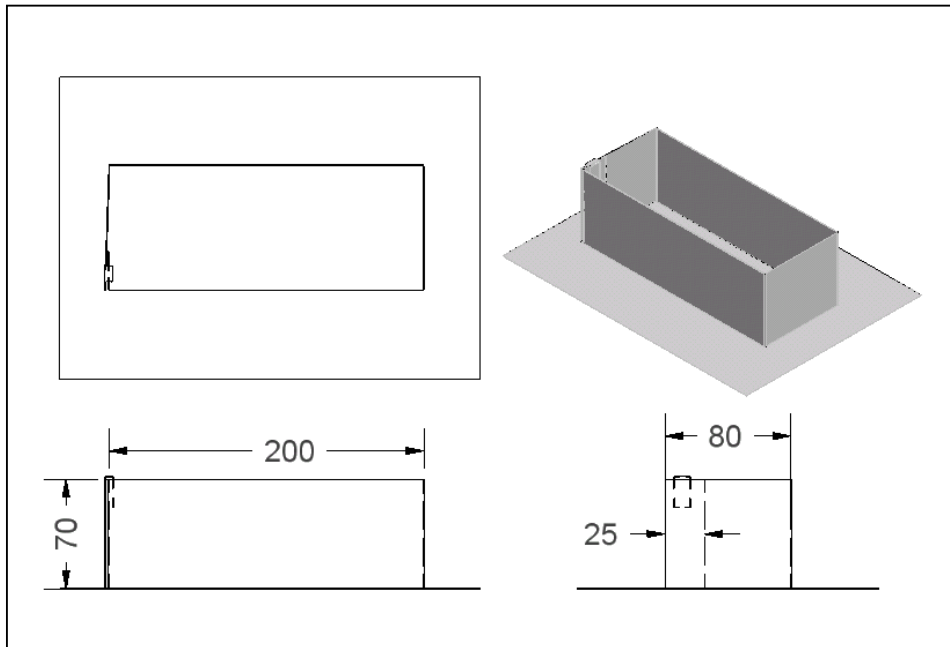
1. Pembuatan cetakan
2. *Preheating*

Pembuatan Cetakan

- a. Tempatkan spesimen di atas pasir resin yang terletak pada rangka cetak (*flask*)

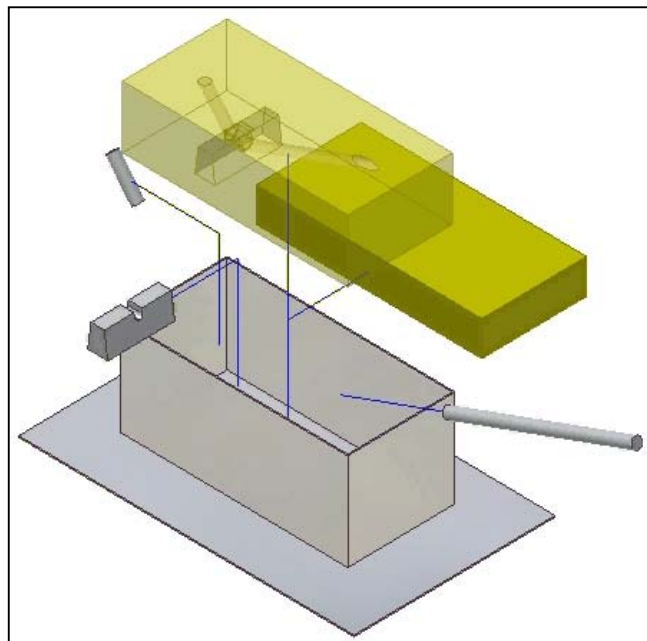


Gambar 2. Geometri dan Dimensi Spesimen

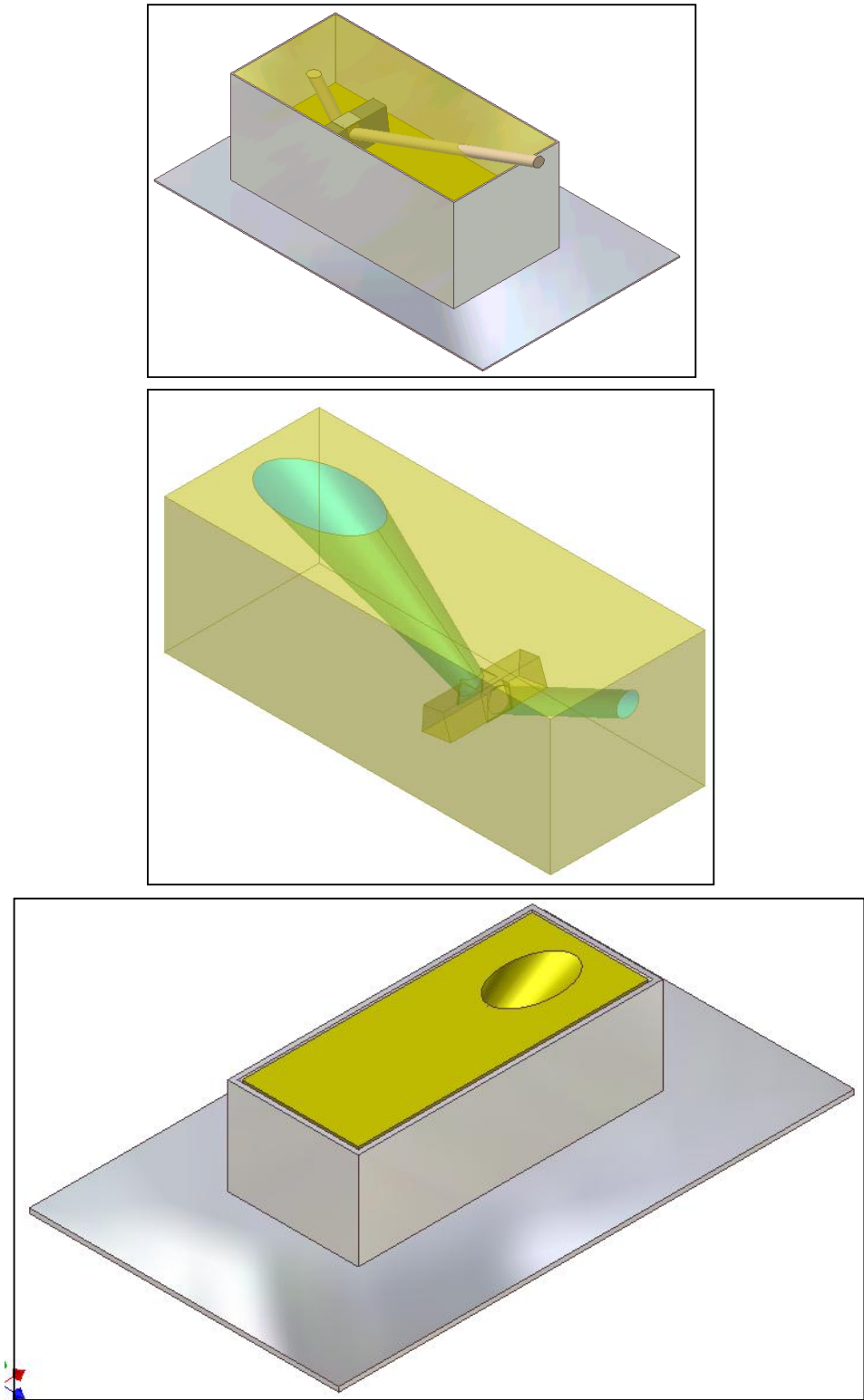


Gambar 3. Geometri dan Dimensi Flask

- b. Tutup spesimen dengan menggunakan pasir cetak dan tempatkan pola saluran pada rongga cacat seperti pada gambar 2.



Gambar 4. Posisi specimen dan saluran



Gambar 5. Layout cetakan

Hal-hal yang harus diperhatikan selama pembuatan cetakan :

- Besar sudut saluran = 30°
- Lubang saluran masuk diperbesar untuk mempermudah penuangan dan harus memastikan saluran cetakan tidak tersumbat dengan cara meniup saluran dengan bantuan kompresor.
- *Sand ratio* = 8 - 12
- Kemiringan cetakan = $5 - 7^{\circ}$

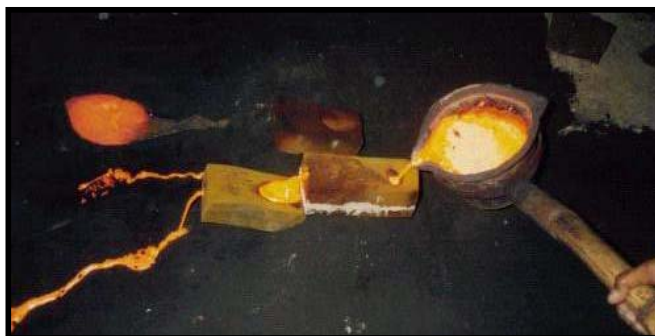
c. Panaskan cetakan hingga temperatur 80°C . Bentuk cetakan setelah proses pemanasan



Gambar 6. Bentuk cetakan setelah proses pemanasan

d. Tahap Penuangan Logam Cair

Proses perbaikan, dilakukan dengan menuangkan logam cair ke permukaan saluran masuk. Posisi ladle selama penuangan logam cair berada sekitar 15 cm di atas lubang saluran masuk cetakan. Penuangan harus dilakukan dengan hati-hati dan secara kontinu. Usahakan sudut ladle selama penuangan dijaga konstan dan tidak berusaha untuk cepat menghabiskan logam cair. Sudut kemiringan *flask* diatur sebesar $5-7^{\circ}$ sehingga terdapat beda ketinggian antara saluran masuk dan keluar, dengan demikian logam cair dapat mengalir keluar cetakan.



Gambar 7. Foto proses perbaikan

V. KESIMPULAN

1. Telah dilakukan penyusunan modul pelatihan perbaikan cacat permukaan dengan menggunakan metode TFC (*Turbulence Flow Casting*).
2. Penyusunan dokumen patent masih sedang disusun

VI. RESUME PELAKSANAAN KEGIATAN PENELITIAN

6.1 KELUARAN YANG DIHARAPKAN

Keluaran yang diharapkan dari penelitian ini adalah:

1. Menghasilkan terobosan baru dalam ilmu pengetahuan dan teknologi, khususnya pada bidang perbaikan komponen blok mesin dan kepala silinder atau komponen mesin yang sejenis (sejenis dalam material dan beban yang dialami)
2. Mengusulkan standar SII untuk perbaikan komponen blok mesin dan kepala silinder
3. Hasil lain dari penelitian ini dapat dimanfaatkan dan dapat meningkatkan kemampuan IKM dalam melaksanakan perbaikan komponen blok mesin dan kepala silinder.
4. Hasil penelitian ini telah dipublikasikan dalam seminar dan journal ilmiah
5. Kemungkinan untuk memperoleh paten proses perbaikan komponen yang terbuat dari besi cor
6. Meningkatkan mutu penelitian di Jurusan Teknik Mesin Universitas Pasundan.

Secara khusus luaran dan hasil yang ditargetkan dari penelitian ini adalah:

1. Mengembangkan metode baru rekondisi komponen yang terbuat dari besi cor
2. Menyusun SOP rekondisi komponen *cylinder head*
3. Mengoptimasi parameter-parameter utama sebagai acuan dalam pengembangan metode perbaikan komponen besi cor kelabu seperti blok mesin dan kepala silinder
4. Memperoleh karakteristik material hasil proses perbaikan yang diarahkan pada hubungan antara temperatur preheat (pemanasan awal) dengan laju pendinginan
5. Mendapatkan metode *preheat* yang dapat diterapkan di lapangan (*applicable*).
6. Menerapkan metode perbaikan TFC dan metode preheat yang *applicable* diterapkan di lapangan untuk memperbaiki produk *cylinder head* industri sebagai studi kasus
7. Running test *cylinder head* yang telah diperbaiki
8. Mengaplikasikan metode TFC untuk produk komersial dan menyusun SOP perbaikan

6.2 PELAKSANAAN PENELITIAN

Pelaksanaan penelitian di tahun ketiga ini merupakan kelanjutan dari penelitian di tahun pertama dan kedua sesuai dengan rencana semula yaitu sebagaimana disampaikan dalam *roadmap* penelitian. Setelah di tahun kedua dilakukan rancangan metode *preheat*, review/mempelajari karakteristik material dan proses perbaikan pada spesimen berdimensi relatif kecil dan *cylinder head* berukuran dibawah 500 mm, selanjutnya adalah penyusunan modul pelatihan dan penyusunan dokumen patent. Resume pelaksanaan kegiatan penelitian tersebut dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Resume Pelaksanaan Kegiatan Penelitian

No.	KEGIATAN	PEMBAHASAN		PENYELESAIAN MASALAH
		Perbedaan dengan Rencana semula	Dampak Perubahan yang Terjadi	
1.	Usulan Kerjasama Penelitian dan kelayakan komersialisasi dengan Industri	Sesuai dengan rencana semula yaitu mengusulkan kerjasama penelitian dan bila memungkinkan dilakukan komersialisasi proses perbaikan	Direncanakan akan mendapatkan cylinder head dari JP-PLN sebagai benda uji sehingga pengembangan proses perbaikan akan lebih cepat terlaksana	Presentasi: 1. Litbang PLN – Jakarta 4 Mei 2010 2. JP PLN – Dayeuh Kolot Bandung 18 April 2011 3. GMF (<i>Garuda Maintenance Facility</i>) 22 Agustus 2011
2.	Merencanakan tahapan kerja kegiatan penelitian	Sesuai dengan rencana semula	Memperoleh tahapan rencana kegiatan penelitian dengan cara mereview studi pendahuluan pengembangan metode perbaikan dan hasil yang telah dicapai	Diadakan pertemuan dengan Tim Peneliti
3.	Mereview pengembangan metode perbaikan hasil studi pendahuluan	Mereview proses TFC (<i>Turbulence Flow Casting</i>)	Memahami lebih jauh prinsip proses penyambungan dan permasalahan pada perbaikan material besi cor. Memahami	Mempelajari proses dan parameter proses setiap metode yang telah dikembangkan

			berbagai metode perbaikan yang telah dikembangkan	
4.	Mereview karakteristik material komponen besi elativ pengembangan proses perbaikan	Rencana semula kegiatan akan langsung dilakukan perbaikan ulang pada cylinder head berdimensi kecil (< 500 mm) dengan menggunakan metode TFC (<i>Turbulence Flow Casting</i>)	Mendapatkan pemahaman lanjut tentang kelebihan metode TFC dalam perbaikan, mampu melakukan pemilihan dan penentuan parameter utama proses perbaikan	Mempelajari hasil studi pendahuluan dan hasil yang telah dicapai. Amati kembali karakteristik mekanik dan kualitas sambungan hasil perbaikan
5.	Pemilihan parameter proses perbaikan dengan metode TFC	Sesuai dengan rencana semula	Mampu memahami berbagai elati yang mempengaruhi hasil perbaikan komponen	Mempelajari hasil studi pendahuluan dan hasil yang telah dicapai
6.	Pengembangan metode preheat I	Pada awalnya hanya akan digunakan pemanas kompor saja	Mendapatkan optimasi pemberian preheat yaitu dengan menggunakan logam cair dan optimasi <i>gating system</i> . Pengamatan sifat material dan kualitas sambungan hasil perbaikan	Menentukan elative re metode preheat, melakukan pemilihan metode preheat yang <i>applicable</i> , murah dan mudah terapkan di lapangan,
7.	Pengembangan metode preheat II	Sesuai rencana semula yaitu rancangan kompor pemanas	Peningkatan kemampun pemanasan secara menyeluruh ke semua bagian/permukaan bawah komponen	Menggabungkan beberapa kompor pemanas dengan cara memodifikasi saluran aliran gas LPG
8.	Pengembangan metode preheat III	Pada awalnya hanya akan digunakan pemanas kompor saja	Membantu pemberian panas dan menjaga agar temperature benda kerja sesuai dengan yang diinginkan	Pembuatan heating coil dilengkapi dengan digital thermometer, temperature control panel.
9.	Perancangan dan	Sesuai dengan rencana	Waktu pemanasan	Integrasi seluruh proses

	Pengembangan proses preheat metode I, II, III	semula	akan lebih singkat	preheat secara bersamaan dengan menempatkan heating coil di daerah retakan, logam cair di dalam cetakan sekeliling benda kerja, kompor pemanas diterapkan di bagian bawah benda kerja
10.	Proses Perbaikan pada elative dengan pemberian preheat I	Pada awalnya hanya akan digunakan pemanas kompor saja	Hasil perbaikan sesuai dengan yang diharapkan yaitu tanpa terjadi besi cor putih	Melakukan proses preheat dengan menggunakan metode I dan melakukan perbaikan pada elative besi cor kelabu dengan menggunakan metode TFC
10.	Pengujian sifat material	Pengujian metalografi	Diperoleh informasi sifat mekanik dari hasil uji tarik dan struktur mikro dari hasil pengamatan metalografi	Uji Tarik pada specimen dengan menggunakan standar ASTM A-370. Pengamatan metalografi dilakukan dengan menggunakan LOM (<i>Light Optical Microscopy</i>) dan etsa Nital 3%
11.	Perbaikan cylinder head I (dua lubang valve)	Perbaikan cylinder head PLTD (JP – PLN) berukuran kecil < 500 mm	Memberikan hasil yang relevan dibandingkan dengan cylinder head PLTD karena material dan dimensinya elative sama	Proses perbaikan cylinder head berukuran kecil < 500 mm untuk kereta api di Jepang. Pemberian preheat dengan menggunakan kompor pemanas konvensional.
12.	Perbaikan cylinder head II (empat lubang valve)	Perbaikan cylinder head PLTD (JP – PLN) berukuran kecil < 500 mm	Memberikan hasil yang relevan dibandingkan dengan cylinder head PLTD karena material dan dimensinya relatif sama	Proses perbaikan cylinder head berukuran kecil < 500 mm untuk kereta api di Jepang. Pemberian preheat dengan menggunakan kompor pemanas konvensional.
13.	Pengembangan metode preheat dan mereview karakteristik material	Perbaikan cylinder head PLTD (JP – PLN) berukuran kecil < 500 mm	Karakteristik material yang diamati menunjukkan keterkaitan parameter	Hasil pengamatan dapat diterapkan dalam kondisi praktis

	serta proses perbaikan		terutama temperature, waktu penuangan, struktur mikro dan dimensi benda kerja	
14.	Penyusunan modul pelatihan	Sesuai dengan rencana	Dapat diterapkan dalam pelatihan ke industri	Pengembangan IKM dalam melakukan proses perbaikan komponen yang terbuat besi cor
15	Penyusunan patent	Masih sedang dilakukan	Memperoleh patent	Pemyusunan dokumen patent dan usulan patent direncanakan pada bulan januari 2014.

6.3 KERJASAMA TIM PENELITI

Tabel 2. Hak dan Tanggung Jawab

Nama Tim Peneliti	Tanggung Jawab		
	Alokasi Waktu (Jam/Minggu)	Peranan (Spesifik)	
Dr. Ir. Muki Satya Permana	20	Sebagai peneliti utama, mempunyai tanggung jawab untuk mengeksekusi penelitian dan mengarahkan pengembangan penelitian. Tanggung jawabnya termasuk memimpin pertemuan yang dilakukan secara berkala setiap minggu bersama anggota tim untuk membicarakan kemajuan penelitian dan semua masalah yang berkaitan dengan penelitian. Ditambah juga, peneliti utama harus bertanggung jawab pada komitmen tahapan dan rencana penelitian, pendekatan analitik, dan analisis eksperimental, dan pemodelan yang dilakukan pada objek penelitian.	
	Hak		
	Administratif	Keuangan	Keilmuan
	Memeriksa masalah administrasi penelitian	Mendapat honor setiap bulan	• Mendapat pengetahuan tambahan dari

			<p>hasil penelitian untuk diaplikasikan</p> <ul style="list-style-type: none"> • Menjadi ketua tim dalam penyusunan dan pembuatan makalah
--	--	--	--

Nama Tim Peneliti	Tanggung Jawab			
	Alokasi Waktu (Jam/Minggu)	Peranan (Spesifik)		
Prof. Dr. Ir. Rochim Suratman	20	Sebagai anggota tim peneliti, yang bersangkutan harus menghadiri pertemuan mingguan bersama dengan anggota tim lainnya membicarakan kemajuan penelitian dan permasalahan yang berhubungan dengan penelitian. Ia diharapkan membantu peneliti utama dalam menyelesaikan penelitian, terutama dalam aspek material, analisis repair welding dan instrumentasi peralatan pengecoran maupun usulan pengaturan parameter dan optimasi proses perbaikan.		
	Hak			
		Administratif	Keuangan	Keilmuan
	Membantu memeriksa masalah administrasi penelitian	Mendapat honor setiap bulan	<ul style="list-style-type: none"> • Mendapat pengetahuan tambahan dari hasil penelitian untuk diaplikasikan • Menjadi anggota 	

			tim dalam penyusunan dan pembuatan makalah
--	--	--	--

Nama Tim Peneliti	Tanggung Jawab		
	Alokasi Waktu (Jam/Minggu)	Peranan (Spesifik)	
Dr. Ir. Budi Hartono Setiamarga	20	Sebagai anggota tim peneliti, yang bersangkutan harus menghadiri pertemuan mingguan bersama dengan anggota tim lainnya membicarakan kemajuan penelitian dan permasalahan yang berhubungan dengan penelitian. Ia diharapkan membantu peneliti utama dalam menyelesaikan penelitian, terutama dalam analisis perpindahan panas dan heat treatment maupun dalam perancangan peralatan preheat.	
	Hak		
	Administratif	Keuangan	Keilmuan
	Membantu memeriksa masalah administrasi penelitian	Mendapat honor setiap bulan	<ul style="list-style-type: none"> • Mendapat pengetahuan tambahan dari hasil penelitian untuk diaplikasikan • Menjadi anggota tim dalam penyusunan dan pembuatan makalah

Tabel 3. Uraian Kerjasama Tim

Karakter Kunci	Uraian Kerjasama Tim
1. Sasaran yang sama	Sasaran yang ingin dicapai mendapatkan metode perbaikan yang terbaik untuk komponen blok mesin, dan kepala silinder untuk meningkatkan keandalan, performansi dan daya saing
2. Interaksi dan peran serta semua anggota	Membantu ketua tim dalam program pengembangan metode perbaikan blok mesin dan kepala silinder.
3. Mempertahankan keilmuan masing-masing pribadi	Diadakan pertemuan mingguan untuk mendiskusikan kemajuan penelitian, dana, masalah-masalah yang ditemui selama penelitian
4. Komunikasi terbuka	Komunikasi dapat dilakukan setiap saat (langsung, telp. Atau lewat e-mail) karena pelaksanaan penelitian dilakukan di kota Bandung dan peneliti utama sebagai pembimbing berkedudukan di Bandung, Jurusan Teknik Mesin Universitas Pasundan.
5. Pengambilan Keputusan	Pengambilan keputusan dilakukan berdasarkan data aktual didiskusikan dengan ketua dan anggota tim peneliti. Pengambilan keputusan detail di lapangan bisa dilakukan oleh peneliti ybs, jika itu memungkinkan.
6. Saling percaya dan menghargai	Setiap anggota tim akan saling menghargai dan percaya satu sama lainnya karena semua hasil penelitian nantinya akan saling berhubungan, dan juga akan saling mengingatkan jika ada kekeliruan.
7. Penyelesaian konflik secara membangun	Konflik dari masalah, diselesaikan dengan melihat akar masalah, kemudian dirumuskan solusi terbaik, kritik dan masukan diperlukan untuk mendapatkan hasil penelitian yang baik.

6.4. ROADMAP PENELITIAN

Posisi kegiatan penelitian di tahun pertama dalam Roadmap keseluruhan penelitian adalah:

1. Mengembangkan suatu metode preheat dalam perbaikan komponen cylinder head berukuran kecil (< 500 mm) dengan menggunakan metode TFC (Turbulence Flow Casting).
2. Proses perbaikan dilakukan dengan memperhatikan parameter-parameter waktu penuangan (pencairan/penyambungan), waktu dan temperatur preheat, sand ratio, flow rate logam cair

masuk ke dalam cetakan, temperatur tapping, temperatur pouring, tinggi penuangan logam cair ke dalam cetakan serta parameter-parameter bilangan tak berdimensi yang memenuhi kaidah mekanika dan dinamika fluida.

3. Proses perbaikan juga dilakukan dengan memperhatikan parameter-parameter dimensi dan bentuk cacat, karakteristik material dan desain serta operasi benda uji, pengaturan waktu dan temperatur preheat, temperatur pencairan.
4. Simulasi perpindahan panas untuk mengetahui distribusi temperatur di daerah sekitar cacat.
5. *Penyusunan SOP (Standard Operating Procedure)* yaitu prosedur perbaikan yang dapat diterapkan di industri dan masyarakat luas pada umumnya.

Sementara itu penelitian di tahun kedua lebih diutamakan pada proses perbaikan cylinder head di industri dan dilakukan pula uji coba cylinder head di lapangan. Penelitian di tahun ketiga lebih diarahkan pada perbaikan komponen selain cylinder head (blok mesin) dan direncanakan akan diadakan pelatihan bagi IKM serta diusulkan untuk memperoleh hak paten.

6.5. INDIKATOR KEBERHASILAN

Tabel 4. Target Luaran hasil Penelitian dan Indikator

Sasaran yang ingin dicapai	Rencana keberhasilan	Indikator
1. Pengembangan Metode Preheat 2. Perbaikan cacat pada Cylinder Head 3. Penyusunan SOP Perbaikan Cylinder Head 4. Optimasi Proses (Simulasi Software)	Desember 2011	1. Makalah (Journal, Prosiding) 2. Standard Operating Procedure
Generalisasi proses Perbaikan cacat permukaan pada komponen yan terbuat besi cor	November 2012	1. Makalah (Journal, Seminar)
1. Pelatihan bagi IKM 2. Hak Paten	Desember 2013	1. Modul Pelatihan 2. Dokumen usulan Patent (masih disusun) 3. Buku Ajar (masih disusun)

Tabel 5. Manfaat Penelitian

Jenis Manfaat	Bobot, %	Uraian Temuan
Invention	35	1. Metode perbaikan cacat coran. 2. SOP perbaikan cacat cor 3. Usulan Paten 4. Usulan SII
Inovasi	25	Dapat menentukan metode perbaikan untuk komponen besi cor kelabu seperti blok mesin, silinder head dll. Dengan mempertimbangkan parameter-parameter yang telah diteliti
Verifikasi	40	Makalah (Journal, Prosiding) dan Paten

*) Invention adalah inovasi yang dapat segera dikomersialisasi.

Tabel 6. Publikasi Ilmiah

Jenis Publikasi	Judul, Penulis	Keterangan
1. Seminar, Lokakarya, Simposium, dll	1. The Application of New Method in Cast Iron Components Repair Using Turbulence Flow Casting 2. Bagaimana Memperbaiki Cacat Permukaan pada Komponen yang Terbuat dari Besi Cor Kelabu	1. Politeknik Manufaktur ASTRA, SNEEMO Jakarta. Seminar Nasional Efisiensi Energi untuk Peningkatan Daya Saing Industri Manufaktur dan Otomotif. 27 September 2012 2. SNTTM XI, UGM Yogyakarta, 16-17 Oktober 2012
2. Artikel ilmiah dalam jurnal nasional	-	Nama jurnal dan tanggal

terakreditasi		penerbitan
3. Artikel ilmiah dalam jurnal internasional	1. Experimental and Numerical Investigation of Melting and Solidification during Gray Cast Iron Repair by Turbulence Flow Casting Method.	International Journal of Mechanical Computation and Manufacturing Research, IJMCMR Vol. 1, No. 1 (2012), ISSN 2301-4148

6.6. KONTRIBUSI PENELITIAN

Pengembangan metode perbaikan yang dihasilkan dari penelitian ini merupakan terobosan baru yang sangat berkontribusi terhadap teknologi manufaktur di tanah air. Dengan demikian maka dapat diusulkan untuk membuat standarisasi khususnya dalam perbaikan cacat permukaan produk komersil yang terbuat dari besi cor kelabu.

Hasil penelitian ini telah dipublikasikan dalam seminar dan journal ilmiah serta rencananya akan diusulkan untuk memperoleh paten proses perbaikan komponen yang terbuat dari besi cor. Selain itu, hasil penelitian ini juga untuk meningkatkan mutu penelitian di Jurusan Teknik Mesin Universitas Pasundan.

VII. DAFTAR PUSTAKA

Abdulgader S. A., Olson D. L. dan Self J. A. (1985), Fe-Mn-Ni-Cu-C Filler Metal for Welding Ductile Cast Iron, *AWS Welding Journal*.

Alexandrov D. V. dan Malygin A. P. (2006), Self-similar Solidification of An Alloy From a Cooled Boundary, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 49, 763-769

Alexiades V., Hannoun N. dan Mai T. Z. (2003), *Computational Simulation Conf.* 10, 55-69

Angus, H. T. (1978), *Cast Iron – Physical and Engineering Properties*, 2nd Ed., Butterworth & Co., England.

- Appelt B. dan Long R. E. (1982),” The Development of SMAW Procedure for Cast Iron”, *AWS Welding Journal*.
- Askeland D. R. dan Birer N. (1979), Secondary Graphite Formation in Tempered Nodular Cast Iron Weldment, *AWS Welding Journal*.
- ASTM Specialty Handbook (1996), *Cast Irons*, ASM International, Materials Park, OH.
- Badillo A. dan Beckermann C. (2006), Phase-field Simulation of the Columnar-to-equiaxed Transition in Alloy Solidification, *Acta Materialia*, (In Press)
- Bartocha D., Janerka K. dan Suchori J. (2005), Charge Materials and Technology of Melt and Structure of Gray Cast Iron, *Journal of Materials Processing* 162/163, 465-470.
- Bars M. B. dan Worster M. G. (2006), Solidification of a binary alloy: Finite-element, single-domain simulation and new benchmark solutions, *Journal of Computational Physics*, (In Press).
- Battezzati L., Baricco M. dan Curiotto S. (2005), Non-stoichiometric Cementite by Rapid Solidification of Cast Iron, *Acta Materialia* 53, 1849-1856.
- Barkhudarov, M. R. (1997), Is Fluid Flow Important for Predicting Solidification?”, *Solidification Processing’97 Conference*, 7-10, Sheffield, U.K.
- Benyounis K. Y., Fakron O. M. A., Abboud J. H., Olabi A. G. dan Hashmi M. J. S. (2005), Surface Melting of Nodular Cast Iron by Nd-YAG Laser and TIG, *Journal of Materials Processing* 170, 127-132.
- Bishel R. A., Wilson R. K. dan Kelly T. J. (1985), Welding of Ductile Iron with Ni-Fe-Mn Filler Metal, *AWS Welding Journal*.
- Callister Jr., W. D. (1990), *Material Science and Engineering*, John Wiley & Sons, Inc., New York.

- Chatterjee S. dan Pal T. K. (2003), Wear Behaviour of Hardfacing Deposits on Cast Iron, *Wear Journal* 255, 417-425.
- Chatterjee S. dan Pal T. K. (2006), Weld Procedural Effect on The Performance of Iron Based Hardfacing Deposits on Cast Iron Substrate, *Journal of Materials Processing Technology*, (In Press).
- Chao L. S. (1999), Du W. C., Macro-Micro Modeling of Solidification, *Proc. Natl. Sci. Counc. ROC(A)*, 23 (5), 622-629.
- Cisgiewski G. (1996), The Mechanical Properties of Joints Welded with Coated Electrodes in Flake and Nodular Graphite Cast Iron, *Welding International*, 10 (11) 853-861.
- Cueva G., Sinatora A., Guesser W. L. dan Tschiptschin A. P. (2003), Wear Resistance of Cast Iron Used in Brake Disc Rotors, *Wear Journal* 255, 1256-1260.
- Chakraborty S. dan Dutta P. (2002), An Analytical Solution for Conductivity-dominated Unidirectional Solidification of Binary Mixtures, *Applied Mathematical Modelling* 26, 545-561.
- Denny (2005), *Analisis Numerik Pengaruh Temperatur Preheat dan Waktu Penuangan Terhadap Kedalaman Kisisan pada Perbaikan Komponen dari Besi Cor Kelabu dengan Metode Liquid Flow*, Tesis Magister Teknik Mesin ITB.
- Devletian J. H. (1978), Weldability of Gray Iron Using Fluxless Gray Iron Electrodes for SMAW, *AWS Welding Journal*.
- Devletian J. H. (1980), Aluminum's Graphitizing Effect in Gray Iron Welds, *AWS Welding Journal*.
- Easterling K. (1992), *Introduction to The Physical Metallurgy of Welding*, Butterworth-Heinemann Ltd., 2nd Ed., London.

- Edalati K., Akhlaghi F. dan Nili-Ahmadabadi M. (2005), Influence of SiC and FeSi Addition on The Characteristics of Gray Cast Iron, *Journal of Materials Processing Technology* 160, 183-187.
- Elliott R. (1988), *Cast Iron Technology*, Butterworth & Co. (Publisher) Ltd, UK, 114-118.
- Djaswir F. (2004), Analisa Perpindahan Panas pada Pemberian Preheat dan Pengelasan dengan Menggunakan Las Oksiasetilen Secara Numerik dan Eksperimental pada Besi Cor Kelabu, Tesis Magister Teknik Mesin ITB.
- Ferreira J. C. (2002), A Study of Cast Chilled Iron Processing Technology an Wear Evaluation of Hardened Gray Iron for Automotive Application, *Journal of Material Processing Technology* 121, 94-101.
- Fomin S. A dan Saitoh T. S. (1999), Melting of Unfixed Material in Spherical Capsule with Non-Isothermal Wall, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 42, 4197-4205.
- Fras E., Gorny M. dan Lopez H. F. (2005), The Transition from Gray to White Cast Iron During Solidification: Part I. Theoretical background, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 36A, 3075.
- Gegner J., Horz G. dan Kirchheim R. (1997), Segregation of Oxygen at Metal/oxide-interface, *Interface Science Kluwer Academic Publisher-Netherland* 5, 231-245.
- Gale W. F. dan Wallach E. R. (1991), microstructural development in transient liquid-phase bonding, *Metallurgical Transactions*, 22A, 2451-2457.
- Ghaderi A. R., Ahmadabadi M. N. dan Ghasemi H. M. (2003), Effect of graphite morphologies on tribological behaviour of austempered cast iron, *Wear Journal* 255, 410-416.
- Goettsch D. D. dan Dantzig J. A. (1991), Modeling Microstructure Development in Gray Cast Iron, *Modeling of Casting, Welding, and Advanced Solidification Processes V*, 377-385.

- Wirjosumarto H. dan Okumura T. (1991), *Teknologi pengelasan logam*, PT Pradnya Paramita, Cetakan Ke-5.
- Holman, J. P (1981), *Heat Transfer*, 5th Edition, Mc. Graw-Hill Book Company, New York.
- Ikeuchy K., Zhou Y., Kokawa H. dan North T. H. (1992), Liquid-solid interface migration at grain boundary regions during transient liquid phase brazing”, *Metallurgical Transactions*, 23A, 2905-2915.
- Ishida T. (1985), A Microstructural Study of Local Melting of Gray Iron with Stasionary Plasma Arc, *AWS Welding Journal*.
- Jana S., Ray S. dan Durst F. (2005), A Numerical Method to Compute Solidification and Melting Processes, *Applied Mathematical Modelling*.
- James M. N. dan Wenfong L. (1999), Fatigue Crack Growth in Austempered Ductile and Grey Cast Irons-stress Ratio Effects in Air and Mine Water, *Material Science and Engineering A265*, 129-139.
- Kiser S. D. dan Irving B. (1993), Unraveling The Mysteries of Welding Cast Iron, *AWS Welding Journal*, 39-44.
- Kreith F. dan Bohn M. S. (1986), *Principles of Heat Transfer*, 4th Ed., Harper & Row Publisher Inc., New York.
- Kurniawan (2005), Karakteristik Las Semprot Nikel dengan Parameter Jarak dan Tekanan pada Perbaikan Cacat Besi Cor Kelabu, Tesis Magister Teknik Mesin ITB.
- Lamberg P. (2004), Approximate Analytical Model for Two-phase Solidification Problem in A Finned Phase Change Material Storage, *Journal of Applied Energy* 77, 131-152.

- Li Y. dan Wang Q. (2005), Intelligent Evaluation of Melt Iron Quality by Pattern Recognition of Thermal Analysis Cooling Curves, *Journal of Materials Processing Technology* 161, 430-434.
- Loper Jr. C. R. dan Voigt R. C. (1983), A Study of Heat-affected Zone Structures in Ductile Cast Iron, *AWS Welding Journal*.
- MacCocaire C. (1991), Repair Welding: How to Set Up a Shop, *Welding Journal* 8, 54-56.
- Muller A. (1998), Mathematical Description of Solidification Cooling Curves of Pure metals, *Materials Research* 1 (1), 29-38.
- Permana M. S. (2001), *Pengaruh Pemilihan Elektroda dan Parameter Proses Terhadap Struktur Mikro dan Sifat Mekanik Besi Cor Kelabu dengan Menggunakan Pengelasan SMAW*, Penelitian Mandiri, Universitas Pasundan.
- Permana M. S. (2002), *Kaji Eksperimental Proses Repair Terhadap Permukaan Cacat yang Terbuat Dari Besi Cor Kelabu Dengan Menggunakan Las Oksiasetilen*, Penelitian Mandiri, Universitas Pasundan.
- Matsugi K., Konishi M., Yanagisawa O. dan Kiritani M. (2005), Erratum to Joining of Spheroidal Graphite Cast Iron to Stainless Steel by Impact-electric Current Discharge Joining, *Journal of Materials Processing Technology* 166, 313-320.
- Martinez R. A. dan Sikora J. A. (1995), Pearlitic Nodular Cast Iron: Can it Be Welded, *AWS Welding Journal*, 65-70.
- M. Ramadan, Takita M. dan Nomura H. (2006), Effect of Semi-solid Processing of Solidification Microstructure and Mechanical Properties of Gray Cast Iron, *Materials Science and Engineering A* 417, 166-173

- Mahmut D. M., Olusegun J. dan Ilegbusi (2002), Application of a Hybrid Model of Mushy Zone to Macrosegregation in Alloy Solidification, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 45, 279-289.
- Mauch J. E. dan Birch J. W. (1983), *Guide to the Successful Thesis and Dissertation, Conception to Publication: A Handbook for Students and Faculty*”, Marcel Dekker, Inc, New York and Basel.
- Mochnacki B., Lara S. dan Pawlak E. (2005), Multiscale Model of Segregation Process, *Journal of Materials Processing Technology* 162/163, 766-769.
- Mochnacki B., Majehrzak E., Pawlak E. dan Suchi J. (1997), Modelling of Fe-C Alloys Solidification Using The Artificial Heat Source Method, *Journal of Materials Processing Technology* 64, 293-302.
- Nadot Y., Mendez J. dan Ranganathan N. (2004), Influence of Casting Defect on Fatigue Limit of Nodular Cast Iron, *International Journal of Fatigue* 26, 311-319.
- Ohnaka H. (1985), *Fundamentals of Heat and Solidification with Computational Solution*, (Translated), Maruzen, Tocnoku-Tokyo, Japan
- Orlowicz A. W. dan Trytek A. (2003), Effect of Rapid Solidification on Sliding Wear of Iron Castings, *Wear Journal* 254, 154-163
- Ozdemir N., Aksoy M. dan Orhan N. (2003), Effect of Graphite Shape in Vacuum-free Diffusion Bonding of Nodular Cast Iron with Gray Cast Iron, *Journal of Materials Processing Technology* 141, 228-233.
- Ozisik M. N. (1968), *Boundary Value Problems of Heat Conduction*, International Textbook Company, Scranton Pennsylvania.

- Oliveira M. J., Malheiros L. F. dan Ribeiro C. A. S. (1999), Evaluation of Heat of Solidification of Cast Irons From Continuous Cooling Curves, *Journal of Materials Processing Technology* 92/93, 25-30.
- Pan J., Yoshida M., Sasaki G., Fukunaga H., Fujimura H. dan Matsura M. (2000), Ultrasonic Insert Casting of Aluminum Alloy, *Scripta Materialia*, 43, 155-159.
- Pedoman Format Penulisan Disertasi (2006), Program Pascasarjana, Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- Prabhu K. N. dan Griffiths W. D. (2000), Assessment of Metal/mold Interfacial Heat Transfer During Solidification of Cast Iron, *Materials Science Forum Trans Tech Publications* 329/330, 455-460.
- Suratman R. (2002), Teknologi Pengelasan Logam, Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- Rabkin E., Straumal B. dan Gust W. (1996), Diffusion Induced Stresses as a Driving Force for the Instability of a Solid/Liquid Interface, *Defect and Diffusion Forum Scitec Publications* 129/130, 229-242.
- Rivera G. L., Boeri R. E. dan Sikora J. A. (2004), Solidification of Gray Cast Iron, *Scripta Materialia* 50, 331-335.
- Roy A. dan Manna I. (2000), Mathematical Modeling of Localized Melting Around Graphite Nodules During Laser Surface Hardening of Austempered Ductile Iron, *Optics and Laser in Engineering* 34, 369-383.
- Riahi A. R. dan Alpas A. T. (2003), Wear Map for Grey Cast Iron, *Wear Journal* 255, 410-409.
- Sahin H. M., Kocatepe K., Kayikci R. dan Akar N. (2006), Determination of Unidirectional Heat Transfer Coefficient During Unsteady-state Solidification at Metal Casting-chill Interface, *Energy Conversion and Management* 47, 19-34.

- Sapate S. G. dan Rao A. V. R. (2004), Effect of Carbide Volum Fraction on Erosion Wear Behaviour of Hardfacing Cast Iron, , *Wear Journal* 256, 774-786.
- Seetharamu K. N., Paragasam R., Quadir G. A, Zainal Z. A., Prasad B. S. dan Sundararajan T. (2001), Finite Element Modelling of Solidification Phenomena, *Sadhana*, 26, (1 & 2), India,103-120.
- Shinoda T., Endo S. dan Tanada K. (1996), Friction Welding of Cast Iron and Stainless Steel, *Welding International* 10 (12), 926-936.
- Shuping H., Weimin Z. dan Fuzhan R. (2002), Progress in the Micro-modeling of the Casting Solidification Process, *Journal of Materials Processing Technology* 123, 361-370.
- Smith W. F. (1993), *Structure and Properties of Engineering Alloys*, 2nd Ed., McGraw-Hill, Inc., Singapore.
- Tangkuman S. (2006), *Simulasi Numerik Pengaruh Temperatur Preheat dan Waktu Penuangan Terhadap Laju Pendinginan pada Metode Flow Casting untuk Perbaikan Cacat Permukaan pada Komponen Besi Cor Kelabu*, Tesis Magister Teknik Mesin ITB.
- Tan L. dan Zabarar N. (2006), A Level Set Simulation of Dendritic Solidification with Combined Features of Front-tracking and Fixed-domain Methods, *Journal of Computational Physics* 211, 36-63
- Surdia T. dan Chijiwa K. (2000), *Teknik Pengecoran Logam*, PT. Pradnya Paramita, Cetakan Ke-8, Jakarta.
- Thomas B. G., Samarasekera I.V. dan Brimacombe J. K. (1987), Mathematical Model of the Thermal Processing of Steel Ingots: Part I, Heat Flow Model, *Metallurgical Transactions B*, Vol. 18B, 119-130.
- Tusek J. (2004), Mathematical modelling of melting rate in arc welding with a triple-wire electrode, *Journal of Materials Processing* 146, pp. 415-423.

Viswanathan S., Sikka V.K. dan Brody H.D. (1992), Using Solidification Parameters to Predict Porosity Distributions in Alloy Casting, *JOM*, (September 1992), 37-40.

Vedat S. A. (1966), *Conduction Heat Transfer*, Addison-Wesley Publishing Co.

Venkatesan A., Gopinath V.M. dan Rajadurai A. (2005), Simulation of Casting Solidification and Its Grain Structure Prediction using FEM, *Journal of Materials Processing Technology* 168, 10-15.

Zhang X. Y., Zhou Z. F., Wu S. L. dan Guan L. Y. (1992), Crack initiation and propagation in a pearlitic nodular iron joint welded with a nickel-iron electrode, *AWS Welding Research Supplement*, 291s-295s.

Zhang X. Y., Zhou Z. F., Xie M. L. dan Zhang Y. M., (1995), A newly developed nickel-iron electrode with superior hot cracking resistance and high-strength properties for welding perlitic nodular iron, *Welding Research Supplement*, 16s-20s.

Zhang X. Y., Zhou Z. F., Zhang Y. M., Wu S. L. dan Guan L. Y. (1996), Influence of nickel-iron electrode properties and joint shapes on welded joint strength of pearlitic nodular iron, *AWS Welding Research Supplement*, 280s-284s.

Zhong M., Liu W. dan Zhang H. (2005), Corrosion and wear resistance characteristics of NiCr coating by laser alloying with powder feeding on grey iron liner, *Wear Journal*, (In Press).

PUSTAKA DARI SITUS

Carley, L. (2000), Cast Iron Crack Repair, *www. CarleySoftware.com*. diturunkan pada bulan Desember tahun 2002.

TWI (2000a), Welding of cast iron, *World Center for Material Joining Technology*, TWI website, diturunkan pada bulan Desember tahun 2002.

TWI (2000b), Oxyacetylene and bronze welding of cast iron, *World Center for Material Joining Technology*, TWI website, diturunkan pada bulan Desember tahun 2002