

RINGKASAN

Besi Cor Nodular (BCN) yang juga dikenal dengan Besi Cor Ulet (ductile), karena sifat-sifatnya dewasa ini makin banyak dipakai dalam pembuatan komponen-komponen mesin.

Suatu pengkajian yang membahas tentang keterkaitan antara proses pembuatan BCN yang memuat banyak variabel dengan metoda optimasinya sangat perlu dilakukan, guna mendapatkan suatu bentuk proses pembuatan BCN yang optimum baik ditinjau dari segi teknologi maupun ekonomi.

Studi kasus yang dilakukan kali ini adalah pembahasan tentang Metoda Optimisasi Teknologis dengan parameter Komposisi Kimia Base Material yang digunakan dalam proses pembuatan BCN.

1. BESI COR NODULAR KINI DAN ESOK

Besi Cor Nodular (BCN) adalah besi cor yang memiliki grafit berbentuk bulat, oleh karenanya BCN juga dikenal sebagai Besi Cor Spherulitik (Spherulitic Iron) dan Besi Bergrafit Sferoidal (Spheroidal Graphite Iron). BCN ini memiliki keuletan yang tinggi sehingga sering juga disebut Besi Cor Ulet (Ductile Cast Iron).

Sampai seberapa jauh BCN berperan dalam kehidupan kita terutama dalam bidang industri pengecoran logam, serta bagaimana perkembangan dan prospeknya di masa datang akan menjadi pokok bahasan dalam sub bab berikutnya.

1.1 Sejarah Besi Cor Nodular

Pada tanggal 7 Mei 1948, mulailah babak perkembangan baru mengenai segala hal yang menyangkut BCN. Pada saat itu Henton Morrogh dari British Cast Iron Research Association menulis dalam Laporan Tahunan AFS (American Foundrymen's Society), tentang pembentukan struktur grafit bulat dalam besi cor apabila dilakukan penambahan cerium. Akibatnya Henton Morrogh sering dikenal sebagai pionir dalam bidang BCN, dua pionir lainnya yang juga cukup terkenal adalah Albert Gagnebin dan Keith D. Millis dari Ductile Iron Society (DIS).

Pada tahun 1949, Inco (International Nickel CO.) mengeluarkan lisensi yang berisikan tentang pembuatan besi cor bergrafit bulat dengan proses penambahan magnesium. Kemudian tak lama kemudian lisensi tersebut mendapat tanggapan dari Prof. Howard Taylor dari MIT, dengan mengadakan suatu pertemuan yang membahas BCN di Swampscott, di mana diundang para ahli dari Amerika Serikat, Kanada dan Eropa. Pertemuan di atas ternyata merupakan konferensi pertama yang membahas tentang BCN, dimana selanjutnya konferensi ini menjadi titik awal bagi perkembangan industri BCN.

Perkembangan BCN ini menunjukkan suatu fenomena luar biasa untuk lebih jelasnya dalam

melihat fenomena yang luar biasa tersebut dapat kita lihat dalam kronologi berikut ini.¹⁾

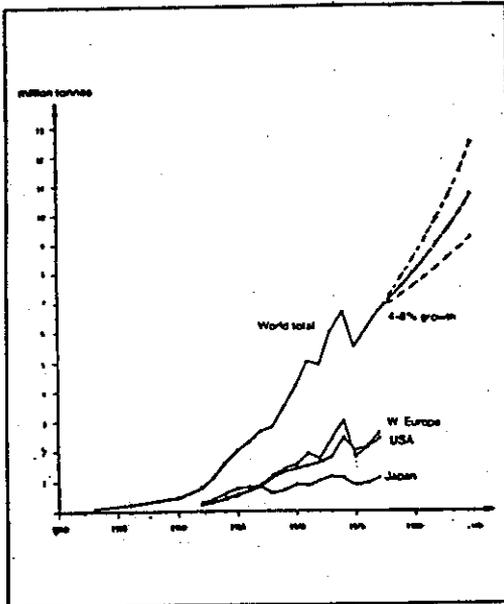
- a. Pada tahun 1949, laju pertumbuhan produksi BCN bisa dikatakan mengalami kenaikan walaupun kenaikannya rendah. Kemudian sampai pada awal tahun 60-an, laju pertumbuhan produksi naik secara kontinyu dan makin mantap. Penyebab rendahnya laju pertumbuhan pada awal produksi adalah masih diperlukan waktu 10 tahun untuk:
 1. memperkenalkan sifat-sifat BCN agar bisa dipakai dengan tingkat kepercayaan yang memadai,
 2. menunjukkan kepada para pemakai bahwa produsen sanggup mensuplai dalam jumlah yang cukup dengan kualitas yang dapat diandalkan.
- b. Memasuki dasa warsa 60-an, laju pertumbuhan produksi naik dengan cepat dari 25% sampai 40% setahun. Produksi BCN di Amerika Serikat pada dasa warsa ini naik dari 190.000 ton pada tahun 1960 sampai 2.140.000 ton pada tahun 1970 dan kemudian melonjak mencapai sekitar 3.000.000 ton pada tahun 1973.
- c. Saat ini, jumlah dan laju produksi sudah tidak begitu menjadi masalah lagi karena kebutuhan BCN dari tahun ke tahun masih menunjukkan kenaikan. Masalah yang dihadapi dewasa ini di mana material-material baru ditemukan, adalah bagaimana memperbaiki kontrol kualitas BCN terutama pada dapur pengecoran (foundry) kecil yang biasa memproduksi besi cor kelabu. Melihat semua itu, kini mau tidak mau kontrol kualitas mutlak harus dilakukan secara rutin, dan inilah yang memberikan kesempatan pada studi optimisasi menjadi bagian yang menarik untuk dikaji.

Perkembangan BCN tidak hanya dapat kita lihat dari jumlah dan pertumbuhan produksi yang makin membengkak saja, tetapi apabila dibandingkan dengan material lain maka BCN juga akan menunjukkan perkembangan yang menggembirakan. Seba-

gai contoh, stainless steel yang mulai diproduksi (dipatenkan) pada tahun 1913 sedang BCN pada tahun 1949, pada tahun ke 16 produksi BCN jumlah produksi BCN dan stainless steel sudah sampai pada tingkat yang sama. Kemudian pada tahun 1966, 18 tahun setelah dikeluarkannya paten BCN, jumlah produksinya telah melampaui jumlah stainless steel yang patennya telah berusia 53 tahun itu.

1.2 Kebutuhan dan Pemakaian Besi Cor Nodular

Apabila kita telaah Gambar 1, terlihat bahwa sejak awal produksi sampai tahun 1973, produksi BCN mengalami kenaikan seperti yang telah kita bahas sebelumnya. Tetapi kemudian pada dua tahun berikutnya, produksi BCN baik pernegara maupun totalnya mengalami penurunan yang cukup drastis. Hal ini mungkin disebabkan oleh terjadinya krisis energi minyak bumi yang kemudian berlanjut dengan dinaikkannya harga minyak bumi oleh OPEC.

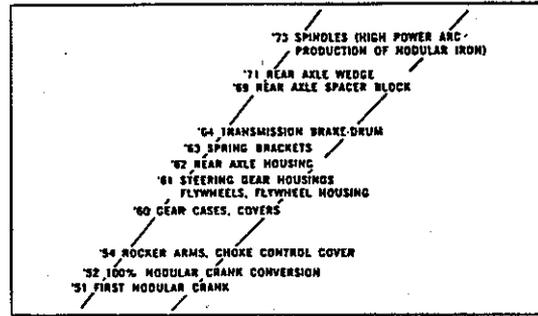


Gambar 1. Volume Produksi BCN Dulu, Kini dan Ramalan Masa Mendatang (2).

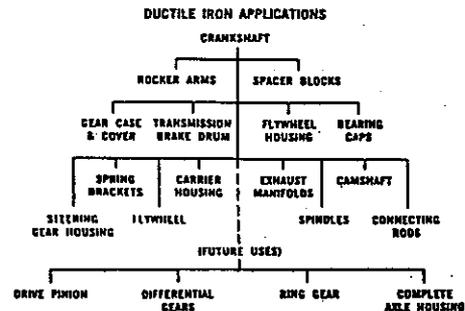
Tahun 1975 sampai 1978 jumlah produksi BCN kembali naik. Laju kenaikannya mencapai 5 sampai 10% setahun dan ini diharapkan tetap sampai dasa warsa delapan puluhan. Sementara itu Gambar 1 juga memberikan gambaran bahwa ramalan produksi BCN pada dasa warsa delapan puluhan ini berkisar antara 4 sampai 8%.

Perkembangan dan produksi BCN di negara-negara besar tentunya tidak begitu mengherankan kita, akan tetapi laporan terkahir menyatakan bahwa pertumbuhan produksi BCN di negara-negara seperti Korea, Afrika Selatan dan Taiwan boleh dikatakan "meledak". Tentunya hal ini mengundang perhatian kita di Indonesia.

Selain alasan-alasan sifat mekanisnya, alasan lain mengapa BCN banyak dipakai adalah rendahnya kebutuhan energi yang dikonsumsi untuk memproduksi BCN persatuan berat. Sebagai perbandingan, untuk memproduksi 1 kg aluminium dibutuhkan 105.066 KJ, sementara untuk BCN hanya 21.013 KJ. Selanjutnya apabila kita kaitkan dengan faktor kekuatannya, yaitu dengan cara melihat rasio antara energi dengan kekuatan, maka untuk memproduksi 1 kg aluminium harga rasio energi dengan kekuatannya berkisar 381 sampai 761 KJ/MPa, sementara untuk BCN berkisar 16,3 sampai 32,6 KJ/MPa. Artinya untuk memproduksi BCN dengan kekuatan yang sama dengan kekuatan aluminium, hanya dibutuhkan energi 50 kali lebih kecil.



Gambar 2. Pemakaian BCN dalam Bidang Industri Otomotif (Ford Motor Company).

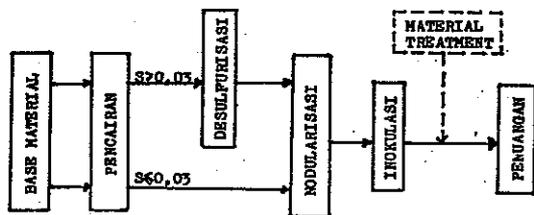


Gambar 3. Perkembangan dan Proyeksi Pemakaian BCN dalam Bidang Industri Otomotif.

Gambar 2. menunjukkan pemakaian BCN dalam bidang industri otomotif dari tahun ke tahun, selanjutnya perkembangan pemakaian BCN dan proyeksi pemakaiannya dimasa datang dapat kita lihat pada Gambar 3.

2. TEKNOLOGI PEMBUATAN BESI COR NODULAR

Pada prinsipnya, proses pembuatan BCN adalah suatu rangkaian proses-proses yang diperlakukan terhadap besi cor agar memiliki struktur grafit yang berbentuk bulat. Proses yang biasa dilakukan, secara skematis dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Skema Proses Pembuatan BCN.

2.1 Base Material

Dalam pembuatan BCN, oleh karena persyaratan (efisiensi dan efektivitas) dalam proses nodularisasi (pembulatan grafit) yang menghendaki kadar sulfur dibawah 0,03%, maka base material yang memiliki kadar sulfur diatas 0,03% harus diperlakukan proses desulfurisasi. (pengurangan kadar sulfur) terlebih dahulu.

Base material selain mengandung sulfur juga mengandung unsur-unsur lain yang sangat berpengaruh dalam pembuatan BCN. Untuk membuat BCN, komposisi kimia baik jenis maupun jumlahnya memiliki batasan tertentu agar dapat dicapai kondisi optimum. Dari literatur⁽⁴⁾ diperoleh bahwa komposisi kimia base material BCN tanpa paduan adalah sebagai berikut:

Total Carbon (TC) %	3,00 – 4,00
Silicon %	1,80 – 2,80
Mangan %	0,10 – 1,00
Phosphor %	0,01 – 0,10
Sulfur %	0,01 – 0,03

Perlu kita ketahui, bahwa prosentase di atas tidaklah mutlak sebab banyak literatur lain yang memberikan harga berbeda-beda terutama untuk unsur-unsur mangan, phosphor dan sulfur, tetapi dengan perbedaan yang tidak terlalu jauh.

2.2 Pencairan

Hampir semua alat pencair (melter) dapat digunakan untuk membuat BCN, seperti cupola, tungku rotary, tungku induksi serta tungku busur. Titik perhatian utama dalam pemilihan alat pencair adalah karakteristik-karakteristiknya. Karakteristik alat pencair antara lain :

1. Kontrol terhadap slag, besi cair, komposisi kimia serta metalurgi.
2. Furnace Lining
3. Unit Pendingin
4. Pemanasan Awal (Pre Heating)
5. Charge Material dan Kapasitas Pencairan
6. Temperatur yang dapat dicapai
7. dan lain-lain.

Sebagai contoh, tungku induksi dengan kapasitas 80 kg, dapat mencapai temperatur 1700°C atau lebih, komposisi kimia cenderung tetap tetapi bila pemanasan terlalu lama kadar silicon akan naik

karena silicon pada furnacanya ikut larut. Sedangkan pada tungku rotary semua komposisi kimia akan berkurang dan temperatur yang bisa dicapai hanya berkisar antara 1500 sampai 1600°C. Karakteristik seperti di atas harus kita ketahui (kalau perlu dengan pasti) agar hasil pencairan yang kita peroleh masih di bawah pengetahuan dan kontrol kita. Selanjutnya apabila terjadi penyimpangan, dengan segera dapat kita lakukan treatment berikutnya (misalnya ladle treatment).

2.3 Desulfurisasi

Sulfur sebagai salah satu unsur yang hampir selalu ada dalam besi, sampai saat ini belum diketahui dengan pasti pengaruhnya dalam pembuatan BCN. Opini-opini yang berkembang sampai saat ini hanya diperoleh melalui eksperimen-eksperimen saja, sementara teori yang pasti belum ada. Opini-opini yang masih saling bertentangan tersebut terbagi menjadi tiga grup, yaitu :

- a. Makin sedikit kandungan sulfur dalam base material akan semakin baik BCN yang diperoleh, dengan kandungan sulfur yang dianjurkan dibawah 0,01%.
- b. Kebutuhan akan base material dengan kandungan sulfur yang rendah semata-mata untuk membulatkan grafit.
- c. Kualitas BCN yang baik dapat diperoleh dari base material dengan kandungan sulfur yang cukup tinggi yaitu 0,2% atau lebih, baik dengan atau tanpa desulfurisasi. Pernyataan ini didasarkan bahwa kandungan sulfur hanya mempengaruhi aspek ekonomi.

Aspek ekonomi pada grup c tersebut muncul karena perbandingan yang menyatakan bahwa untuk memperoleh BCN dengan kualitas yang sama, proses desulfurisasi (dengan CaC_2) yang kemudian dilanjutkan dengan proses nodularisasi (dengan MgFeSi) ternyata lebih murah dibanding dengan proses nodularisasi saja yang tentunya membutuhkan MgFeSi lebih banyak.

Akan tetapi pada dasarnya, para profesional yang berkecimpung dalam bidang BCN sepakat bahwa kondisi optimum yang dinyatakan dalam :

1. tensile dan yield strength maksimum.
2. jumlah nodule grafit (grafit bulat) yang banyak
3. elongasi minimum

terletak di dalam base material dengan kandungan sulfur antara 0,01% sampai 0,03%.

Selanjutnya dalam terminologi pembuatan BCN ini, istilah desulfurisasi berarti suatu proses yang diperlakukan terhadap besi cor cair agar tercapai kadar sulfur dibawah 0,03% dengan tujuan supaya proses nodularisasi lebih murah dan mudah.

2.3.1 Desulfuran

Telah disinggung di atas, bahwa Calcium Carbide (CaC_2) dapat digunakan sebagai bahan dalam proses desulfurisasi (desulfuran). Desulfuran-desulfuran lain yang biasa digunakan adalah,

1. Caustic soda (NaOH)
2. Soda ash (Na_2CO_3)
3. Burnt Lime (CaO)
4. Limestone (CaCO_3)
5. Calcium cyanamide (CaCN_2)

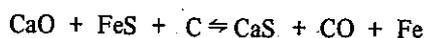
Caustic soda jarang dipakai karena membahayakan kesehatan, limestone sebelum aktif dalam proses desulfurisasi terlebih dahulu harus direduksi menjadi CaO , sedang CaCN_2 jarang dipakai karena gas nitrogen yang terbentuk dapat mengakibatkan cacat pada benda coran.

Dipandang dari batasan-batasan di atas, maka CaO dan CaC_2 adalah desulfuran yang optimal untuk digunakan dalam proses desulfurisasi. Selain alasan-alasan di atas CaO dan CaC_2 masih memiliki sifat-sifat lain yang menguntungkan, yaitu

1. Produksi terak berbentuk granular sehingga mudah dibuang
2. Asap yang dihasilkan sedikit
3. Penurunan temperatur kecil (CaO lebih besar dibanding CaC_2)
4. Penurunan kadar silicon sangat kecil.

2.3.2 Metoda Desulfurisasi

Lepasnya sulfur dari kandungan besi secara sederhana dapat diberikan oleh reaksi berikut (bila dipakai desulfuran CaO),



Efisiensi dan efektivitas reaksi di atas (desulfurisasi) dipengaruhi oleh :

1. persentuhan antara permukaan desulfuran dengan logam cair
2. transport sulfur dari besi ke permukaan desulfuran
3. pengadukan.
4. dwelling time (waktu dimana desulfuran berada di dalam logam cair).
5. ukuran partikel desulfuran.

Jadi, yang diinginkan dari setiap metoda desulfurisasi adalah bagaimana memperoleh pengadukan di dalam logam cair dalam waktu yang lama sehingga seluruh permukaan desulfuran menyentuh besi cair seefektif mungkin.

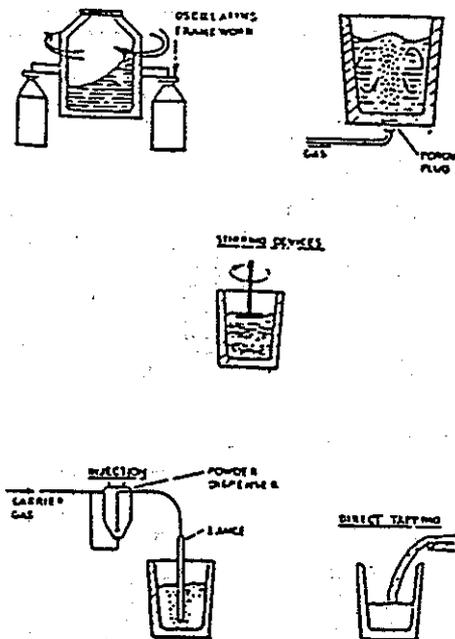
Metoda-metoda yang dikembangkan dari prinsip di atas dan biasa dipakai dalam proses desulfurisasi antara lain :

1. Oscillations Framework
2. Pengaliran Gas melalui Porous Plug
3. Stirring Device
4. Injection dengan menggunakan Powder Dispenser

5. Direct Tapping

6. Vortex Unit

Metoda-metoda 2, 4 dan 6 biasa juga dipakai dalam proses nodularisasi. Secara skematis metoda-metoda desulfurisasi dapat dilihat pada Gambar 5.



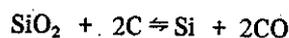
Gambar 5. Beberapa Proses Dasar Desulfurisasi

2.4 Nodularisasi

Fenomena proses pembulatan grafit (nodularisasi), sampai saat ini masih belum berhasil diangkat menjadi sebuah teori yang pasti. Banyak teori yang berkembang dengan berbagai keunggulan dan kelemahannya. Dalam Pembahasan selanjutnya akan dikemukakan salah satu teori yang mempunyai kaitan cukup erat dengan praktek pembuatan BCN.

2.4.1 Teori Batas Fasa atau Teori Gelembung⁽²⁾

Beranjak dari kenyataan bahwa seperti juga retak, pinhole dan inklusi, grafit akan cenderung mengkristal diatas permukaan. Teori ini menyatakan bahwa grafit dapat terbentuk hanya bila proses kristalisasinya dijaga oleh adanya sejenis batas fasa (phase boundary), dan bila batas fasa ini tidak ada maka yang terbentuk adalah carbide atau diamond. Selanjutnya dinyatakan pula bahwa terjadinya batas-batas fasa diakibatkan oleh kehadiran gelembung gas CO dalam logam cair yang timbul akibat reaksi.

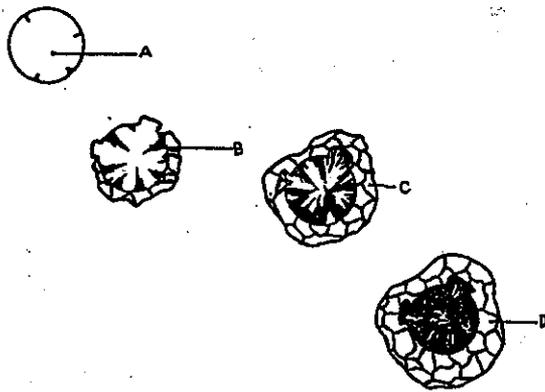


Graft serpih terbentuk melalui proses sebagai berikut, gelembung-gelembung gas yang terbentuk memiliki ukuran yang relatif besar dengan sebagian

permukaannya terbungkus oleh lapisan grafit yang tipis. Selanjutnya grafit tersebut segera masuk ke dalam gelembung yang mengakibatkan pecahnya gelembung tersebut hingga terbentuk grafit serpih yang tidak teratur.

Terbentuknya grafit bulat relatif lebih rumit dibanding dengan grafit serpih. mekanisme terbentuknya grafit bulat adalah sebagai berikut :

- * Akibat hilangnya elemen yang aktif di permukaan seperti sulfur dan juga akibat kehadiran elemen yang aktif di permukaan seperti Mg, maka pertumbuhan grafit yang berbentuk film dapat dicegah. Akibatnya grafit yang tumbuh lebih menyerupai spiral.
- * Volume grafit yang akan mengalami presipitasi harus disediakan dalam gelembung gas CO dengan volume yang sama, hal ini dapat dilakukan dengan menurunkan kadar oksigen.
- * Selama pendinginan berlangsung molekul SiO_2 mengalami presipitasi dengan oksida-oksida inoculan sebagai intinya. Akibatnya keseimbangan menjadi heterogen.
- * Agar tercapai keseimbangan yang heterogen, sebagian SiO_2 bereaksi dengan carbon yang menghasilkan gelembung-gelembung CO yang kecil dan tersebar dengan merata.
- * Selanjutnya, secara ilustratif dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Fasa-fasa Kemungkinan dalam Pertumbuhan Grafit Bulat Menurut Teori Batas Fasa

- A : Gelembung Gas
- B : Grafit Serabut
- C : Besi Cair
- D : Besi Beku (Austenit)

2.4.2 Nodulizer

Dari pembahasan tentang teori pembentukan grafit bulat di atas, dapat ditarik kesimpulan bahwa

unsur pembulat grafit (nodulizer, Mg) memiliki peranan dalam proses nodulisasi walaupun tidak terlalu dominan, tetapi dari pengalaman dalam bidang pembuatan BCN menunjukkan bahwa penambahan nodulizer perlu bahkan harus dilakukan.

Magnesium, cerium, calcium, lithium, sodium, barium dan beberapa unsur lainnya dapat digunakan sebagai unsur pembuat grafit. Dipandang dari segi komersial magnesium dan cerium praktis untuk digunakan. Dibanding dengan cerium, magnesium lebih murah dan lebih baik, cerium hanya efektif digunakan untuk besi cor hipereutektik, sementara magnesium efektif baik untuk besi cor hipereutektik maupun hipoeutektik. Disamping itu magnesium juga dapat berfungsi sebagai unsur untuk proses desulfurisasi lanjut karena reaksinya dengan sulfur dan juga mengikat oksigen.

Dalam pemakaiannya, magnesium tidaklah berbentuk sebagai unsur yang murni (100% Mg), tetapi dipadu dalam bentuk master alloy. Berdasarkan paduannya, nodulizer magnesium tersedia di pasaran (direkomendasi) dalam bentuk-bentuk sebagai berikut :

1. Magnesium metal

Magnesium metal adalah magnesium yang dipadu dengan aluminium dengan konsentrasi yang rendah.

2. Magnesium dengan Paduan Dasar Nikel

Ada 4 jenis nodulizer magnesium dengan paduan dasar nikel yang biasa dipakai dalam pembuatan BCN. Keempat nodulizer tersebut tertera dalam Tabel 1.

Tabel 1. Nodulizer Magnesium dengan Paduan Dasar Nikel ⁽²⁾

Designation	Komposisi Kimia Nominal, persen				
	Mg	Ni	Si	C	Fe
Ni-Mg 1	15	83	—	2,0	—
Ni-Mg 2	15	50	30	—	Bal.
Ni-Mg 3	4,5	93	—	1,5	—
Ni-Mg 4	4,5	60	—	2,5	Bal.

3. Magnesium dengan Paduan Dasar Ferro-Silicon

Nodulizer jenis ini jumlahnya cukup banyak, selain sering digunakan dalam percobaan di laboratorium pemakaiannya dalam pembuatan BCN secara komersial dalam skala besar juga cukup murah

Tabel 2. Komposisi Kimia Nodulizer Paduan Magnesium - Ferro - Silicon (2)

AVERAGE CHEMICAL COMPOSITION PERCENT														
Alloy No.	Mg	Ca	P.E. (Sn/L Ca)	Ba	Co	Li	S	N	Si	Cu	Al	Fe	La	Comments
1	2.8	7	3.0	3.1	7	3.1	—	—	48	—	1.0	Bal.	N.S.	
2	3.0	—	—	—	1.0	—	—	—	46	—	1.0	Bal.	N.S.	
3	3.0	0.4	1.0	—	1.0	—	—	—	48	—	1.0	Bal.	0.27	
4	3.0	1.75	2.2	—	0.4	—	—	—	48	—	1.0	Bal.	N.S.	
5	4.5	N.S.	4.5	—	N.S.	—	—	—	42	—	1.0	Bal.	N.S.	
6	5.5	—	—	—	1.0	—	—	—	46	—	1.0	Bal.	N.S.	
7	5.5	0.3	0.75	—	1.0	—	—	—	46	—	1.0	Bal.	0.20	
8	5.5	0.65	1.25	—	1.0	—	—	—	46	—	1.0	Bal.	0.45	
9	5.5	1.10	2.0	—	1.0	—	—	—	46	—	1.0	Bal.	0.75	
10	5.5	0.9	1.8	—	1.0	—	—	—	46	—	1.0	Bal.	N.S.	
11	5.5	0.4	0.75	—	1.0	—	—	—	46	—	1.0	Bal.	N.S.	
12	5.5	0.5	1.0	—	1.0	—	—	—	46	—	1.0	Bal.	N.S.	
13	6.8	N.S.	11.0	—	22.0	—	—	—	45	—	1.0	Bal.	N.S.	High calcium content
14	8.0	2.0	N.S.	—	10.0	—	—	—	50	—	1.0	Bal.	N.S.	High calcium content
15	9.0	—	—	—	1.25	—	—	—	46	—	1.0	Bal.	N.S.	
16	9.0	0.35	1.0	—	1.25	—	—	—	46	—	1.0	Bal.	N.S.	
17	9.0	0.6	1.00	—	1.25	—	—	—	46	—	1.0	Bal.	N.S.	
18	9.25	0.4	0.7	—	1.0	—	—	—	46	—	1.0	Bal.	0.26	
19	8.0	N.S.	1.25	—	8.0	—	—	—	38	—	1.0	Bal.	N.S.	High calcium content
20	9.0	—	—	5.0	1.5	—	0.5	0.4	48	—	1.0	Bal.	N.S.	Claimed to be self-inoculating
21	12.0	—	—	—	N.S.	—	—	—	40	18	N.S.	Bal.	N.S.	For pearlitic grades
22	30.0	N.S.	2.0	—	4.5	—	—	—	50	—	1.0	Bal.	N.S.	For plunging
23	5-10	N.S.	2.0	1-3	1.0	—	—	—	48	—	1.0	Bal.	N.S.	

N.S.: Non-specified

2.4.3 Metoda Nodularisasi

Dipandang dari segi praktisnya, metoda nodularisasi dapat diartikan sebagai suatu teknik pencampuran antara nodulizer dengan logam cair serta penentuan jumlah nodulizer yang diperlukan. Penentuan metoda nodularisasi biasanya didasarkan pada faktor-faktor berikut ini :

1. Komposisi kimia base material
2. Geometri dan dimensi benda coran
3. Jumlah paduan
4. Temperatur logam saat dikeluarkan dari tungku
5. Komposisi kimia nodulizer
6. Peralatan yang dipakai

Apabila elemen nodulizer yang dipakai adalah magnesium, maka ada beberapa teknik pencampuran yang bisa dilakukan. Teknik-teknik tersebut adalah,

1. T Nock Treatment
2. Metoda Sandwich
3. Metoda Plunging
4. Teknik Penambahan dari Permukaan
5. Vortex Unit
6. Open Ladle
7. Inmold Process

Untuk membandingkan metoda nodularisasi yang satu dengan yang lain biasanya digunakan parameter efisiensi magnesium yang dinyatakan

dalam bentuk : (2)

$$Mg_{\text{recovery}} = \frac{Mg \text{ Analyzed } (\%)}{Mg \text{ Added } (\%) - \text{Base S } (\%)} \times 100$$

Karakteristik metoda-metoda nodularisasi tersebut di atas dapat dilihat pada Tabel 3, dan secara skematis proses nodularisasinya dapat dilihat pada Gambar 7.

2.5. Inokulasi

Sesuai dengan Teori Batas Fasa dalam menerangkan mekanisme terbentuknya grafit bulat, maka yang dimaksud inokulasi adalah penambahan unsur-unsur tertentu (inokulan) pada logam cair dengan tujuan untuk membentuk inti-inti pada proses kristalisasi. Lebih lanjut lagi, pada BCN, tujuan utama inokulasi adalah untuk meningkatkan jumlah inti-inti grafit bulat sebanyak-banyaknya, disamping mencegah terbentuknya karbida-karbida besi yang tidak diinginkan.

2.5.1 Metoda Inokulasi

Untuk memperoleh hasil proses inokulasi yang lebih efektif dapat dilakukan beberapa metoda inokulasi sebagai berikut :

Tabel 3. Karakteristik Metoda Nadularisasi

Metoda Dan Deskripsi	Penggunaan	Efisiensi Mg	Keuntungan	Kerugian
1. Cara Open Ladle : Logam cair dituangkan diatas paduan Mg yang diletakkan diatas ladle.	S - 2 L - 3	20 - 30%	- sederhana - penggunaan luas	- reaksinya hebat, menghasilkan uap & asap - perlu besi asal berkadar Si rendah
2. Metoda Sandwich : Modifikasi cara Open Ladle dengan penambahan kantung untuk paduan Mg dan tutup untuk memperlambat reaksi Mg.	S - 1 L - 1	40 - 50%	- Mgrec lebih tinggi - bisa dipakai pada bermacam-macam ukuran ladle.	- sama seperti pada open ladle.
3. Metoda Plunging : Tabung refraktori yang berlubang mengandung nodulan dibenamkan kedalam ladle berisi besi cair.	S - 4 L - 2	50%	- ongkos nodulan lebih rendah - asap sedikit - dapat dimekani-sasi.	- penurunan suhu tinggi - ongkos peralatan lebih tinggi - waktu prose lebih lama - tidak fleksibel
4. Meroda Porous Plug : Pemberiat efek turbulensi melalui gelembung gas inert yang disebarkan dari bawah sebagai sarana pengaduk.	S - 3	40-50%	- dapat juga berfungsi untuk desulfurisasi atau pos inoculasi	- kerugian panasnya besar
5. Inmold Process : Penambahan nodulan pada sistem saluran turun (gating) dari cetakan	L - 3	hampir 90%	- reaksi Mg tidak tampak - jumlah terak sedikit - pos inoculasi di-tiadakan - penurunan suhu rendah - dapat diotomati-sasikan	- perhitungan gating system harus teliti - pengontrolan kadar bele-rang harus teliti - kemungkinan menghasilkan coran mutu rendah
6. Cara Injeksi : Injeksi bubuk atau butiran nodulan yang halus ke bagian bawah permukaan logam cair	-	-	- bisa menggunakan Mg metalik - bisa dipakai pada bermacam-macam ukuran ladle. - dapat dimekani-sasi.	- penurunan suhu tinggi - reaksinya hebat
Keterangan : - S : Small Foundries (kapasitas produksi kurang dari 100 ton/minggu) - L : Large Foundries (kapasitas produksi lebih dari 100 ton/minggu)				

1. setelah penambahan nodulizer pada logam cair sesuai dengan metode nodularisasi yang dipakai, kemudian logam cair tersebut bersama dengan inokulan dituangkan ke dalam sebuah ladle.
2. penambahan nodulizer ke dalam logam cair yang dituang setengah bagian, kemudian dilanjutkan setengah bagian berikutnya dituang bersama dengan inokulan.
3. pengadukan inokulan di dalam logam cair
4. kombinasi antara metoda pada no. 2 dan 3

2.5.2 Inokulan

Secara umum, di dalam proses inokulasi besi cor dikenal dua tipe inokulan, yaitu graphitizing dan stabilizing. Kedua tipe inokulan tersebut digunakan dalam inokulasi besi cor kelabu, sedang untuk BCN hanya digunakan inokulan tipe graphitizing. Selanjutnya inokulan tipe graphitizing dibagi lagi menjadi dua jenis, yaitu standard dan proprietary. Komposisi kimia inokulan graphitizing standard dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Komposisi Kimia Beberapa Inokulan Graphitizing Standard

Inokulan	% Si	% Ca	% Al
50% FeSi	47,5	0,20	1,30
75% FeSi	76,5	0,50 min*	1,30
85% FeSi	86,0	0,50 min*	1,30
Calcium Silicide	62,5	32,0	1,10

* juga tersedia dengan Ca min. 1,50%

50% FeSi tidak banyak dipakai sebagai inokulan yang fungsinya untuk mengontrol struktur grafit dalam besi cor. Meskipun demikian, bila jumlah Ca terletak antara 0,80% sampai 1,25% serta Al antara 1,00% sampai 1,50% inokulan ini cukup efektif untuk tujuan di atas.

75% dan 85% FeSi biasanya tersedia dalam dua range Ca, minimum 0,50% dan 1,50%. Inokulan jenis ini beroperasi pada temperatur diatas 1455°C. Bila jumlah Ca tinggi, inokulan ini memiliki kemampuan yang besar dalam proses inokulasi, tetapi bila Ca terlalu banyak akan meningkatkan jumlah slag dalam logam cairnya. Jadi bila memungkinkan dalam prakteknya, lebih baik digunakan inokulan ini dengan kandungan Ca yang rendah, terutama bila inokulan diperlukan dalam jumlah yang besar (0,40% atau lebih).

Tabel 5. Komposisi Kimia Beberapa Inokulan Graphitizing Proprietary

Inokulan	% Si	% Ca	% Al	% Elemen lain
Ca/Si	57,5	14,0	1,00	—
Ca/Si/Ti	52,5	6,0	1,10	Ti 10
Si/Mn/Ti	62,5	3,5	1,00	Mn 6, 0—Zr 6,0
Si/Mn/Zr/Ba	62,5	2,1	1,00	Mn 6, 0—Zr 6,0—Ba 2,5
Si/Mn/Ca/Ba	62,5	2,1	1,25	Mn 10, 0—Ba 5,0
Si/Sr	77,5	—	0,5 max	Sr 1,0
Ce/Si	38,0	0,5	0,5	Ce 10, 0—RF 3,0
Si Eksotermis	61,0	0,5	1,10	NaNO ₃ 10—Mg 2,50

Tabel 5 menunjukkan sejumlah inokulan graphitizing proprietary yang memiliki beberapa kelebihan dibanding dengan inokulan ferro-silicon standard. Kelebihan-kelebihannya adalah,

1. untuk mendapatkan hasil coran yang diinginkan, diperlukan inokulan dalam jumlah yang lebih sedikit
2. karena alasan di atas, maka biaya inokulasi menjadi lebih kecil
3. perubahan komposisi kimia yang terjadi pada penggunaan inokulan ini sangat kecil, karena jumlah inokulan yang dipakai sedikit.

Dari delapan jenis inokulan yang tertera pada Tabel 5, hanya dua yang biasa dipakai untuk proses inokulasi BCN, yaitu paduan Ce/Si dan Si/Mn/Ca/Ba.

Paduan Si/Mn/Ca/Ba juga efektif digunakan sebagai inokulan dalam proses post inokulasi BCN. Dalam pemakaiannya, dibandingkan dengan ferro-silicon, paduan Si/Mn/Ce/Ba memiliki kelebihan-kelebihan sebagai berikut :

1. penambahan 0,30% Si/Mn/Ca/Ba sama efektifnya dengan penambahan 1,00% ferro-silicon
2. berdasarkan hal di atas, hanya seperempat bagian dari sejumlah silicon yang harus ditambahkan, telah menjadikan kelebihan silicon dalam charge (muatan)
3. makin banyak silicon dalam charge, baik yang berasal dari base materialnya maupun yang berasal dari penambahan ferro-silicon yang jumlahnya lebih besar dibanding Si/Mn/Ca/Ba, perlu dipertimbangkan keuntungan-keuntungannya dalam mempertinggi umur furnace.
4. hampir dalam segala hal, akan lebih ekonomis bila menggunakan proprietary pada BCN.

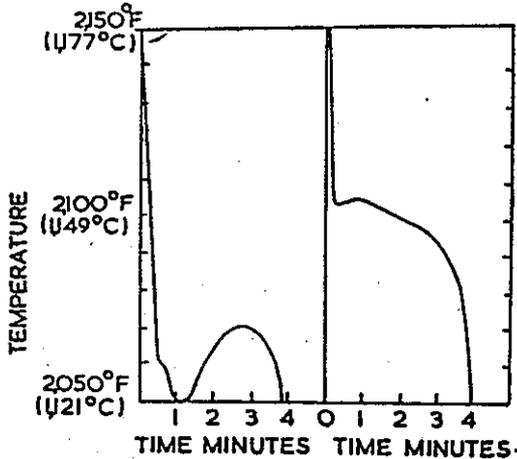
2.5.3 Efek Inokulasi

Sebagaimana dalam besi cor kelabu, pendinginan (undercooling) pada BCN mengakibatkan efek nyata pada pembentukan carbide-carbide selama solidifikasi. Penggunaan inokulan pada BCN dapat mencegah pembentukan carbide primer. Efek di atas akan lebih jelas dengan memperhatikan kurva pendinginan Gambar 8.

Pada Gambar 8 ditunjukkan dua buah kurva pendinginan, satu untuk BCN tanpa proses inokula-

si sedang yang lain dengan proses inokulasi (post inokulasi) yang menggunakan inokulan paduan, 0,30% Si/Mn/Ca/Ba (proprietary graphitizing).

Kurva pendinginan BCN tanpa inokulasi menunjukkan tingginya tingkat pendinginan sebelum proses solidifikasi, hal ini mengakibatkan terjadinya struktur carbide pada tingkat yang tinggi. Struktur mikro yang diperoleh dari keadaan ini dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 8. Kurva Pendinginan BCN; tanpa inokulasi (kiri) dibandingkan dengan menggunakan inokulasi atau post inokulasi.

Gambar 9 menunjukkan bahwa bentuk-bentuk grafit irregular pada besi cor tanpa inokulasi adalah temper carbon yang terbentuk karena pengaruh carbide primer setelah solidifikasi. Grafit yang berbentuk serpih (flake) tersebut bukanlah grafit vermicular di mana bentuk serpih pada keadaan normal terbentuk karena kurangnya nodulizer dalam proses nodularisasinya.

Gambar 10 menunjukkan struktur mikro BCN yang sama dengan pada Gambar 9 tetapi dengan proses inokulasi (post inokulasi). Terlihat bahwa grafit nodul terbentuk dengan baik dalam matriks ferit dan perlit, serta tak terlihat adanya carbide primer.



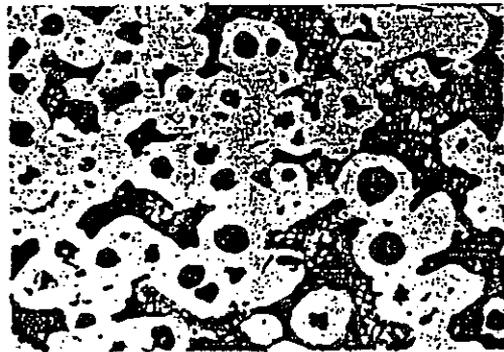
Gambar 9. Struktur mikro BCN tanpa inokulasi x 150

Efek lain dari proses inokulasi adalah,

1. mengakibatkan terjadinya suatu mekanisme untuk menghasilkan bentuk yang lebih sempurna dan lebih menyeragamkan penyebaran nodul grafit.
2. mengembangkan nodularitas struktur grafit.
3. meningkatkan rasio ferit-perlit dalam matriksnya, hal ini akibat tidak langsung dari penambahan inti grafit karena inokulasi.
4. mencegah, atau memperkecil terbentuknya carbide.

Setelah kita bahas mengenai prinsip, metode, bahan serta efek inokulasi, satu hal yang tak kalah pentingnya dalam pembahasan ini adalah penentuan jumlah inokulan. Penentuan jumlah inokulan bergantung pada :

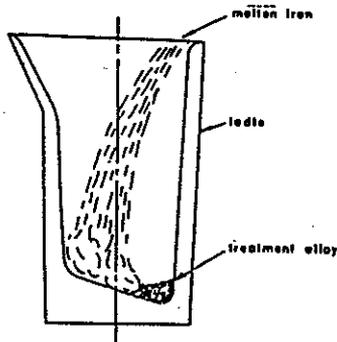
1. komposisi kimia base material
2. temperatur logam cair
3. ukuran cetakan
4. banyaknya charge
5. media yang digunakan untuk pencairan logam
6. bahan cetakan
7. waktu pencairan, desulfurisasi, nodularisasi serta waktu antara proses-proses tersebut.



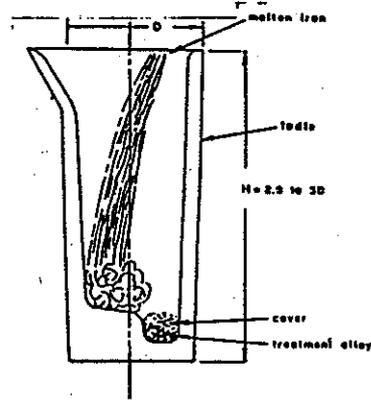
Gambar 10. Struktur mikro BCN dengan inokulasi x 150

Rangkaian proses pencairan—desulfurisasi—nodularisasi—inokulasi adalah proses standard yang dilakukan dalam pembuatan BCN. Sebenarnya, masih ada satu proses lagi yaitu material treatment yang diartikan sebagai proses penambahan elemen paduan utama yaitu C, Si, Mn, P, S atau proses penambahan elemen paduan minor yang meliputi Cr, Ni, Mo, V, Cu, Pb dan Ba.

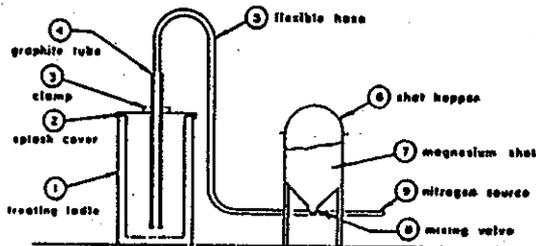
Berdasarkan pengalaman, material treatment bisa dilakukan pada proses manapun, baik bersamaan pencairan, desulfurisasi, nodularisasi maupun inokulasi. Tetapi proses material treatment ini paling sering dilakukan setelah inokulasi, dengan alasan bahwa setelah inokulasi apabila kita periksa



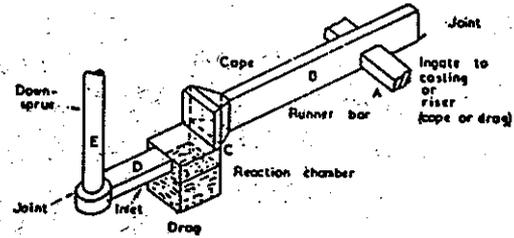
a. Metoda Open Ladle



b. Metoda Sandwich



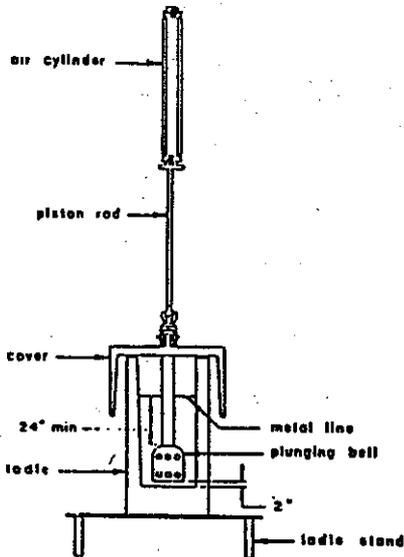
d. Metoda in mold



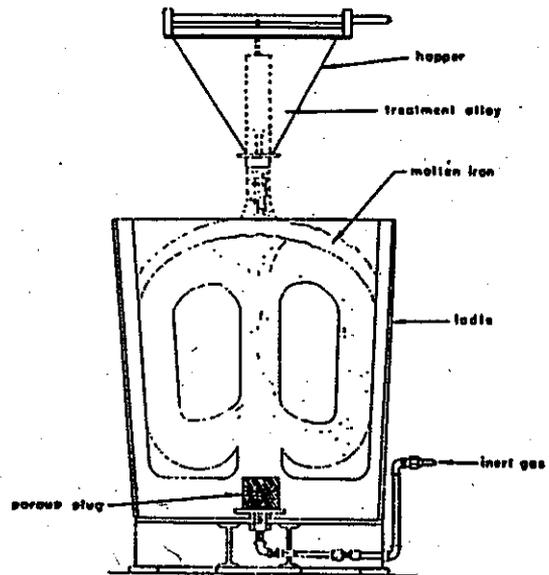
c. Metoda Injeksi

GATING SYSTEM FOR ONE OR TWO CASTINGS PER FLASK

Chamber	area	shape	Square x 10 ⁻⁹ to ft ²	pouring rate chamber area
A	x x	sq. in.		
B	x x 10 ^{1/2}	sq. in.		
C	x x 12%			
D	x x 30%			
E	x x 30%			



e. Metoda Plunging



f. Metoda Porous Plug

Gambar 7a – F. Beberapa Metoda Proses Nodularisasi

kandungan unsur-unsurnya dalam keadaan cair, akan kita dapatkan harga yang sudah tidak berubah lagi. Sehingga elemen paduan utama maupun minor yang akan ditambahkan, jumlahnya dapat diatur dan disesuaikan dengan hasil akhir yang kita inginkan.

3. METODA OPTIMASI

Optimasi seperti telah kita ketahui bersama, adalah kegiatan untuk memperoleh suatu hasil terbaik dari keadaan-keadaan yang diberikan. Tujuan utama setiap keputusan yang dihasilkan melalui proses optimasi, pada dasarnya adalah minimasi input yang dibutuhkan atau maksimasi output yang ingin dicapai. Jika dalam kondisi prakteknya output dapat diekspresikan ke dalam bentuk fungsi dengan input sebagai variabelnya, maka optimisasi dapat didefinisikan sebagai suatu proses untuk mendapatkan kondisi-kondisi (input) yang memberikan harga minimum atau maksimum fungsi tersebut.

Dalam penelitian yang menyangkut masalah pengecoran, data yang diperoleh biasanya tidak diekspresikan ke dalam bentuk fungsi matematis, melainkan dituangkan dalam bentuk gambar (struktur mikro), tabel serta grafik. Pengolahan data selanjutnya, baik data yang berupa tabel serta gambar yang kemudian diolah secara kuantitatif dapat ditungkan dalam bentuk diagram (kurva), tanpa disertai formulasi matematisnya yang biasanya merupakan polinom berderajat tinggi dan rumit.

Analisa optimisasi yang paling logis untuk dilakukan dalam penelitian pengecoran ini adalah analisa optimisasi terhadap grafik-grafik yang dihasilkan dari pengujian. Metoda yang cocok digunakan untuk masalah seperti ini adalah Unconstrained Peak Seeking Methods untuk kasus Single Variable Elimination Methods. (5)

Dari pembahasan mengenai proses pembuatan BCN, terlihat banyak faktor-faktor yang bisa berlaku sebagai variabel dalam analisa optimisasi ini. Dalam kesempatan ini yang kita pilih sebagai variabel hanya elemen paduan utama C, Si, Mn, P dan S yang divariasikan pada proses material treatment. Untuk lebih jelasnya lihat Gambar 11.

3.1. Konstanta Proses.

Bila kita perhatikan Gambar 11 di atas, maka apabila telah kita tentukan bahwa yang menjadi variabel dalam proses ini adalah elemen paduan utama dalam proses material treatment, sementara kita tahu bahwa proses lainnya juga bisa divariasikan, maka kita harus melakukan hal berikut ini :

Semua variabel baik yang bebas maupun tak bebas akan dijadikan sebagai suatu konstanta yang ditentukan. Penentuan variabel menjadi konstanta tersebut dibatasi oleh suatu kri-

teria untuk mempermudah analisa optimisasi dan menghasilkan output yang kita inginkan.

Variabel-variabel yang dijadikan konstanta proses adalah,

1. Jenis Alat Pencair (Cupola, Tungku Induksi, Tungku Putar)
2. Temperatur dan Waktu Pencapaian
3. Desulfurisasi (Metoda dan Desulfuran yang dipakai)
4. Nodularisasi (Metoda dan Nodulizer yang dipakai)
5. Inokulasi (Metoda dan Inokulan yang dipakai)
6. Waktu Antara
 - a. Waktu Antara Tapping dengan Desulfurisasi
 - b. Waktu Antara Desulfurisasi dengan Nodularisasi
 - c. Waktu Antara Nodularisasi dengan Inokulasi
 - d. Waktu Antara Inokulasi dengan Material Treatment
 - e. Waktu Antara Material Treatment dengan Penuangan ke dalam Cetakan.
7. Cetakan (Metoda Pembuatan, Bahan, Bentuk dan Dimensi).

3.2. Variabel Proses

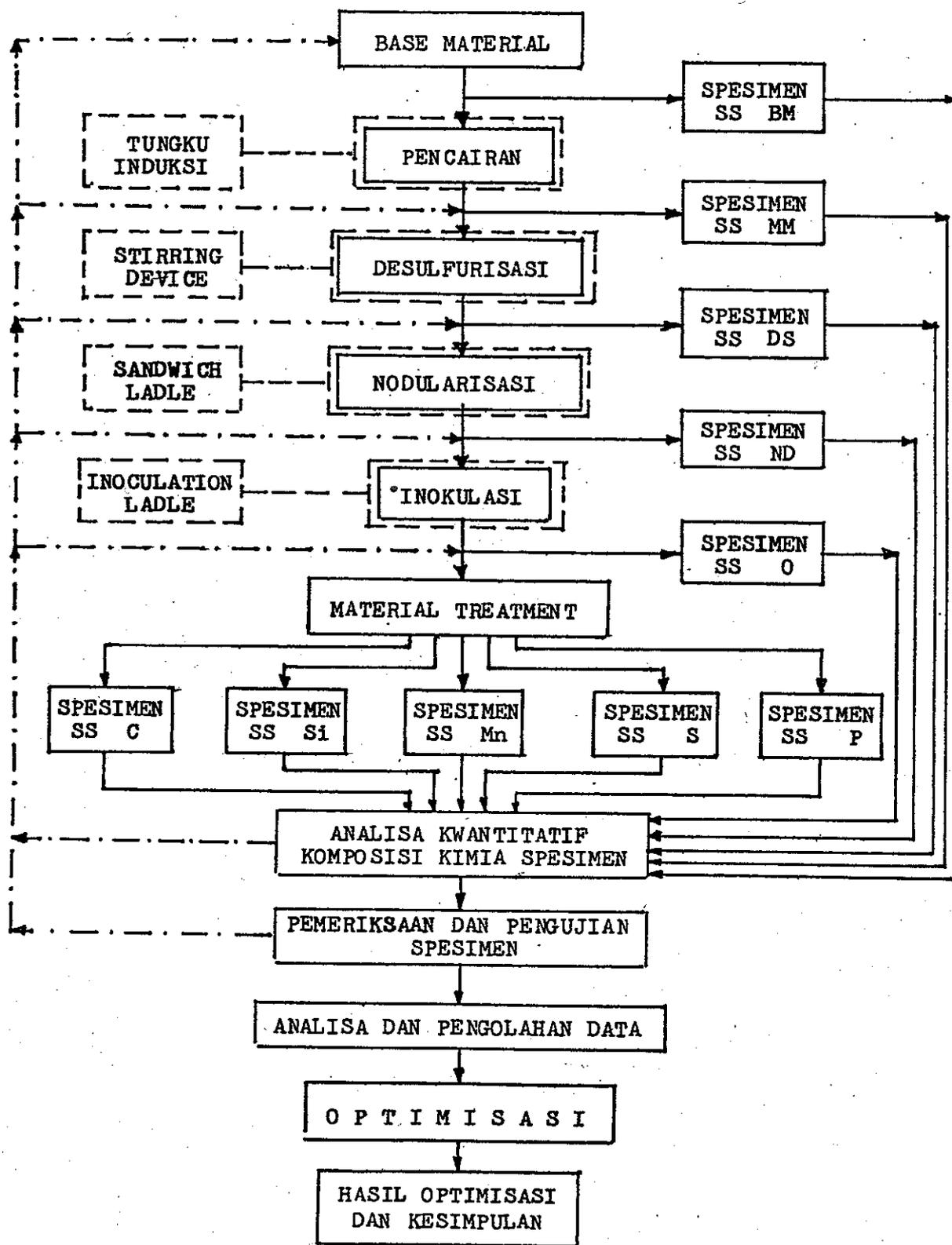
Seperti telah disinggung di depan, Base Material BCN tanpa paduan mengandung C, Si, Mn, P dan S yang memiliki range komposisi tertentu. Tentunya setelah mengalami proses desulfurisasi-nodularisasi-inokulasi komposisinya akan berubah.

Material Treatment lebih lanjut guna mempertegas definisi sebelumnya, diartikan sebagai usaha untuk mengembalikan komposisi kimia base material dari penyimpangan akibat proses pembuatan BCN yang telah dilakukan. Selanjutnya, pada prosentase berapa komposisi kimia akan kita kembalikan tergantung pada sifat-sifat material yang ingin kita capai.

Jadi, terminologi optimisasi, lebih tegas didefinisikan sebagai operasi untuk mendapat sifat material yang kita inginkan, di mana sifat material ini kita tempatkan sebagai output optimisasi yang merupakan fungsi dari elemen paduan utama, di mana elemen paduan utama ini dijadikan input (variabel) proses.

Sebelum kita bahas mengenai variabel prosesnya, akan kita tentukan lebih dahulu output yang kita inginkan. Dari Gambar 10, setelah kita dapatkan spesimen uji dan dianalisa komposisi kimianya secara kuantitatif, maka hal selanjutnya yang perlu dilakukan adalah Pengujian dan Pemeriksaan Material, yang lebih lanjut dapat dideskripsikan sebagai berikut :

1. Sifat-sifat Mekanis yang meliputi
 - kekuatan yield dan tensile
 - kekerasan



Gambar 11. Diagram Proses, Pengambilan Spesimen serta Pengolahan Data Hasil Pengujian

- elongasi
- keuletan
- ketangguhan dll.

2. Pemeriksaan Metallografi yang menghasilkan

- besar butir grafit bulat
- jumlah grafit Bulat
- jumlah grafit total
- nodularitas
- jumlah dan persentase perlit
- jumlah dan persentase ferit

Dalam kesempatan ini akan diambil sebagai studi kasus optimisasi adalah kekuatan tarik (tensile).

Dalam proses material treatment kita tentukan bahwa C, Si, Mn, P dan S sebagai input (variabel) proses. Selanjutnya akan kita tinjau apakah variabel-variabel di atas merupakan variabel bebas atau tak bebas. Untuk itu akan kita bahas lebih dahulu karakteristik-karakteristik variabel di atas satu persatu.

3.2.1. Carbon

Dalam terminologi pembahasannya dikenal peristilahan Carbon Equivalen (CE) dan Total Carbon (TC). Yang dimaksud dengan CE adalah suatu bilangan yang menyatakan hubungan antara carbon dengan unsur-unsur lain dalam base material, oleh karenanya CE memiliki berbagai harga tergantung pengaruh unsur lain tersebut, dengan formulasi-formulasi sebagai berikut :

1. Jika yang mempengaruhi hanya silicon, maka

$$CE = \% TC + \frac{1}{3} \% Si$$

untuk formulasi di atas maka komposisi eutektik berada pada CE = 4,3. Harga CE = 3,9 menyatakan paduan dengan kandungan carbon dan silicon lebih kecil (hypoeutektik) dari komposisi eutektiknya, dan harga CE = 4,55 menyatakan paduan antara carbon dan silicon lebih besar (hypereutektik) dari komposisi eutektiknya. Perlu diketahui bahwa range komposisi yang memberikan harga CE antara 3,9 sampai 4,55 adalah range komposisi yang menjadi syarat dalam pembuatan BCN.

2. Jika yang mempengaruhi adalah silicon dan phosphor,

$$CE = \% TC + \frac{1}{3} (\% Si + \% P)$$

formulasi ini juga memberikan kondisi eutektik pada CE = 4,3

3. Formulasi lain yang lebih akurat diberikan dalam bentuk

$$CE = \% TC + 0,312\% Si + 0,33\% P - 0,078 (\% Mn - 1,8 \% S)$$

dengan formula ini komposisi eutektik dicapai pada harga CE = 4,23

Perlu dicatat bahwa besi cor yang memiliki harga CE sama tetapi kandungan carbon, silicon dan lain-lain berbeda akan memiliki sifat pengecoran yang berbeda pula.

Terminologi lain dalam pembahasan mengenai carbon ini adalah Combined Carbon, yang diartikan sebagai carbon dalam besi yang terikat secara kimia dengan unsur-unsur lain dan bukan sebagai carbon bebas seperti grafit atau temper carbon. Banyaknya kandungan Combined Carbon dalam besi merupakan selisih antara Total Carbon dengan Graphitic Carbon.

Fungsi utama carbon dalam BCN adalah sebagai unsur pokok pembentuk grafit, sedang pengaruh carbon terhadap sifat-sifat mekanis dapat dideskripsikan sebagai berikut :

Kenaikan kandungan carbon dari 3,00 sampai 4,00% akan mengakibatkan :

- penurunan kekuatan tarik
- penurunan elongasi
- penurunan pengecilan penampang.

3.2.2. Silicon

Silicon merupakan unsur dalam base material yang memiliki jumlah persentase yang cukup besar setelah carbon. Dalam semua bentuk CE, silicon selalu berpengaruh. Dipandang dari metallurginya silicon berperan sebagai unsur pembentuk grafit dan ferit. Sedangkan pengaruh silicon terhadap sifat-sifat mekanisnya dapat diterangkan sebagai berikut .

Kenaikan kandungan silicon akan mengakibatkan:

- kenaikan kekuatan tarik
- kenaikan kekerasan
- penurunan elongasi
- penurunan kekuatan impact

3.2.3. Sulfur

Dalam komposisi kimia BCN, baik ditinjau dari segi praktek maupun teorinya (Teori Batas Fasa), sulfur merupakan unsur yang tidak dikehendaki kehadirannya. Seperti telah kita ketahui dalam pembahasan tentang desulfurisasi, bahwa kadar sulfur dibawah 0,03% merupakan syarat yang harus dipenuhi sebelum proses nodularisasi dilakukan. Dari pembahasan di atas telah kita ketahui juga bagaimana pengaruh sulfur terhadap sifat mekanis dan struktur mikro. Studi dan pengalaman lebih lanjut menunjukkan bahwa range sulfur yang paling efektif untuk mendapatkan respon maksimum pada proses nodularisasi serta post inoculasi adalah 0,005 sampai 0,0012%. Pada range tersebut dihasilkan carbon primer paling sedikit

sehingga jumlah nodul grafitnya maksimum. Data penelitian (2) lain menunjukkan bahwa ada kecenderungan terbentuknya ferit dipengaruhi oleh rasio Mn/S. Pada kandungan silicon sebanyak 2,6%, jumlah ferit maksimum akan terjadi bila rasio Mn/S sebesar 15 sampai 17.

3.2.4. Mangan

Efek sulfur harus diperhitungkan terhadap kandungan mangan dalam besi. Tanda kehadiran mangan dalam besi, sulfur bersama-sama besi akan membentuk besi sulfida (FeS), yang terbentuk pada batas-batas butir selama proses solidifikasi. Jika jumlah mangan dalam besi cukup, maka semua sulfur bersama-sama mangan akan membentuk mangan sulfida, peristiwa tersebut terjadi sebagai partikel-partikel yang terdistribusi secara random di dalam struktur mikronya.

Dengan cara yang sama, mangan secara efektif dapat dihilangkan seperti sebuah elemen paduan, jika mangan tersebut bergabung dengan sulfur. Sebelum efek mangan sebagai suatu paduan dapat direalisasikan, jumlah mangan yang ada harus lebih besar dari jumlah mangan yang bergabung dengan sulfur. Besarnya mangan yang bergabung dengan sulfur diberikan dalam bentuk persamaan sebagai berikut (4):

$$\% S + 1,7 \approx \% M$$

Keseimbangan kandungan sulfur dan mangan yang akan saling menetralkan dan menaikkan jumlah maksimum ferit bebas dan kekerasan minimum dapat diberikan dalam bentuk persamaan keseimbangan sebagai berikut (4):

$$1,7 X \% S + 0,15 \approx \% Mn$$

Kelebihan mangan dalam keseimbangan di atas akan mengembangkan struktur perlit dan menaikkan kekuatan serta kekerasan.

3.2.5. Pospor

Pospor biasa terdapat dalam besi. Dalam jumlah kecil pospor akan tetap menyebar dalam larutan padat (solid solution), tetapi dalam jumlah yang besar akan membentuk steadite.

Sebelum menaikkan temperatur logam cair kepada temperatur yang lebih tinggi untuk penuangannya, besi dengan kandungan pospor yang tinggi memiliki fluiditas yang tinggi pula, hingga biasa digunakan untuk penuangan benda coran yang tipis.

Penambahan pospor akan mengakibatkan:

- kenaikan kekuatan tarik
- kenaikan kekerasan
- penurunan elongasi
- penurunan ketangguhan
- penurunan keuletan

sampai pada jumlah tertentu, kenaikan selanjutnya

akan memperkecil keuletan tanpa mempengaruhi kekuatannya.

3.3. Teknis Penentuan Spesimen Uji

Dengan melihat kembali range komposisi base materialnya, maka dapat dibayangkan betapa banyaknya kombinasi yang bisa dicapai untuk membuat spesimen uji. Karenanya untuk menentukan komposisi spesimen uji perlu kita kaji kembali pengaruh tiap unsur terhadap output yang kita inginkan. Sebagai studi kasus akan kita lihat hubungan kekuatan sebagai fungsi dari carbon dan silicon. Dari pembahasan sebelumnya dapat kita ketahui bahwa :

- * penambahan carbon dari 3,00 sampai 4,00% akan menurunkan kekuatan tarik
- * sementara penambahan silicon (1,80 s/d 2,80%) justru malah menambah kekuatan tarik.

Jadi, apabila kita ingin melihat korelasi antara kekuatan tarik dengan carbon dan silicon, maka spesimen uji yang kita butuhkan minimal terdiri dari :

1. Spesimen yang diambil setelah proses inokulasi, di mana spesimen ini direncanakan mengandung 3,00% C dan 1,80% Si, selanjutnya spesimen ini kita sebut SS O.
2. Khusus untuk melihat pengaruh carbon terhadap kekuatan tarik, kita buat spesimen dalam dua tipe berikut ini :
 - a. Spesimen SS C_I, yang mengandung 1,80% Si dan kemudian ditambah carbon secara segmental hingga didapat kandungan carbon dari 3,00% sampai 4,00%.
 - b. Spesimen SS C_{II}, sama dengan spesimen SS C_I tetapi kandungan siliconnya sebesar 2,80%.
3. Dan untuk melihat pengaruh silicon terhadap kekuatan tarik, maka kita buat spesimen-spesimen sebagai berikut :
 - a. Spesimen SS Si_I, yang mengandung 3,00% C dan kemudian ditambah silicon secara segmental hingga didapat kandungan silicon dari 1,80% sampai 2,80%.
 - b. Spesimen SS Si_{II}, sama seperti spesimen SS Si_I tetapi kandungan carbonnya sebesar 4,00%.

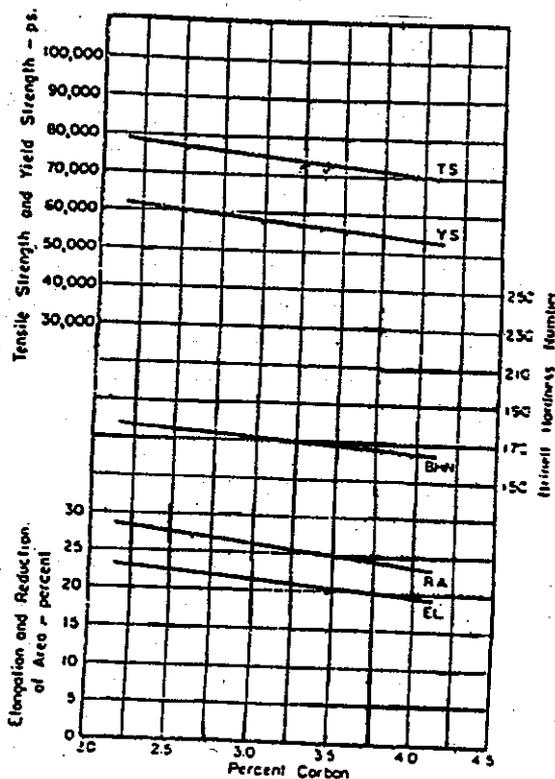
Apabila spesimen-spesimen di atas, kita lakukan pemeriksaan metallografi dan pengujian tarik serta selanjutnya hasil pemeriksaan dan pengujian tersebut kita tuangkan dalam bentuk diagram, maka hasilnya dapat kita lihat pada Gambar 12, 13 dan 14.

Untuk tujuan optimisasi yang diusulkan, kita manipulasi Gambar 12 dan 13 sehingga kita dapatkan hasil seperti pada Gambar 15 dan 16. Kemudian Gambar 15 dan 16 tersebut kita himpitkan maka kita peroleh Gambar 17.

Selanjutnya untuk melihat korelasi antara kekuatan tarik dengan silicon dan carbon dapat dilakukan langkah-langkah sebagai berikut :

1. Garis-garis Iso-tensile Strength (ITS) adalah garis-garis yang memiliki harga tensile strength sama, misalnya :

- DD' menunjukkan harga TS=75.10³PSI
- EE' menunjukkan harga TS=73.10³PSI
- FF' menunjukkan harga TS=72.10³PSI
- GG' menunjukkan harga TS=71.10³PSI
- HH' menunjukkan harga TS=70.10³PSI
- II' menunjukkan harga TS=67.10³PSI
- JJ' menunjukkan harga TS=65.10³PSI
- KK' menunjukkan harga TS=65.10³PSI
- LL' menunjukkan harga TS=63.10³PSI
- MM' menunjukkan harga TS=61.10³PSI



Gambar 12. Pengaruh Carbon pada Sifat-sifat Mekanis Besi Cor Nodular Feritik.

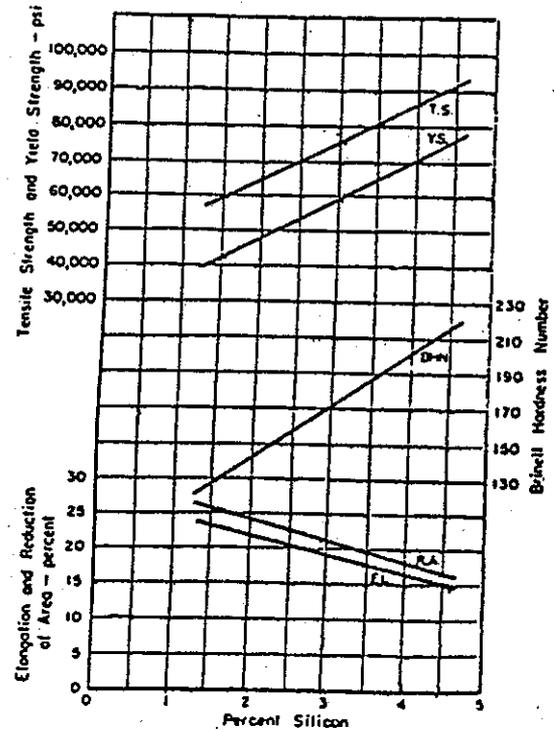
2. Daerah Karakteristik Intrapolasi (DKI) adalah daerah yang memiliki karakteristik intrapolasi yang khas.

Sebagai contoh adalah,

- Daerah OQS dengan simbol Titik Sampel o merupakan daerah intrapolasi khusus antara Garis III dengan Garis IV. Jadi titik sampel yang terletak di daerah ini harga kadar siliconnya terletak 1,8% sampai 2,8%, sedang harga carbonnya dapat diperoleh dengan menarik garis horisontal sampai memotong absis %C.

Sebagai contoh kita ambil titik-titik sebagai berikut :

- Titik E₁ dengan TS = 73.10³ PSI
% C = 3,13
% Si = 2,72
- Titik F₁ dengan TS = 72.10³ PSI
% C = 3,13
% Si = 2,50



Gambar 13. Pengaruh Silicon pada Sifat-sifat Mekanis Besi Cor Nodular Feritik.

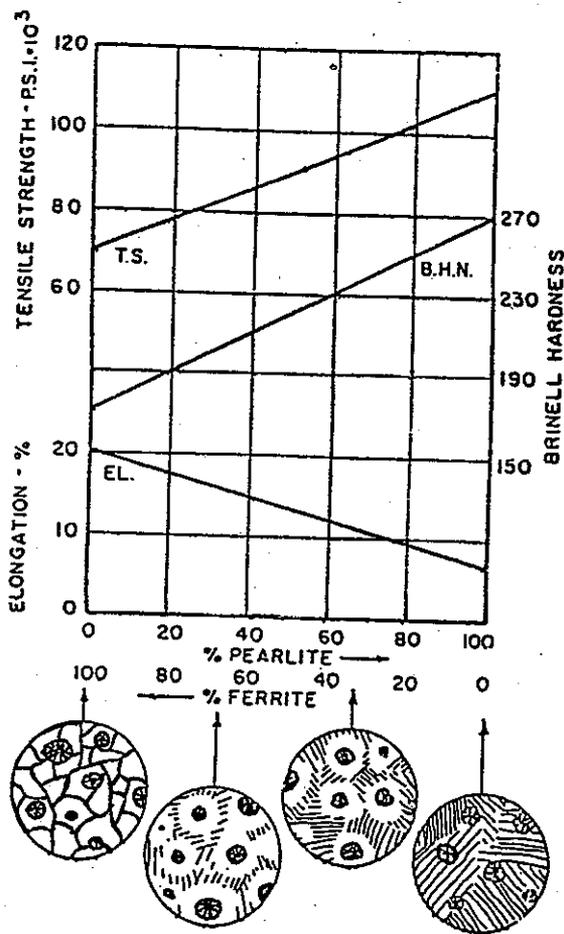
- Daerah lain yang memiliki karakteristik sama dengan daerah OQS adalah daerah RTV dengan simbol Titik Sampel ■, dengan contoh sampel :

- Titik I₅ dengan TS = 65.10³ PSI
% C = 3,96
% Si = 2,52

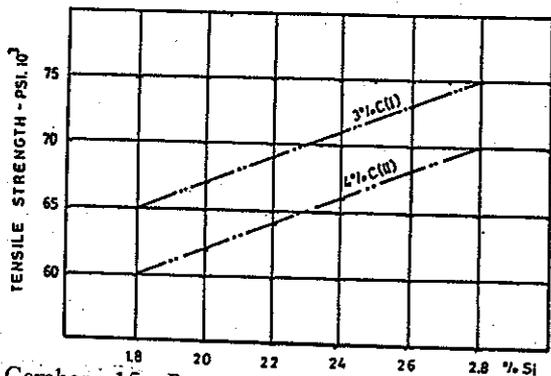
- daerah STO dan PQR adalah DKI dengan intrapolasi antara Garis I dan II, dengan demikian harga kadar carbonnya terletak antara 3% sampai 4% sedang harga kadar silicon diperoleh dengan cara menarik garis horisontal hingga memotong absis %Si. Daerah STU diberi simbol sedang PQR dengan simbol ●.

- Titik K₁ pada daerah STU dengan harga TS = 64.10³ PSI
%Si = 1,86
%C = 3,30

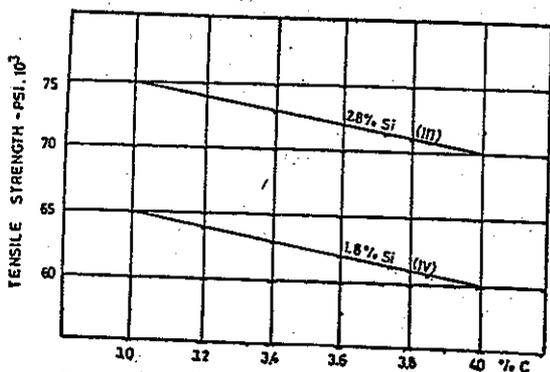
- Titik E₅ pada daerah PQR dengan harga TS = 73.10³ PSI
%Si = 2,78
%C = 3,20



Gambar 14. Struktur dan Sifat-sifat Campuran Ferrit dan Perlit dalam Besi Cor Nodular



Gambar 15. Penambahan Silicon pada Carbon Konstan akan mempertinggi Tensile Strength



Gambar 16. Penambahan Carbon pada Silicon Konstan akan memperendah Tensile Strength

Daerah QRTS dengan simbol sampel ▲, daerah ini sangat menguntungkan karena pada daerah ini bisa dilakukan intrapolasi baik dengan Garis I – II atau Garis III – IV. Contoh titik sampel adalah.

- Titik G₃ dengan TS = 71.10³ PSI
 - intrapolasi I – II mendapatkan
 - %C = 3,15
 - %Si = 2,41
 - intrapolasi III – IV, didapat
 - %C = 3,61
 - %Si = 2,70

- Garis-garis I, II, III, IV
 Penarikan Garis ITS yang memotong garis-garis ini kadar carbon dan siliconnya ditentukan tanpa intrapolasi. Untuk titik-titik potong Q, R, S dan T dan titik lain yang terletak pada segmen garis QS, QR, ST dan RT akan diperoleh 2 pasang C-Si untuk sebuah harga TS, dengan catatan bahwa titik-titik yang terletak pada segmen garis sepasang dilakukan tanpa intrapolasi sepasang lainnya dilakukan dengan intrapolasi.

Aspek praktis yang bisa diambil dari Gambar 17 ini dapat diterangkan sebagai berikut :

Apabila kita menginginkan suatu besi cor yang telah ditentukan harga TS nya maka dengan mudah kita dapat mencari harga kadar C dan Si serta berapa pasang C-Si yang mungkin didapat.

Contoh :

TS = 71.10³ PSI maka Garis Iso Tensile Strengthnya (ITS) adalah GG' dengan titik-titik sampel :

- G₁ - %Si = 2,48 - %C = 3,16
- G₂ - %Si = 2,37 - %C = 3,00
- G₃ - %Si = 2,65 - %C = 3,58
- G₄ - %Si = 2,41 - %C = 3,15
- G₅ - %Si = 2,70 - %C = 3,61

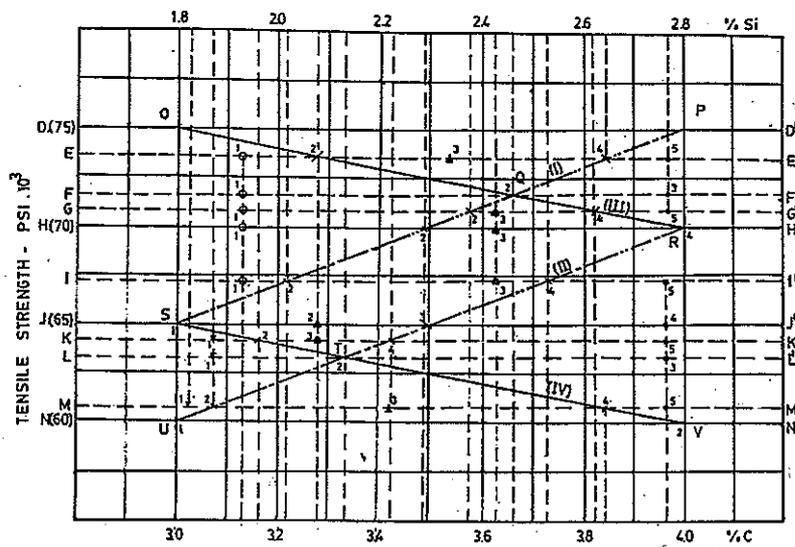
Selanjutnya apabila %C – %Si pada titik G₁ sampai G₅ kita tinjau lebih lanjut, maka akan kita peroleh korelasi C-Si untuk harga TS = 71.10³ PSI. Metoda yang kita pakai di sini adalah Regresi Linier, yang formulasinya sebagai berikut :

$$\%C = A + B \cdot \%Si$$

dengan

$$\text{Koefisien Regresi, } B = \frac{n \cdot \sum \%Si \cdot \%C - \sum \%Si \cdot \sum \%C}{n \cdot \sum \%Si^2 - (\sum \%Si)^2}$$

$$\text{Konstanta Term, } A = \frac{\sum \%C - B \cdot \sum \%Si}{n}$$



Gambar 17. Iso-Tensile Strength dengan variabel Silicon dan Carbon.

Koefisien-Korelasi, $r =$

$$\frac{n \cdot \Sigma \% Si \cdot \% C - \Sigma \% Si \cdot \Sigma \% C}{\sqrt{(n \cdot \Sigma \% Si^2 - (\Sigma \% Si)^2) (n \cdot \Sigma \% C^2 - (\Sigma \% C)^2)}}$$

dari perhitungan yang dilakukan, diperoleh harga-harga

$$A = 1,42 \quad B = 1,87 \quad r = 0,99$$

sehingga diperoleh korelasi % dengan %Si sebagai

$$\%C = -1,42 + 1,87 \%Si$$

untuk $TS = 71.10^3 \text{ PSI}$
dimana $3,00 \leq \%C \leq 4,00$
 $1,80 \leq \%Si \leq 2,80$
dan P, S, Mn konstan.

4. PENUTUP

Perkembangan BCN, baik jumlah produksi maupun pemakaiannya memperlihatkan adanya kecenderungan yang meningkat. Sementara, segala hal yang menyangkut BCN di Indonesia belum banyak yang kita ketahui. Pengamatan yang dilakukan di MIDC menunjukkan bahwa riset dan pengembangan BCN masih sedikit sekali. Saat ini produk yang sedang dibuat hanya roda lori. Hal ini disebabkan oleh sulitnya operasi pembuatan BCN yang harus dilakukan, terutama bila proses desulfurisasi harus dilakukan terhadap base material yang kandungan sulfurnya lebih besar dari 0,03%, sementara apabila kita pakai material yang sulfurnya lebih kecil dari 0,03% (pig iron) akan menjadi lebih mahal.

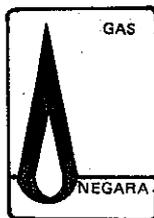
Analisa optimisasi yang dilakukan, dimaksudkan untuk ikut memecahkan masalah proses pembuatan BCN di atas. Seperti kita ketahui bahwa dari analisa optimisasi kita dapatkan :

1. Seluruh konstanta proses apa saja yang harus dibakukan.
2. Korelasi antara output dengan input ($TS = f(C, Si)$) memberi gambaran kepada kita tentang hasil yang akan kita dapat bila kita lakukan treatment dengan C dan Si.
3. Metoda optimisasi yang dilakukan ini bisa dikembangkan untuk mendapatkan korelasi-korelasi lain seperti :
 - a. Korelasi antara C, Si, Mn, P dan S dengan sifat mekanis yang lain (kekerasan, keuletan, elongasi dll).
 - b. Korelasi antara C, Si, Mn, P dan S dengan Struktur mikro (nodul grafit, matris ferit dan perlit, dsb).
 - c. dari a dan b bisa juga kita dapatkan korelasi antara sifat mekanis dengan struktur mikro.
4. Apabila batasan input kita ketahui, misalnya harga C dan Si maka kita dapat memperoleh suatu material dengan kekuatan yang kita inginkan tetapi dengan harga yang lebih murah. Untuk menyelesaikan hal ini dapat digunakan metoda Program Linier.

Apa yang dijadikan konstanta dalam studi kasus ini, kiranya bisa mengundang kita untuk menjadikannya sebagai variabel dalam penelitian selanjutnya, guna memperkaya cakrawala dalam bidang pengecoran terutama besi cor. Mungkin ini adalah salah satu tantangan praktis yang harus kita hadapi dalam rangka industrialisasi untuk menyongsong tahap lepas landas yang telah kita rencanakan dalam waktu kurang lebih 15 tahun mendatang.

5. DAFTAR PUSTAKA

1. Quality Ductile Iron Production-Today and Tomorrow, Proceedings of Joint American Foundrymen's Society-Ductile Iron Society, October 14 - 16, 1975, Sheraton O'Hare Inn, Rosemont, Illinois.
2. Karsay S.I., Ductile Iron, Quebec Iron and Titanium Corporation - Fer et Titane Ins., Canada, 1981
3. Cast Iron, Physical and Engineering Properties Agus H.T., Butterworth & Co (Publisher) Ltd., 1976.
4. Iron Casting Handbook, Iron Society, Inc., 1981.
5. Process Optimization with Applications in Metallurgy and Chemical Engineering, Ray W.M., Szekely J., John Wiley & Sons, New York, 1974.
6. Patterson V.H., Alloying Elements in Cast Iron, Tech Report, American Foundrymen's Society, 1971.



DEPARTEMEN PERTAMBANGAN DAN ENERGI

PERUSAHAAN GAS NEGARA

KANTOR PUSAT

Jalan : M.I. Ridwan Rais No. 2, Jakarta, Kotak Pos No. 119 Jkt.

Telp. : 374809 (5 saluran), Telex : 45764 GASMI IA, Cable : GAS PUSAT

PERUM GAS NEGARA SIAP MELAYANI KEBUTUHAN BAHAN BAKAR GAS
(GAS BUMI & GAS BUATAN) UNTUK :

- INDUSTRI (Industri Kimia, Gelas, Tekstil, Logam, dll.)
- KOMERSIAL (Industri Pariwisata, Perhotelan, Rumah Makan, Perkantoran dll.)
- RUMAH TANGGA.

CABANG - CABANG :

GAS BUMI.

- PGN MEDAN
- PGN JAKARTA
- PGN BOGOR
- PGN CIREBON

GAS BUATAN.

- PGN BANDUNG
- PGN SEMARANG
- PGN SURABAYA
- PGN UJUNG PANDANG