

PEMBUATAN BESI COR NODULAR**Asmadi, Reny Afriany**

Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas IBA

Email: asmadilubay4@gmail.com**ABSTRAK**

Besi Cor *Nodular* (BCN) yang juga Besi Cor Ulet (*ductile*), karena sifat-sifat mekaniknya banyak kesesuaian dengan sifat komponen-komponen mesin saat ini. Suatu pengkajian yang membahas tentang keterkaitan antara prosen 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 saat ini adalah pembahasan tentang Metoda Optimasi dengan parameter Komposisi kimia Base material yang digunakan dalam proses pembuatan BCN.

Kata Kunci : *Nodular, Ductile, Optimasi, Base Material*

1. BESI COR NODULAR DAHULU, KINI DAN ESOK

Besi Cor Nodular adalah besi cor yang memiliki *grafit* berbentuk bulat, oleh karenanya BCN juga dikenal sebagai besi cor *spherulitik* dan Besi *Bergrafit Spheroidal*. Besi cor 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 dimasa datang akan menjadi pokok bahasan dalam tulisan ini.

Pada tanggal 7 Mei 1948 mulailah babak perkembangan baru mengenai segala hal yang menyangkut BCN. Pada saat itu Henton Morrogh menulis tentang pembentukan struktur *grafit* bulat dalam besi cor apabila dilakukan penambahan *cerium*. Kemudian 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, sehingga pertemuan itu merupakan konferensi pertama yang membahas tentang BCN dan menjadi titik awal perkembangan industri BCN. Perkembangan BCN ini menunjukkan suatu fenomena luar biasa yang dapat kita lihat pada kronologi berikut.

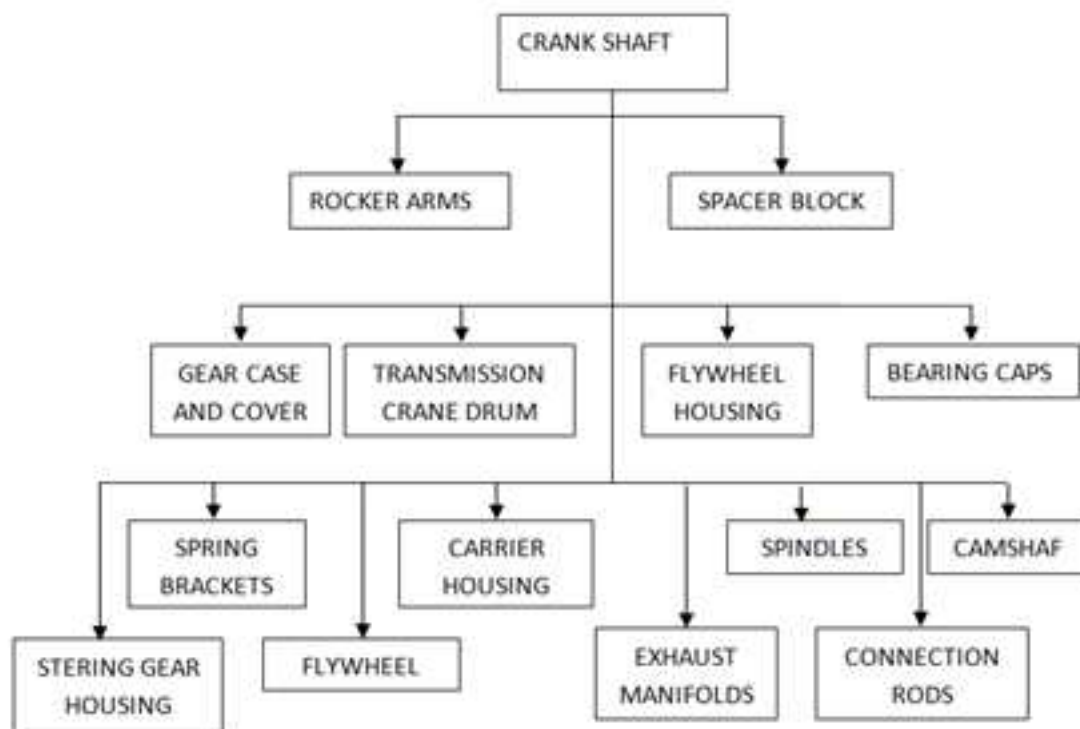
a. Pada tahun 1949 laju pertambahan produksi BCN bisa dikatakan sangat rendah. Kemudian sampai pada awal tahun 60-an laju pertambahan produksi naik secara kontinyu dan stabil. Penyebab rendahnya laju pertambahan pada awal produksi adalah masih diperlukan waktu 10 tahun untuk; memperkenalkan sifat-sifat BCN agar dapat dipakai dengan tingkat kepercayaan yang memadai dan menunjukkan kepada pemakai bahwa produsen sanggup mensuplai dalam jumlah yang cukup dengan kualitas yang dapat diandalkan.

b. Memasuki era 60-an laju pertambahan produksi naik dengan cepat dari 25% sampai 40% per tahun. Produksi BCN di Amerika Serikat 190.000 ton pada tahun 1960 sampai 2.140.000 ton pada tahun 1970 dan kemudian meningkat mencapai 3.000.000 ton tahun 1973.

c. Saat ini jumlah dan laju produksi sudah tidak menjadi masalah lagi karena kebutuhan BCN dari tahun ke tahun selalu menunjukkan kenaikan. Masalah yang dihadapi saat ini dengan material-material baru yang ditemukan adalah bagaimana memperbaiki kontrol kualitas terutama pada dapur pengecoran (*foundry*) kecil yang biasa memproduksi besi cor kelabu. Melihat fenomena ini, kini mau tidak mau kontrol kualitas mutlak harus dilakukan secara rutin

dan inilah yang memberi kesempatan pada studi optimasi menjadi bagian yang menarik untuk dikaji.

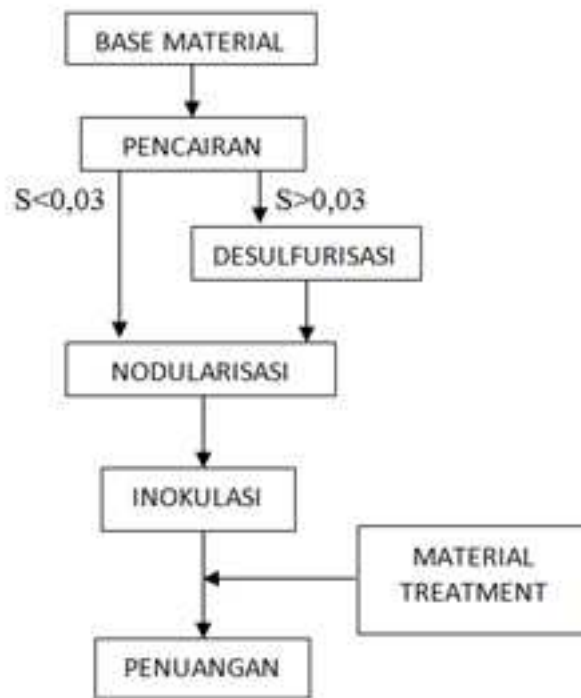
Perkembangan BCN tidak hanya dilihat dari pertambahan perkembangan produksi saja yang makin meningkat, tetapi apabila dibandingkan dengan material lain maka BCN juga menunjukkan perkembangan yang menggembirakan. Sebagai contoh, *Stainless steel* yang mulai diproduksi tahun 1913 sedang BCN pada tahun 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. Perkembangan dan produksi BCN dinegara-negara besar tentunya tidak begitu mengherankan kita, akan tetapi laporan terakhir menyatakan bahwa produksi BCN dinegara seperti Korea, Taiwan, Afrika Selatan produksinya luar biasa. Tentunya hal ini mengundang perhatian kita di Indonesia. Selain sifat mekaniknya BCN banyak dipakai karena 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 dikaitkan dengan faktor kekuatan, yaitu dengan cara melihat ratio antara energi dengan kekuatan, maka untuk memproduksi 1 kg Aluminium harga ratio 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 1. Pemakaian BCN di bidang Industri Otomotif

2. TEKNOLOGI PEMBUATAN BESI COR NODULAR

Pada prinsipnya proses pembuatan BCN adalah suatu rangkaian proses yang diperlakukan terhadap besi cor agar memiliki struktur grafit yang berbentuk bulat. Proses yang biasa dilakukan secara skematis dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2 PROSES PEMBUATAN BCN

2.1 Base Material

Dalam pembuatan BCN oleh karena persyaratan dalam proses nodularisasi yang menghendaki kadar sulfur dibawah 0,03%, maka base material yang memiliki kadar sulfur diatas 0,03% harus diperlakukan proses desulfurisasi (pengurangan kaadar sulfur) terlebih dahulu. Untuk membuat BCN komposisi kimia baik jenis maupun jumlahnya memiliki batasan tertentu agar dapat dicapai kondisi optimum, komposisi kimia BCN tanpa paduan adalah sebagai berikut:

Total carbon %	3,0 – 4,0
Silicon %	1,8 – 2,8
Mangan %	0,1 – 1,0
Phosphor %	0,01 – 0,10
Sulfur %	0,01 – 0,03

Perlu kita ketahui bahwa prosentase diatas tidaklah mutlak sebab banyak literatur lain yang memberikan harga berbeda walaupun perbedaan itu tidak terlalu jauh.

2.2 Pencairan

Hampir semua alat pencair dapat digunakan untuk membuat BCN, seperti cupola, tungku rotary, tungku induksi serta tungku busur. Titik perhatian dalam pemilihan alat pencair adalah karakteristiknya, yaitu:

- a. Kontrol terhadap slag, besi cair, komposisi kimia dan metalurginya
- b. Furnace lining
- c. Unit pendingin
- d. Pemanas awal
- e. Kapasitas pencairan
- f. Temperatut yang dapat dicapai

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 silikon pada *furnace* ikut larut. Sedang pada tungku rotary semua komposisi kimia akan berkurang dan temperatur yang bisa dicapai hanya berkisar antara 1500°C – 1600°C. Karakteristik ini harus kita ketahui dengan pasti agar hasil pencairan yang kita peroleh masih dapat kita kontrol, tetapi kalau ada penyimpangan dapat segera dilakukan *treatment*

2.3 Desulfurisasi

Sulfur sebagai salah satu unsur yang hampir selalu ada dalam besi, sampai saat ini pengaruhnya belum diketahui dalam pembuatan BCN. Beberapa opini yang berkembang sementara teorinya belum pasti, opini itu terbagi tiga kelompok, yaitu:

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

Pernyataan kelompok c tersebut muncul karena perbandingan yang menyatakan bahwa untuk memperoleh BCN dengan kualitas yang sama, proses desulfurisasi (CaC₂) yang kemudian dilanjutkan dengan proses nodularisasi (MgFeSi) ternyata lebih murah dibanding dengan proses nodularisasi saja yang tentunya membutuhkan MgFeSi lebih banyak. Akan tetapi pada dasarnya, para profesional dalam bidang BCN sepakat bahwa kondisi optimum yang dinyatakan dalam: tensile strength maksimum, jumlah nodule grafit yang banyak dan elongasi yang minimum terletak didalam base material dengan kandungan sulfur antara 0,01% - 0,03%. Selanjutnya dalam terminologi pembuatan BCN ini, istilah desulfurisasi berarti suatu proses yang diperlakukan terhadap besi cor cair agar tercapai kadar sulfur < 0,03% dengan tujuan supaya proses nodularisasi lebih murah dan mudah.

2.3.1 Desulfuran

Dijelaskan diatas bahwa Calcium Carbide (CaC₂) dapat digunakan sebagai bahan dalam proses desulfurisasi. Desulfuran lain yang biasa digunakan adalah:

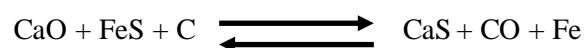
<i>Caustic soda</i>	(NaOH)
<i>Soda Ash</i>	(Na ₂ CO ₃)
<i>Burnt Lime</i>	(CaO)
<i>Limestone</i>	(CaCO ₃)
<i>Calcium cyanamide</i>	(CaCN ₂)

Caustic soda jarang dipakai karena tidak baik untuk kesehatan, *Limestone* sebelum aktif dalam proses desulfurisasi terlebih dahulu harus direduksi menjadi CaO, sedang CaCN₂ jarang dipakai karena gas *nitrogen* yang terbentuk dapat mengakibatkan cacat coran. Dapat disimpulkan bahwa CaO dan CaC₂ adalah desulfuran yang optimal dalam proses desulfurisasi, sifat lain yang menguntungkan dari CaO dan CaC₂ adalah:

- Produksi terak berbentuk granular sehingga mudah dibuang
- Penurunan temperatur kecil (CaO lebih besar dibanding CaC₂)
- Penurunan kadar silicon sangat kecil.

2.3.2 Metoda Desulfurisasi

Lepasnya sulfur dari kandungan besi secara sederhana dapat dilihat reaksi berikut:



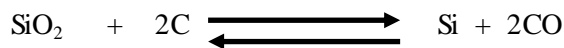
Efisiensi dan efektivitas reaksi diatas dipengaruhi oleh: persentase antara permukaan desulfuran dengan logam cair, *transport sulfur* dari besi ke permukaan desulfuran, pengadukan, *dwelling time desulfuran*, ukuran partikel *desulfuran*. Jadi yang diinginkan dari setiap metode desulfurisasi adalah bagaimana memperoleh pengadukan didalam logam cair sehingga seluruh permukaan *desulfuran* menyentuh besi cair seefektif mungkin.

2.4 Nodularisasi

Metode proses pembuatan grafit sampai saat ini belum ada teori yang sempurna, masing-masing mempunyai keunggulan dan kelemahan, berikut beberapa teori:

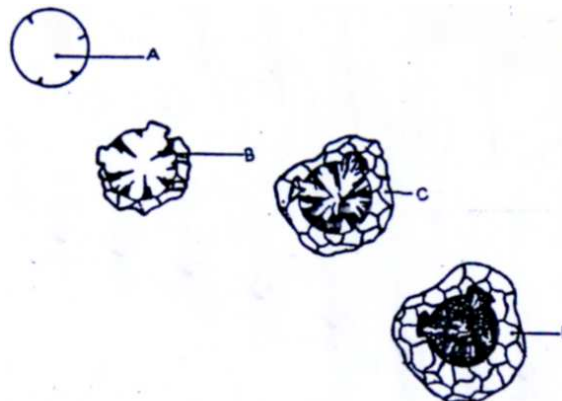
2.4.1 Teori Batas Fasa atau teori gelembung

Teori ini menyatakan bahwa grafit dapat terbentuk hanya bila proses kristalisasi dijaga oleh adanya sejenis batas fasa, dan bila batas fasa ini tidak ada maka yang terbentuk adalah carbide atau diamond. Selanjutnya dinyatakan pula bahwa terjadinya batas fasa diakibatkan oleh kehadiran gelembung gas CO dalam logam cair yang timbul akibat reaksi:



Grafit serpih terbentuk melalui proses sebagai berikut, gelembung gas yang terbentuk memiliki ukuran yang relatif besar dengan sebagian permukaannya terbungkus oleh lapisan grafit yang tipis. Selanjutnya grafit tersebut segera masuk kedalam 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 dipermukaan seperti sulfur dan magnesium, maka pertumbuhan grafit yang berbentuk film dapat dicegah. Akibatnya grafit yang tumbuh lebih menyerupai spiral
- Volume grafit yang 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 inokulen sebagai intinya. Akibatnya keseimbangan menjadi heterogen.
- Agar tercapai keseimbangan heterogen, sebagian SiO_2 bereaksi dengan carbon yang menghasilkan gelembung CO yang kecil dan tersebar dengan rata.



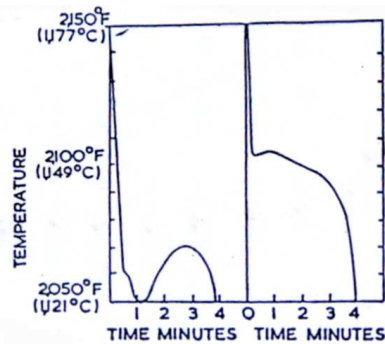
Gambar 3. Fasa-fasa dalam pertumbuhan Grafit Bulat (Teori Batas Fasa)
(A= gelembung gas; B= grafit serabut; C= Besi Cair; D= Besi Beku (Austenit))

Tabel 1. Karakteristik Metoda Nodularisasi

Metoda dan Deskripsi	Penggunaan	Efisiensi Mg	Keuntungan	Kerugian
1. Cara open Ladle: Logam cair dituangkan di atas paduan Mg yang diletakkan di atas ladle	S - 2 L - 3	20 - 30%	-sederhana -penggunaan luas	-reaksinya hebat, menghasilkan uap dan asap -perlu besi asal berkadar Si rendah
2. Metoda Sandwich: Modifikasi cara open ladle dengan penam bahan kantong untuk paduan Mg dan tutup untuk memperlambat reaksi Mg	S - 1 L - 1	40 - 50%	-Mg lebih tinggi -dapat dipakai pada bermacam ukuran ladle	-sama seperti pada open ladle
3. Metoda Plunging: Tabung refraktori yang berlubang mengandung nodulan ditanamkan ke dalam ladle berisi besi cair	S - 4 L - 2	50%	-ongkos nodulan lebih rendah -sedikit asap -dapat dimekanisasi	-penurunan suhu tinggi -ongkos peralatan lebih tinggi -waktu proses lebih lama -tidak fleksibel
4. Metoda Porous Plug: Pemberian efek turbu lensi melalui gelembung gas inert yang disebarkan dari bawah sebagai sarana pengaduk	S - 3	40 - 50%	-dapat juga berfungsi untuk desulfurisasi atau pos inokulan	-kerugian panasnya tinggi
5. Inmold Proses: Penambahan nodulan pada sistem saluran turun (gating) dari cetakan	L - 3	Hampir 90%	-reaksi Mg tidak tampak -jumlah terak sedikit -pos inokulasi ditiadakan -penurunan suhu rendah	-perhitungan gating sistem harus diteliti -pengontrolan kadar belerang harus teliti -hasil coran mutu rendah
6. Cara Injeksi : Injeksi bubuk atau butiran nodulan yang halus ke bagian bawah permukaan logam cair	-	-	-dapat menggunakan Mg metalik -dapat dipakai berbagai ukuran ladle -dapat dimekanisasi	-reaksinya hebat
Keterangan : - S : Small Foundries (kapasitas produksi < 100 ton/minggu) - L : Large Foundries (kapasitas produksi > 100 ton/minggu)				

2.5 Efek Inokulasi

Sebagaimana dalam besi cor kelabu pendinginan pada BCN mengakibatkan efek pada pembentukan carbide selama solidifikasi. Penggunaan inokulan pada BCN dapat mencegah pembentukan carbide primer. Efek di atas akan lebih jelas dengan memperhatikan kurva pendinginan gambar 4. Selanjutnya gambar tersebut menunjukkan dua buah kurva pendinginan, satu untuk BCN tanpa proses inokulasi sedang yang lain dengan proses inokulasi (post inokulasi) yang menggunakan inokulan paduan, 0,03% Si/Mn/Ca/Ba. Kurva pendinginan BCN tanpa inokulasi menunjukkan tingginya tingkat pendinginan sebelum proses solidifikasi, hal ini mengakibatkan terjadinya struktur carbide pada tingkat yang tinggi.



Gambar 4. Kurva Pendinginan BCN; tanpa inoculasi (kiri) dan dengan inoculasi

3. METODA OPTIMASI

Optimasi adalah kegiatan untuk memperoleh hasil terbaik dari keadaan yang diberikan. Tujuan utamanya dari proses optimasi adalah minimalisasi input yang dibutuhkan atau memaksimalkan output yang ingin dicapai. Jika dalam prakteknya output dapat diekspresikan kedalam bentuk fungsi dengan input sebagai variabelnya, maka optimasi 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 kedalam 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 dituangkan dalam bentuk diagram (kurva), tanpa disertai formulasi matematisnya yang biasanya merupakan polinom berderajat tinggi dan rumit.

Analisa optimasi yang paling logis untuk dilakukan dalam penelitian pengecoran ini adalah analisa optimasi terhadap grafik-grafik yang dihasilkan dari pengujian. Metoda yang cocok digunakan untuk masalah seperti ini adalah Unconstrained Peak Seeking Methods untuk kasus Single variabel Elimination Methods. Dari pembahasan mengenai proses pembuatan BCN, terlihat banyak faktor yang dapat berlaku sebagai variabel dalam analisa optimasi ini. Dalam kesempatan ini yang kita pilih sebagai variabel hanya elemen paduan utama C, Si, Mn, P, S yang divariasikan pada proses material treatment, lihat gambar 5.

3.1. Konstanta Proses

Dari gambar 5, 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 dapat divariasikan, maka kita harus melakukan hal berikut: Semua variabel baik yang bebas maupun tak bebas akan dijadikan sebagai suatu konstanta yang ditentukan. Penentuan variabel dan Nodulizer menjadi konstanta tersebut dibatasi oleh suatu kriteria untuk mempermudah analisa optimasi 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 pencairan
3. Desulfurisasi (Metoda dan Desulfuran yang dipakai)
4. Nodularisasi (Metoda Nodulizer yang dipakai)
5. Inokulasi (Metoda dan Inokulan yang dipakai)
6. Waktu antara
7. Cetakan (Metoda Pembuatan, Bahan, Bentuk, Dimensi)

3.2. Variabel Proses

Seperti dijelaskan diatas, 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 material yang kita capai. Jadi terminologi optimasi lebih tegas didefinisikan sebagai operasi untuk mendapat sifat material yang kita inginkan, dimana sifat material ini kita tempatkan sebagai output optimasi yang merupakan fungsi dari elemen paduan utama, dimana elemen paduan utama ini dijadikan input (variabel) proses. Sebelum kita bahas mengenai variabel prosesnya akan kita tentukan lebih dahulu output yang kita inginkan. 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 mekanis yang meliputi; Tensile strength, kekerasan, keuletan dan ketangguhan serta elongasi.
2. Pemeriksaan Metalografi yang menghasilkan; besar butir grafit bulat, jumlah grafit bulat, jumlah grafit total, nodularisasi, jumlah dan persentase perlit dan ferit.

Dalam kesempatan ini akan diambil sebagai studi kasus optimisasi adalah kekuatan tarik. Dalam proses material treatment kita tentukan bahwa C, Si, Mn, P dan S sebagai input (variabel) proses. Selanjutnya akan kita tinjau apakah variabel itu merupakan variabel bebas atau tak bebas. Untuk itu akan kita bahas lebih dahulu karakteristik variabel tersebut:

a. Carbon

- Carbon Equivalen (CE) dan Total Carbon (TC) range CE untuk BCN antara 3,9 sampai 4,5. $CE = \% TC + 1/3 \% Si$, jika yang berpengaruh hanya silicon.
- Jika yang berpengaruh silicon dan phospor $CE = \% TC + 1/3(\%Si + \%P)$, $CE=4,3$
- Formulasi lain $CE = \%TC + 0,312\%Si + 0,33\%P - 0,078(\%Mn - 1,8\%S)$, $CE=4,2$

b. Silicon

Persentase Si cukup banyak setelah C didalam material base. Pengaruhnya sebagai unsur pembentuk grafit dan ferit dan terhadap sifat mekanis adalah: Kenaikan kuat tarik dan kekerasan dan penurunan elongasi dan kekuatan Impac.

c. Sulfur

Sulfur merupakan unsur yang tidak dikehendaki dalam BCN, dipembahasan Desulfurisasi kadar $S < 0,03\%$. Pada kandungan Si 2,6% jumlah ferit maksimum akan terjadi jika rasio Mn/S sebesar 15 – 17.

d. Mangan

Besarnya Mn yang bergabung dengan S diberikan dalam bentuk persamaan:

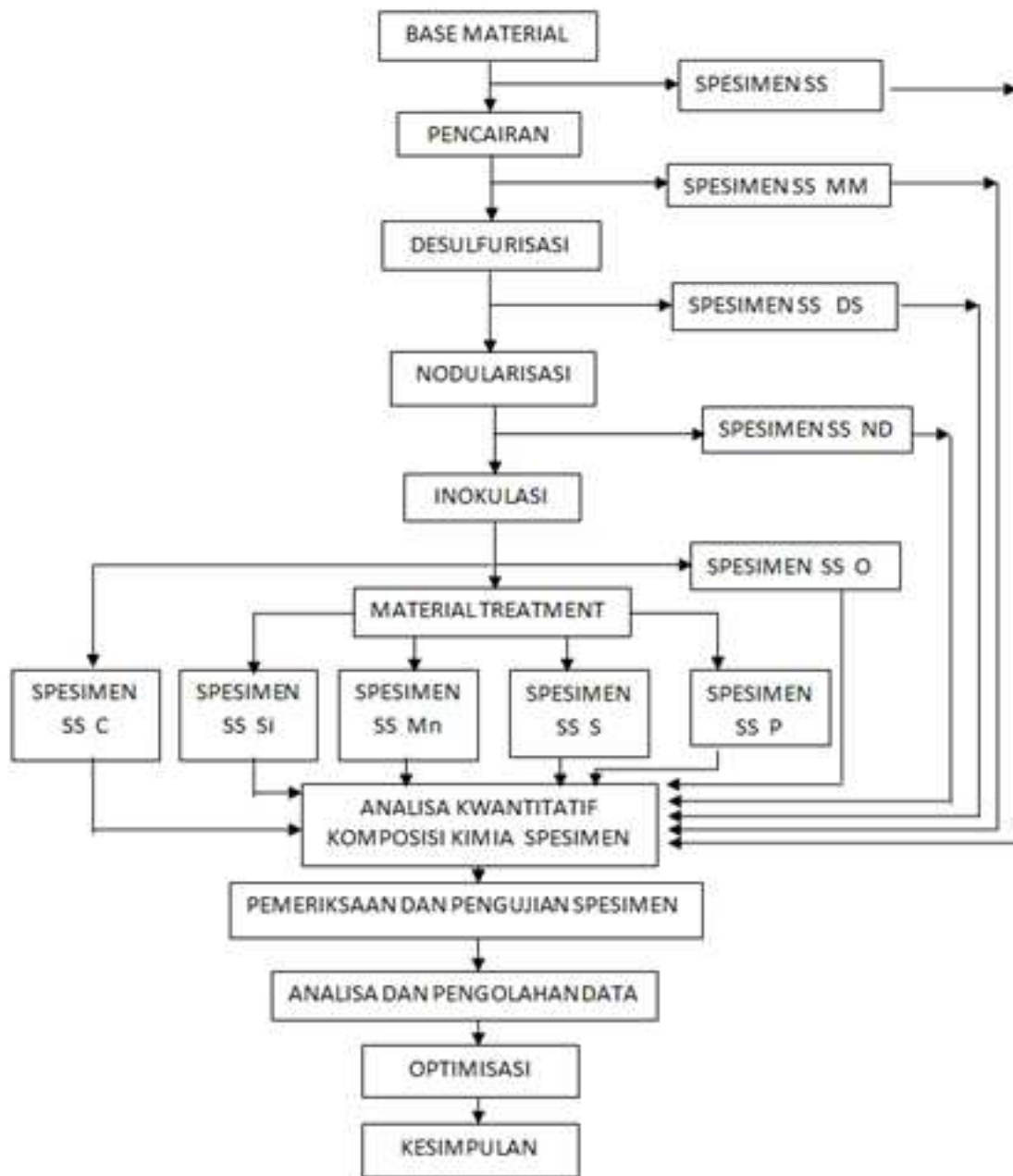
$\% S + 1,7 \rightleftharpoons \% Mn$. Keseimbangan kandungan S dan Mn yang akan saling menetralkan dan menaikkan jumlah maksimum ferit dan kekerasasan minimum dapat diberikan dalam persamaan keseimbangan:

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

e. Phosfor

Phosfor dalam jumlah kecil menyebar dalam larutan padat, tapi dalam jumlah yang besar akan membentuk steadite. Besi dengan P yang tinggi memiliki fluiditas yang tinggi pula hingga Dapat digunakan untuk penuangan benda cor yang tipis. Penambahan phosfor akan mengakibatkan:

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



Gb.5. Diagram Proses Pengambilan Spesimen dan Pengolahan Data Hasil Pengujian

4. PENUTUP

1. Perkembangan BCN baik jumlah produksi maupun pemakainya memperlihatkan adanya kecenderungan yang meningkat. Sementara segala hal yang menyangkut BCN di Indonesia belum banyak yang kita ketahui. Saat ini produk yang dibuat hanya roda lori. Hal tersebut karena sulitnya operasi pembuatan BCN terutama bila proses desulfurisasi harus dilakukan terhadap base material yang kandungan sulfurnya > 0,03%, akan tetapi bila kandungan sulfurnya < 0,03% akan menjadi lebih mahal.

2. Analisa optimasi kita dapatkan:
 - 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.
 - korelasi antara C, Si, Mn, P dan S dengan sifat mekanis yang lain (kekerasan, keuletan)
 - korelasi antara C, Si, Mn, P dan S dengan struktur mikro (nodul grafit, matriks ferit)
3. Masalah yang perlu dikaji adalah memperbaiki kontrol kualitas terutama pada dapur pengecoran (foundry) kecil yang dapat memproduksi besi cor kelabu. Inilah yang memberi kesempatan pada studi optimasi menjadi bagian yang menarik untuk selalu ditelaah.

DAFTAR PUSTAKA

- Arie Hendarto, “*Teknologi Pembuatan BCN*”, Direktorat Teknologi Proses dan Rekayasa, BPPT Jakarta
- ASM Hand Book, “*Metallography and Microstructure*”, vol.9 ASM for Metal, 1992
- Ray W.M., Szekely J. John Wiley & Sons. “*Process Optimization with Application in Metallurgy and Chemical Engineering*”, New York, 1974