

KONVEKSI PAKSA SELAMA PEMBEKUAN PADUAN Al-4 wt% Cu DAN PENGARUHNYA TERHADAP MAKROSEGREGASI

Shinta Virdhian

Balai Besar Logam dan Mesin, Kementerian Perindustrian
Jalan Sangkuriang No. 12, Bandung, Jawa Barat 40135
Email: shinta-v@kemenperin.go.id

ABSTRAK

Makrosegregasi adalah ketidakseragaman komposisi pada jarak yang dapat dibandingkan dengan ukuran produk, contohnya mm, cm bahkan meter. Ketidakseragaman komposisi ini akan berakibat menurunnya sifat mekanis dari hasil produk *direct chill casting* pada Aluminium ingot/billet. Pada paduan Al-4%Cu, makrosegregasi dimaksudkan ketidakseragaman komposisi Cu pada ingot/billet. Dalam penelitian ini, pompa *screw* yang dirancang khusus untuk memproduksi dan memodifikasi aliran dalam logam cair selama pembekuan paduan Al-4% Cu. Pompa *screw* digunakan untuk memproduksi aliran konveksi paksa sejajar atau berlawanan dengan konveksi alami dengan cara mengatur arah dan kecepatan putaran. Hasil analisa struktur mikro menunjukkan bentuk butiran yang *equiaxed dendritic* untuk semua kasus dalam penelitian ini. Peningkatan intensitas dari konveksi paksa akan menurunkan ukuran butir secara kualitatif, walaupun secara kuantitatif tidak ditemukan nilai perbedaan yang signifikan. Analisa makrosegregasi menunjukkan bahwa konveksi paksa searah dengan konveksi alami menyebabkan segregasi positif (presentase Cu yang lebih besar dari rata-rata) di bagian tengah dari billet, peningkatan kecepatan lebih lanjut akan menyebabkan variasi komposisi menjadi lebih besar dan makrosegregasi akan sulit untuk dikontrol. Konveksi paksa yang berlawanan dengan segregasi akan menekan konveksi alami sehingga dihasilkan variasi komposisi yang lebih kecil.

Kata kunci: proses *direct chill casting*, makrosegregasi, konveksi paksa

ABSTRACT

Macrosegregation is the inhomogeneous of the composition at distances comparable to the size of the product, for example mm, cm and even feet. Inhomogeneous of this composition will result in decreased mechanical properties of the resulting product in direct chill casting aluminum ingot/billet. In the alloy Al-4% Cu, macrosegregation is intended variation of composition of Cu in aluminum ingot/billet. In this present work, a specially designed screw pump was used to produce and modify the flow in the bulk liquid during solidification. A screw pump produced the forced flow aligned with natural convection or opposite to natural convection. The flow can be controlled with arrangement of rotation speed and direction of the rotation. The results showed that the microstructure remains the same for all condition. The structure of grain is equiaxed dendritic. Macrosegregation analysis showed that forced flow aligned with natural convection causes positive segregation in the centerline. Increasing further the magnitude of the flow will cause chaotic flow in bulk liquid and result in irregular pattern of composition profiles, i.e. macrosegregation profiles is difficult to control. Forced flow opposite to natural convection suppresses the natural convection and at the certain condition the flow will result in small deviation of composition profiles.

Keywords: *direct chill casting, macrosegregation, forced convection*

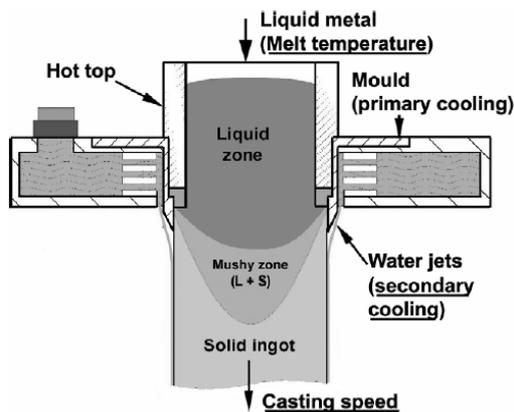
PENDAHULUAN

Konveksi (aliran fluida) memainkan peran penting selama proses pembekuan. Konveksi mengubah konsentrasi dan gradien termal di antarmuka fasa padat/cair, dan karenanya akan mempengaruhi struktur mikro, laju pertumbuhan butir, dan segregasi dari unsur-unsur paduan. Proses *direct chill casting* adalah proses yang umum digunakan untuk membuat ingot atau billet (batangan logam yang berbentuk balok atau silinder) aluminium. Skema dari proses *direct chill casting* dapat dilihat pada Gambar 1.¹ Sebuah *starting block* diletakkan didalam sebuah cetakan yang tidak memiliki bagian bawah (*bottomless*). Cairan logam dimasukkan melalui *nozzle*, dan cairan yang bersentuhan dengan dinding cetakan akan

mulai membeku dan membentuk lapisan luar. Sewaktu bagian luar membeku, bagian dalam dari ingot/billet masih berupa fasa padat dan cair (*mushy zone*). Kemudian *starting block* diturunkan ke bawah dengan kecepatan tertentu dan pada waktu ingot mencapai bagian bawah dari cetakan, aliran air jet akan membekukan ingot lebih lanjut. Dalam proses ini, cetakan berfungsi sebagai pendingin primer, sedangkan air merupakan pendingin sekunder (pendinginan langsung).

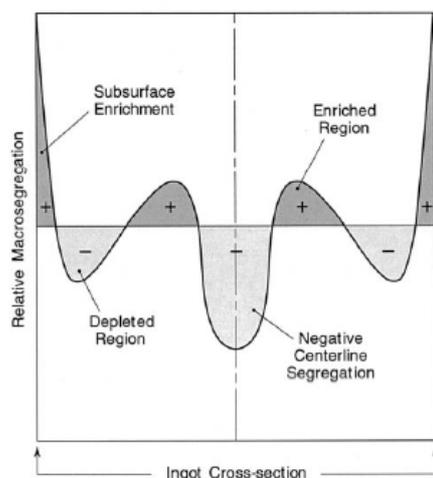
Pada proses *direct chill casting*, ingot yang terbentuk terbagi menjadi tiga area, yaitu daerah yang sudah membeku di bagian bawah (*solid ingot*), daerah gabungan fasa padat

dengan cair (*mushy zone*) dan daerah yang masih cair (*liquid zone*).¹⁻³



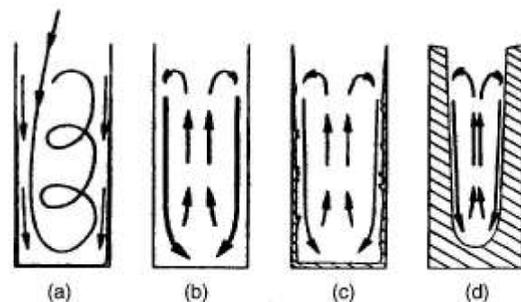
Gambar 1. Skematik proses *direct chill casting*¹

Penyebab umum dari makrosegresi adalah aliran relatif dari fasa padat dan fasa cair selama proses pembekuan logam.^{1,3-4,7} Kebanyakan unsur paduan memiliki kelarutan yang lebih rendah pada fasa padat dibandingkan pada waktu cair. Sewaktu proses pembekuan, unsur terlarut akan dikeluarkan dari fasa padatan dan akan memperkaya daerah yang masih cair.^{1,3,4} Makrosegresi positif adalah komposisi paduan yang diatas komposisi rata-rata, sedangkan makrosegresi negatif adalah komposisi paduan lebih rendah daripada komposisi rata-rata.^{1,4} Gambar 2 menunjukkan tipikal makrosegresi pada aluminium ingot yang dihasilkan dari proses *direct chill casting*.⁸



Gambar 2. Tipikal profil makrosegresi pada *billet* Aluminium *direct chill casting*.⁸

Aliran selama proses pembekuan dapat disebabkan oleh gaya *buoyancy* (konveksi alami), gaya dari luar (konveksi paksa), pergerakan fasa padat yang lebih ringan atau berat daripada cairan, proses penyusutan selama pembekuan atau tegangan permukaan pada antarmuka (*Mangaroni convection*).^{7,9} Konveksi alami adalah konveksi yang terjadi tanpa adanya gaya dari luar. *Driving force* dari konveksi alami adalah adanya perbedaan temperatur atau perbedaan konsentrasi. Gambar 3 menunjukkan pola aliran konveksi alami. Aliran dalam fluida dapat juga dihubungkan dengan aliran cairan pada waktu memasuki cetakan, sebagai contoh pada waktu proses penuangan.¹⁰



Gambar 3. Pembekuan pada ingot, a) Konveksi pada waktu penuangan, (b)-(d) Konveksi alami selama proses pembekuan.

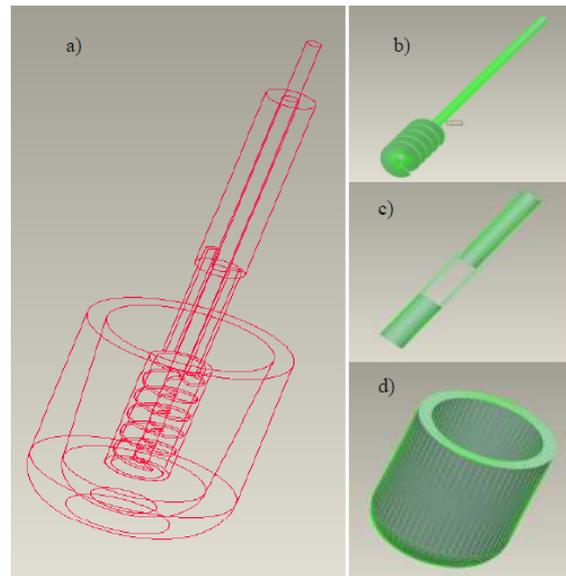
Perangkat lunak dinamika fluida komputasi adalah alat yang dapat digunakan untuk memprediksi atau memverifikasi hasil eksperimen atau percobaan. Saat ini, pengaruh dari aliran fluida terhadap struktur dan segregasi pada komersial paduan aluminium belum dimengerti sepenuhnya. Oleh karena itulah maka percobaan khusus dikombinasikan dengan simulasi pola aliran diperlukan untuk mempelajari fenomena ini. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh konveksi paksa selama proses pembekuan terhadap struktur dan makrosegresi paduan aluminium.

METODE PENELITIAN

Analisa pola aliran dengan perangkat lunak komersial dinamika fluida komputasi

Dalam penelitian ini, pompa *screw* khusus didesain untuk memodifikasi aliran dalam cairan selama proses pembekuan. Pompa *screw* digunakan sebagai alat untuk memberikan konveksi paksa pada cairan logam selama proses pembekuan. Pompa *screw* berfungsi untuk memodifikasi aliran yang searah dengan konveksi alami ataupun berlawanan dengan konveksi alami. Turchin et al.²¹ menggunakan metode yang sama pada mesin *direct chill casting* dalam penelitian mereka. Geometri dari pompa *screw* dibuat berdasarkan ukuran dari krusibel dan dinamika fluida.²¹⁻²² Penjelasan penentuan desain dari pompa *screw* dijelaskan pada sumber literatur yang lain.^{21,23} Bagian *screw* dan barel dari pompa *screw* dibuat menggunakan material Hasteloy (paduan Nikel) yang tahan terhadap temperatur tinggi dan dilapis dengan boron nitrit. Gambar 3 adalah gambar dari file STL (*stereolithography*) yang digunakan perhitungan simulasi pola aliran. Gambar 4(a) menunjukkan *set-up* dari percobaan yang akan dilakukan, sedangkan Gambar 4(b-d) menunjukkan bagian-bagian dari pompa *screw* yang meliputi bagian *screw*, barel dan krusibel.

Perangkat lunak komersial Dinamika Fluida Komputasi (*Computational Fluid Dynamics*) digunakan untuk memodelkan pola aliran yang dihasilkan oleh pompa *screw* serta besarnya kecepatan dari aliran. Performa dari pompa *screw* dievaluasi secara kualitatif yang meliputi kemampuan untuk menghasilkan aliran yang mempengaruhi pembekuan secara efektif, pembentukan *vortices* seminimal mungkin serta kesimetrisan aliran yang dihasilkan.



Gambar 4. Gambar STL yang digunakan dalam perhitungan, a) set-up eksperimen, b) bagian *screw*, c) bagian barel, d) krusibel.

Pompa *screw* dimodelkan menggunakan perangkat lunak 3D CAD yaitu Pro/ENGINEER Wildfire 3.0 (*Parametric Technology Corporation*). Performa dari pompa *screw* dianalisa menggunakan perangkat lunak komersial FLOW-3D (versi 9.1). Perhitungan pola aliran dan profil kecepatan cairan, dilakukan tanpa memasukkan proses pembekuan. Domain perhitungan adalah 3D model dari set-up eksperimen. Komputasional domain adalah 20 cm x 20 cm x 18 cm yang dibagi menjadi 490852 kubik sel. Pendekatan *finite volume* digunakan untuk memecahkan persamaan *Navier-Stokes* untuk aliran fluida secara iteratif dengan minimum *time step* 10^{-9} s. Sebelumnya, kode yang digunakan dalam perhitungan ini telah divalidasi dengan hasil eksperimen yang meliputi pengisian cetakan, pembekuan dan pola aliran.²⁴ Perhitungan dihentikan setelah mencapai kondisi *steady state*. Dalam perhitungan simulasi pola aliran ini, material yang digunakan adalah paduan Al 4 wt% Cu dengan berat jenis cairan 2460 kg/m³, temperatur cairan 720 °C, viskositas dinamik 0.0013 Pa.s, dengan kecepatan putaran 1 putaran/detik. Studi kasus yang akan disimulasikan menggunakan perangkat lunak FLOW3D dapat dilihat pada Tabel 1.

Asumsi-asumsi yang digunakan dalam perhitungan pola aliran meliputi:

- Aliran dalam pompa *screw* dianggap sebagai aliran laminar.
- Cairan logam adalah fluida *incompressible* dan memiliki permukaan bebas.
- Kontak dengan batas padat bagian luar adalah kondisi *no-slip* untuk persamaan momentum.
- Perhitungan simulasi hanya menghitung aliran tanpa memasukkan parameter perpindahan panasnya.
- Temperatur awal diatas temperatur cair leleh dari cairan logam.

Tabel 1. Studi kasus untuk perhitungan pola aliran dan kecepatan aliran.

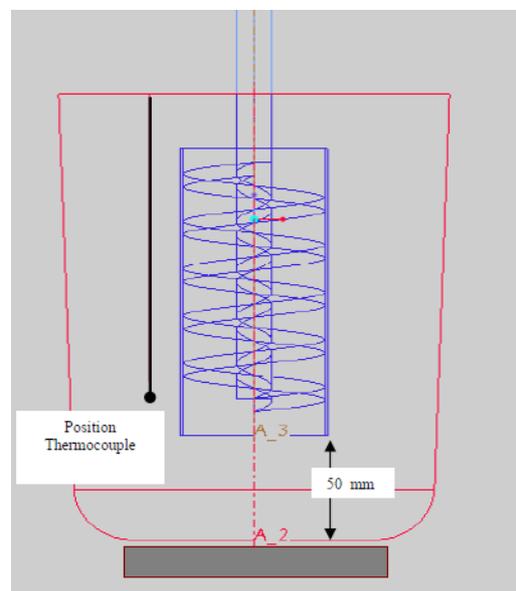
| Studi kasus | Bentuk barel | Diameter dalam pompa | Posisi barel terhadap <i>screw</i> | Konveksi paksa |
|-------------|---|----------------------|------------------------------------|---------------------------|
| 1 | Silinder | 25 mm | Sejajar | Searah konveksi alami |
| 2 | Silinder ditambah dengan bagian kerucut (<i>cone</i>) | 10 mm | Sejajar | Searah konveksi alami |
| 3 | Silinder | 10 mm | Posisi barel di bawah <i>screw</i> | Searah konveksi alami |
| 4 | Silinder | 10 mm | Posisi barel di bawah <i>screw</i> | Berlawanan konveksi alami |

Eksperimental

Percobaan dilakukan di Laboratorium Material Proses di Delf University of Technology, 2007. Percobaan dilakukan dalam krusibel yang berukuran diameter atas 130 cm, diameter bawah 80 mm dan tinggi 175 mm. Pompa *screw* diletakkan di bagian tengah dari krusibel pada jarak 50 mm dari bagian dasar. Material yang digunakan dalam percobaan ini adalah aluminium dengan penambahan 4% paduan tembaga. Paduan Al 4 wt% Cu dipilih dalam penelitian ini disebabkan paduan ini memiliki tempeatur leleh yang relatif rendah, daerah temperatur pembekuannya yang lebar. Selain itu sifat fisik dan karakteristik pembekuannya yang sudah

dimengerti dan mudah dimasukkan dalam perhitungan simulasi.

Temperatur awal dari cairan adalah 720°C. Perputaran dari pompa *screw* dihentikan apabila temperatur sudah mencapai 640 °C dimana fasa dari cairan sudah mencapai fasa padat-cair (*mushy zone*). Temperatur dari cairan diukur dengan termokopel yang diletakkan pada daerah yang dekat barel (Gambar 5). Sebuah pelat besi diletakkan pada bagian bawah dari krusibel untuk mengarahkan pembekuan dari bagian dasar krusibel ke atas. Untuk menghindari cairan membeku dari atas maka pada bagian atas diberikan insulator. Gambar 5 menunjukkan set-up dari eksperimen. Tabel 2 memberikan ringkasan mengenai percobaan yang dilakukan pada penelitian ini.



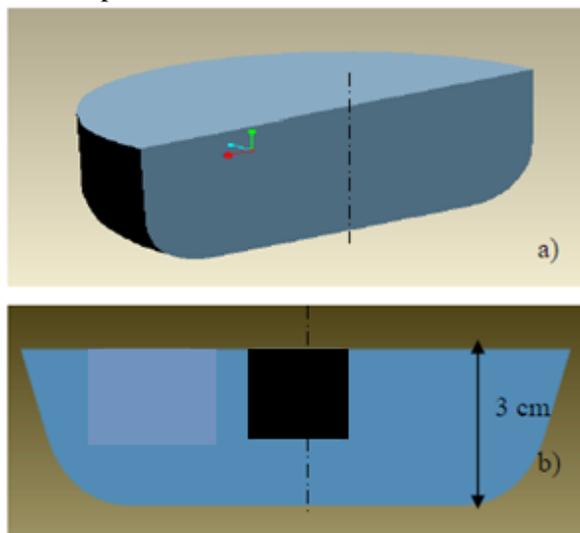
Gambar 5. Set-up percobaan konveksi paksa dengan menggunakan pompa *screw*

Tabel 2. Ringkasan percobaan yang dilakukan dalam penelitian ini

| No | Kondisi Aliran | Kode | Kecepatan putaran (putaran per detik) |
|----|----------------------------------|------|---------------------------------------|
| 1 | Tanpa aliran | NC | 0 |
| 2 | Aliran searah konveksi alami | NC4 | 4 |
| 3 | Aliran searah konveksi alami | NC6 | 6 |
| 4 | Aliran searah konveksi alami | NC8 | 8 |
| 5 | Aliran berlawanan konveksi alami | ONC4 | 4 |

Setelah percobaan, masing masing sampel dikeluarkan dari cetakan dan dipotong pada arah longitudinal yang melewati garis tengah (*centerline*) seperti yang terlihat pada Gambar 6a. Profil dari makrosegregasi diperoleh dengan pengukuran komposisi kimia, dalam hal ini presentase tembaga, dari sampel yang telah dipotong (Gambar 6b). Pengukuran komposisi kimia dari sampel dilakukan dengan menggunakan *spark spectrum analyzer* (SpectroMax). Pengukuran dilakukan pada setiap jarak 8 mm pada arah longitudinal pada posisi 10, 20, 30 cm dari bagian dasar krusibel. Absolut error dari pengukuran komposisi menggunakan alat ini adalah ± 0.01 wt %. Hasil yang diperoleh merupakan nilai normalisasi dari komposisi rata-rata tembaga dalam paduan aluminium tembaga ini.

Pengujian selanjutnya adalah pengujian mikrostruktur dari sampel. Bagian tengah pada arah longitudinal dari sampel (Gambar 6b) dipotong, untuk kemudian di grinding, poles, etsa dan diperiksa strukturnya menggunakan mikroskop optik dengan sinar polarisasi. 0.5% HF digunakan untuk mendapatkan mikrostruktur dari sampel.



Gambar 6. Skematik sampel yang digunakan untuk analisis, a) analisis makrosegregasi dan makrostruktur, b) analisis mikrostruktur.

HASIL DAN PEMBAHASAN

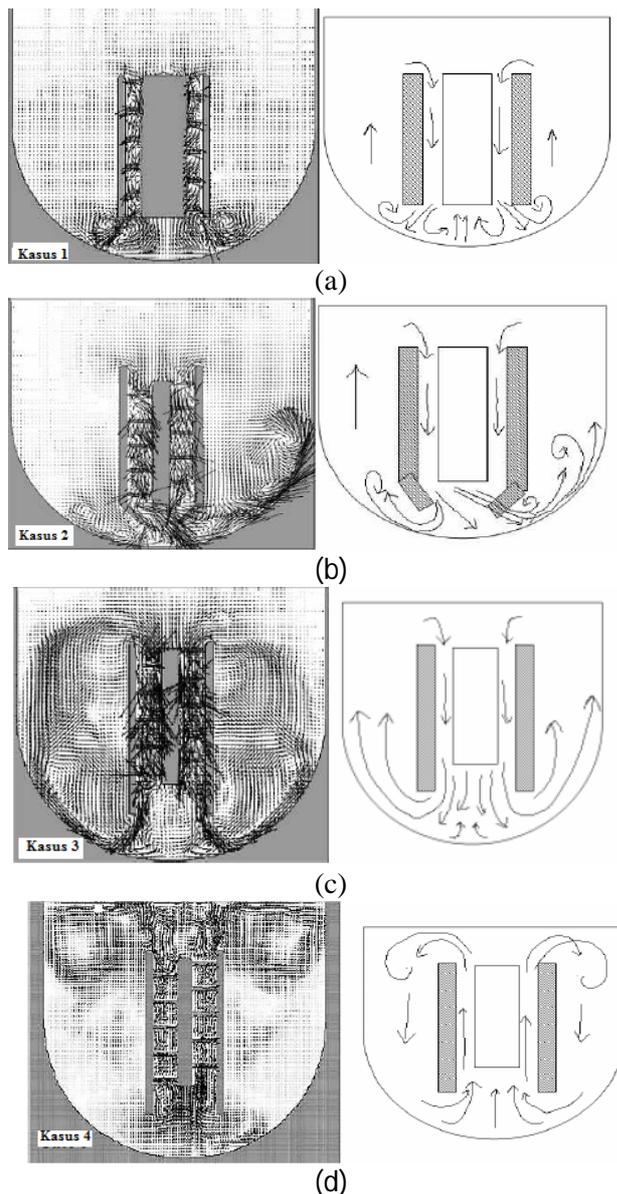
Analisis pola aliran dengan perangkat lunak komersial dinamika fluida komputasi

Hasil simulasi menggunakan *FLOW3D* dari keempat kasus tersebut dapat dilihat pada Gambar 6. Gambar 7(a) menunjukkan pola aliran dari hasil simulasi pada kasus 1, dimana jarak antara barel dengan bagian dasar krusibel adalah 20 mm. Aliran di dalam barel menunjukkan arah

ke bawah yang berarti sejajar dengan konveksi alami. Pada bagian bawah barel terdapat aliran keluar yang pada akhirnya membentuk *vortices* di kedua sisi. Hal ini disebabkan jarak yang terlalu dekat antara bagian dasar krusibel dengan barel. Hasil perhitungan menunjukkan kecepatan pada daerah di bawah barel adalah 74 mm/s.

Pada kasus 2, modifikasi dilakukan untuk meningkatkan volume cairan yang dipindahkan dengan cara memperkecil diameter dalam dari pompa *screw*. Selain itu penambahan cone pada ujung barel dimasukkan untuk memfokuskan aliran. Jarak antara pompa *screw* dengan bagian dasar dimodifikasi menjadi 30 mm untuk menghindari terjadinya *vortices* akibat pantulan aliran dari dinding krusibel. Hasil simulasi pola aliran pada kasus 2 menunjukkan pada bagian dalam pompa *screw* kecepatan aliran lebih tinggi apabila dibandingkan dengan kasus 1. Hal ini menunjukkan peningkatan volume cairan yang dipindahkan oleh pompa *screw*. Penggunaan cone pada bagian barel membuat aliran tidak simetris dan menimbulkan banyak *vortices*. Dalam melakukan percobaan, pola aliran yang diharapkan adalah menyerupai pola konveksi natural (searah maupun berlawanan arah), tetapi dengan kecepatan aliran yang lebih besar (pengaruh adanya *external force* dari pompa *screw*). Walaupun begitu, kecepatan aliran yang terlalu tinggi akan menyebabkan terjadinya *vortices* dan pembentukan gelembung udara yang harus dihindari. Kecepatan pada bagian bawah barel adalah 64 mm/s. Sebagai perbandingan, konveksi alami pada daerah padat-cair (*mushy zone*) 6 mm/min¹, yang merupakan nilai sangat kecil bila dibandingkan dengan kecepatan aliran yang dihasilkan oleh pompa *screw*.

Kasus 3 dan kasus 4 memiliki parameter desain yang sama, perbedaannya terdapat pada arah putaran dari pompa *screw*. Aliran yang dihasilkan searah dengan konveksi alami untuk kasus 3 dan berlawanan dengan konveksi alami untuk kasus 4. Hasil simulasi (Gambar 7 (c-d)) menunjukkan pola aliran yang simetris, dengan jumlah *vortices* yang sedikit. Kecepatan maksimum aliran terdapat pada bagian bawah dari barel dengan nilai 38.6 mm/s untuk kasus 3 dan 40.4 mm/s untuk kasus 4. Hasil simulasi menunjukkan bahwa desain pada kasus 3 dan kasus 4 digunakan dalam penelitian ini untuk membuat konveksi paksa selama proses pembekuan.



Gambar 7. Hasil simulasi pola aliran yang terbentuk untuk masing-masing kasus dengan menggunakan FLOW3d (kiri) dan skematik dari pola aliran (kanan), a) pompa dan barrel berbentuk silinder sejajar, b) pompa dan barrel berbentuk cone, c) pompa dan barrel tidak sejajar, aliran searah konveksi alami, dan d) pompa dan barrel tidak sejajar, aliran berlawanan dengan konveksi alami.

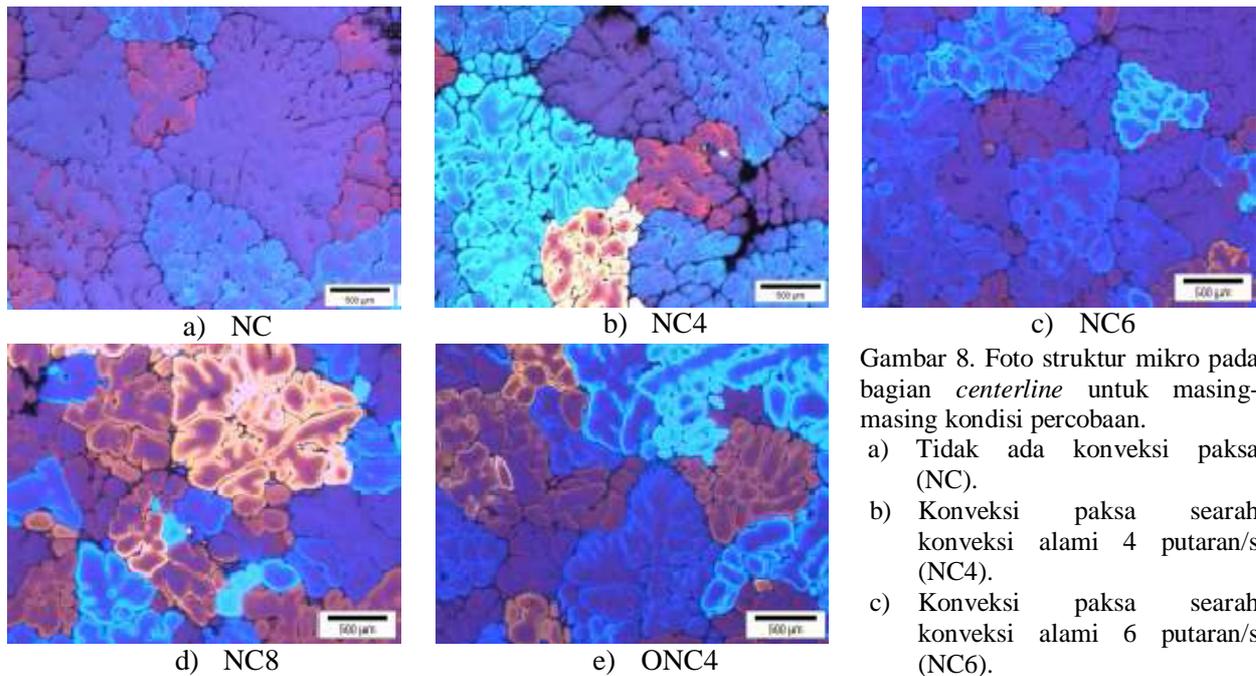
Analisa pengaruh konveksi paksa terhadap mikrostruktur dan makrosegresi paduan aluminium

Foto struktur mikro pada bagian *centerline* dari kelima kondisi percobaan dapat dilihat pada Gambar 8. Hasil dari pengamatan mikrostruktur ditemukan adanya struktur yang memiliki *floating dendrite* dengan jumlah yang tidak signifikan berupa patahan cabang dendrit (Gambar 8(d)). Keseluruhan struktur mikro menunjukkan bentuk butiran yang *equiaxed dendritic*. Pembentukan *equiaxed grain* dapat disebabkan oleh rendahnya gradient temperatur dalam

cairan selama proses pembekuan. Dalam percobaan ini pendinginan berlangsung lambat karena hanya menggunakan pendinginan dari dinding cetakan dan tidak menggunakan pendinginan sekunder (menggunakan air) seperti pada proses *direct chill casting*. Oleh karena itu gradient temperatur di dalam krusibel akan lebih kecil dibandingkan apabila menggunakan pendinginan sekunder. Gradient temperature yang rendah bisa mempromosikan pembentukan *equiaxed grain*.

Penghalusan ukuran butir juga dapat diamati dengan semakin meningkatnya konveksi paksa. Pada kondisi tanpa konveksi paksa, ukuran butir lebih besar apabila dibandingkan dengan kondisi konveksi paksa. Hal ini sesuai dengan beberapa hasil penelitian mengenai penggunaan konveksi paksa melalui metode *electromagnetic stirring* dimana adanya konveksi paksa akan menyebabkan penghalusan butir.^{1,15,19} Hal ini disebabkan oleh adanya konveksi paksa pada waktu pembentukan dendrit menyebabkan cabang dari dendrit akan terlepas dan dibawa oleh konveksi paksa, yang pada akhirnya bertindak sebagai inti-inti selama proses pembekuan (*heterogeneous nucleation*). Inti-inti itu selanjutnya akan berkembang membentuk *equiaxed grain*. Walaupun begitu secara kuantitatif, penghalusan ukuran butir tidak menunjukkan nilai yang signifikan. Ukuran butir berkurang dari $700 \pm 60 \mu\text{m}$ (tanpa konveksi paksa) menjadi $650 \pm 50 \mu\text{m}$ (konveksi paksa 8 putaran/s).

Gambar 9 menunjukkan plot dari relatif segregasi terhadap posisi pengukuran dan diagram *contour line* hasil pengukuran makrosegresi terhadap posisi pengukuran. Hasil pengukuran untuk kondisi tanpa konveksi paksa (NC) pada Gambar 9(a) menunjukkan pola segregasi yang terbagi dua pola yaitu pola segregasi positif pada setengah bagian dan pola segregasi negatif di bagian satunya. Hal ini berbeda bila dibandingkan pola segregasi untuk tipikal pola makrosegresi pada proses *direct chill casting* untuk paduan aluminium (Gambar 2). Dari gambar tersebut, pada bagian *centerline* terdapat segregasi negatif dan daerah di kanan kirinya segregasi positif. Segregasi negatif dihubungkan adanya bagian dendrit yang terlepas (*floating of detachment dendrite*) dan terapung dalam cairan. Karena terbawa oleh konveksi alami, bagian dendrit ini akan terbawa ke daerah *mushy zone* dan menyebabkan segregasi negatif di bagian tengah *centerline* dari bilet. Dari pengamatan hasil mikrostruktur dimana ditemukannya struktur *floating dendrite* tetapi jumlahnya dan ukurannya tidak signifikan, sehingga pengamatan struktur mikro tidak bisa menjelaskan mengenai variasi pada makrosegresi dikarenakan mikro struktur yang sama untuk semua kondisi.



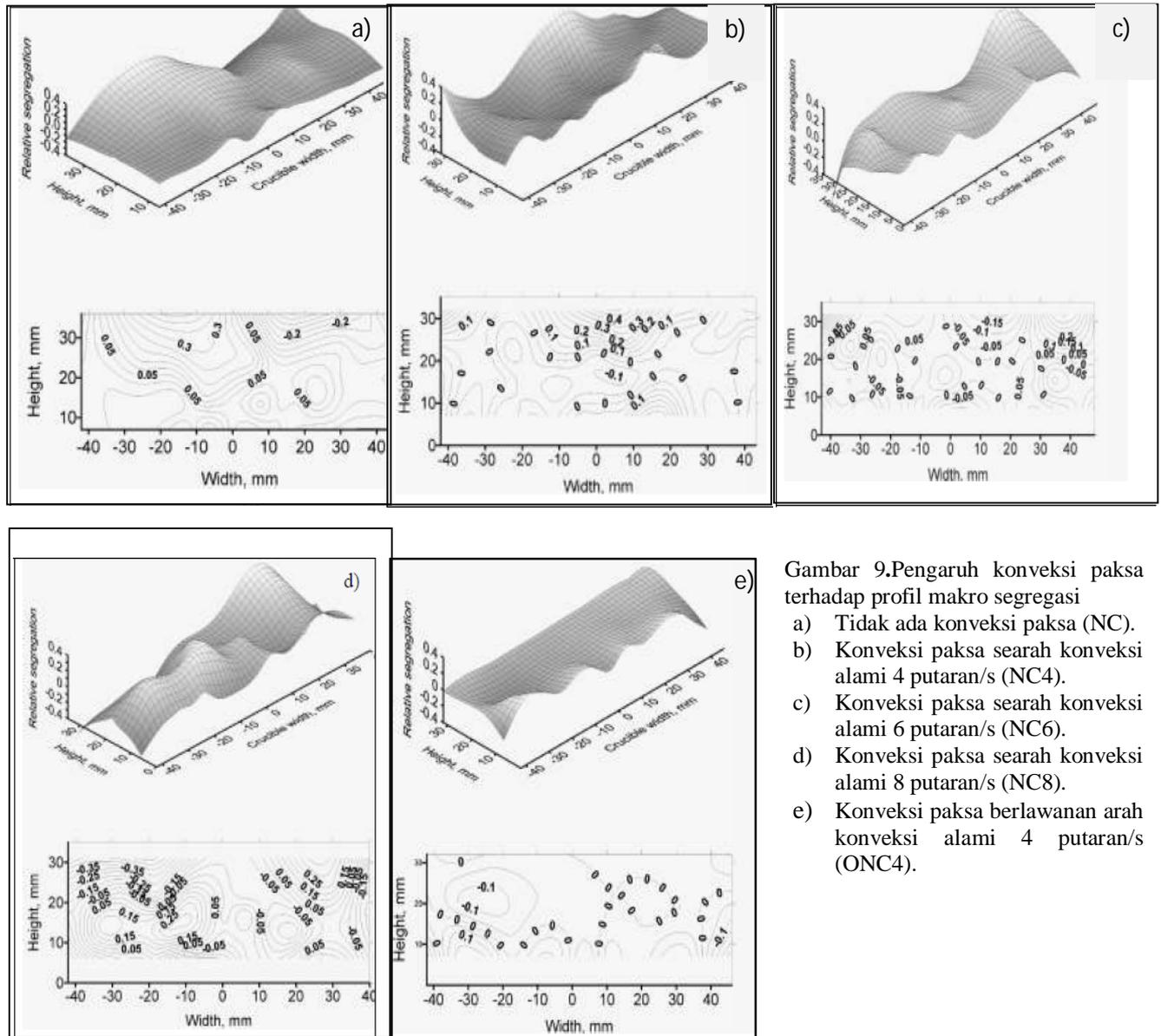
Gambar 8. Foto struktur mikro pada bagian *centerline* untuk masing-masing kondisi percobaan.

- a) Tidak ada konveksi paksa (NC).
- b) Konveksi paksa searah konveksi alami 4 putaran/s (NC4).
- c) Konveksi paksa searah konveksi alami 6 putaran/s (NC6).
- d) Konveksi paksa searah konveksi alami 8 putaran/s (NC8).
- e) Konveksi paksa berlawanan arah konveksi alami 4 putaran/s (ONC4).

Oleh karena itu variasi hasil dari makrosegregasi akan dijelaskan dengan menganalisa pergerakan cairan (*fluida*) akibat adanya konveksi paksa selama proses pembekuan. Pada bagian *centerline* pada *solidification front* terdapat dua jenis aliran, yaitu aliran yang disebabkan adanya penyusutan dan aliran akibat perbedaan gradient temperature. Pada waktu pembekuan akan terjadi penyusutan yang menyebabkan zat terlarut dikeluarkan dari tengah ke arah permukaan. Aliran ini akan menyebabkan daerah tengah mengalami segregasi negatif. Aliran yang kedua adalah aliran akibat perpindahan *solute rich liquid* ke arah tengah bilet sehingga mengakibatkan segregasi positif pada bagian tengah. Konveksi paksa searah dengan konveksi natural akan membawa *solute-rich liquid* dalam zone slurry ke bagian tengah, sehingga akan membuat segregasi positif ke bagian tengah bilet (Gambar 9b).

Peningkatan magnitude dari konveksi paksa akan membuat peningkatan penetrasi *solute rich liquid* ke dalam mushy zone, tetapi juga mengeluarkan *solute rich liquid* dari slurry sehingga pola makrosegregasi yang tidak beraturan. Pada konveksi paksa yang berlawanan arah dengan konveksi alami, aliran ini akan

menekan aliran yang disebabkan oleh penyusutan sehingga akan mengkompensasi aliran yang disebabkan oleh penyusutan. Hal ini menyebabkan nilai segregasi relatifnya menjadi lebih kecil. Apabila konveksi paksa yang dihasilkan bisa menekan konveksi natural dan mengkompensasi aliran akibat penyusutan, maka makrosegregasi akan berkurang secara dramatis seperti yang terlihat pada Gambar 9 (e).



Gambar 9. Pengaruh konveksi paksa terhadap profil makro segregasi
 a) Tidak ada konveksi paksa (NC).
 b) Konveksi paksa searah konveksi alami 4 putaran/s (NC4).
 c) Konveksi paksa searah konveksi alami 6 putaran/s (NC6).
 d) Konveksi paksa searah konveksi alami 8 putaran/s (NC8).
 e) Konveksi paksa berlawanan arah konveksi alami 4 putaran/s (ONC4).

KESIMPULAN

Pengaruh konveksi paksa terhadap struktur mikro dan makrosegregasi telah diamati dalam penelitian ini. Keseluruhan struktur mikro menunjukkan bentuk butiran yang *equiaxed dendritic*. Peningkatan intensitas dari konveksi paksa akan menurunkan ukuran butir secara kualitatif, walaupun secara kuantitatif tidak ditemukan nilai perbedaan yang signifikan. Pemberian konveksi paksa selama proses pembekuan dapat meningkatkan atau menurunkan makrosegregasi pada billet. Konveksi paksa searah dengan konveksi natural dapat menyebabkan segregasi positif pada bagian

tengah billet, sedangkan peningkatan lebih lanjut akan menyebabkan derajat makrosegregasi menjadi meningkat. Konveksi paksa yang berlawanan dengan segregasi akan menekan konveksi alami dan mengkompensasi aliran yang disebabkan oleh penyusutan selama proses pembekuan dan interdendritik *flow* sehingga dihasilkan pola makrosegregasi lebih seragam.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada Dr. D.G. Eskin, Dr. Andrey Turchin dan Prof. L. Katgerman atas bimbingannya dalam penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- ¹Nadella, R., D.G. Eskin, Q. Du, L. Katgerman, 2008. Macro-segregation in direct-chill casting of aluminium alloys. *Progress in Materials Science* 53: 421–480.
- ²Davidson, P.A. and S.C. Flood, 1994. Alami convection of an aluminum ingot a mathematical model. *Metallurgical and Materials Transactions B* 25B: 293–302.
- ³Zhang, H., H. Nagaum, Y. Zui, J. Cui, 2007. Coupled modeling of electromagnetic field, fluid flow, heat transfer and solidification during conventional DC casting and low frequency electromagnetic casting of 7xxx aluminum alloys. *Advanced Materials Research* 15-17: 18–23.
- ⁴Ghosh, A., 2001. Segregation in a cast products, *Sadhana* 26(1-2): 5–24.
- ⁵Slamet, S., Suyitno, 2012. Pengaruh konsentrasi Cu terhadap sifat mekanis Al-Cu pada proses pembekuan searah (*Unidirectional Solidification*). Dalam: Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi Fakultas Teknik Universitas Wahid Hasyim Semarang 1(1): 82–87.
- ⁶Porter, D.A., K.E. Easterling, 1992. *Phase transformations in Metals and Alloys*. USA: Chapman and Hall, 514 hal.
- ⁷Beckermann, C., 2002. Modelling of macrosegregation: applications and future needs. *International Materials Reviews* 47: 243–261.
- ⁸Flood, S.C., L. Katgerman, V.R. Voller, 1991. The calculation of macrosegregation and heat and fluid flows in the DC casting of aluminium alloys. Dalam: M. Rappaz, M.R. Ozgu, K.W. Mahin, *Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes V*. Pennsylvania: TMS, 683–690.
- ⁹Viskanta, R., 1988. Heat transfer during melting and solidification of metals, *Trans. of ASME, J. of Heat Transfer* 110: 1205–1219.
- ¹⁰Fredriksson, H., U. Arkelind, 2006. *Material Processing during Casting*. Chichester: Wiley, 434 hal.
- ¹¹Guo, M., Y. Yang, F. Hua, Z. Hu, 2004. The mechanism of columnar to equiaxed transition during electromagnetic centrifugal solidification. *Zeitschrift für Metallkunde* 95(9): 835–839.
- ¹²Yang, Y., Q. Zhang, Y. He, Z. Hu, 2001. The segregation of copper and silicon in Al-Si-Cu alloy during electromagnetic centrifugal solidification. *Science and Technology of Advanced Materials* 2: 271–275.
- ¹³Prescott, P.J., Incopera F.P., 1995. The effect of turbulence on solidification of a binary metal alloy with electromagnetic stirring. *Transaction of the ASME* 117: 716–724.
- ¹⁴Rishel, L.L., 1993. *A study of the effect of a unidirectional bulk flow on the structure of selected aluminum copper alloy*. PhD Thesis. USA: University of Pittsburgh.
- ¹⁵Zhang, B., J. Cui, G. Lu, 2003. Effects of low-frequency electromagnetic field on microstructures and macrosegregation of continuous casting 7075 aluminium alloy. *Materials Science and Engineering A* 355: 325–330.
- ¹⁶Murakami, K., H. Aihara, T. Okamoto, 1984. Growth direction of columnar crystals solidified in flowing melt. *Acta Materialia* 32(6): 933–939.
- ¹⁷Filip, O., R. Hermann R, G. Gerbeth, J. Priede, V. Shatriv, A. Gueth, L. Schultz, 2004. Influence of melt convection on the microstructure of levitated and undercooled Nd-Fe-B alloys. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 272–276: 1857–1858.
- ¹⁸Buchholz, A., S. Engler, 1996. The influence of forced convection on solidification interfaces. *Computational Materials Science* 7: 221–117.
- ¹⁹Fan, Z., G. Liu, and M. Hitchcock, 2005. Solidification behavior under intensive forced convection. *Materials Science and Engineering A* 413–414: 229–235.
- ²⁰Liu, L., T. Huang, Y. Xiong, A. Yang, Z. Zhao, R. Zhang, J. Li, 2005. Grain refinement of superalloy K4169 by addition of refiners: cast structure and refinement mechanisms. *Materials Science and Engineering A*, 394:1–8.
- ²¹Turchin, A.N., 2008. *Effects of Melt Flow in Casting Process*. PhD Thesis. Netherlands: Delft University of Technology.
- ²²Womer, T.W., *Basic Screw Geometry*, Xaloy Inc.

²³Virhdian, S., 2007. *Effects of forced convection on the structure and macrosegregation of Al-Cu Alloy*. Master Thesis. Netherlands: Delft University of Technology.

²⁴Turchin, A.N., D.G.Eskin and L.Katgerman, 2007. Solidification under Forced Flow Conditions in a Shallow Cavity. *Metallurgical and Materials Transactions A38* (6): 1317-132.