



Mampu Cor Paduan Aluminium

Able to Cast Aluminum Alloy

Surya Irawan

Universitas Pembinaan Masyarakat Indonesia

Corresponding Author: surya.irawan310864@gmail.com

Abstrak

Mampu cor adalah kemampuan paduan untuk dilemparkan tanpa pembentukan cacat seperti retakan, segregasi, pori-pori atau misruns. Ketergantungan paduan fenomena yang menentukan castability adalah fluiditas, macrosegregation, hot tearing dan porositas. Fenomena ini sudah dikenal sejak lama waktu tetapi baru-baru ini menjadi dipahami dengan baik dan pekerjaan sedang dilakukan untuk mengembangkan model castability prediktif. Model-model ini membutuhkan masukan sifat fisik, seperti jalur solidifikasi, koherensi dendrit, penyusutan solidifikasi dan permeabilitas interdendritik. Beberapa di antaranya sifat sulit ditentukan secara eksperimental tetapi teknik eksperimental baru sedang dikembangkan untuk mengekstrak data tersebut. Kertas ini akan meninjau fenomena yang membatasi castability paduan aluminium. Pengaruh komposisi paduan terhadap fluiditas, makrosegregasi, panas robekan dan porositas akan dijelaskan. Model untuk prediksi castability akan ditinjau secara singkat dan data koherensi, fluiditas, permeabilitas dan penyusutan akan disajikan.

Kata kunci: Cor; robekan panas; porositas; makrosegregasi; paduan aluminium.

Abstract

Castability is the ability of an alloy to be cast without the formation of defects such as cracks, segregation, pores or misruns. The alloy-dependent phenomena that determine castability are fluidity, macrosegregation, hot tearing and porosity. This phenomenon has been known for a long time but only recently became well understood and work is underway to develop predictive castability models. These models require input of physical properties, such as solidification pathways, dendritic coherence, solidification shrinkage and interdendritic permeability. Some of these properties are difficult to determine experimentally but new experimental techniques are being developed to extract these data. This paper will review the phenomena that limit the castability of aluminum alloys. The influence of alloy composition on fluidity, macrosegregation, heat of tear and porosity will be explained. Models for predicting castability will be briefly reviewed and coherence, fluidity, permeability and shrinkage data will be presented.

Keywords: Cast; hot tear; porosity; macrosegregation; aluminum alloy.

PENDAHULUAN

Castability adalah kemampuan paduan untuk dilemparkan ke suatu tempat bentuk dengan proses tertentu tanpa pembentukan pengecoran cacat [1]. Paduan fenomena dependen yang menentukan castability adalah fluiditas, macrosegregation, hot tearing dan porositas. Mengenai ketergantungan paduan, diketahui bahwa beberapa elemen paduan umum mempengaruhi castability aluminium paduan secara mendalam. Tinjauan ekstensif diberikan dalam [2-4] dan baru-baru ini di [5]. Paduan yang paling sering digunakan elemen dalam aluminium, silikon, sebenarnya berutang sebagian darinya popularitas karena peningkatan castability. Silikon memiliki kelarutan maksimum sekitar 1,5% berat dalam aluminium dan seterusnya konsentrasi dalam paduan pengecoran aluminium melebihi itu konsentrasi sejauh ini (konsentrasi tipikal berkisar antara 5 dan 17wt% pada paduan seri 300 dan 400), silikon biasanya hadir dalam bentuk unsurnya. Panas fusi dari oleh karena itu, meningkatkan fluiditas secara signifikan. Selain itu, silikon mengembang pematatan dan melawan penyusutan pematatan aluminium; aluminium murni menyusut sebesar 6,7% yang berkurang menjadi sekitar 4,5% dalam paduan Al-Si eutektik dengan 12% berat silikon [6]. Ini, selain rentang pembekuan sedang, karakteristik untuk paduan seri 300- dan khususnya 400, membuat paduan ini mudah diberi makan dan menawarkan ketahanan terhadap panas sobek. Tembaga dan magnesium, yang merupakan dasar dari Seri 200- dan 500, masing-masing, ditambahkan ke aluminium paduan pengecoran dalam konsentrasi biasanya 4 sampai 8% berat. Penambahan ini menghasilkan rentang pembekuan yang besar paduan rentan terhadap robekan panas. Tanpa yang bermanfaat pengaruh silikon, castability paduan tipe 200 dan 500 umumnya dianggap miskin. Jenis paduan 700, yang mana didasarkan pada sistem aluminium-seng, memiliki relatif rentang titik beku yang sempit dan castability sedang.

METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan adalah metode penelitian eksperimen. Penelitian eksperimen adalah penelitian yang dilakukan dengan pendekatan saintifik dengan menggunakan dua set variabel. Set pertama bertindak sebagai konstanta, yang Anda gunakan untuk mengukur perbedaan dari set kedua. Metode penelitian kuantitatif, misalnya, bersifat eksperimental. Makalah ini akan segera meninjau fluiditas, macrosegregation, robekan panas dan pembentukan porositas dalam pengecoran, dan arus status penelitian mereka.

Setiap penelitian yang dilakukan di bawah kondisi yang dapat diterima secara ilmiah menggunakan metode eksperimental. Keberhasilan studi eksperimental bergantung pada peneliti mengkonfirmasi perubahan variabel hanya didasarkan pada manipulasi variabel konstan. Penelitian harus menetapkan sebab dan akibat yang menonjol.

Anda dapat melakukan penelitian eksperimental dalam situasi berikut:

- a) Waktu adalah faktor penting dalam membangun hubungan antara sebab dan akibat.
- b) Perilaku yang tidak berubah-ubah antara sebab dan akibat.
- c) Anda ingin memahami pentingnya sebab dan akibat.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Fluiditas

Dalam pengecoran, digunakan untuk menunjukkan jarak lelehan logam dapat mengalir dalam cetakan dengan luas penampang konstan sebelum mengeras [7]. Fluiditas adalah teknologi yang kompleks properti dan itu tergantung pada banyak faktor [8] yang bisa dikategorikan sebagai berikut:

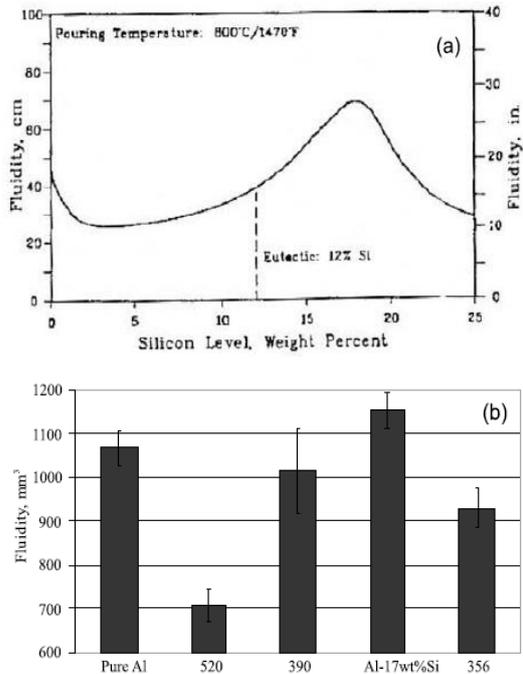
1. Variabel logam: Komposisi kimia Kisaran pemadatan Viskositas Panas fusi
2. Variabel cetakan dan cetakan/logam: Koefisien perpindahan panas (pelapisan) Mould dan konduktivitas termal logam Kepadatan massa cetakan dan logam Panas spesifik Tegangan permukaan
3. Variabel uji:

Kepala logam terapan Diameter saluran. Suhu pengecoran (superheat) Kandungan oksida/partikel Data fluiditas yang andal untuk murni dan komersial paduan pengecoran aluminium tidak tersedia. Namun, data tersebut penting dalam optimalisasi pengisian cetakan perhitungan selama pemadatan [9]. Pengujian fluiditas dapat dilakukan dengan cara yang berbeda. Sejak uji fluiditas pertama di 1902 [10], beberapa peralatan untuk pengujian fluiditas telah dibuat dikembangkan dan dimodifikasi [11,12]. Saat ini, yang paling populer uji fluiditas adalah uji cetakan berbentuk spiral dan vakum uji fluiditas.

Metode pertama mengukur panjang logam mengalir di dalam cetakan berbentuk spiral. Metode kedua mengukur panjang logam mengalir di dalam saluran sempit ketika disedot dari wadah dengan menggunakan pompa vakum.

Secara tradisional, tes spiral telah banyak digunakan karena kompak dan portabel, dan karenanya dapat digunakan dengan mudah di pengecoran. Ulasan komprehensif tentang fluiditas tes yang tersedia saat ini telah disajikan baru-baru ini [13,14]. Para penulis [13,14] juga melaporkan keakuratannya metode dan membandingkan baik laboratorium dan komersial tes yang tersedia. Temperatur pengecoran dan kimia paduan adalah parameter utama yang mempengaruhi fluiditas. Gambar 1 menunjukkan variasi fluiditas dengan tingkat silikon dan sistem paduan [8,9]. Peningkatan kandungan silikon paduan akan meningkatkan fluiditasnya dengan maksimum sekitar 17-18% berat Si. Diantara elemen paduan minor, magnesium ditemukan menurunkan fluiditas paduan A356 [15] sementara tidak ada yang signifikan pengaruh besi dan titanium-boron grain refiner [16]. Alat pemodelan yang saat ini tersedia tidak memiliki modul untuk prediksi/perhitungan fluiditas. Namun, beberapa upaya ke arah ini baru-baru ini dilakukan [17].

Kriteria penghentian didasarkan pada koherensi dendrit dari fluiditas pengukuran dengan cetakan pasir berbentuk spiral menentukan beberapa parameter kunci untuk pemodelan, misalnya, panas koefisien transfer dan ukuran jaring yang optimal [17].



Gbr. 1 : Pengukuran fluiditas sebagai fungsi dari a) tingkat silikon [9] dan b) sistem paduan [8].

Makrosegregasi

Macrosegregation adalah variasi spasial dalam komposisi yang terjadi pada coran dan dapat berkisar dari beberapa milimeter ke sentimeter atau bahkan meter [18]. Penyebab dari makrosegregasi adalah gerakan relatif dari segregasi cair atau padat selama pematangan. Ada beberapa penyebab aliran cairan dan gerakan padat dalam proses pengecoran [18].

Diantaranya adalah:

1. Aliran yang memberi makan penyusutan pematangan
2. Aliran apung yang diinduksi karena termal dan solutal
3. gradien
4. Aliran karena gaya kapiler
5. Aliran yang diinduksi oleh gelembung gas
6. Aliran paksa karena medan elektromagnetik yang diterapkan, pengadukan, rotasi dan/atau getaran Untuk mencegah makrosegregasi, aliran cairan dan gerakan padat harus dikendalikan bertujuan seragam dan distribusi padat padat.

Tinjauan literatur yang komprehensif pada macrosegregation di DC casting paduan aluminium memiliki dilaporkan oleh Nadella et al. [19]. Mereka mengulas yang utama parameter yang mempengaruhi makrosegregasi. Diantaranya parameter, efek penyulingan biji-bijian masih belum jelas. Yu dan Granger melaporkan segregasi garis tengah negatif Cu dan Mg dalam paduan Al-Cu-Mg yang dihaluskan [20]. Kebalikan untuk hasil ini, penulis lain telah melaporkan positif segregasi garis tengah yang disebabkan oleh penyulingan butir. Finn dkk.[21] melaporkan bahwa pemurnian butir dengan Al5Ti0.2B

dihasilkan segregasi garis tengah positif dalam billet Al-4.5wt%Cu paduan. Eskin et al. [22] menunjukkan bahwa perbaikan butir tidak secara signifikan mengubah profil macrosegregation dan tingkat ketidakhomogenan kimia. Peran penyulingan biji-bijian tampaknya tergantung pada beberapa faktor, misalnya, jenis paduan dan jenis penghalus biji-bijian. Apalagi kontribusi dari biji-bijian yang mengambang bebas adalah isu yang paling kontroversial di teori makrosegregasi [22]. Beberapa peneliti pernah melaporkan bahwa dendrit sel kasar miskin zat terlarut [20,23] sementara yang lain telah melaporkan bahwa dendrit sel halus miskin zat terlarut dan bertanggung jawab atas segregasi garis tengah negatif [24]. Eskin et al. [22] menunjukkan bahwa konsentrasi minimum unsur terlarut dalam sel kasar tidak bergantung pada kondisi pengecoran dan pemurnian biji-bijian, sedangkan dalam sel halus ini meningkat dengan kecepatan pengecoran dan penyempurnaan struktur.

Baru-baru ini, pengaruh proses yang paling penting parameter pada macrosegregation dalam paduan Al-Cu DC cast billet dipelajari dengan melakukan simulasi numerik [25].

Itu menunjukkan bahwa parameter proses mempengaruhi makrosegregasi melalui dampak langsungnya pada aliran termosolutal di kolam cair dan zona lembek. Itu faktor utama adalah kedalaman kolam cair dan gradien suhu yang mendorong termal alami konveksi di kolam [25]. Pekerjaan pemodelan ditujukan untuk prediksi kuantitatif dari kejadian dan tingkat keparahan macrosegregation masih perlu pengembangan lebih lanjut. Meskipun mekanisme dasar memiliki telah diakui, tantangan saat ini dalam menentukan besarnya di mana mekanisme ini mempengaruhi makrosegregasi. Kedua pekerjaan eksperimental dan teoritis adalah diperlukan untuk sepenuhnya memahami efek dari gerakan butir equiaxed, morfologi mereka dan permeabilitas zona lembek [19]

Robek panas

Penyusutan pepadatan dan kontraksi termal bisa menyebabkan tekanan yang signifikan. Oleh karena itu, pengecoran dapat robek daerah yang kekuatannya masih rendah. Daerah-daerah itu tidak benar-benar dipadatkan dan hot spot terjadi [7]. Formasi air mata panas disebabkan oleh kurangnya makan di zona lembek. Jika pengecoran diberi makan dengan baik dan permeabilitas dalam lembek zona tinggi, cairan dapat mengalir antara dendrit menyembuhkan air mata yang baru mulai.

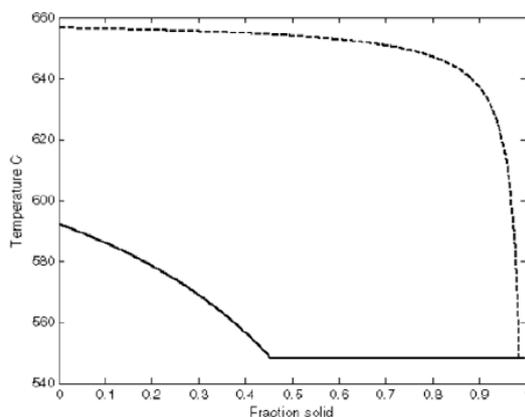
Sobekan panas sangat bergantung pada paduan dan umumnya diyakini bahwa air mata panas mulai berkembang di zona lembek pada fraksi padat mendekati 1 [1]. Dalam urutan agar air mata panas berkembang, kondisi berikut harus diterapkan [1]: Casting menahan diri dari kontrak Jaringan yang koheren harus dibangun Cairan harus tetap ada pada dendrides atau biji-bijian batasan.

Penurunan suhu yang signifikan harus terjadi setelahnya koherensi jaringan padat harus cukup padat untuk mencegah memberi makan cairan ke dalam air mata / Permeabilitas rendah Jembatan antara dendrit harus dibuat untuk menahan tegangan tarik yang timbul. Dalam aluminium paduan, telah ditemukan bahwa menjembatani antara dendrit adalah didirikan pada fraksi cair sekitar 0,1 di mana biasanya 90% dari batas butir masih ditutupi oleh film cair tipis [26]. Pada tahap ini

permeabilitas dari jaringan dendrit sangat rendah sehingga memberi makan ke dalam dilatasi jaringan dicegah. Di sisi lain, jika jaringannya dijembatani ke tingkat yang besar dan sebagian kecil dari gandum batas-batas ditutupi oleh cairan, jaringan akan berubah bentuk plastis tanpa sobek. Air mata panas akan mulai sebagai pori. Nukleasi akan terjadi dalam kondisi yang mirip dengan pori, kebanyakan kemungkinan pada inklusi. Ketergantungan paduan dari hot tearing dapat dipahami dari perilaku segregasi dari elemen paduan. Jika konten paduan relatif rendah dibandingkan dengan konsentrasi eutektik dalam sistem dengan eutektik dalam, seperti sistem Al-Cu atau Al-Mg, paduannya segregasi akan moderat pada awalnya dan pepadatan akan berlangsung pada suhu yang relatif konstan. Menjelang akhir pepadatan, bagaimanapun, parah microsegregation akan menghasilkan penurunan suhu yang tajam dan kontraksi termal yang luas akan menekan pengecoran saat itu rentan sobek. Situasi seperti itu ditunjukkan pada Gambar. 2

Bahkan konsentrasi paduan yang lebih rendah akan menghasilkan coran itu sudah koheren menjelang akhir pepadatan dan akan, oleh karena itu, berubah bentuk secara plastis. Beberapa tes telah dirancang untuk mengukur panas kecenderungan sobek paduan aluminium. Sebagian besar adalah berdasarkan coran dalam cetakan yang menahan logam dari kontrak. Pengujian tarik suhu tinggi telah digunakan untuk menilai perkembangan stres paduan dekat dengan mereka suhu solidus dan diharapkan hasil dari inites akan menjadi penting untuk pemahaman lebih lanjut dan kuantifikasi fenomena hot tearing.

Upaya untuk memodelkan hot tearing telah dijelaskan dan ditinjau oleh Eskin et al. [27]. Model seperti itu didasarkan pada secara bersamaan menggambarkan makan / formasi porositas dan deformasi berlebihan. Model yang lebih canggih berdasarkan persamaan konservasi dua fase volume rata-rata untuk massa.



Gambar 2 : Ketergantungan temperatur pepadatan Al-1wt% Cu (kurva putus-putus) dan Al-20wt%Cu (kurva padat) Al-1wt%Cu akan merobek panas sedangkan Al-20wt%Cu tidak dan momentum di zona lembek dalam jaringan melebar telah dikembangkan dan dikombinasikan dengan berbagai hot tearing kriteria. Tantangan dengan semua model ini adalah merumuskan kriteria robek panas yang secara akurat membedakan kerentanan untuk berbagai pilihan bahan- dan proses parameter.

Porositas

Porositas dalam pengecoran dikaitkan dengan kedua pemadatan penyusutan dan kandungan gas yang tinggi. Ketidak mampuan cairan logam untuk memberi makan melalui daerah interdendritik untuk mengkompensasi penyusutan volume selama pemadatan menyebabkan porositas. Penolakan gas hidrogen dari larutan selama pemadatan juga dapat menyebabkan porositas. Itu diakui bahwa nukleasi pori homogen tidak mungkin. Bukan logam inklusi dan film oksida yang terkandung dalam cairan keadaan mempengaruhi pembentukan porositas dan sifat mekanik dalam aluminium dan paduannya [28,29]. Memahami mekanisme pembentukan porositas membutuhkan direproduksi percobaan laboratorium di mana parameter kunci seperti tingkat hidrogen dan kualitas lelehan dapat dikontrol dengan hati-hati. Baru-baru ini penyelidikan dilakukan di mana efeknya porositas dua tingkat hidrogen (rendah dan sedang). diselidiki pada step-mould die [30]. Juga efek dari prosedur degassing dan upgassing pada tingkat porositas diselidiki. Ditunjukkan bahwa adanya oksida/ inklusi, karenanya kualitas lelehan, memainkan efek yang lebih signifikan pada sifat mekanik dan porositas dari hidrogen konten [30]. Reprodusibilitas dari pendekatan eksperimental ini dinilai dengan mengulang serangkaian dua pengecoran percobaan dalam kondisi yang identik pada dua hari yang berbeda. Reprodusibilitas relatif diukur untuk bervariasi dalam berkisar 5-10% [31].

Prediksi kuantitatif porositas membutuhkan pertimbangan beberapa efek pada pembentukan porositas, seperti kandungan hidrogen, jumlah dan ukuran pori, permeabilitas dll. Tinjauan ekstensif tentang kemajuan penelitian tentang porositas pemodelan dapat ditemukan dalam referensi [32]. Penulis yang sama [32] mengembangkan model rata-rata volume untuk memprediksi penyusutan dan pembentukan porositas gas selama pemadatan paduan aluminium. Model ini memperhitungkan efek dari aliran makan, variasi tekanan leleh dan difusi laju hingga hidrogen terlarut dalam cairan menuju pori-pori. Dulu

menunjukkan bahwa porositas yang digerakkan oleh penyusutan menjadi penting untuk laju pendinginan tinggi dan gradien suhu rendah [32]. Namun, penulis membahas kebutuhan untuk

- a) Lebih ukuran yang akurat dari kelarutan hidrogen dalam eutektik,
- b) Model yang lebih baik untuk variasi kerapatan nomor pori, dan
- c) Akurasi yang lebih baik dari hidrogen laju-hingga lokal submodel difusi.

Saat ini, model untuk pembentukan dan pertumbuhan porositas berdasarkan difusi/transportasi gas skala mikro/makro di meleleh, ditambah dengan model untuk memberi makan aliran dan tekanan selama pemadatan, sedang dalam pengembangan dan simulasi hasilnya divalidasi oleh data eksperimen yang akurat [31]. Ini pendekatan pemodelan dimaksudkan untuk menjadi berlaku baik untuk gravitasi dan die casting bertekanan rendah

Validasi eksperimental sangat penting untuk membantu dan mengembangkan lebih lanjut alat pemodelan. Salah satu yang utama tantangan untuk merumuskan kriteria porositas harus dipertimbangkan memperhitungkan permeabilitas di daerah interdendritik.

Investigasi ekstensif telah dilakukan di SINTEF/ NTNU untuk mengukur permeabilitas dan menguraikan model memperhitungkan variasi permeabilitas dengan fraksi padat dan struktur mikro [33-35]. Boeira et al. [36] menghitung komposisi lokal bersama panjang pengecoran Al-Cu dengan model macrosegregation dan menggunakannya sebagai parameter input untuk simulasi mikroporositas. Mereka menemukan bahwa penurunan zat terlarut paduan konten dan peningkatan perpindahan panas logam / cetakan disebabkan tingkat porositas yang lebih rendah di daerah yang dekat dengan permukaan pengecoran.

KESIMPULAN

Kemajuan yang signifikan telah dibuat dalam dekade terakhir di pemahaman castability paduan aluminium. Ini pemahaman sedang disistematisasikan dalam model prediksi. Model seperti itu masih dalam pengembangan dan belum bisa secara kuantitatif memprediksi panjang cairan, makrosegregasi, panas sobekan dan porositas. Penelitian lanjutan harus fokus pada:

1. Perbaikan deskripsi fisik castability fenomena dalam rangka meningkatkan kecanggihan dari model .
2. Pengukuran fisiokimia dan termodinamika data, khususnya properti zona lembek seperti permeabilitas dan sifat mekanik semipadat logam .
3. Eksperimen kritis yang dapat direproduksi untuk memvalidasi model.

DAFTAR PUSTAKA

1. Arnberg L, Mo A, Castability-fluidity and hot tearing, *MetalsHandbook*, ASM (2008) 375.
2. Arnberg L, Bäckerud L and Chai G, Solidification Characteristics of Aluminium Alloys. *AFS Trans*, (1996) 3.
3. Bäckerud L, Chai G and Tamminen J, Solidification Characteristics of Aluminium Alloys, *AFS Trans*, (1990) 2.
4. Jorstad J and Rasmusen W M, Aluminium Casting Technology, *AFS Trans.*, (1993).
5. Major F J, Aluminium and aluminium alloy castings. *Metals Handbook*, ASM (2008) 1059.
6. Magnusson T and Arnberg L, *Met. Trans.*, 32A (2001) 2605.
7. Flemings M C, *Solidification Processing*, (1974) McGraw Hill.
8. Di Sabatino M, Fluidity of aluminium alloys. PhD Thesis at NTNU, (2005).
9. Loper Jr, C R, *AFS Trans*, (1992) 533.
10. West T D, *Metallurgy of cast iron*. Cleveland, OH, (1902).
11. Saito D, Hayashi K, *Memoires of the College of Engineering, Kyoto Imperial University*, 2 (1919) 83.
12. Krynitsky A I, *AFS Trans.*, 61 (1953) 399.
13. Di Sabatino M, Syvertsen F, Arnberg L and Nordmark A, An improved method for fluidity measurement by gravity casting of spirals in sand moulds. *Int. J. Cast Met. Res.*, 18 (2005) 59.

14. Di Sabatino M, Arnberg L, Brusethaug S, Apelian D, Fluidity evaluation methods for Al-Mg-Si alloys. *Int. J. Cast Met. Res.*, 19 (2006) 94.
15. Di Sabatino M, Shankar S, Apelian D, Arnberg L, Influence of temperature and alloying elements on fluidity of Al-Si alloys. In *TMS-Shape Casting Symposium*. (2005) 193.
16. Di Sabatino M, Arnberg L, Effect of grain refinement and dissolved hydrogen on the fluidity of A356 alloy. *Int. J. Cast Met. Res.*, 18 (2005) 181.
17. Di Sabatino, M., Arnberg, L., Bonollo, F., Simulation of fluidity in Al-Si alloys. *Met Sc and Tech*, Ed by Teksid (2006).
18. Beckermann C, Macrosegregation. *Metals Handbook*. 2008:ASM. 348.
19. Nadella R, Eskin D G and Du Q, Katgerman L, Macrosegregation in direct-chill casting of aluminium alloys, *Prog. Mater. Sci.*, 53(2008) 421.
20. Yu H and Granger D A, International conference on aluminium alloys-their physical and mechanical properties, (1986) Warley, UK.
21. Finn T L, Chu M G and Bennon W D, Micro/Macro scale phenomena in solidification, ed. C. Beckermann, New York: ASME (1992) 17.
22. Eskin D G, Nadella R and Katgerman L, Effect of different grain structures in centreline macrosegregation during direct-chill casting. *Acta Mat*, 56 (2008) 1358.
23. Glenn A M R, Paterson S P, P.J. K., *Metall Mat Trans A*, 384 (2003) 232.
24. Chu M G, Jacoby J E, *Light Metals*, (1990) 925.
25. Zaloznik M, Sarler B, *Mat. Sci and Eng. A*, 413-414 (2005) 85.
26. Ju Y, Arnberg L, *Int. J. Cast Met. Res.*, 16 (2003) 522.
27. Eskin D, Suyinto G, Katgerman L, *Prog. Mater. Sci.*, 49 (2004) 629.
28. Monroe R, Porosity in castings. *AFS Trans*, 5 (2005) 10.
29. Rooy E L, Preventing porosity in aluminum castings, Part 2. *Modern Casting*, 82 (1992)