

REKAYASA

**LAPORAN AKHIR
PENELITIAN HIBAH BERSAING**



**Pengendali Gelombang Permukaan dan Titik
Jatuh Logam Cair pada Proses Pengecoran
dengan Mengatur Kecepatan dan Posisi Titik
Putar Tungku**

**IR. H. USMAN HARAHAHAP, MT.
DRS. DADAN RAMDAN, MENG., MSC.
IR. DARIANTO, MSC.**

***Dibiayai Oleh:*
Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi
Departemen Pendidikan dan Kebudayaan
Surat Keputusan Koordinator Perguruan Tinggi Swasta Wil. I
Nomor: 016/K1.2.2/HK/2012**

UNIVERSITAS MEDAN AREA

OKTOBER 2012

REKAYASA

**LAPORAN AKHIR
PENELITIAN HIBAH BERSAING**



**Pengendali Gelombang Permukaan dan Titik
Jatuh Logam Cair pada Proses Pengecoran
dengan Mengatur Kecepatan dan Posisi Titik
Putar Tungku**

**IR. H. USMAN HARAHAH, MT.
DRS. DADAN RAMDAN, MENG., MSC.
IR. DARIANTO, MSC.**

**Dibiayai Oleh:
Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi
Departemen Pendidikan dan Kebudayaan
Surat Keputusan Koordinator Perguruan Tinggi Swasta Wil. I
Nomor: 016/K1.2.2/HK/2012**

**UNIVERSITAS MEDAN AREA
OKTOBER 2012**

1. Judul Penelitian : Pengendali Gelombang Permukaan dan Titik Jatuh Logam Cair pada Proses Pengecoran dengan Mengatur Kecepatan dan Posisi Titik Putar Tungku

2. Ketua Peneliti

- a. Nama Lengkap : Ir. H. Usman Harahap, MT.
- b. Jenis Kelamin : L
- c. NIP : 19510215 198703 1 003
- d. Jabatan Struktural : Ketua Jurusan Teknik Elektro UMA
- e. *Jabatan Fungsional* : Lektor Kepala
- f. Bidang Keahlian : Teknik Sistem Tenaga
- g. Fakultas/Jurusan : Teknik/Teknik Elektro
- h. Perguruan Tinggi : Universitas Medan Area
- i. Tim Peneliti

No.	Nama dan Gelar Akademik	Bidang Keahlian	Fakultas/Jurusan	Perguruan Tinggi
1.	Drs. Dadan Ramdan, MEng., MSc.	Teknik Kendali	Teknik/T. Elektro	Universitas Medan Area
2.	Ir. Darianto, MSc.	Teknik Produksi	Teknik/T. Mesin	Universitas Medan Area


3. Pendanaan dan jangka waktu penelitian

- a. Jangka Waktu Penelitian yang diusulkan : 1 tahun
- b. Biaya total yang diusulkan : 47.000.000,-
- c. Biaya yang disetujui tahun II : -

Medan, 29 Oktober 2012

Mengetahui,
Dekan FT-UMA




Hj. Haniza, MT.
NIP. 19610131 198703 1 002


Ketua Peneliti,



Ir. H. Usman Harahap, MT.
NIP. 19510215 198703 1 003

Menyetujui,
Ketua LP2M UMA




Dr. Jr. Suswati, MP.
NIP. 19650525 198903 2 002

Ringkasan

Pada penelitian ini telah dirancang mesin pengecoran logam otomatis dengan posisi titik putar tungku yang berubah serta kecepatan putar tungku diatur berdasarkan besar gelombang permukaan sehingga titik jatuh logam sesuai dengan sasaran. Disamping itu telah dirancang juga model matematik gelombang permukaan liquid pada tungku (ladle) dalam sistem pengecoran ini dengan menggunakan model pendulum.

Model matematik yang dirancang menjadi acuan pengendalian dan simulasi komputer untuk menggambarkan perilaku liquid di dalam ladle ketika putar balik setelah proses penuangan pada cetakan.

Simulasi komputer yang dibuat menggunakan program aplikasi dinamika fluida dengan menggunakan metoda SOLA-MAC, kemudian hasil simulasi ini dibandingkan dengan hasil eksperimen.

Pengendalian sistem untuk mengurangi gelombang permukaan yang digunakan adalah input shaping. Hal ini cukup sesuai karena ditunjukkan dengan perbandingan hasil simulasi dan eksperimen dengan perbedaan gelombang permukaan setelah 1 detik sebesar 6.5 %.

Summary

This research designed of automatic pouring machine control by tilting position and velocity base on generated of liquid vibration. The mathematics model of liquid vibration in ladle of pouring process system is designed by pendulum models.

The mathematics model which design as references of computer simulation for describe of liquid behavior in the ladle in turn backward after pouring to sprue cup process.

The computational simulation that designed was use available software of *fluid dynamics code by SOLA-MAC methods*. The simulation result compared whit experimental results was good confirmation.

The controller for reducing liquid vibration is input shaping. The result of the proposed controller is assured by comparison between simulation and experimental results. The average deviation at maximum liquid vibration (after 1 s) is found to be 6.5 %. The results demonstrate good quantitative agreement.

PRAKATA

Alhamdulillah puji syukur penulis sampaikan kepada Allah swt yang telah memberikan petunjuk, kesehatan dan kemampuan sehingga laporan akhir penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

Penelitian ini merupakan upaya untuk memberikan kontribusi kepada pembangunan dalam rangka meningkatkan kualitas hasil cetakan pada proses pengecoran logam.

Penulis sangat berharap jika hasil penelitian ini dapat diterapkan pada masyarakat yang memerlukannya, karena sampai saat ini di Kota Medan masih banyak yang belum menerapkan teknologi ini.

Namun demikian penulis juga berharap adanya masukan dan saran-saran untuk kesempurnaan penelitian ini dari pembaca yang budiman dan saya ucapkan banyak terima kasih.

Penulis juga ingin mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu kepada kelancaran penelitian ini terutama kepada Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi Departemen Pendidikan dan Kebudayaan melalui KOPERTIS WILAYAH I Medan.

Medan, Oktober 2012

Penulis

DAFTAR ISI

Halaman Pengesahan	i
A. LAPORAN KEMAHUAN HASIL PENELITIAN	
Ringkasan dan Summery	ii
Prakata	iii
Daftar Isi	iv
Daftar Tabel	v
Daftar Gambar	vi
Daftar Lampiran	viii
Bab I Pendahuluan	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
Bab II Tinjauan Pustaka	3
Bab III Tujuan dan Manfaat Penelitian	7
3.1 Tujuan	7
3.2 Manfaat Penelitian	8
Bab IV Metoda Penelitian	10
Bab V Hasil Penelitian dan Pembahasan	13
5.1 Hasil Penelitian	13
5.2 Pembahasan	21
5.3 Pengendali (Controller)	23
5.4 Penggunaan pada Cetakan Kecil	29
Bab VI Kesimpulan dan Saran	32
6.1 Kesimpulan	32
6.2 Saran	32
Daftar Pustaka	33
Lampiran-lampiran	34

B. DRAF USULAN PATEN

C. DRAF ARTIKEL ILMIAH

Daftar Tabel

Tabel 5.1	Parameter percobaan pada Simulasi Komputer	21
Tabel 5.2	Parameter Percobaan dengan model SOLA-MAC	22

Daftar Gambar

Gambar 2.1	Sistem Kontrol Pengecoran Otomatis yang didukung oleh CAE	5
Gambar 4.1	Model gelombang permukaan tipe pendulum untuk tanki (lade) berputar ke belakang (backward-tilting)	11
Gambar 4.2	Ilustrasi model alat eksperimen sistem pengecoran Otomatis	12
Gambar 5.1	(a) Hubungan sudut putar dan waktu, (b) Hubungan gelombang permukaan liquid dengan waktu hasil simulasi dan eksperimen pada $h_s = 20$ cm	13
Gambar 5.2	(a) Hubungan sudut putar dan waktu, (b) Hubungan gelombang permukaan liquid dengan waktu hasil simulasi dan eksperimen pada $h_s = 16$ cm	13
Gambar 5.3	(a) Hubungan sudut putar dan waktu, (b) Hubungan gelombang permukaan liquid dengan waktu hasil simulasi dan eksperimen pada $h_s = 9,5$ cm	14
Gambar 5.4	(a) Hubungan sudut putar dan waktu, (b) Hubungan gelombang permukaan liquid dengan waktu hasil simulasi dan eksperimen pada $h_s = 20$ cm	14
Gambar 5.5	Hasil simulasi pada saat 0 – 1 detik untuk $h_s = 20$ cm	15
Gambar 5.6	Hasil simulasi pada saat 1,5 – 2,5 detik untuk $h_s = 20$ cm	15
Gambar 5.7	Hasil simulasi pada saat 3 – 4 detik untuk $h_s = 20$ cm	15
Gambar 5.8	Hasil simulasi pada saat 4,5 – 5,5 detik untuk $h_s = 20$ cm	15
Gambar 5.9	Hasil simulasi pada saat 0 – 1 detik untuk $h_s = 16$ cm	16
Gambar 5.10	Hasil simulasi pada saat 1,5 – 2,5 detik untuk $h_s = 16$ cm	16
Gambar 5.11	Hasil simulasi pada saat 3 – 4 detik untuk $h_s = 16$ cm	16
Gambar 5.12	Hasil simulasi pada saat 4,5 – 5,5 detik untuk $h_s = 16$ cm	16
Gambar 5.13	Hasil simulasi pada saat 0 – 1 detik untuk $h_s = 9,5$ cm	17
Gambar 5.14	Hasil simulasi pada saat 1,5 – 2,5 detik untuk $h_s = 9,5$ cm	17
Gambar 5.15	Hasil simulasi pada saat 3 – 4 detik untuk $h_s = 9,5$ cm	17
Gambar 5.16	Hasil simulasi pada saat 4,5 – 5,5 detik untuk $h_s = 9,5$ cm	17
Gambar 5.17	Hasil eksperimen pada saat 0 – 1 detik untuk $h_s = 20$ cm	18
Gambar 5.18	Hasil eksperimen pada saat 1,5 – 2,5 detik untuk $h_s = 20$ cm	18
Gambar 5.19	Hasil eksperimen pada saat 3 – 4 detik untuk $h_s = 20$ cm	18
Gambar 5.20	Hasil eksperimen pada saat 4,5 – 5,5 detik untuk $h_s = 20$ cm	18
Gambar 5.21	Hasil eksperimen pada saat 0 – 1 detik untuk $h_s = 16$ cm	19
Gambar 5.22	Hasil eksperimen pada saat 1,5 – 2,5 detik untuk $h_s = 16$ cm	19
Gambar 5.23	Hasil eksperimen pada saat 3 – 4 detik untuk $h_s = 16$ cm	19
Gambar 5.24	Hasil eksperimen pada saat 4,5 – 5,5 detik untuk $h_s = 16$ cm	19
Gambar 5.25	Hasil eksperimen pada saat 0 – 1 detik untuk $h_s = 9,5$ cm	20
Gambar 5.26	Hasil eksperimen pada saat 1,5 – 2,5 detik untuk $h_s = 9,5$ cm	20
Gambar 5.27	Hasil eksperimen pada saat 3 – 4 detik untuk $h_s = 9,5$ cm	20
Gambar 5.28	Hasil eksperimen pada saat 4,5 – 5,5 detik untuk $h_s = 9,5$ cm	20
Gambar 5.29	Perbandingan hasil simulasi antara model SOLA-MAC dan Pendulum	20
Gambar 5.30	Penerapan prinsip input shaping pada turunan input kendali kontinu berdasarkan kedua reduksi vibrasi dan kendali sudut	

putar tungku	24
Gambar 5.31 Prinsip mereduksi vibrasi	25
Gambar 5.32 Sistem kendali fungsi transfer model tipe pendulum	25
Gambar 5.33 Hasil simulasi kendali komputer menggunakan model tipe pendulum dengan masukan shaping	26
Gambar 5.34 Perbandingan Hasil Percobaan Antara Menggunakan Preshaping dan Tanpa Preshaping	27
Gambar 5.35 Perbandingan Hasil Simulasi dengan Hasil Eksperimen Tanpa Preshaping	28
Gambar 5.36 Perbandingan Hasil Eksperimen Antara Tanpa Preshaping dan dengan Preshaping	28
Gambar 5.37 Hasil eksperimen proses transfer fluida pada cetakan kecil yang berbeda arah input untuk waktu 1detik samapi 5 detik.	30
Gambar 5.38 Hasil eksperimen proses transfer fluida pada cetakan kecil yang berbeda arah input untuk waktu 7detik samapi 11 detik.	31

Daftar Lampiran

Lampiran 1. Ukuran Ladle yang Dibuat	35
Lampiran 2. Spesifikasi Alat Eksperimen yang Digunakan	36
Lampiran 3. Alat eksperiment yang dibuat	37
Lampiran 4. Hasil simulasi menggunakan FLUEN	38
Lampiran 5. Komponen alat eksperimen	41

Bab I

Pendahuluan

1.1 Latar Belakang

Dalam upaya melakukan pemberdayaan masyarakat dan seluruh kekuatan ekonomi nasional termasuk terhadap industri kecil dan menengah (IKM) pengecoran logam memerlukan keberpihakan dari pemerintah. Keberpihakan ini disamping untuk meredam kegagalan pasar (market failures) juga diperlukan dalam upaya mengurangi keterpurukan akibat krisis ekonomi yang berkepanjangan. Industri kecil dan menengah (IKM) pengecoran logam di Ceper adalah contoh kasus, yang dalam batas-batas tertentu memerlukan keberpihakan tersebut.

Berdasarkan 'Klaten Dalam Angka 1998' bahwa jumlah IKM pengecoran logam sebanyak 332, namun dengan adanya krisis ekonomi, diduga yang masih survive sekitar 30%. Meskipun ada penurunan yang cukup tajam, IKM pengecoran logam di Ceper ini masih berpeluang untuk meraih potensi pasar komponen pengecoran logam, hanya persoalannya antara lain adalah diperlukan adanya sentuhan teknologi yang inovatif sehingga kualitas produknya memiliki daya saing yang tinggi. Oleh karena itu intervensi pemerintah melalui berbagai kebijakan diperlukan untuk mendorong IKM pengecoran logam Ceper mau mengadopsi atau mendifusikan hasil inovasi teknologi (Ugay Sugarmansyah dkk., 2003).

Hal utama yang harus diperhatikan pada proses pengecoran dengan teknologi yang berinovasi tinggi atau otomatis adalah : 1) Mampu menuangkan logam cair kedalam cetakan pada titik yang tepat; 2) Mampu menuangkan logam cair sampai level ketinggian yang tepat tanpa ada logam cair yang tumpah atau tanpa terjadi percikan, karena bila hal ini terjadi maka akan ada pemborosan bahan dan berbahaya bagi operatornya; 3) Mampu menentukan volume logam cair yang masuk ke cetakan dengan tepat; 4) Mampu menggunakan waktu proses yang diperlukan selama proses pencetakan pertama dan proses pencetakan berikutnya sesingkat mungkin, sebab hal ini akan dipengaruhi oleh temperatur dari logam cair yang digunakan (Kazuhiko Terashima dkk., 2000)

Kemudian, oleh karena proses pengecoran logam sangat berbahaya bagi kesehatan dan keselamatan operatornya yang diakibatkan oleh asap, panas dan gas yang ditimbulkannya, maka merealisasikan sistem pengecoran yang memiliki teknologi yang berinovasi tinggi atau otomatis sangat diperlukan.

1.2 Perumusan Masalah

Dari pemaparan di atas, maka penelitian ini mengambil perumusan masalah sebagai berikut : **Apakah dengan mengendalikan kecepatan putar balik dan mengatur gerak posisi titik putar dapat mengurangi atau menghilangkan gelombang permukaan liquid (logam cair) sehingga kesalahan posisi penuangan pada cetakan dapat dihindari dan konsumsi energi dapat dikurangi?.**

Bab II

Tinjauan Pustaka

Terasima and Ramdan (2000), telah membuat model dan simulasi komputer untuk perilaku fluida pada tungku dan cetakan pada proses pengecoran untuk penuangan model putar (tilting-type). Paper ini telah menunjukkan perbandingan antara hasil simulasi dan eksperimen yang signifikan. Perilaku fluida dianalisa dengan menggunakan metoda SOLA-MAC. Pertama dilakukan analisa perilaku permukaan fluida pada saat tungku putar balik, kemudian dilakukan analisa fluida di dalam cetakan ketika penuangan dilakukan, lalu hasilnya dibandingkan dengan hasil pengamatan dari eksperimen.

Terashima *et al.* (2001) telah menganalisa gelombang permukaan dan merancang sistem kontrol untuk menghilangkan gelombang permukaan pada mesin pengecoran logam otomatis model tilting-type. Paper ini membahas kendali dua derajat kebebasan yaitu mengendalikan besar sudut putar balik dan sekaligus mengatur kecepatan putar sehingga gelombang permukaan liquid dapat diredam. Pengendalian yang digunakan adalah kompensasi umpan balik dan input shaping. Terashima *et al.* (1999, 1997) juga telah membahas Model dan sistem kendali vibrasi permukaan zat cair pada sistem pengecoran otomatis untuk model tilting-type. Pada penelitian ini suatu rancangan optimal dengan menghilangkan gelombang permukaan pada kendali kontainer bergerak yang berisi fluida cair dengan model simulasi komputer dinamika fluida telah dihasilkan.

Dengan model yang berbeda, Burditt and Bralower (1989) dan Lindsay (1983) dalam papernya membahas kualitas produk yang dihasilkan oleh sistem pengecoran yang dikendalikan secara otomatis.

Terashima *et al.* (2005) telah membahas tentang model dan kontrol robust untuk mengatur ketinggian permukaan liquid pada suatu cetakan untuk bentuk baskom pada proses pengecoran logam. Tujuan pada penelitian ini adalah untuk memperoleh metode agar menghasilkan ketinggian permukaan liquid pada cetakan yang tetap setiap dilakukan penuangan pada proses pengecoran logam model baskom. Pada penelitian ini digunakan model robot pengecoran otomatis tipe tilting. Suatu sistem kontrol dua derajat kebebasan

digunakan untuk mengendalikan ketinggian permukaan liquid. Pada paper ini juga menunjukkan suatu urutan model yang sesuai untuk setiap bagian pada proses pengecoran logam. Selanjutnya model input feedforward juga digunakan untuk merealisasikan pengendali ketinggian permukaan liquidnya (level control). Untuk mempertahankan performansi model digunakan kendali umpan balik robust dengan menggunakan teori kendali H tak hingga. Untuk menguji validitas sistem kontrol yang diusulkan telah ditunjukkan melalui hasil simulasi dan eksperimen:

Noda *et al.* (2003) telah melakukan penelitian tentang pendeteksian dan kendali lintasan untuk objek yang sistem geraknya tidak diketahui dengan tujuan untuk meredam gelombang permukaan pada proses pengecoran logam.

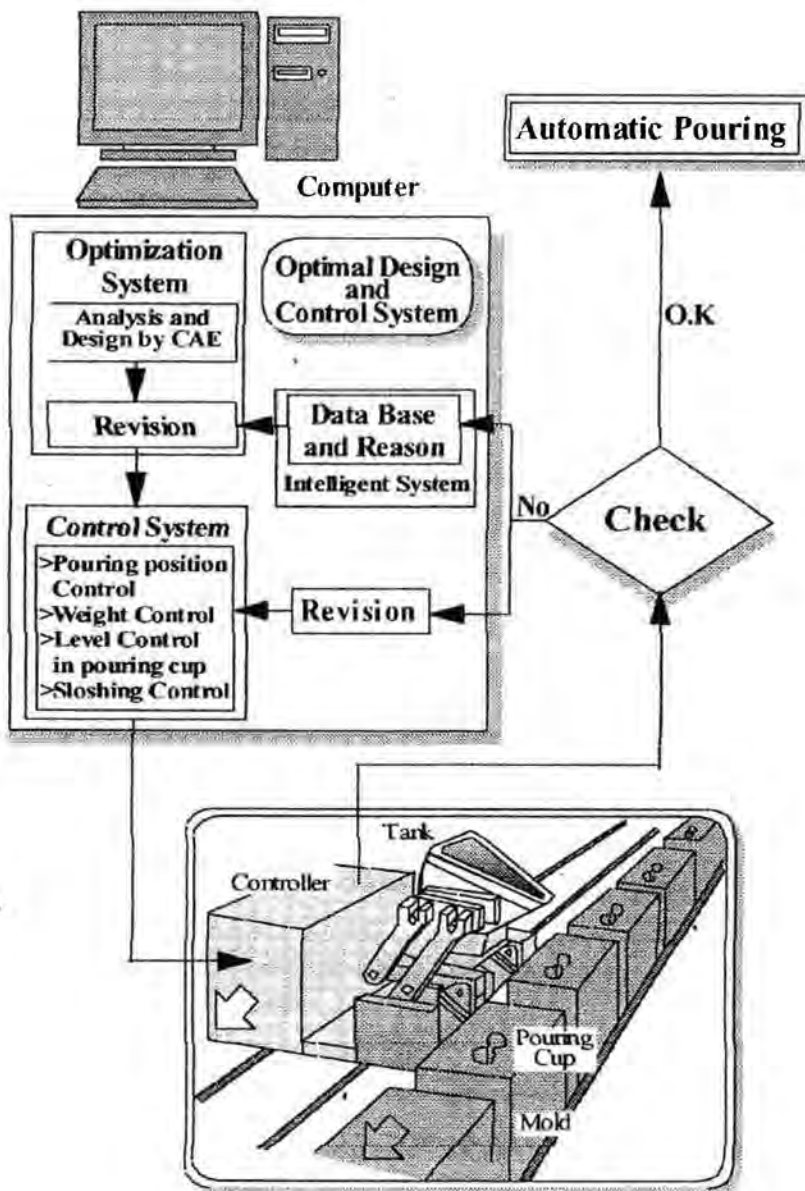
Penelitian ini mengambil fokus pada pendeteksian otomatis dan kendali lintasan untuk gerakan memperoleh target yang posisinya tidak diketahui, juga kendali untuk meredam gelombang permukaan pada suatu lintasan objek. Kendali lintasan untuk target objek tersebut dengan mengeksekusi gelombang permukaan melalui kendali peredaman telah di rekomendasikan sebagai pengembangan awal untuk suatu tipe robot pengecoran otomatis yang dapat bekerja secara otomatis pada industri pengecoran.

Pada penelitian ini juga telah dilakukan pengamatan target objek, kemudian suatu sensor laser telah digunakan untuk mengukur posisi lintasan objek dan perbedaan antara target dan lintasan objek telah diestimasi. Berdasarkan informasi ini, referensi jalan lintasannya untuk mengendalikan lintasan diberikan berdasarkan peredaman gelombang permukaan. 2-DOF (degree of freedom) sistem dengan menggunakan suatu pengendali feedforward model inverse untuk lintasan objek telah ditunjukkan. Kendali gelombang permukaan pada lintasan objek ditunjukkan dengan merancang pengendali umpan balik melalui pendekatan bentuk hibrida. Keefektifan sistem kendali yang diusulkan ditunjukkan melalui percobaan pada sistem transfer container zat cair.

Tabatabaei (1998), pada papernya yang berjudul Pengecoran Otomatis untuk Logam Cair dengan Menggunakan Sistem Kendali Pengamatan Real Time telah melakukan penelitian yang memfokuskan pada

pengamatan logam cair dalam sprue cup dengan menggunakan kamera digital. Penelitian ini juga telah membandingkan hasil penggunaan Laser dan Sinar-X di dalam pengukuran tanpa menyentuh objek yang ditangkap dengan kamera, lensa dan elektronik pemeroses citra.

Terashima *et al.* (2001) pada papernya menunjukkan Sistem Kontrol Pengecoran Otomatis yang didukung oleh CAE yang diilustrasikan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Sistem Kontrol Pengecoran Otomatis yang didukung oleh CAE

Dari Gambar 2.1 di atas dapat dilihat bahwa pengendalian dapat di fokuskan selain kepada meredam gelombang permukaan juga dapat ditekankan kepada pengendalian posisi titik jatuh pengecoran, pengendalian berat (massa) liquid dan pengendalian ketinggian level liquid pada sprue cup (cetakan) ketika pengecoran dilakukan.

Bab III

Tujuan dan Manfaat Penelitian

3.1 Tujuan

Untuk merealisasikan maksud di atas, maka diperlukan upaya agar perilaku logam cair (liquid) pada saat dilakukan proses penuangan dan pencetakan selama pengecoran dapat diketahui. Hal ini dapat dicapai dengan merancang model dan kendali gelombang liquid sistem pengecoran melalui komputer terutama analisa bentuk dan besar gelombang permukaan selama proses pengecoran, sebab untuk mengetahui perilaku permukaan liquid di dalam tungku dan cetakan pada proses pengecoran logam melalui analisa komputer dapat diamati dengan mudah (Terashima *et al.*, 2001). Oleh karena itu biaya dan waktu percobaan di lapangan dapat dikurangi, juga operator dapat memahami lebih mudah untuk mengenal proses pengecoran.

Dengan proses numerik yang dilakukan komputer, analisa akan mudah dilakukan, begitu juga visualisasi perilaku permukaan liquid dapat ditunjukkan dengan interaktif.

Selain hal di atas, penelitian ini juga berusaha agar diperoleh suatu model matematik yang tepat dari perilaku liquid (zat cair) pada proses pengecoran logam. Hal ini sangat diperlukan untuk upaya proses pengendalian secara otomatis dengan tujuan agar gelombang permukaan liquid (zat cair) pada tungku (ladle) dapat dikurangi atau dihilangkan ketika proses putar balik berlangsung setelah penuangan.

Gelombang permukaan ini akan sangat berpengaruh terhadap proses dan hasil pengecoran karena akan menimbulkan ketidak-tepatan jatuhnya logam cair ke cetakan. Juga getaran yang timbul akan berpengaruh terhadap sistim perangkat pengecorannya.

Telah banyak peneliti yang melakukan upaya di atas namun pengendalian untuk meredam gelombang permukaan hanya melalui pengaturan gerak putar motor dengan titik putar yang tetap. Hal ini diperlukan motor yang memiliki torsi yang sangat besar, sehingga energi yang diperlukan juga cukup besar (Terashima *et al.*, 1999, 1997).

Pada penelitian ini akan diupayakan proses pengendalian untuk meredam gelombang permukaan liquid (zat cair) melalui pengaturan posisi

titik putar yang berubah serta mengatur gerak putar motor pada tungku (ladle). Hal ini diharapkan akan diperoleh hasil peredaman gelombang permukaan yang lebih baik serta dapat mengurangi konsumsi energi.

3.2 Manfaat Penelitian

IKM pengecoran logam Ceper merupakan aset negara yang peranannya relatif cukup besar dalam menghasilkan produk besi cor Indonesia. Namun teknologi pengecoran logam di Ceper yang sebagian besar memakai teknologi tungkik menghasilkan kualitas produk coran yang relatif rendah dan kurang efisien, sehingga produk yang dihasilkan akan sulit bersaing dengan produk dari luar negeri terutama dalam menjelang pasar bebas. Padahal IKM pengecoran di Ceper ini masih berpeluang untuk meraih potensi pasar komponen pengecoran logam, hanya persoalannya antara lain adalah diperlukan adanya sentuhan teknologi yang inovatif sehingga kualitas produknya memiliki daya saing yang tinggi (Sugarmansyah dkk., 2003).

Oleh karena di Indonesia pada umumnya dan di Medan pada khususnya, industri yang menggunakan proses pengecoran belum banyak menggunakan sistem teknologi yang berinovasi tinggi misalnya yang otomatis, maka penelitian ini sangat diperlukan, terutama nanti apabila sudah diterapkan pada IKM akan menghasilkan kualitas produk yang lebih baik.

Untuk menghasilkan produk cetakan yang dapat bersaing dengan dunia luar, maka diperlukan suatu sistem pengecoran yang berkualitas. Berkualitas dalam hal ini adalah sistem yang bekerja dapat dilakukan secara otomatis sehingga dapat melakukan proses pengecoran dengan presisi dan akurasi yang tinggi sehingga tidak muncul gangguan baik dari luar maupun dari sistem itu sendiri.

Kemudian, apabila hasil produksinya sudah dapat diterima di pasar global, maka tentu harga jual akan semakin bersaing sehingga keuntungan yang diperoleh IKM atau perusahaan semakin besar. Dengan demikian diharapkan industri pengecoran di Indonesia akan dapat diterima di pasar global untuk meningkatkan daya saing bangsa di masa depan.

Selain hal di atas dari sisi teknologi inovasi, paling tidak ada beberapa elemen penting yang perlu dipertimbangkan di dalam mendifusikan teknologi tersebut yaitu (1) inovasi teknologi yang didifusikan harus memberikan

manfaat bagi adopters baik secara teknis maupun ekonomis (relative advantage), kemudian juga dilihat dari aspek compatibility, complexity, trialability, dan observability; (2) bagaimana inovasi tersebut dikomunikasikan; (3) difusi inovasi teknologi memerlukan waktu yang relatif beragam dan ;(4) harus mempertimbangkan sistem sosial yang ada (Sugarmansyah dkk., 2003).

Model dan kendali gelombang liquid melalui simulasi komputer yang dirancang dapat juga digunakan sebagai alat untuk mengkomunikasikan teknologi yang inovatif kepada para operator yang bertugas di Industri Pengecoran. Dalam segi ilmiah, penelitian ini sangat memungkinkan untuk menghasilkan beberapa paper yang dapat diterbitkan pada jurnal nasional maupun internasional.

Penelitian ini diharapkan akan menjadi acuan perancangan model sistem pengecoran otomatis dan sekaligus menjadi alat untuk menganalisa perilaku zat cair pada proses pengecoran. Sehingga penelitian akan mudah dilakukan dengan biaya yang rendah karena cukup dilakukan di labolatorium.

Bab IV

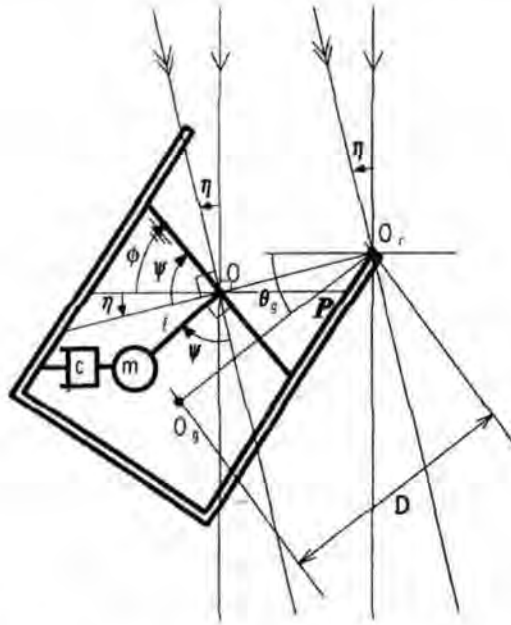
Metoda Penelitian

Metode penelitian yang dipakai adalah dengan urutan sebagai berikut:

1. Merancang model matematik dan kendali gelombang permukaan liquid pada sistem pengecoran logam otomatis dengan posisi titik putar yang tetap.
2. Membangun program simulasi komputer dengan model matematik yang diperoleh dari poin 1 dengan menggunakan program MATLAB.
3. Membuat program simulasi komputer dengan menggunakan FLUENT untuk mengamati perilaku liquid pada tungku (ladle).
4. Membuat program pengendali sistem dengan program MATLAB
5. Membangun alat eksperimen dengan posisi titik putar yang tetap
6. Melakukan percobaan dengan menggunakan alat eksperimen yang dibuat
7. Membandingkan hasil eksperimen dengan hasil simulasi pada langkah 3 dan langkah 4

Jadi, metode penelitian yang digunakan adalah melalui pendekatan simulasi yang dibandingkan dengan hasil eksperimen. Simulasi diawali dengan membangun model matematik dan algoritma untuk menyusun program pengendali. Program yang digunakan untuk pengendali sistem adalah program MATLAB. Model matematik dikembangkan melalui model bandul matematis (pendulum) berayun yang dipengaruhi oleh tinggi permukaan, gesekan akibat pengaruh viskositas zat cair serta gravitasi yang mempengaruhi massa zat cair yang ada dalam tungku (ladle). Model bandul matematis tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.1 berikut ini.

Titik O adalah titik pusat perputaran pendulum. Dimana m adalah massa liquid, c adalah ekivalen dengan koefisien fiskositas, l ekivalen dengan panjang pendulum, η = sudut putar dari sudut putar inisialisasi, ψ = sudut vibrasi dari garis permukaan, θ = sudut putar inisialisasi, $\Phi = \psi + \eta$, D = jarak antara O_r dan O_g .



Gambar 4.1 Model gelombang permukaan tipe pendulum untuk tanki (lade) berputar ke belakang (backward-tilting)

Model tipe pendulum akan dengan mudah dapat diturunkan dari kesetimbangan momen pada sekitar titik pusat perputaran O sebagai berikut.

$$J \frac{d^2(\eta + \psi)}{dt^2} = -c \frac{d\{l(\eta + \psi)\}}{dt} l \cos(\eta + \psi) - mgl \sin(\eta + \psi) - m \frac{d^2\{D \cos \theta_g \eta\}}{dt^2} l \sin(\eta + \psi) - m \frac{d^2\{D \sin \theta_g \eta\}}{dt^2} l \cos(\eta + \psi) \quad (4.1)$$

$$\ddot{\phi} = -\frac{c}{m} \dot{\phi} - \frac{g}{l} \phi - \frac{D \sin \theta_g}{l} \ddot{\eta}, \quad J = ml^2 \quad (4.2)$$

Fungsi Transfer Q(s) menjadi :

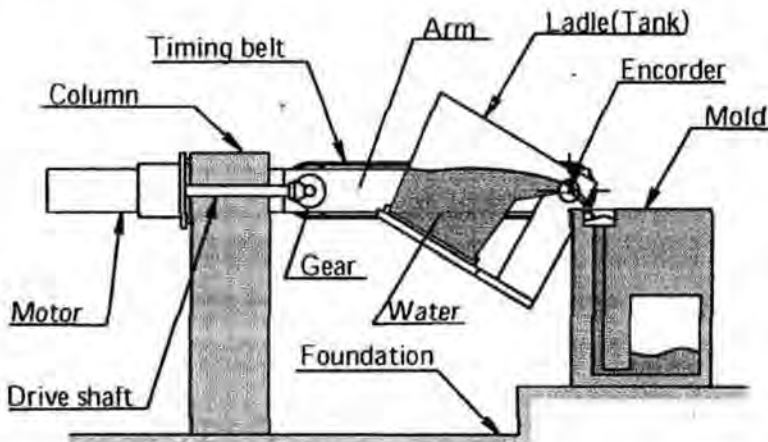
$$Q(s) = \frac{\phi(s)}{\eta(s)} = -\frac{(D \sin \theta_g / l) s^2}{s^2 + (c/m)s + (g/l)} = -\frac{(D \sin \theta_g / l) \omega^2}{-\omega^2 + 2\xi \omega_n \omega + \omega_n^2} \quad (4.3)$$

$$\omega_n = 2\pi f_n = \sqrt{\frac{g}{l}}, \quad \xi = \frac{c}{2m} \sqrt{\frac{l}{g}}$$

J adalah momen inersia, ω_n adalah frekwensi angular natural, ζ adalah rasio peredam.

Model matematik yang diperoleh disubstitusikan dengan persamaan gerak motor (sistem motor) yang digunakan, kemudian dilakukan pemeriksaan kekontrolan (controllable) dan keteramatan (observable) dari matrik ruang keadaan yang diperoleh. Apabila sudah memenuhi syarat, maka dapat dibangun perangkat keras sistem pengecoran logam.

Ilustrasi model alat eksperimen sistem pengecoran logam otomatis yang dirancang pada tahap II ini dapat dilihat pada Gambar 4.2 berikut ini. Pada Gambar 4.2 tersebut terlihat tungku dapat bergerak berputar ke depan dan ke belakang sehingga diharapkan dapat menghilangkan gelombang permukaan liquid (zat cair) yang terdapat di dalam tungku (ladle).



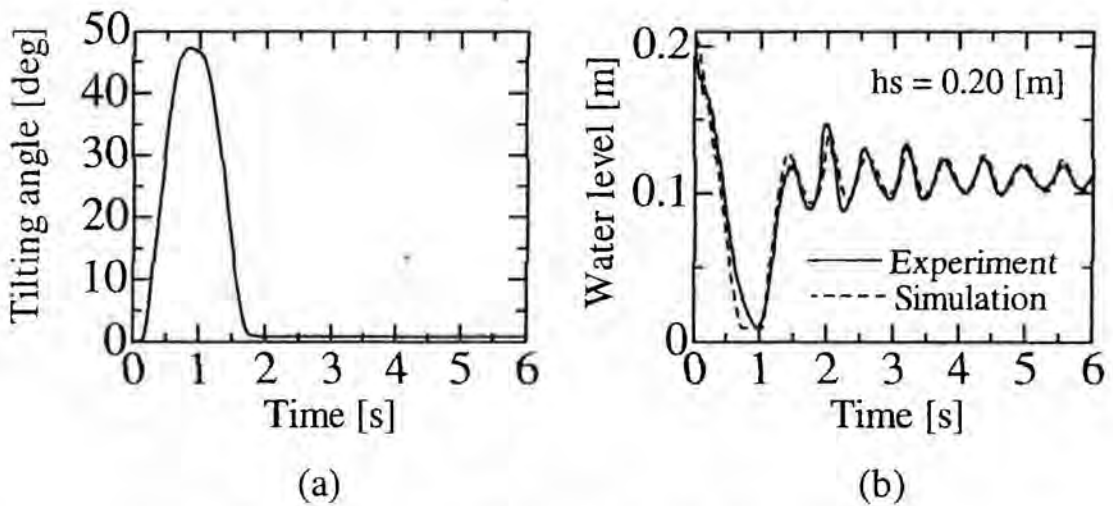
Gambar 4.2 Ilustrasi model alat eksperimen sistem pengecoran otomatis

Bab V

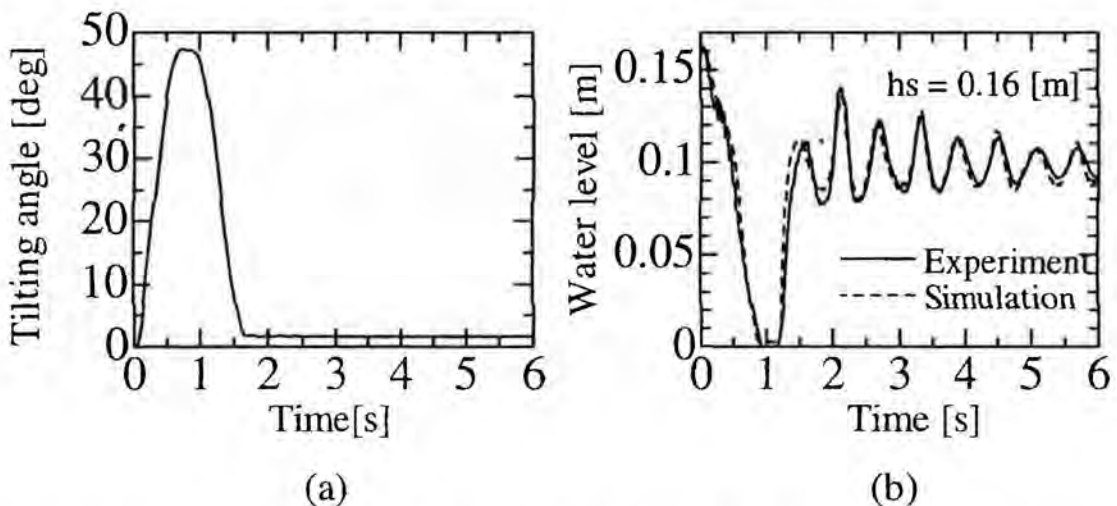
Hasil Penelitian dan Pembahasan

5.1 Hasil Penelitian

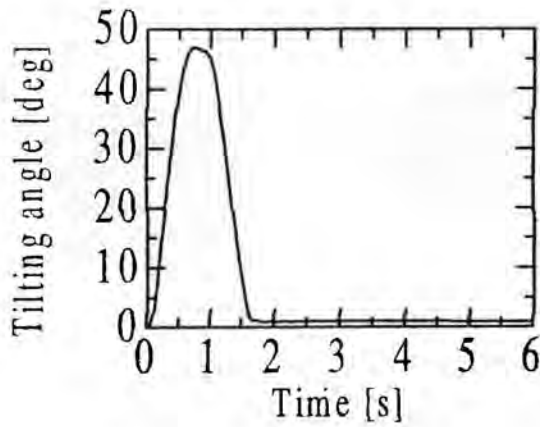
Hasil penelitian ini diperoleh data hasil simulasi dan eksperimen seperti grafik yang ditunjukkan pada Gambar 5.1 sampai Gambar 5.4 di bawah ini. Sedangkan dalam bentuk visual dari hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 5.5 sampai Gambar 5.16 dan hasil eksperimen ditunjukkan pada Gambar 5.17 sampai Gambar 5.28.



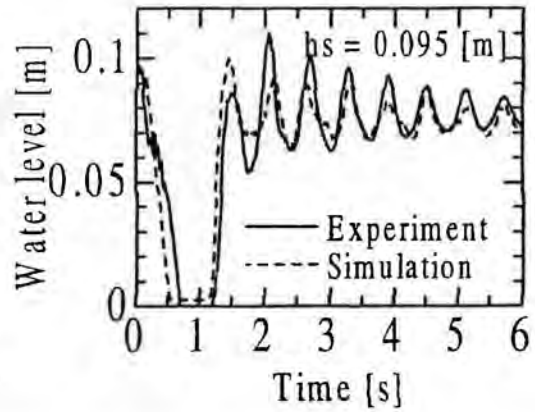
Gambar 5.1 (a) Hubungan sudut putar dan waktu
(b) Hubungan gelombang permukaan liquid dengan waktu hasil simulasi dan eksperimen pada $h_s = 20$ cm



Gambar 5.2 (a) Hubungan sudut putar dan waktu
(b) Hubungan gelombang permukaan liquid dengan waktu hasil simulasi dan eksperimen pada $h_s = 16$ cm

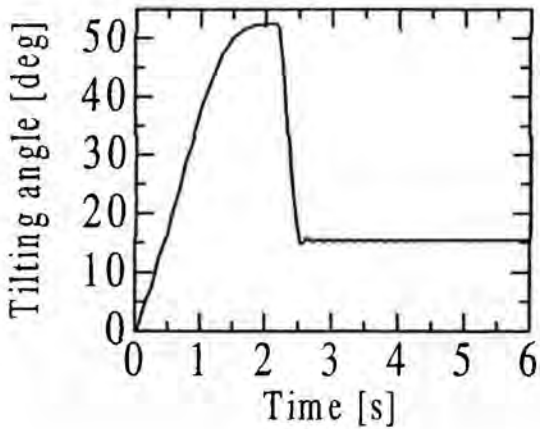


(a)

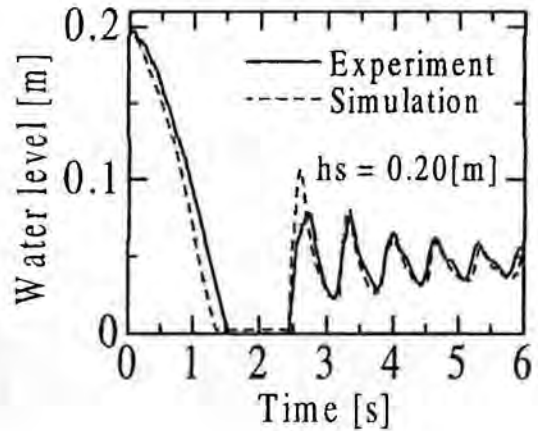


(b)

Gambar 5.3 (a) Hubungan sudut putar dan waktu
(b) Hubungan gelombang permukaan liquid dengan waktu hasil simulasi dan eksperimen pada $h_s = 9,5$ cm

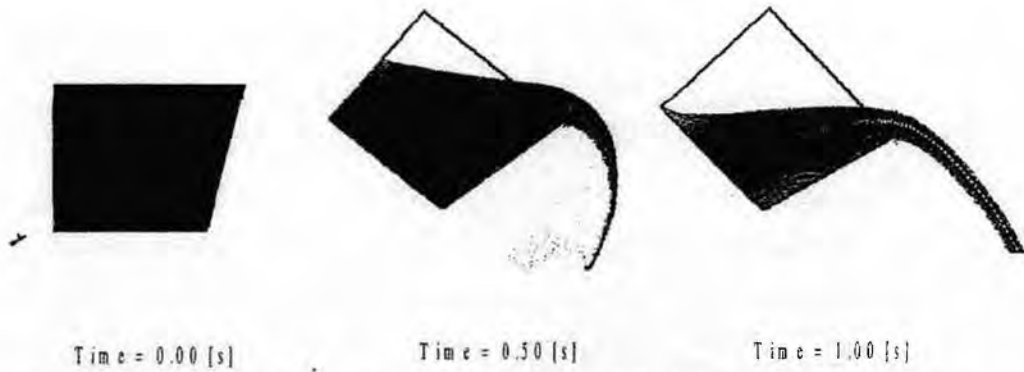


(a)

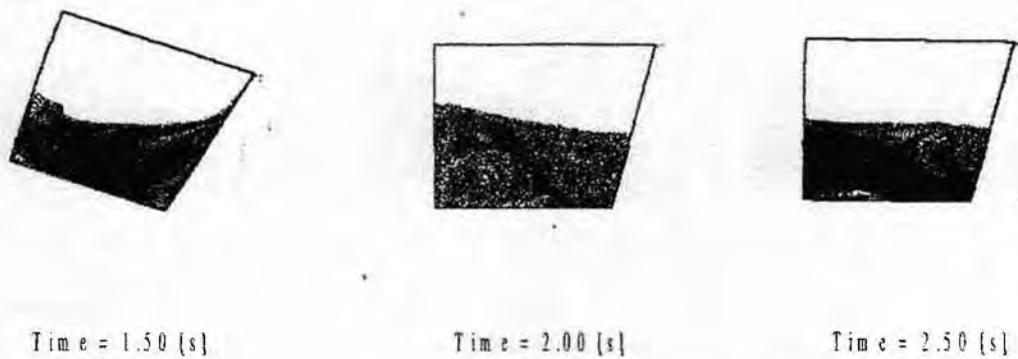


(b)

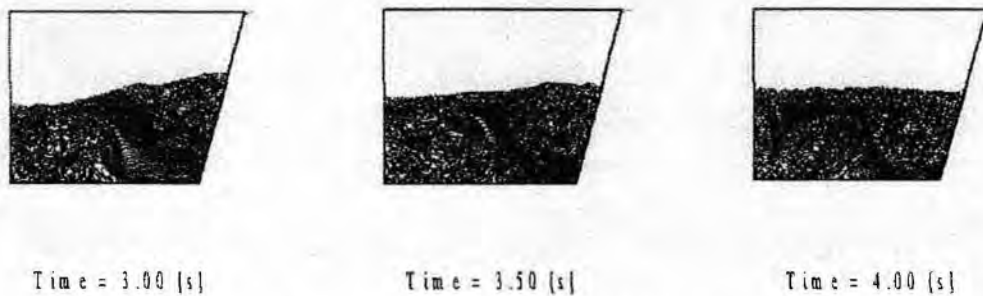
Gambar 5.4 (a) Hubungan sudut putar dan waktu
(b) Hubungan gelombang permukaan liquid dengan waktu hasil simulasi dan eksperimen pada $h_s = 20$ cm



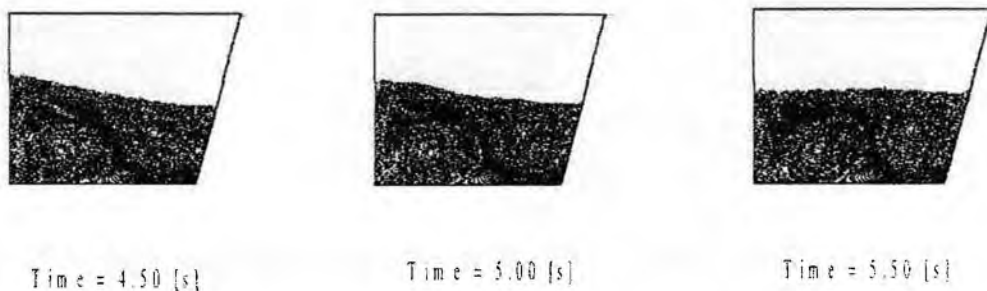
Gambar 5.5 Hasil simulasi pada saat 0 – 1 detik untuk $h_s = 20$ cm



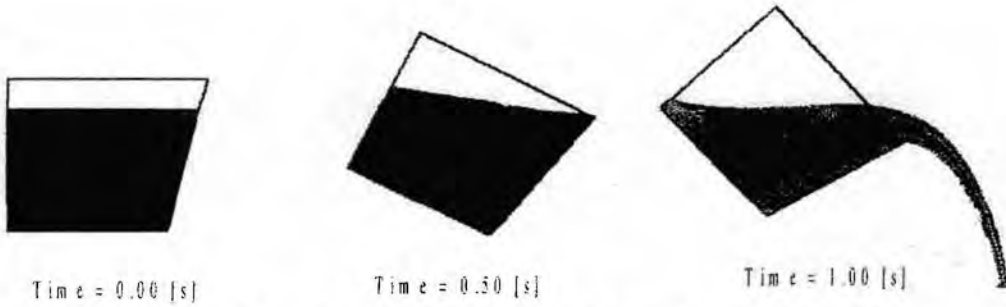
Gambar 5.6 Hasil simulasi pada saat 1,5 – 2,5 detik untuk $h_s = 20$ cm



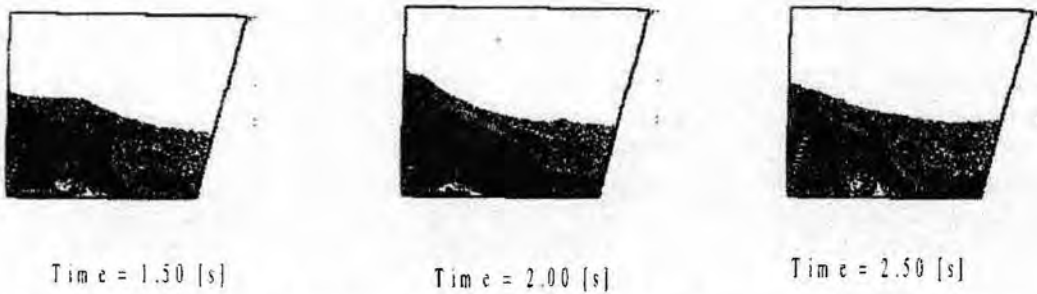
Gambar 5.7 Hasil simulasi pada saat 3 – 4 detik untuk $h_s = 20$ cm



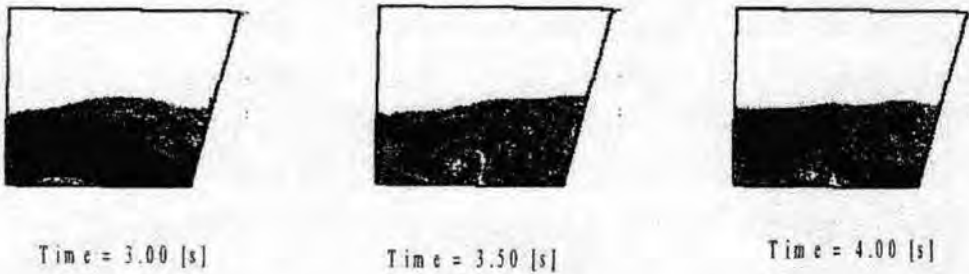
Gambar 5.8 Hasil simulasi pada saat 4,5 – 5,5 detik untuk $h_s = 20$ cm



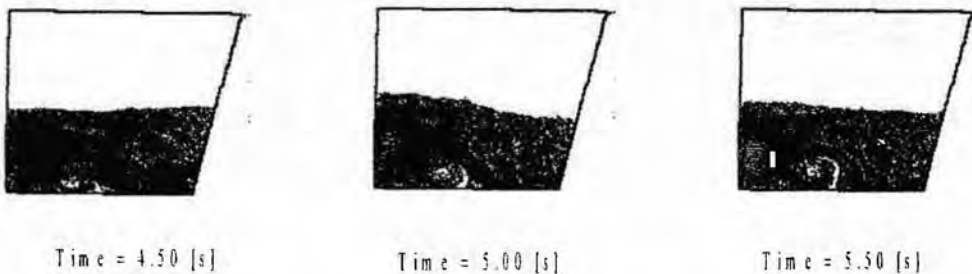
Gambar 5.9 Hasil simulasi pada saat 0 – 1 detik untuk $h_s = 16$ cm



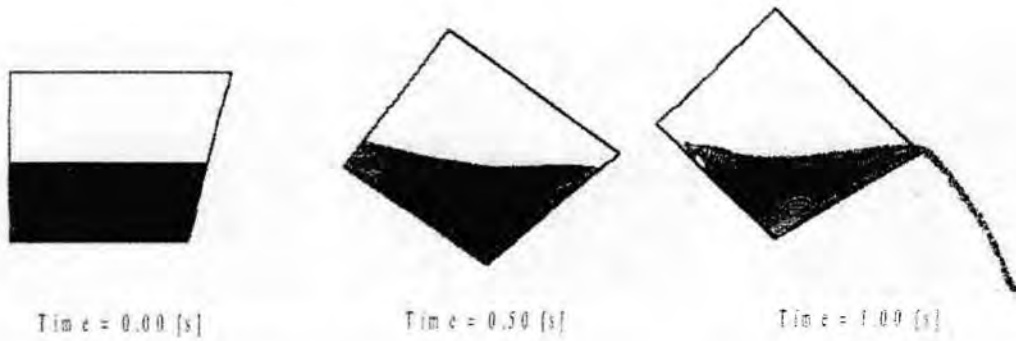
Gambar 5.10 Hasil simulasi pada saat 1,5 – 2,5 detik untuk $h_s = 16$ cm



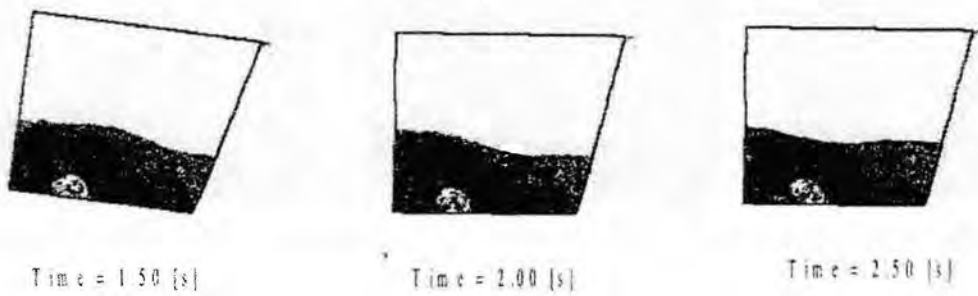
Gambar 5.11 Hasil simulasi pada saat 3 – 4 detik untuk $h_s = 16$ cm



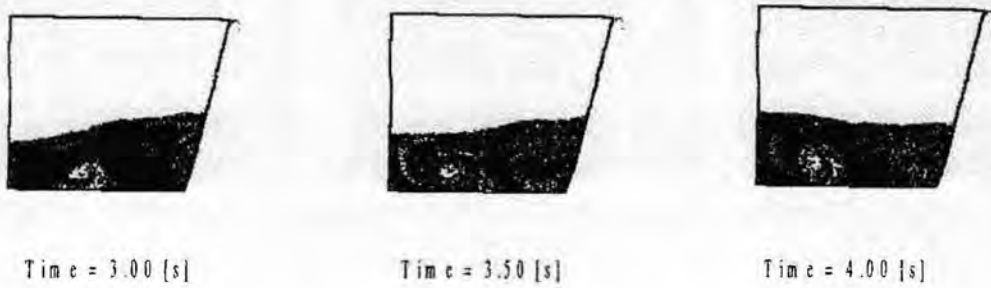
Gambar 5.12 Hasil simulasi pada saat 4,5 – 5,5 detik untuk $h_s = 16$ cm



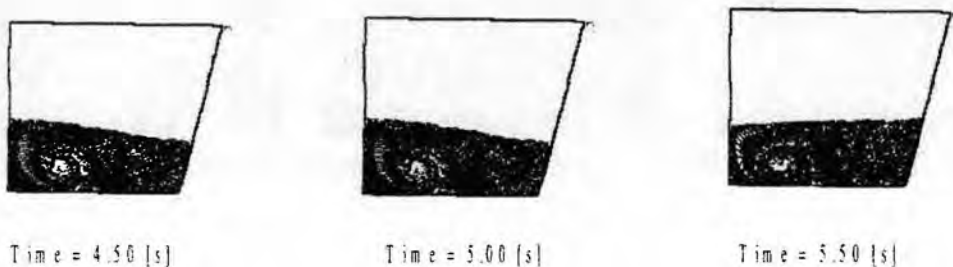
Gambar 5.13 Hasil simulasi pada saat 0 – 1 detik untuk $h_s = 9,5$ cm



Gambar 5.14 Hasil simulasi pada saat 1,5 – 2,5 detik untuk $h_s = 9,5$ cm



Gambar 5.15 Hasil simulasi pada saat 3 – 4 detik untuk $h_s = 9,5$ cm



Gambar 5.16 Hasil simulasi pada saat 4,5 – 5,5 detik untuk $h_s = 9,5$ cm
UNIVERSITAS MEDAN AREA



Gambar 5.17 Hasil eksperimen pada saat 0 – 1 detik untuk $h_s = 20$ cm



Gambar 5.18 Hasil eksperimen pada saat 1,5 – 2,5 detik untuk $h_s = 20$ cm



Gambar 5.19 Hasil eksperimen pada saat 3 – 4 detik untuk $h_s = 20$ cm



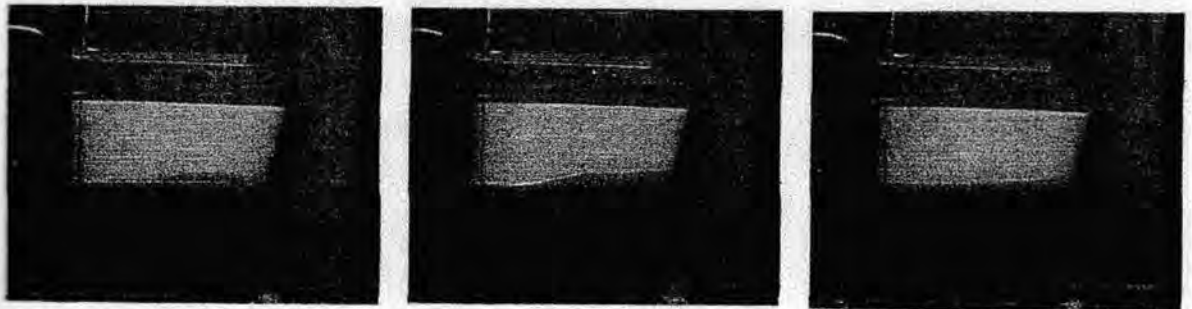
Gambar 5.20 Hasil eksperimen pada saat 4,5 – 5,5 detik untuk $h_s = 20$ cm



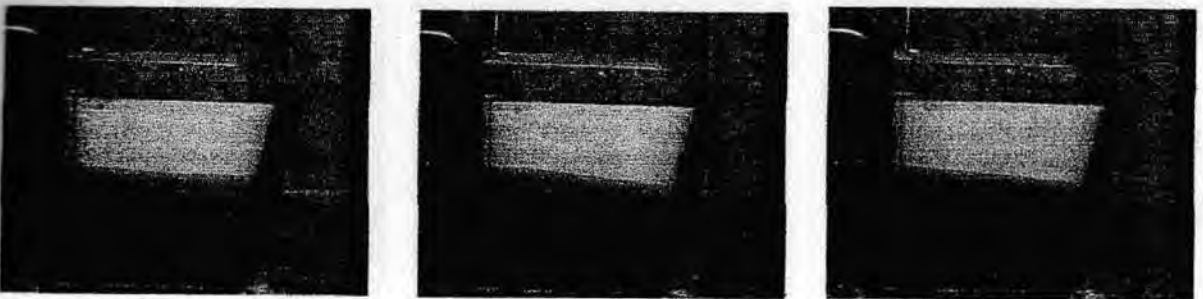
Gambar 5.21 Hasil eksperimen pada saat 0 – 1 detik untuk $h_s = 16$ cm



Gambar 5.22 Hasil eksperimen pada saat 1,5 – 2,5 detik untuk $h_s = 16$ cm



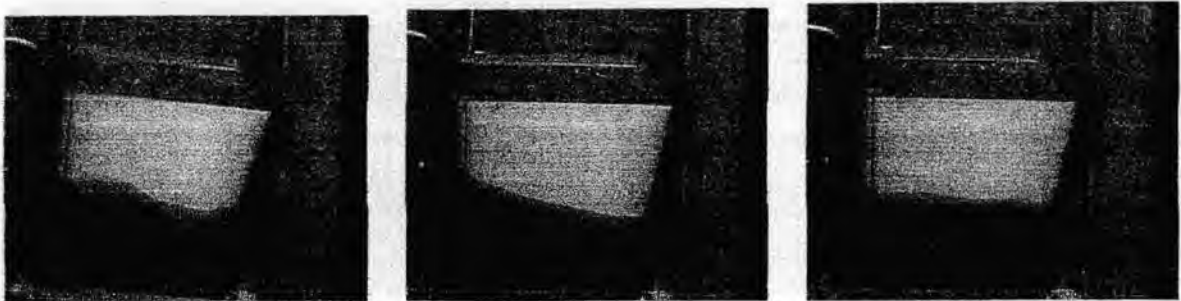
Gambar 5.23 Hasil eksperimen pada saat 3 – 4 detik untuk $h_s = 16$ cm



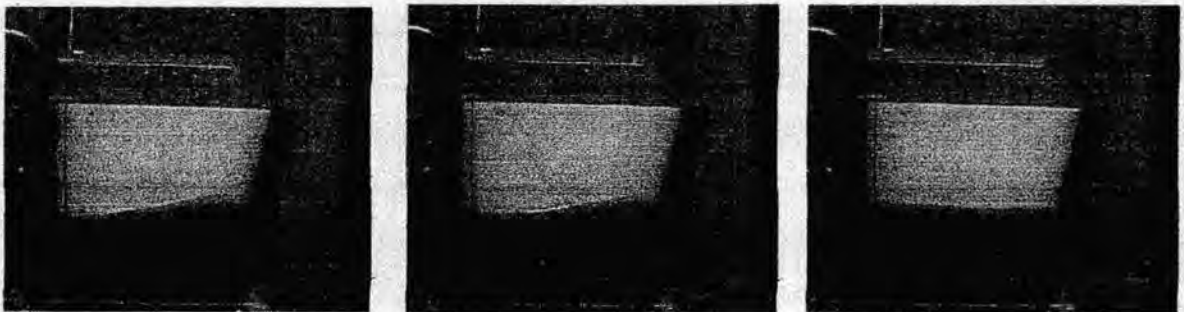
Gambar 5.24 Hasil eksperimen pada saat 4,5 – 5,5 detik untuk $h_s = 16$ cm



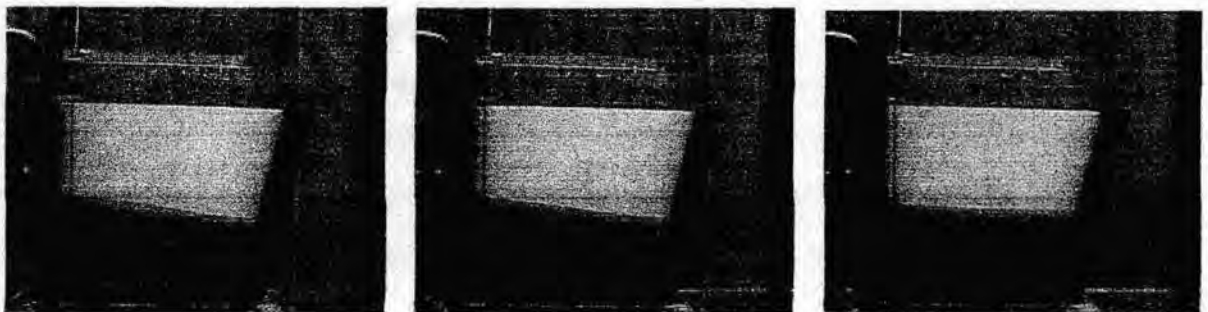
Gambar 5.25 Hasil eksperimen pada saat 0 – 1 detik untuk $h_s = 9,5$ cm



Gambar 5.26 Hasil eksperimen pada saat 1,5 – 2,5 detik untuk $h_s = 9,5$ cm



Gambar 5.27 Hasil eksperimen pada saat 3 – 4 detik untuk $h_s = 9,5$ cm



Gambar 5.28 Hasil eksperimen pada saat 4,5 – 5,5 detik untuk $h_s = 9,5$ cm

5.2 Pembahasan

Data penelitian di atas menggunakan parameter simulasi seperti yang ditunjukkan pada Tabel 5.1 sebagai berikut:

Tabel 5.1 Parameter percobaan pada Simulasi Komputer

Percobaan	Parameter	Dimensi
Percobaan I	Sudut Putar Mundur	47°
	Kecepatan Putar	31,3°/det
	Tinggi Air dlm. tungku	20 [cm]
Percobaan II	Sudut Putar Mundur	46°
	Kecepatan Putar	30,67°/det
	Tinggi Air dlm. tungku	16 [cm]
Percobaan III	Sudut Putar Mundur	47°
	Kecepatan Putar	31,3°/det
	Tinggi Air dlm. tungku	9,5 [cm]
Percobaan IV	Sudut Putar Mundur	37°
	Kecepatan Putar	74°/det
	Tinggi Air dlm. tungku	20 [cm]

Apabila kita memperhatikan bentuk gelombang permukaan zat cair yang dihasilkan dan dihubungkan dengan parameter yang diberikan maka dapat ditunjukkan bahwa untuk percobaan pertama sampai ke tiga dengan sudut putar mundur dan kecepatan putar yang relatif hampir sama yaitu berturut-turut 31,3°/det dan 47°/det, bila ketinggian air dalam tungku semakin rendah, maka amplitudo gelombang permukaan yang timbul akan semakin rendah. Sedangkan pada percobaan IV dengan parameter tinggi air 20 cm dan kecepatan 74 °/det tinggi gelombang permukaan lebih besar jika dibandingkan dengan ke tiga percobaan sebelumnya. Hal ini diakibatkan oleh massa zat cair yang semakin besar dan kecepatan putar balik semakin tinggi. Hal ini pun terjadi dikarenakan pengereman dilakukan lebih cepat.

Dari semua hasil percobaan secara simulasi komputer di atas menunjukkan bahwa gelombang permukaan muncul ketika tungku diputar mundur hal ini tentu akan mempengaruhi proses penuangan berikutnya. Hal ini dapat dilihat juga pada hasil simulasi secara visual untuk percobaan satu sampai tiga dengan menggunakan program FLOW-3D yang menggunakan metoda SOLA-MAC. Oleh karena itu perlu diupayakan proses pengendalian pada saat putar mundur tersebut agar supaya pada proses penuangan

selanjutnya tidak terjadi percikan pada lubang cetakan dan jatuh pada titik yang tepat sehingga akan mengurangi pemborosan bahan cetakan.

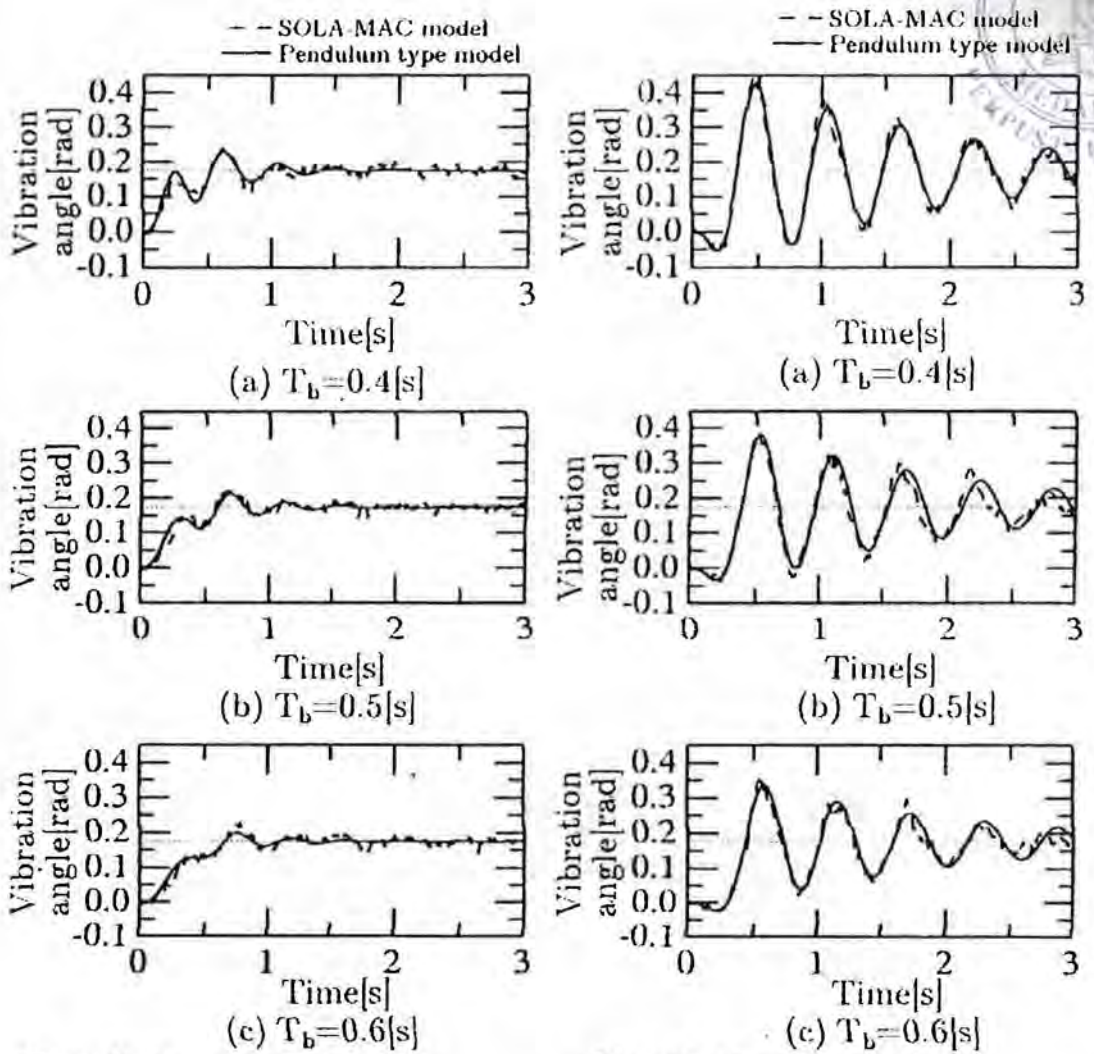
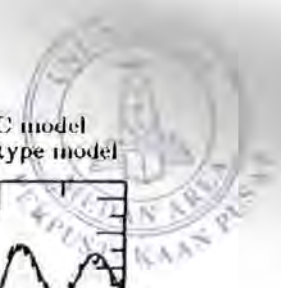
Penelitian ini merekomendasikan pengendali dengan cara menggunakan umpan balik dan tanpa menggunakan umpan balik. Namun untuk tahap ini terlebih dahulu dilakukan simulasi dan eksperimen dengan menggunakan pengendali tanpa umpan balik yaitu menggunakan metoda *pre-shaping* (*input shaping*) yaitu metoda pemberian gelombang yang sama namun dilakukan pergeseran fasa dan lalu dijumlahkan dengan gelombang tersebut setelah terlebih dahulu di-inversi-kan. Keunggulan metoda ini adalah sistem tidak memerlukan sensor sehingga apabila diterapkan pada eksperimen atau kasus yang sebenarnya maka akan mengurangi biaya percobaan dan akan mempermudah pengecekan ketika ada kesalahan.

Pada penelitian ini juga dilakukan percobaan dengan metoda lain yaitu dengan model SOLA-MAC (*Solution Algorithm Marker and Cells*) dan hasil yang diperoleh dibandingkan dengan model Pendulum yang ditunjukkan pada Gambar 5.29. Parameter yang digunakan pada simulasi ini adalah ditunjukkan pada Tabel 5.2 sebagai berikut

Tabel 5.2 Parameter simulasi dengan model SOLA-MAC

Percobaan	Parameter	Dimensi
Percobaan I	Waktu Pengamatan	3 det
	Waktu Putar Mundur Tb	0,4; 0,5; 0,6
	Sudut Inisialisasi	0,33 rad
	Tinggi Air dlm. tungku	12 [cm]
Percobaan II	Waktu Pengamatan	3 det
	Waktu Putar Mundur Tb	0,4; 0,5; 0,6
	Sudut Inisialisasi	0,87 rad
	Tinggi Air dlm. tungku	4 [cm]

Dari hasil yang diperoleh dapat dilihat bahwa kedua model yaitu model SOLA-MAC dan model Pendulum memiliki hasil simulasi yang hampir mendekati pada setiap percobaan. Hal ini bisa diperhatikan pada Gambar 5.29. Hasil inipun dapat menunjukkan bahwa dengan kecepatan putar balik semakin besar, diperoleh gelombang permukaan yang semakin besar. Hal ini sesuai dengan hasil percobaan sebelumnya yaitu dengan kecepatan putar balik yang semakin tinggi diperoleh gelombang permukaan semakin besar.



Simulation results
($h_s=0.12[m], \theta_{ini}=0.3333[rad]$)

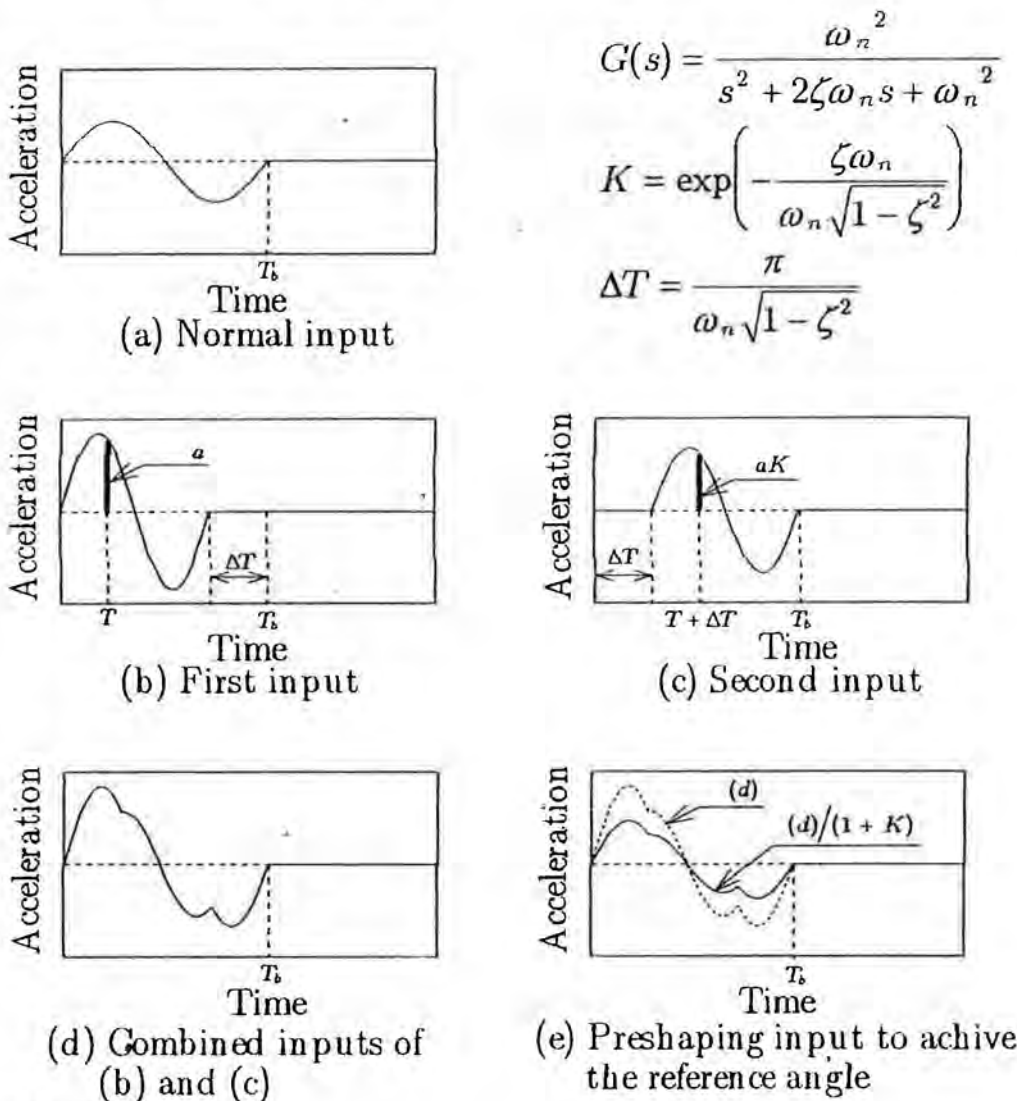
Simulation results
($h_s=0.04[m], \theta_{ini}=0.8742[rad]$)

Gambar 5.29 Perbandingan hasil simulasi antara model SOLA-MAC dan Pendulum

5.3 Pengendali (Controller)

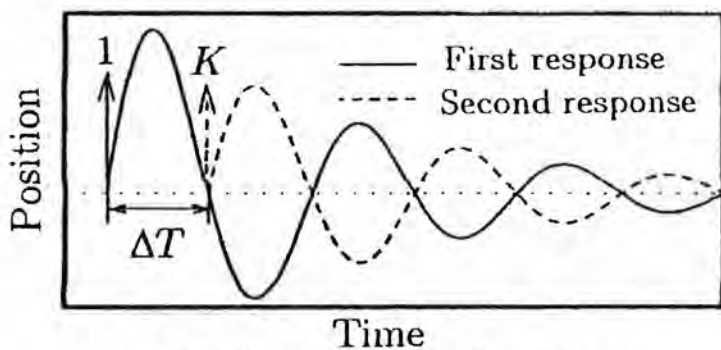
Pengendali yang digunakan pada penelitian tahap kedua ini adalah pengendali *Preshaping methods*. Metoda ini digunakan karena tidak memerlukan sensor sebagai umpan balik, sehingga dalam simulasi akan lebih mudah dilakukan dan dalam eksperimen atau percobaan dilaboratorium akan menghemat biaya dan sistem menjadi lebih sederhana. Namun dalam menggunakan metoda ini kita memerlukan penentuan pergeseran waktu gelombang yang tepat karena hal ini akan sangat berpengaruh kepada hasil pengendaliannya.

Secara teori model *Preshaping* ini ditunjukkan pada Gambar 5.30. Input normal, input pertama dan kedua ditunjukkan pada Gambar 5.30 tersebut. Sedangkan gabungan input pertama dan kedua ditunjukkan pada Gambar 5.30 (d). Dan Input *Preshaping* untuk memperoleh sudut referensi ditunjukkan pada Gambar 5.30 (e).

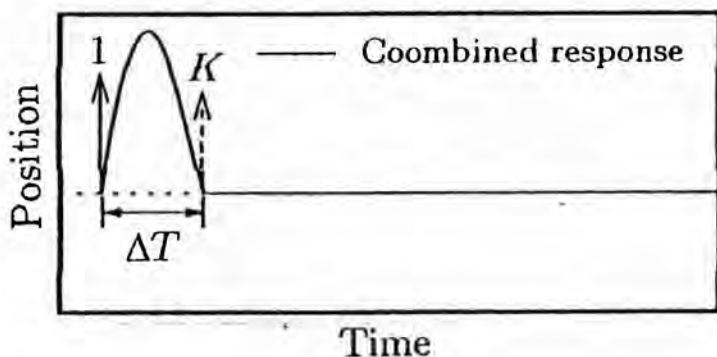


Gambar 5.30 Penerapan prinsip input *shaping* pada turunan input kendali kontinu berdasarkan kedua reduksi vibrasi dan kendali sudut putar tungku

Gambar 5.31 menunjukkan tentang proses mereduksi vibrasi. Gambar 5.31 (a) menunjukkan respon dan impuls masing-masing sedangkan 5.31 (b) menunjukkan kombinasi impuls dan respon.

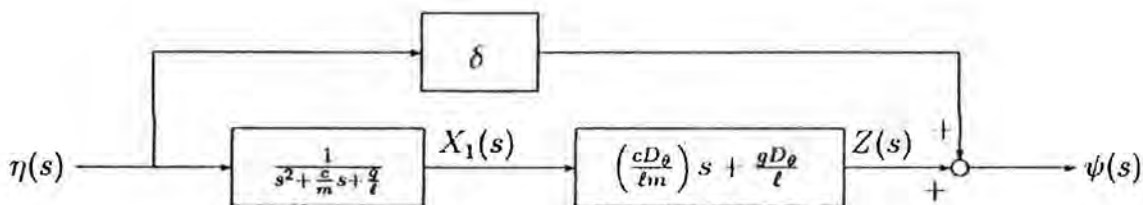


(a) Each impulse and response



(b) Combined impulse and response

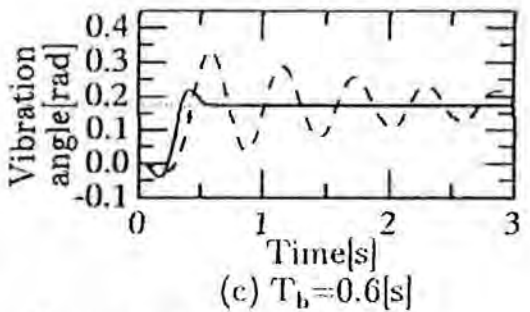
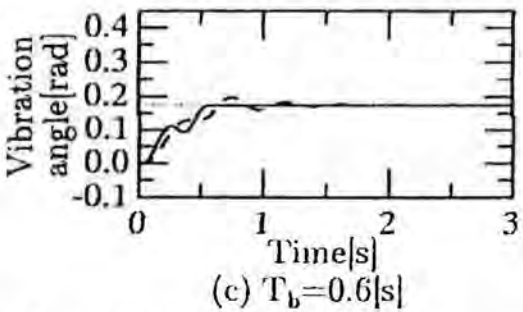
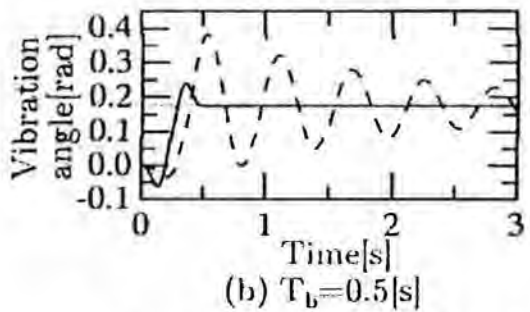
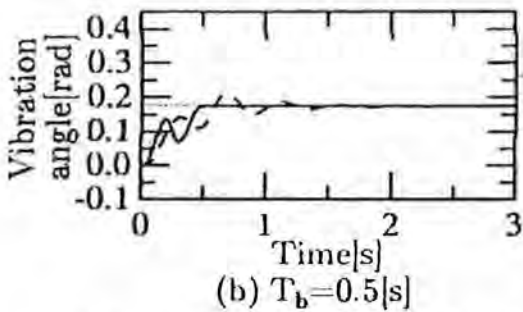
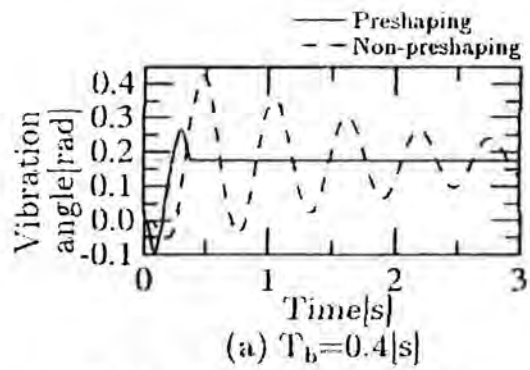
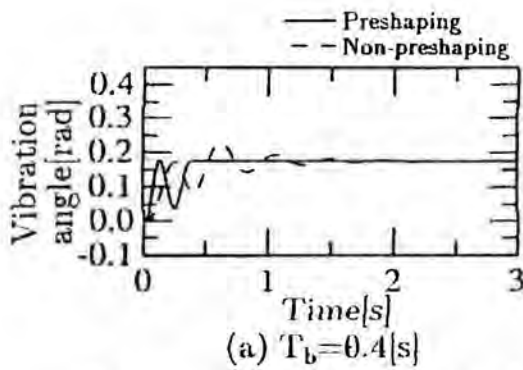
Gambar 5.31 Prinsip mereduksi vibrasi



Gambar 5.32 Sistem kendali fungsi transfer model tipe pendulum

Gambar 5.32 menunjukkan sistem kendali fungsi transfer model pendulum yang digunakan. Model ini menjadi acuan didalam merancang program pengendali yang digunakan dari model yang dirancang sebelumnya dengan memasukkan input preshaping.

Hasil simulasi tersebut dapat dilihat pada Gambar 5.33 berikut. Gambar 5.33 tersebut menunjukkan perbandingan hasil simulasi antara percobaan dengan menggunakan Preshaping dan tanpa menggunakan Preshaping. Pengamatan dilakukan pada saat $T_b = 0,4; 0,5; \text{ dan } 0,6$ detik untuk ketinggian air $h_s = 12 \text{ cm}$ dan 4 cm .



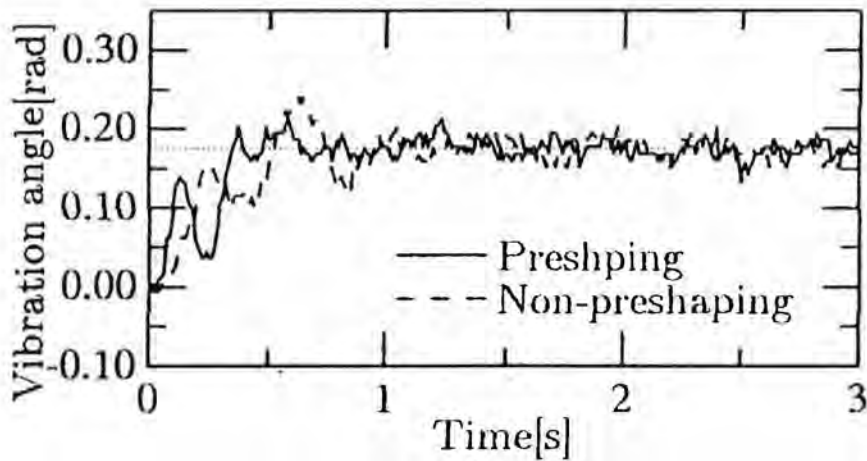
Simulation results
 $(h_s=0.12[m], \theta_{ini}=0.3333[rad])$

Simulation results
 $(h_s=0.04[m], \theta_{ini}=0.8742[rad])$

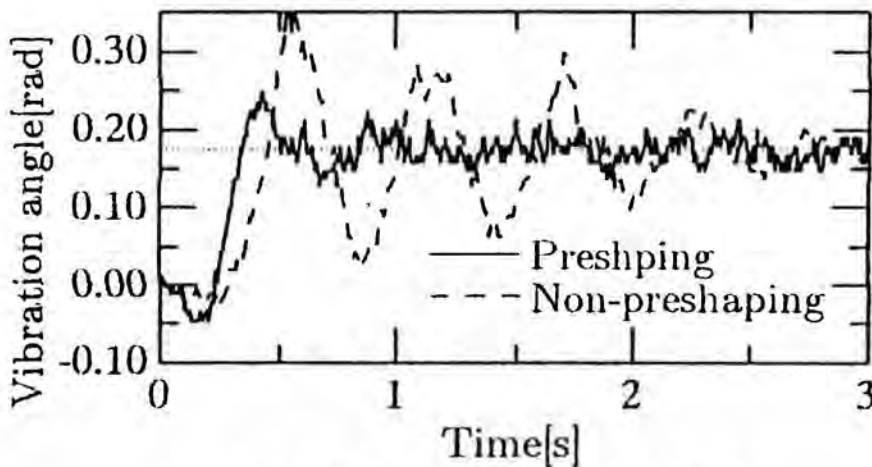
Gambar 5.33 Hasil simulasi kendali komputer menggunakan model tipe pendulum dengan masukan shaping

Dari Gambar 5.33 di atas dapat dilihat bahwa gelombang permukaan ketika putar balik dapat diredam hampir mencapai 90% dengan waktu yang sangat singkat. Hal ini menunjukkan bahwa hasil simulasi dengan menggunakan input shaping dapat membuktikan bahwa input shaping dapat menghilangkan gelombang permukaan dengan baik. Sehingga hal ini dapat digunakan pada eksperimen.

Gambar 5.34 menunjukkan hasil eksperimen untuk kondisi $h_s = 12$ cm dan $T_b = 0.4$ detik serta $h_s = 4$ cm dan $T_b = 0.6$ detik.



(a) $h_s=0.12$ [m], $T_b=0.4$ [s]

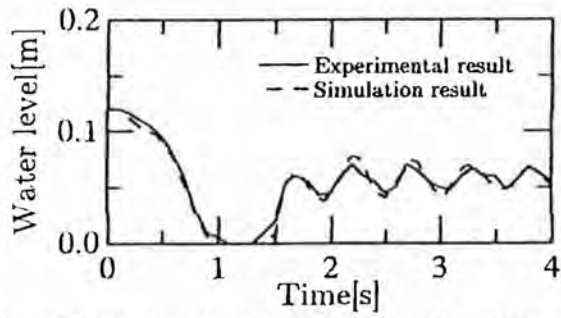


(b) $h_s=0.04$ [m], $T_b=0.6$ [s]

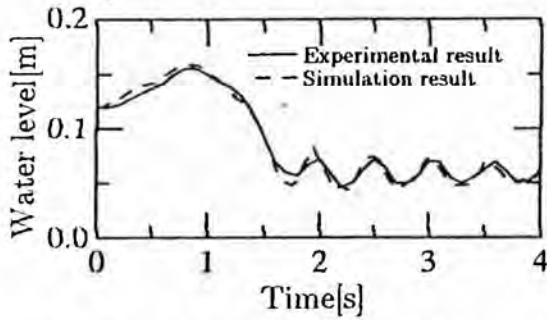
Gambar 5.34 Perbandingan Hasil Percobaan Antara Menggunakan Preshaping dan Tanpa Preshaping

Dari hasil eksperimen yang ditunjukkan pada Gambar 5.34 dapat membuktikan bahwa input *shaping* dapat meredam gelombang permukaan ketika putar balik dengan cepat.

Gambar 5.35 menunjukkan hasil pengamatan eksperimen dan hasil simulasi tanpa input *shaping* di bagian kiri dan kanan tanki untuk ketinggian air h_s 12 cm.

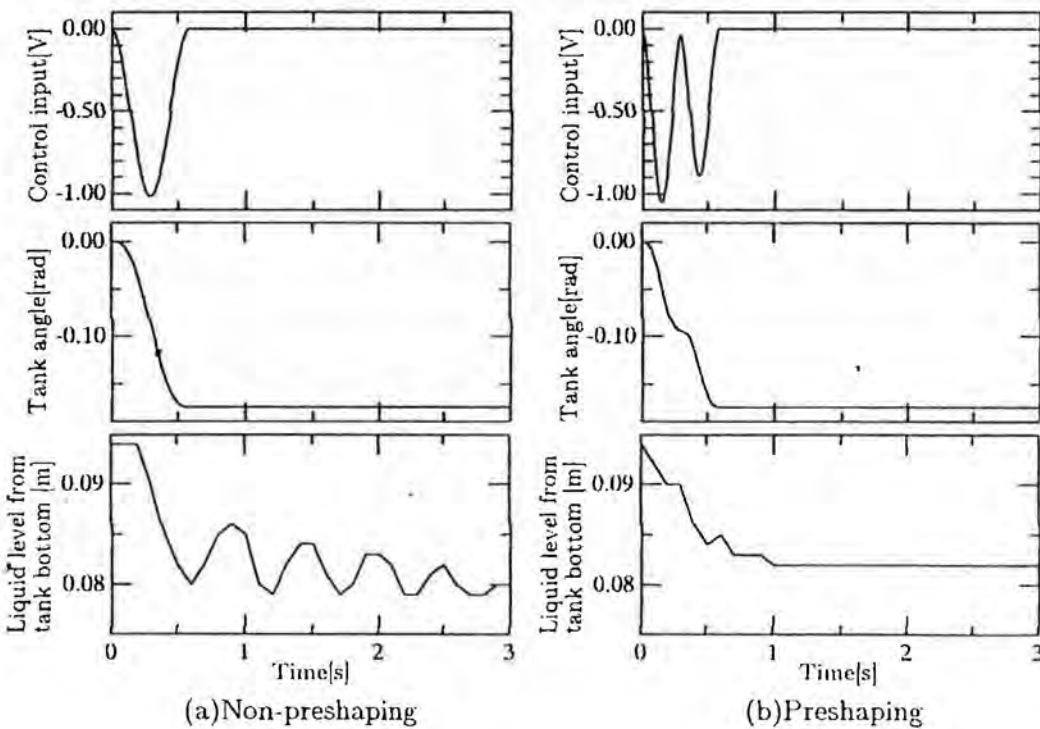


(a) Water level at left position(a) of tank



(b) Water level at right position(b) of tank

Gambar 5.35 Perbandingan Hasil Simulasi dengan Hasil Eksperimen Tanpa *Preshaping*



(a) Non-preshaping

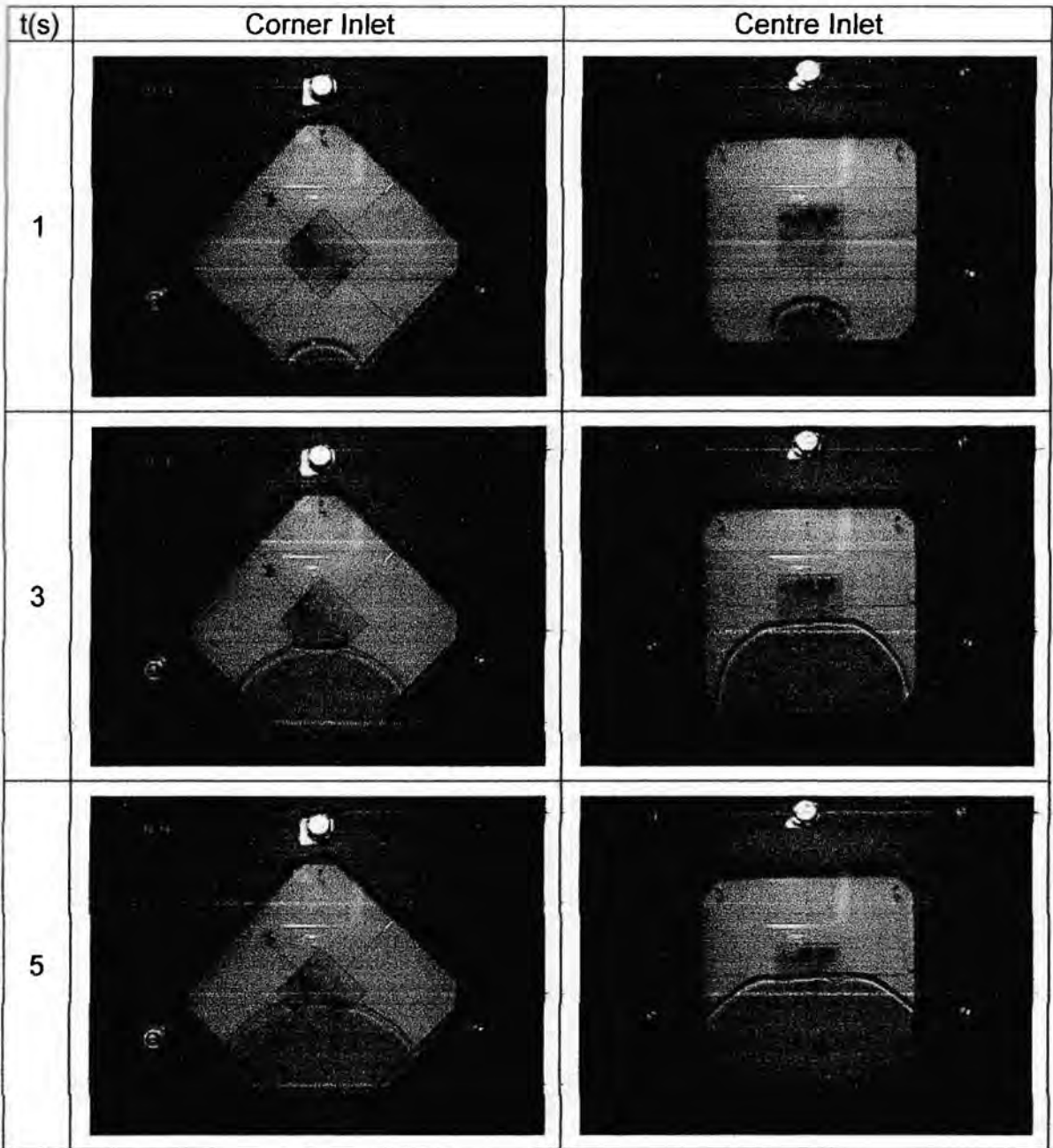
(b) Preshaping

Gambar 5.36 Perbandingan Hasil Eksperimen Antara Tanpa *Preshaping* dan dengan *Preshaping*

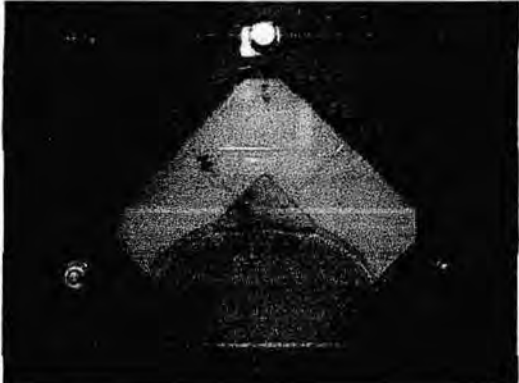





Gambar 5.36 menunjukkan secara lengkap perbandingan hasil percobaan atau eksperimen antara tanpa preshaping dan dengan preshaping. Gambar 5.36 tersebut menunjukkan juga tentang kendali input dalam besaran tegangan listrik DC, kemudian sudut putar tanki dalam satuan radial dan bentuk gelombang permukaan air atau likuid dalam meter. Hasil kendali tersebut dapat dilihat bahwa nampak sangat berbeda antara bentuk gelombang permukaan tanpa preshaping dan dengan preshaping. Di mana dengan menggunakan preshaping gelombang permukaan air pada saat putar alik tidak terlihat lagi pada saat setelah satu detik.

5.4 Penggunaan pada cetakan kecil

Berikut adalah hasil dari eksperimen berupa penuang fluida cair ke dalam cetakan yang berukuran kecil (100 mm x 100 mm x 1 mm) untuk arah input yang berbeda yaitu input dari arah sudut dan input dari arah tengah. Banyaknya volume yang masuk dapat diatur sesuai dengan volume fluida yang dituang oleh bagian baskom atau ladle. Waktu yang diperlukan untuk menuang fluida ke dalam cetakan sama untuk ke dua kasus tersebut. Mesin penuang cetakan ini dapat digunakan untuk banyak jenis cetakan yang berbeda sesuai dengan keperluan namun perlu disesuaikan dengan volume yang tersedia di dalam baskom atau ladle. Gambar 5.37 menunjukkan hasil eksperimen proses transfer fluida pada cetakan kecil yang berbeda arah input untuk waktu 1 detik samapi 5 detik dan Gambar 5.38 menunjukkan hasil eksperimen proses transfer fluida pada cetakan kecil yang berbeda arah input untuk waktu 7 detik samapi 11 detik.



Gambar 5.37 Hasil eksperimen proses transfer fluida pada cetakan kecil yang berbeda arah input untuk waktu 1 detik samapi 5 detik.

T(s)	Corner Inlet	Centre Inlet
7		
9		
11		

Gambar 5.38 Hasil eksperimen proses transfer fluida pada cetakan kecil yang berbeda arah input untuk waktu 7 detik samapi 11 detik.

Bab 6

Kesimpulan dan Saran

6.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian awal di atas dapat diambil beberapa kesimpulan, diantaranya adalah :

1. Telah ditunjukkan hasil simulasi komputer dan eksperimen mengenai perilaku fluida pada tungku yang berputar balik (mundur) pada proses pengecoran model tilting.
2. Pada proses tanpa pengendali terlihat bahwa gelombang permukaan fluida semakin besar jika ketinggian fluida bertambah.
3. Identifikasi bentuk gelombang permukaan telah dilakukan dengan menggunakan metoda SOLA-MAC dan model pendulum dengan hasil yang signifikan.
4. Pengendali Preshaping yang digunakan dapat menghilangkan atau mengurangi gelombang permukaan fluida pada saat putar balik.
5. Hasil simulasi antara tanpa dan dengan pengendali telah dibandingkan dengan variasi sudut putar dan ketinggian fluida dengan hasil yang signifikan.

6.2 Saran

Hasil penelitian ini masih dapat dikembangkan diantaranya dengan melakukan lebih banyak variasi variabel yang digunakan, misalnya dengan merubah bentuk dan ukuran tanki (ladle) serta ketinggian fluida dalam ladle. Kecepatan putar maju dan mundurpun dapat diganti dengan nilai yang berbeda sehingga mendekati dengan kasus yang sebenarnya.

Pengendali yang digunakan dapat diganti dengan pengendali lain seperti PID atau Robush Controller sehingga diperoleh hasil yang lebih baik.

Daftar Pustaka

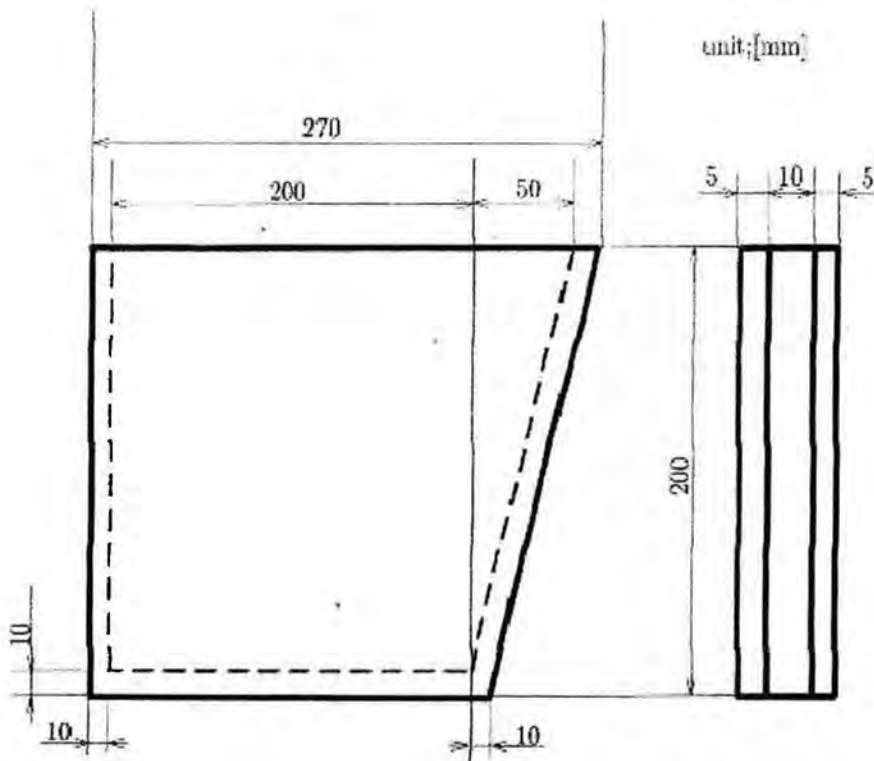
1. E. Tabatabaei (1998), Automatic Pouring of Molten Metal by Utilizing Real Time Vision Based Control System, AFS Transaction, pp 641-644
2. Kazuhiko Terashima, Dadan Ramdan, Ken'ichi Yano, Takahiro Toda (2000), Modeling and Simulation of Fluid Flow in Ladle and Mold of Tilting-type Pouring in Casting Process, Paper, FLUCOME 2000, Sherbrooke, Canada, Vol.18, No. 5 pp. 728-736
3. Kazuhiko Terashima, Ken'ichi Yano (2001), Sloshing Analysis and Suppression Control of Tilting-type Automatic Pouring Machine, Control Engineering Prctice 9, pp 607-620
4. Kazuhiko Terashima, Ken'ichi Yano (1999), Sloshing Suppression Control of Tilting-Type Automatic Pouring Machine, IFAC World Congress, Beijing, vol O pp 25-30
5. Kazuhiko Terashima and Tomochika Inagaki (1997), Feedforward and Feedback Control on Liquid Vibration and Rotary Angle in Tilting Motion of Automatic Pouring, Proc. Of 2nd Asian Control Conference, Soul (Korea), pp 375-378
6. K. Terashima, K. Yano, Y. Sugimoto (2005), Modeling and Robust Control of Liquid Level in a Sprue Cup for Batch-type Casting Pouring Processes, ISIJ Int. vol. 45 pp. 1165 - 1172
7. Michael F. Burditt, Paul M. Bralower (1989), Good Pouring Practice Contributor to Quality Castings, Modern Casting, pp 59-63
8. Ugay Sugarmansyah, Dharmawan, Hartaya, Ruki Savianto, Irawan Santoso (2003), Analisis Difusi Inovasi Teknologi Pengecoran Logam di Industri Kecil dan Menengah Klaten-Ceper (Tinjauan dari Aspek Kebijakan), Prosiding Seminar Teknologi untuk Negeri, Volume V, hal. 130-139
9. W. Lindsay (1983), Automatic Pouring and Metal Distribution Systems, Foundry Trade Journal, pp 151-165
10. Y.Noda, K. Yano, K. Terashima (2003), Detection and Tracking Control to Unknown Moving Object Considering Sloshing-Suppression in Pouring Robot, Proceeding Intelligent Systems and Control vol. 388

11. N. C. Singer, W. P. Seering (1990) Preshaping Command Inputs to Reduce System Vibration, Transaction of the ASME, Vol. 12 pp 76-82



Lampiran :

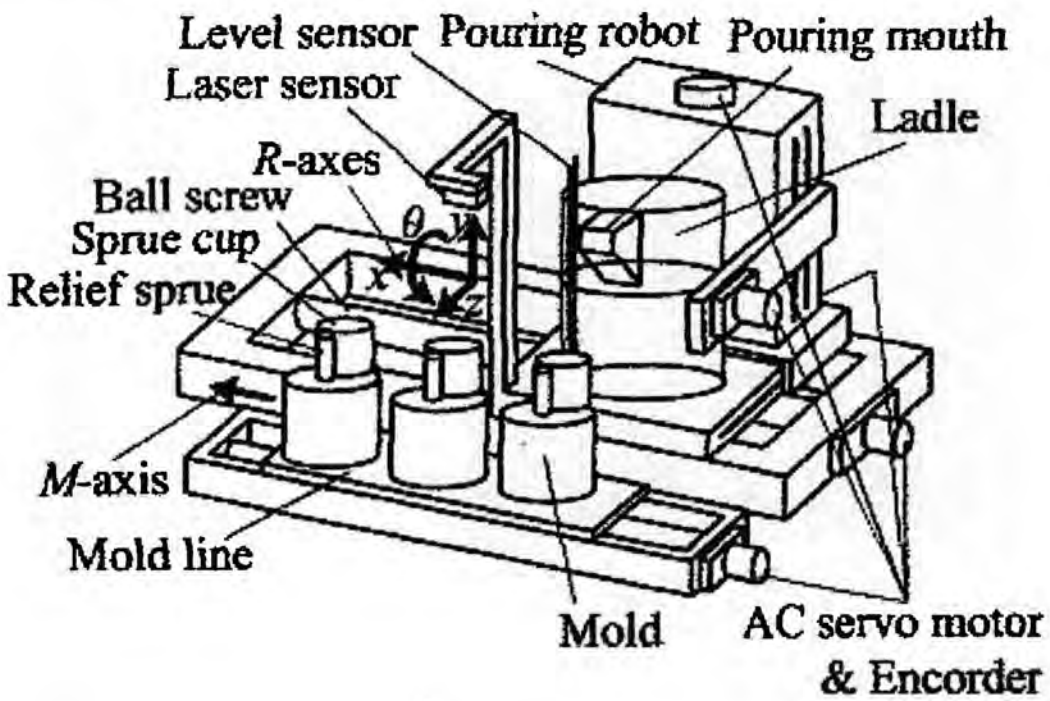
Ukuran Ladle yang Dibuat



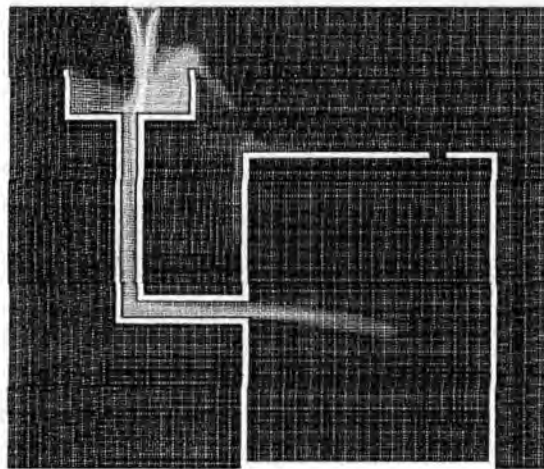
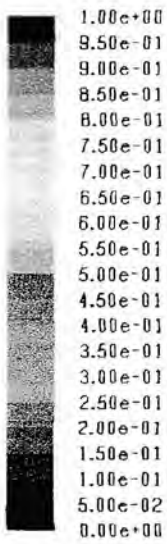
Spesifikasi Alat Eksperimen yang Digunakan

D.C. Servo motor	maker	: SANYO DENKI CO.LTD
	model	: L511tg2-012
	rated output	: 110W
	rated torque	: 3.5kg·cm
	max. tuening velocity	: 500rpm
	gear ratio	: 1/30
Driver unit	maker	: SANYO DENKI CO.LTD
	model	: PTD-A03-A0
	rated current	: max. 2.1A
Encoder	maker	: OMRON CO.LTD
	model	: E6C-CWZ5C
	resolution	: 720(P/R) × 4
	cillent consumption	: max. 50mA
A/D,D/A converter	maker	: CONTEC CO.LTD
	model	: ADA12-8/2(98) A/D(12bit,8 channel) D/A(2 channel)
Counter bord	maker	: CONTEC CO.LTD
	model	: CNT24-4A(98)
I/O expansion unit	maker	: ADDTECH
	model	: APE-501
Computer	maker	: IBM
	model	: Endeavor
	CPU	: Pentium III 500MHz

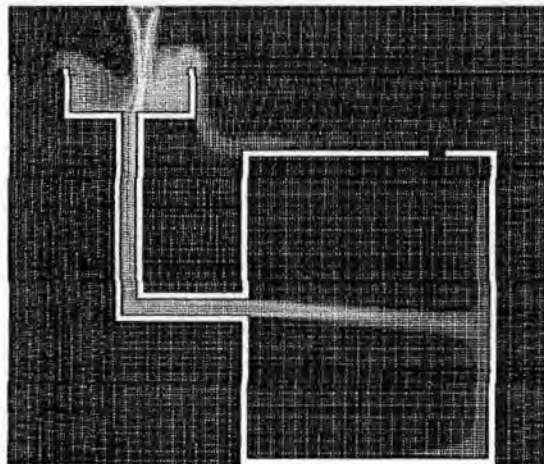
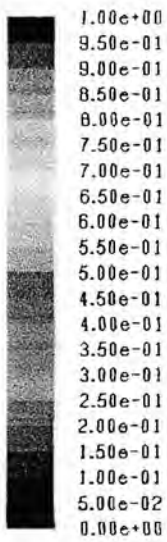
Gambar alat eksperimen yang akan dibuat



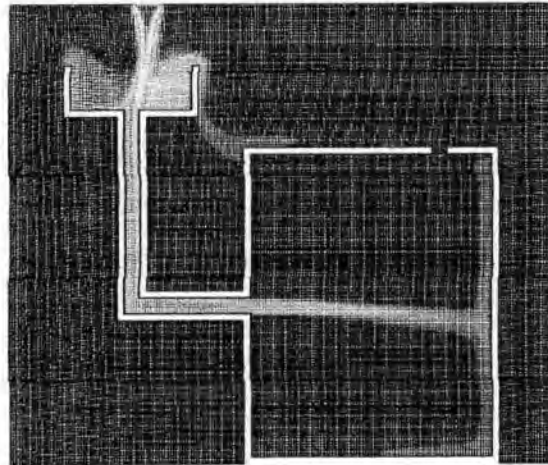
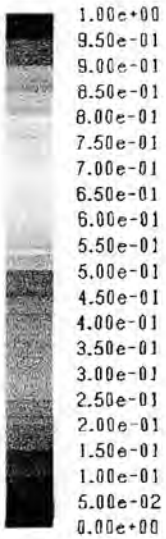
Hasil simulasi menggunakan FLUENT Software
(Bagian Cetakan)



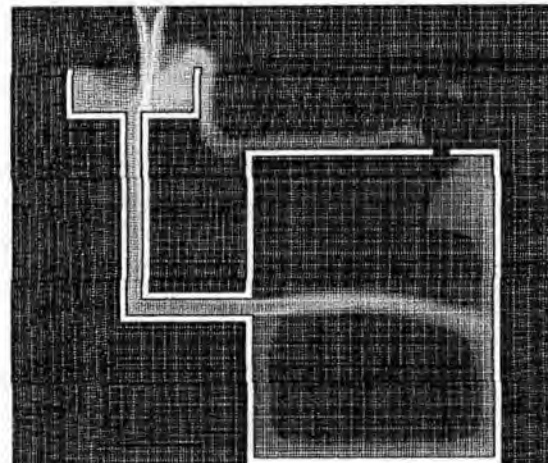
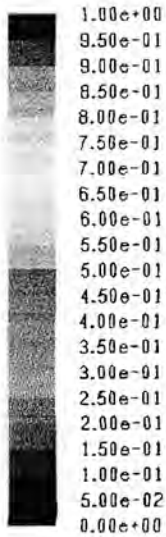
$t = 2s$



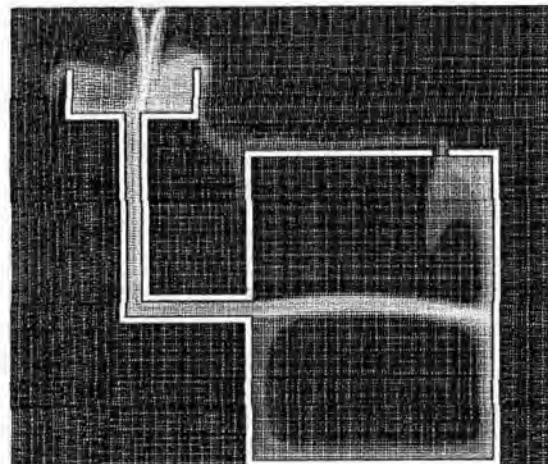
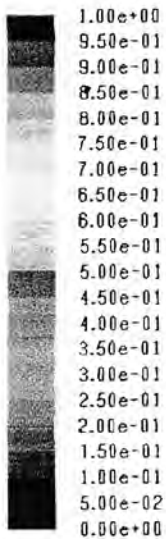
$t = 2.5s$



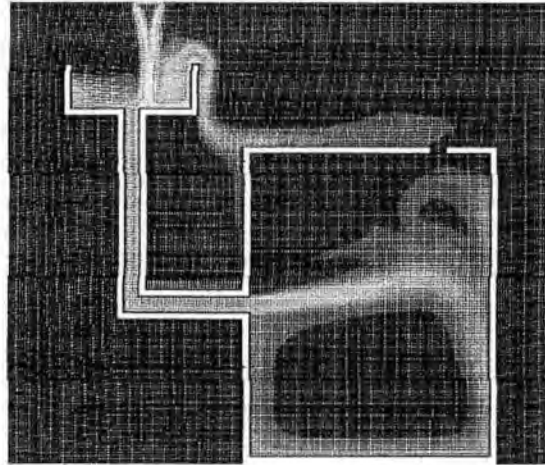
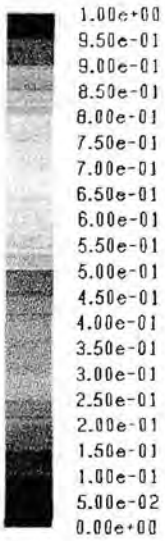
t = 3s



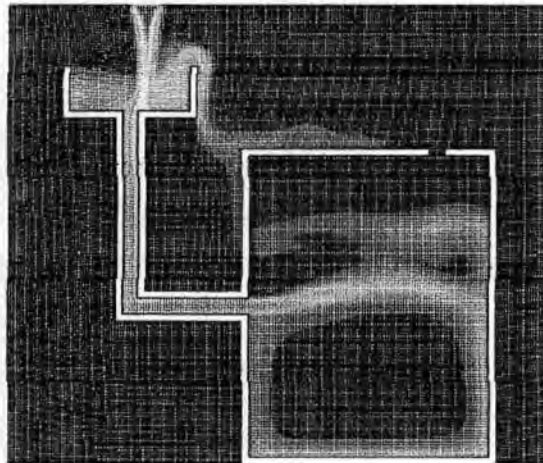
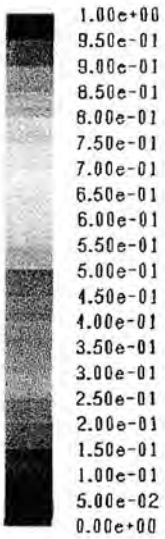
t = 3.5s



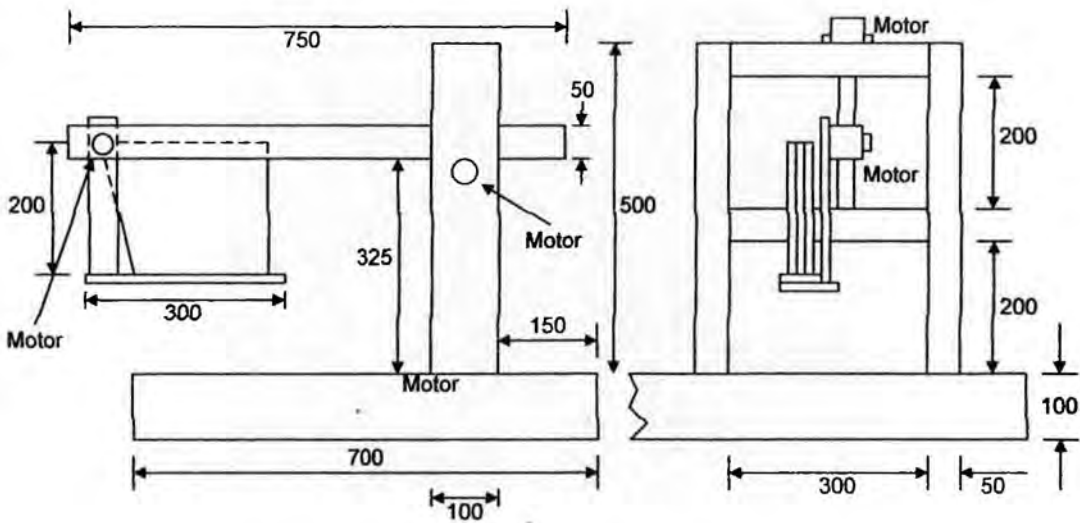
t = 4s



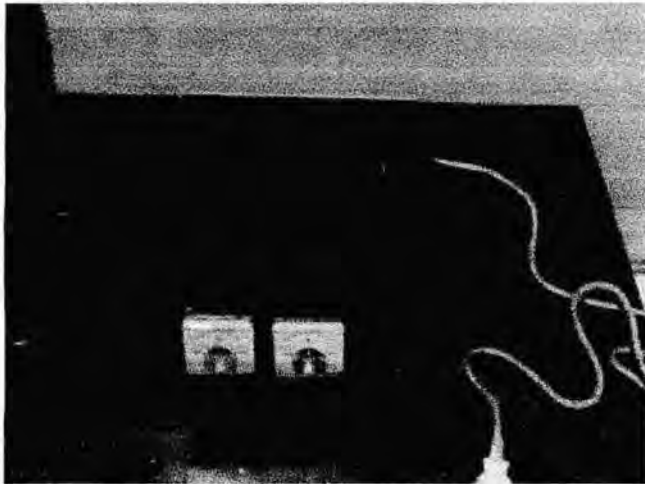
$t = 4.5s$



$t = 5s$



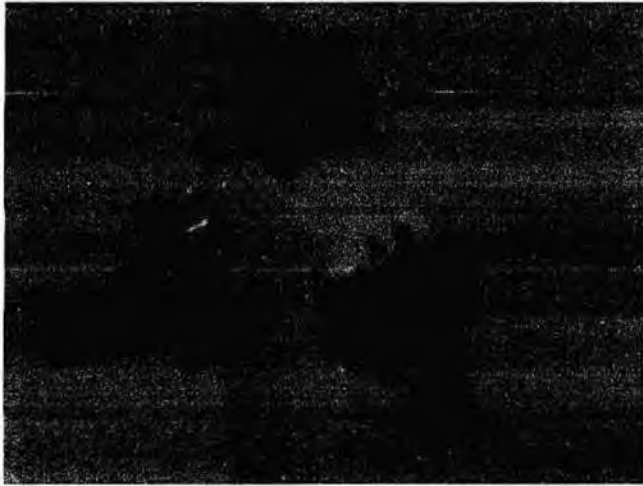
Prototip Mesin Pengecoran Logam Otomatis



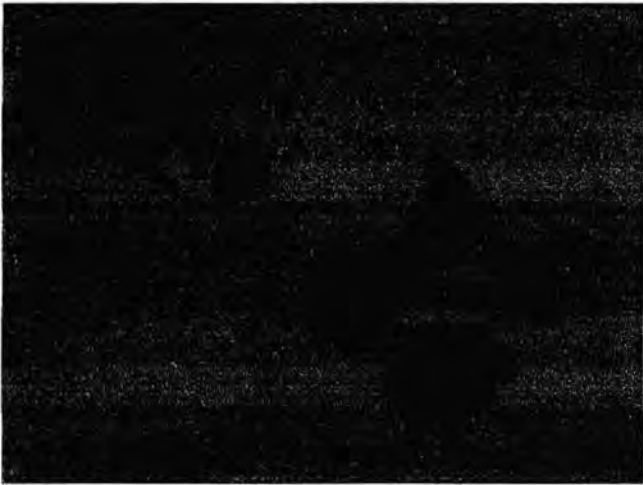
Power Supply 10A DC



PWM pengendali kecepatan putar motor



Rotary Encoder



Komponen Rotary Encoder



Motor Penggerak

DRAF USULAN PATEN

DRAFT
USULAN PATEN

**MODEL DAN KENDALI GELOMBANG PERMUKAAN LIQUID SAAT PUTAR BALIK DENGAN
MENGATUR POSISI TITIK PUTAR DAN KECEPATAN PUTAR TUNGKU PADA PROSES
PENGECORAN**

OLEH:

IR. H. USMAN HARAHAP, MT.

DRS. DADAN RAMDAN, MENG., MSC.

IR. DARIANTO, MSC.

UNIVERSITAS MEDAN AREA

MEDAN

OKTOBER 2012

Deskripsi**MODEL DAN KENDALI GELOMBANG PERMUKAAN LIQUID SAAT PUTAR BALIK
DENGAN MENGATUR POSISI TITIK PUTAR DAN KECEPATAN PUTAR TUNGKU
PADA PROSES PENGECORAN****5 Bidang Teknik Invensi**

Invensi ini berhubungan dengan suatu sistem proses pengecoran logam cair yang menggunakan pengendali posisi titik putar dan kecepatan putar tungku guna menambah akurasi atau ketepatan posisi titik jatuh logam cair pada lubang mulut cetakan untuk meningkatkan kualitas hasil cetakan yang berulang.

Latar belakang Invensi

Hal utama yang perlu diperhatikan pada proses pengecoran dengan teknologi inovasi tinggi atau otomatis adalah: 1) Mampu menuangkan logam cair ke dalam cetakan dengan posisi yang tepat pada lubang mulut cetakan; 2) Mampu menuangkan logam cair sampai level ketinggian yang tepat tanpa ada logam cair yang tumpah atau tanpa terjadi percikan, karena bila hal ini terjadi maka akan ada pemborosan bahan dan berbahaya bagi operatornya; 3) Mampu menentukan volume logam cair yang masuk ke cetakan dengan tepat; 4) Mampu menggunakan waktu proses yang diperlukan selama proses penuangan pertama dan proses penuangan berikutnya sesingkat mungkin, sebab hal ini akan dipengaruhi oleh temperatur dari logam cair yang digunakan.

Prinsip kerja dari sistem proses pengecoran logam cair yang berulang adalah sebagai berikut; Tungku (*ladle*) berputar ke depan dengan sudut tertentu sehingga logam cair tumpah keluar melalui mulut tungku dengan debit logam cair tertentu dan sampai ke lubang mulut cetakan (*mold*) hingga cetakan penuh atau sesuai dengan volume tertentu. Apabila logam cair sudah mengisi penuh pada cetakan atau sesuai dengan yang diinginkan, maka tungku berputar ke belakang atau putar balik. Pada saat tungku berputar ke belakang, cetakan yang sudah terisi bergeser dan posisinya digantikan oleh cetakan yang masih kosong. Kemudian tungku kembali berputar ke depan untuk mengisi cetakan baru yang masih kosong hingga penuh dan tungku melakukan putar balik lagi serta cetakan yang sudah terisi penuh bergeser dan posisinya digantikan oleh cetakan yang masih kosong berikutnya. Demikian

seterusnya sampai seluruh cetakan terisi semua.

Semua gerak yang terjadi pada sistem di atas baik rotasi (gerak tungku) maupun translasi (gerak cetakan) dilakukan oleh motor penggerak atau aktuator yang dipasang sesuai dengan posisi dan kebutuhan teknis. Sedangkan untuk mengatur pergantian gerak tungku dan cetakan menggunakan beberapa sensor diantaranya encoder, sensor ketinggian logam cair dan sensor batas yang kerjanya diatur oleh suatu program pengendali. Encoder berfungsi untuk menghitung besar sudut putar, sensor ketinggian logam cair berfungsi untuk mengukur tinggi logam cair yang ada di mulut cetakan dan yang ada pada tungku. Sedangkan sensor batas berfungsi untuk memutuskan arus motor gerak translasi dan menjadi input agar supaya tungku mulai bergerak berputar ke depan. Berdasarkan keluaran sensor-sensor tersebut maka sistem berjalan sesuai dengan yang diinginkan. Informasi dari sensor volume dan atau sensor ketinggian logam cair pada cetakan dikirim juga ke pengatur sehingga motor yang menggerakkan tungku berhenti berputar dan melakukan putar balik ketika logam cair sudah mengisi penuh cetakan. Tungku akan melakukan gerakan berputar ke depan setelah pengendali menerima masukan dari sensor pembatas yang tersentuh oleh cetakan yang baru berhenti karena suplai arus ke motor terputus. Pengendali yang digunakan untuk mengatur proses di atas atau mengatur gerak semua motor yang ada hanya berdasarkan masukan dari semua sensor yang dipakai sehingga bekerja sesuai dengan yang diinginkan. Hasil dari sistem tersebut di atas belum maksimum karena sering terjadi hal-hal yang tidak diinginkan seperti adanya vibrasi atau gelombang permukaan logam cair yang ada pada tungku ketika berhenti setelah putar balik hal ini akan mengakibatkan adanya logam cair yang tumpah apabila melakukan penuangan berikutnya pada cetakan karena posisi titik jatuh logam cair tidak tepat seluruhnya di lubang mulut cetakan. Hal ini tentunya akan merugikan pada nilai kompetisi ekonomis hasil cetakan.

Ringkasan Invensi

Invensi yang diusulkan ini pada prinsipnya adalah memaksimalkan proses kerja sistem pengecoran logam cair untuk memperoleh kualitas hasil cetakan yang juga maksimal. Dan pada akhirnya dapat meningkatkan jumlah hasil produksi tanpa harus menambah biaya produksi. Atau dengan kata lain, model dan

kendali yang diinvensikan ini secara tidak langsung adalah merupakan upaya dalam penghematan biaya produksi akibat adanya logam cair yang terbuang. Konsep invensi **model dan kendali sistem pengecoran logam** ini adalah mengatur kecepatan putar maju dan mundur sekaligus mengatur posisi titik putar tungku guna menurunkan atau menghilangkan gelombang permukaan logam cair pada tungku akibat gaya sentripetal karena putar balik yang selama ini sering terjadi di industri pengecoran logam.

Suatu metode pengurangan gelombang permukaan adalah dengan mengatur kecepatan putar balik tungku berdasarkan perilaku gelombang tersebut yakni dengan mengkonversikan hasil penjumlahan fungsi gelombang permukaan awal dengan fungsi gelombang yang sama setelah dilakukan pergeseran (*shift*) dan balik (*inverse*) ke bentuk besar daya input motor yang bertujuan untuk menghilangkan gelombang permukaan tersebut. Selain hal tersebut di atas dilakukan juga pengaturan posisi titik putar tungku ke arah vertikal (ke atas dan ke bawah) dan horizontal (ke depan dan ke belakang) yang bertujuan untuk meningkatkan ketepatan (akurasi) titik jatuh logam cair ke lubang mulut cetakan.

Uraian Singkat Gambar

Untuk memudahkan pemahaman mengenai inti invensi ini, selanjutnya akan diuraikan perwujudan invensi melalui gambar-gambar terlampir.

Gambar 1, adalah model gelombang permukaan tipe pendulum untuk tungku (*ladle*) berputar ke belakang (*backward-tilting*) sesuai dengan invensi ini.

Gambar 2, adalah tampak tiga dimensi dari ilustrasi model alat sistem pengecoran otomatis sesuai dengan invensi ini.

Uraian Lengkap Invensi

Sebagaimana telah dikemukakan pada latar belakang invensi bahwa gelombang permukaan logam cair merupakan produk dari suatu proses pengecoran yang berulang saat beroperasi pada putaran dan kondisi tertentu. Peningkatan kecepatan putar balik maka gelombang permukaan logam cair akan bertambah, begitu juga dengan jumlah volume yang tinggi pada tungku akan mengakibatkan gelombang permukaan yang tinggi juga. Menghilangkan gelombang

permukaan sering dilakukan dengan menurunkan kecepatan putar tungku dan mengurangi volume logam cair pada tungku sehingga hal ini tentunya mempunyai konsekuensi teknis yang diperoleh, yaitu jumlah produksi menjadi menurun.

5 Mengacu pada Gambar 1, yang memperlihatkan suatu model gelombang permukaan tipe pendulum untuk tungku (*ladle*) berputar ke belakang (*backward-tilting*) sesuai dengan invensi ini. Model seperti invensi yang diusulkan adalah model tipe pendulum yang dapat diturunkan dari kesetimbangan momen pada sekitar titik pusat perputaran tungku. Dari model matematik yang diperoleh
10 dapat diturunkan fungsi transfer sistem.

Model matematik yang diperoleh disubstitusikan dengan persamaan gerak motor (sistem motor) yang digunakan untuk memutar tungku, kemudian dilakukan pemeriksaan kekontrolan (*controllable*) dan keteramatan (*observable*) dari matrik ruang
15 keadaan yang diperoleh. Apabila sudah memenuhi syarat, maka dapat dibangun perangkat eksperimen sistem pengecoran logam cair yang berulang (Gambar 2).

Mengacu pada Gambar 2, yang memperlihatkan tampak tiga dimensi dari ilustrasi model alat sistem pengecoran otomatis sesuai dengan invensi ini. Sistem pengecoran otomatis seperti invensi yang diusulkan adalah mengkondisikan gelombang permukaan logam cair pada tungku seminimal mungkin dan meningkatkan akurasi titik jatuh logam cair ke mulut cetakan dengan cara mengendalikan kecepatan putar tungku baik ke depan maupun ke
20 belakang dan posisi titik putar tungku ke atas dan atau ke depan. Gerak putar tungku ke depan diatur berdasarkan jumlah volume yang ada pada tungku. Hal ini bisa diketahui dengan sensor ketinggian atau sensor berat. Apabila volume logam cair pada tungku besar, maka sudut putar tungku bergerak kecil karena
25 masih penuh. Apabila logam cair sudah berkurang atau sedikit karena sudah dituangkan pada cetakan, maka tungku akan berputar ke depan lebih besar atau sudut putarnya besar.

Setiap melakukan gerak putaran ke depan yang besar sudutnya diatur berdasarkan jumlah volume yang terdapat pada tungku, maka
30 seiring dengan berkurangnya volume kecepatan putar balik tungku pun diatur berdasarkan jumlah volume tersebut karena besar gelombang permukaan yang dihasilkannya berbeda. Sehingga pengendali harus mengatur kecepatan putar balik berdasarkan masukan dari sensor ketinggian logam cair yang ada pada tungku.

Pengaturan ini bertujuan untuk meredam atau mengurangi gelombang
UNIVERSITAS MEDAN AREA

permukaan logam cair yang timbul akibat gerak putar balik yang terdapat pada tungku. Gerakan putar ini menimbulkan gaya sentrifugal yang terjadi pada logam cair dan membentur dinding tungku sehingga menimbulkan gaya yang berlawanan yang mengakibatkan timbulnya gelombang permukaan pada tungku. Gelombang permukaan yang besar dan tidak seimbang akan mengakibatkan ketidakseimbangan pada sistem pengecoran yang menyebabkan kerusakan.

Invensi ini memiliki perbedaan yang sangat mencolok dibandingkan dengan sistem pengecoran logam cair yang ada di Industri-industri atau yang dikenal oleh masyarakat luas. Yaitu pada 'keberadaan' pengaturan gerak translasi posisi titik putar tungku pada saat dilakukan pengecoran atau penuangan logam cair ke cetakan. Pengaturan gerak translasi ini berdasarkan masukan dari dua buah sensor posisi yang mendeteksi kedudukan jatuhnya logam cair pada lubang mulut cetakan. Pengaturan gerak translasi ini dimaksudkan agar supaya titik jatuh logam cair tepat berada pada lubang mulut cetakan.

Sebagaimana diungkapkan pada Gambar 2, yang menunjukkan bagian yang dapat bergerak secara vertikal (naik-turun) dan horizontal (maju-mundur) sesuai dengan invensi ini. Tungku pada sistem pengecoran logam cair yang dapat bergerak menambah fleksibilitas sistem dalam mengatur posisi jatuhnya logam cair pada lubang mulut cetakan, dengan deskripsi sebagai berikut;

(a) Jumlah Motor

Motor yang digunakan untuk mengatur posisi titik putar tungku berjumlah 2 (dua) buah. Satu motor untuk menggerakkan tungku pada arah vertikal (naik-turun) dan yang satunya lagi untuk menggerakkan tungku pada arah horizontal (maju dan mundur).

(b) Posisi atau Kedudukan Motor

Oleh karena semua beban motor dihubungkan dengan poros ulir, maka posisi atau kedudukan kedua motor terletak sejajar dengan poros motor yang terhubung dengan transmisi gir hubungan langsung dengan rasio putaran output dinotasikan dengan simbol N_1/N_2 .

(c) Spesifikasi Teknis Motor

Motor-motor yang digunakan untuk mengatur posisi titik putar tungku memiliki spesifikasi teknis yang seragam karena beban yang diemban tidak jauh berbeda.

(d) Jumlah dan jenis sensor

Sensor yang digunakan pada system pengecoran logam cair ini berjumlah 9 (sembilan) buah. Ke sembilan sensor ini terdiri dari 4 (empat) buah sensor sudut, empat buah sensor posisi dan satu buah sensor batas.

(e) Posisi atau Kedudukan Sensor

Posisi atau kedudukan sensor disesuaikan dengan fungsinya masing-masing. Ke empat sensor sudut diletakkan pada semua sumbu putar motor yang ingin diketahui sudut dan kecepatan putarnya. Sedangkan sensor posisi terbagi dua bagian, satu buah berkedudukan di atas tungku yang digunakan untuk mengukur tinggi logam cair yang terdapat pada tungku, satu buah diletakkan di atas cetakan yang digunakan untuk mengukur tinggi logam cair yang terdapat pada cetakan. Sedangkan dua buah lagi digunakan sekaligus untuk mengukur posisi logam cair jatuh, sehingga kedua sensor ini diletakkan di atas lubang mulut cetakan yang dipasang membentuk sudut 90° pada arah horizontal. Sensor batas digunakan untuk memberhentikan gerak cetakan dan diletakkan pada jalur perpindahan cetakan.

Sistem pengecoran logam cair otomatis yang diinvensikan ini apabila beroperasi, maka semua motor (tiga buah motor) akan bergerak serentak sesuai dengan masukan dari semua sensor (sembilan buah sensor) sehingga tidak terdapat gelombang permukaan logam cair pada tungku dan tidak terdapat percikan logam cair yang tumpah atau terbuang di sekitar cetakan.

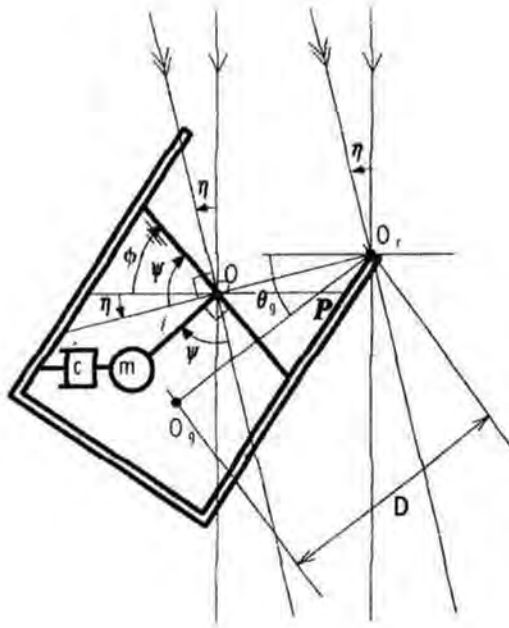
Klaim

1. Suatu sistem pengecoran logam cair otomatis untuk memaksimalkan proses pengecoran logam cair, sehingga menghasilkan jumlah produk yang maksimal dan pada akhirnya dapat meningkatkan kualitas produk pengecoran logam tanpa harus memperbesar biaya produksi, yang harus di-instal, terdiri dari: Dua buah motor penggerak yang memiliki spesifikasi yang sama ditambahkan dan menyatu dengan struktur tungku. Satu buah motor penggerak menyatu dengan struktur line cetakan. 9 (sembilan) buah sensor yang terdiri dari 4 (empat) buah sensor sudut, 4 (empat) buah sensor posisi logam cair dan 1 (satu) buah sensor batas ditambahkan pada posisi yang sesuai dengan fungsinya masing-masing.
2. Suatu sistem pengecoran logam cair otomatis sesuai dengan klaim 1, dimana akan baik apabila model gelombang permukaan tipe pendulum diterapkan.
3. Suatu metode pengurangan gelombang permukaan sesuai dengan klaim 2, adalah dengan mengatur kecepatan putar balik tungku berdasarkan perilaku gelombang tersebut yakni dengan mengkonversikan hasil penjumlahan fungsi gelombang permukaan awal dengan fungsi gelombang yang sama setelah dilakukan pergeseran (*shift*) dan balik (*inverse*) gelombang ke bentuk besaran daya input motor yang bertujuan untuk menghilangkan gelombang permukaan logam cair pada tungku.
4. Untuk mengoptimalkan hasil sesuai klaim 3, dilakukan juga pengaturan posisi titik putar tungku ke arah vertikal (ke atas dan ke bawah) dan horizontal (ke depan dan ke belakang) yang bertujuan untuk meningkatkan ketepatan (akurasi) titik jatuh logam cair ke lubang mulut cetakan.
5. Suatu sistem pengecoran logam cair otomatis sesuai dengan klaim 1 sampai 4, dimana gelombang permukaan logam cair pada tungku dapat dihilangkan 100% setelah 1 detik.
6. Sesuai dengan klaim 5, suatu sistem pengecoran logam cair otomatis, pengecoran secara berulang dapat dilakukan 1 detik setelah tungku melakukan putar balik.

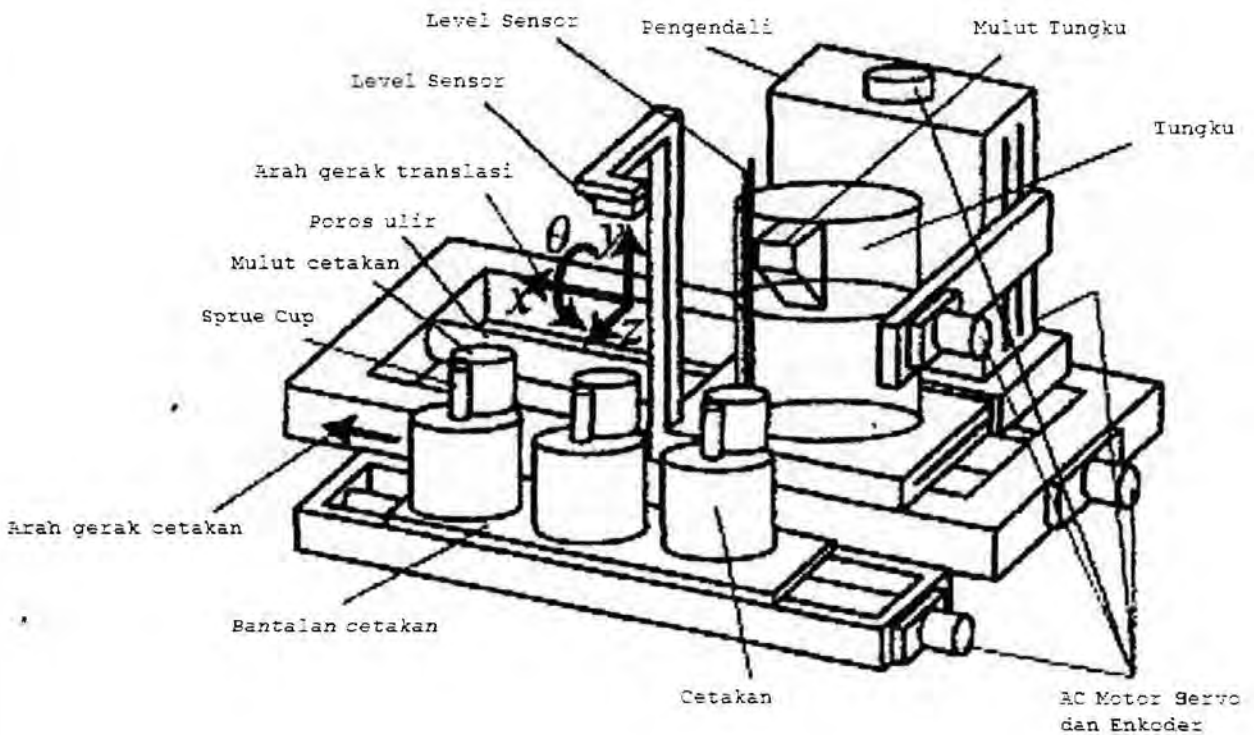
Abstrak**MODEL DAN KENDALI GELOMBANG PERMUKAAN LIQUID SAAT PUTAR BALIK
DENGAN MENGATUR POSISI TITIK PUTAR DAN KECEPATAN PUTAR TUNGKU
PADA PROSES PENGECORAN**

5 Suatu sistem pengecoran logam cair otomatis untuk
memaksimalkan proses pengecoran logam cair, sehingga
menghasilkan jumlah produk yang maksimal dan pada akhirnya dapat
meningkatkan kualitas produk pengecoran logam tanpa harus
memperbesar biaya produksi, yang harus di-instal, terdiri dari:
10 dua buah motor penggerak yang memiliki spesifikasi yang sama
ditambahkan dan menyatu dengan struktur tungku. 7 (tujuh) buah
sensor yang terdiri dari 3 (tiga) buah sensor sudut dan 4
(empat) buah sensor posisi logam cair ditambahkan pada posisi
yang sesuai dengan fungsinya masing-masing. Gelombang permukaan
15 logam cair pada tungku dapat dihilangkan 100% setelah 1 detik
dan pengecoran secara berulang dapat dilakukan 1 detik setelah
tungku melakukan putar balik.

Lampiran



Gambar 1. Model gelombang permukaan tipe pendulum untuk tungku (ladle) berputar ke belakang (*backward-tilting*)



Gambar 2. Ilustrasi model alat sistem pengecoran otomatis

DRAF ARTIKEL JURNAL TERAKREDITASI

Pengendali Gelombang Permukaan dan Titik Jatuh Logam Cair pada Proses Pengecoran dengan Mengatur Kecepatan dan Posisi Titik Putar Tungku

Usman Harahap, Dadan Ramdan, Darianto

Fakultas Teknik Universitas Medan Area

Jalan Kolam No.1 Medan Estate, Medan, 20371. Tlp. 0617366998

e-mail: dadan@uma.ac.id

Abstract

This research designed of automatic pouring machine control by tilting position and velocity base on generated of liquid vibration. The mathematics model of liquid vibration in ladle of pouring process system is designed by pendulum models. The mathematics model which design as references of computer simulation for describe of liquid behavior in the ladle in turn backward after pouring to sprue cup process. The computational simulation that designed was use available software of fluid dynamics code by SOLA-MAC methods. The simulation result compared whit experimental a result was good confirmation. The controller for reducing liquid vibration is input shaping. The result of the proposed controller is assured by comparison between simulation and experimental results. The average deviation at maximum liquid vibration (after 1 s) is found to be 6.5 %. The results demonstrate good quantitative agreement.

Keywords: vibration, pouring process, SOLA-MAC

1. Pendahuluan

Dalam upaya melakukan pemberdayaan masyarakat dan seluruh kekuatan ekonomi nasional termasuk terhadap industri kecil dan menengah (IKM) pengecoran logam memerlukan keberpihakan dari pemerintah. Keberpihakan ini disamping untuk meredam kegagalan pasar (market failures) juga diperlukan dalam upaya mengurangi keterpurukan akibat krisis ekonomi yang berkepanjangan. Industri kecil dan menengah (IKM) pengecoran logam di Ceper adalah contoh kasus, yang dalam batas-batas tertentu memerlukan keberpihakan tersebut.

Berdasarkan 'Klaten Dalam Angka 1998' bahwa jumlah IKM pengecoran logam sebanyak 332, namun dengan adanya krisis ekonomi, diduga yang masih survive sekitar 30%. Meskipun ada penurunan yang cukup tajam, IKM pengecoran logam di Ceper ini masih berpeluang untuk meraih potensi pasar komponen pengecoran logam, hanya persoalannya antara lain adalah diperlukan adanya sentuhan teknologi yang inovatif sehingga kualitas produknya memiliki daya saing yang tinggi. Oleh karena itu intervensi pemerintah melalui berbagai kebijakan diperlukan untuk mendorong IKM pengecoran logam Ceper mau mengadopsi atau mendifusikan hasil inovasi teknologi (Ugay Sugarmansyah dkk., 2003).

Hal utama yang harus diperhatikan pada proses pengecoran dengan teknologi yang berinovasi tinggi atau otomatis adalah : 1) Mampu menuangkan logam cair kedalam cetakan pada titik yang tepat; 2) Mampu menuangkan logam cair sampai level ketinggian yang tepat

tanpa ada logam cair yang tumpah atau tanpa terjadi percikan, karena bila hal ini terjadi maka akan ada pemborosan bahan dan berbahaya bagi operatornya; 3) Mampu menentukan volume logam cair yang masuk ke cetakan dengan tepat; 4) Mampu menggunakan waktu proses yang diperlukan selama proses pencetakan pertama dan proses pencetakan berikutnya sesingkat mungkin, sebab hal ini akan dipengaruhi oleh temperatur dari logam cair yang digunakan (Kazuhiko Terashima dkk., 2000)

Kemudian, oleh karena proses pengecoran logam sangat berbahaya bagi kesehatan dan keselamatan operatornya yang diakibatkan oleh asap, panas dan gas yang ditimbulkannya, maka merealisasikan sistem pengecoran yang memiliki teknologi yang berinovasi tinggi atau otomatis sangat diperlukan.

Dari pemaparan di atas, maka penelitian ini mengambil perumusan masalah sebagai berikut : **Apakah dengan mengendalikan kecepatan putar balik dan mengatur gerak posisi titik putar dapat mengurangi atau menghilangkan gelombang permukaan liquid (logam cair) sehingga kesalahan posisi penuangan pada cetakan dapat dihindari dan konsumsi energi dapat dikurangi?**

Terasima and Ramdan (2000), telah membuat model dan simulasi komputer untuk perilaku fluida pada tungku dan cetakan pada proses pengecoran untuk penuangan model putar (tilting-type). Paper ini telah menunjukkan perbandingan antara hasil simulasi dan eksperimen yang signifikan. Perilaku fluida dianalisa dengan menggunakan metoda SOLA-MAC. Pertama dilakukan analisa perilaku permukaan fluida pada saat tungku putar balik, kemudian dilakukan analisa fluida di dalam cetakan ketika penuangan dilakukan, lalu hasilnya dibandingkan dengan hasil pengamatan dari eksperimen.

Terashima *et al.* (2001) telah menganalisa gelombang permukaan dan merancang sistem kontrol untuk menghilangkan gelombang permukaan pada mesin pengecoran logam otomatis model tilting-type. Paper ini membahas kendali dua derajat kebebasan yaitu mengendalikan besar sudut putar balik dan sekaligus mengatur kecepatan putar sehingga gelombang permukaan liquid dapat diredam. Pengendalian yang digunakan adalah kompensasi umpan balik dan input shaping. Terashima *et al.* (1999, 1997) juga telah membahas Model dan sistem kendali vibrasi permukaan zat cair pada sistem pengecoran otomatis untuk model tilting-type. Pada penelitian ini suatu rancangan optimal dengan menghilangkan gelombang permukaan pada kendali kontainer bergerak yang berisi fluida cair dengan model simulasi komputer dinamika fluida telah dihasilkan.

Dengan model yang berbeda, Burditt and Bralower (1989) dan Lindsay (1983) dalam papernya membahas kualitas produk yang dihasilkan oleh sistem pengecoran yang *dikendalikan secara otomatis*.

Terashima *et al.* (2005) telah membahas tentang model dan kontrol robust untuk mengatur ketinggian permukaan liquid pada suatu cetakan untuk bentuk baskom pada proses pengecoran logam. Tujuan pada penelitian ini adalah untuk memperoleh metode agar menghasilkan ketinggian permukaan liquid pada cetakan yang tetap setiap dilakukan penuangan pada proses pengecoran logam model baskom. Pada penelitian ini digunakan model robot pengecoran otomatis tipe tilting. Suatu sistem kontrol dua derajat kebebasan digunakan untuk mengendalikan ketinggian permukaan liquid. Pada paper ini juga menunjukkan suatu urutan model yang sesuai untuk setiap bagian pada proses pengecoran logam. Selanjutnya model input feedforward juga digunakan untuk merealisasikan pengendali ketinggian permukaan liquidnya (level control). Untuk mempertahankan performansi model digunakan kendali umpan balik robust dengan menggunakan teori kendali H tak hingga. Untuk menguji validitas sistem kontrol yang diusulkan telah ditunjukkan melalui hasil simulasi dan eksperimen.

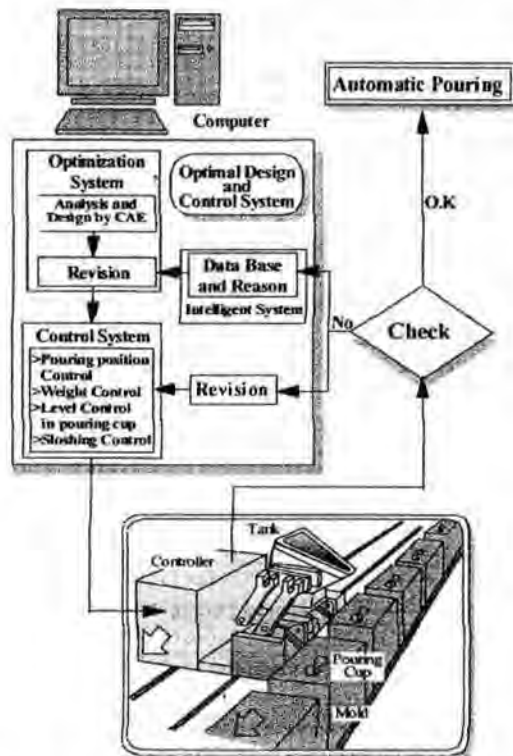
Noda *et al.* (2003) telah melakukan penelitian tentang pendeteksian dan kendali lintasan untuk objek yang sistem geraknya tidak diketahui dengan tujuan untuk meredam gelombang permukaan pada proses pengecoran logam.

Penelitian ini mengambil fokus pada pendeteksian otomatis dan kendali lintasan untuk gerakan memperoleh target yang posisinya tidak diketahui, juga kendali untuk meredam gelombang permukaan pada suatu lintasan objek. Kendali lintasan untuk target objek tersebut dengan *mengeksekusi gelombang permukaan melalui kendali peredaman telah di rekomendasikan sebagai pengembangan awal untuk suatu tipe robot pengecoran otomatis yang dapat bekerja secara otomatis pada industri pengecoran.*

Pada penelitian ini juga telah dilakukan pengamatan target objek, kemudian suatu sensor laser telah digunakan untuk mengukur posisi lintasan objek dan perbedaan antara target dan lintasan objek telah diestimasi. Berdasarkan informasi ini, referensi jalan lintasannya untuk mengendalikan lintasan diberikan berdasarkan peredaman gelombang permukaan. 2-DOF (degree of freedom) sistem dengan menggunakan suatu pengendali feedforward model inverse untuk lintasan objek telah ditunjukkan. Kendali gelombang permukaan pada lintasan objek ditunjukkan dengan merancang pengendali umpan balik melalui pendekatan bentuk hibrida. Keefektifan sistem kendali yang diusulkan ditunjukkan melalui percobaan pada sistem transfer container zat cair.

Tabatabaei (1998), pada papernya yang berjudul Pengecoran Otomatis untuk Logam Cair dengan Menggunakan Sistem Kendali Pengamatan Real Time telah melakukan penelitian yang memfokuskan pada pengamatan logam cair dalam sprue cup dengan menggunakan kamera digital. Penelitian ini juga telah membandingkan hasil penggunaan Laser dan Sinar-X di dalam pengukuran tanpa menyentuh objek yang ditangkap dengan kamera, lensa dan elektronik pemroses citra.

Terashima *et al.* (2001) pada papernya menunjukkan Sistem Kontrol Pengecoran Otomatis yang didukung oleh CAE yang diilustrasikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Sistem Kontrol Pengecoran Otomatis yang didukung oleh CAE.

Dari Gambar 2.1 di atas dapat dilihat bahwa pengendalian dapat di fokuskan selain kepada meredam gelombang permukaan juga dapat ditekankan kepada pengendalian posisi titik jatuh pengecoran, pengendalian berat (massa) liquid dan pengendalian ketinggian level liquid pada sprue cup (cetakan) ketika pengecoran dilakukan.

Untuk merealisasikan maksud di atas, maka diperlukan upaya agar perilaku logam cair (liquid) pada saat dilakukan proses penuangan dan pencetakan selama pengecoran dapat diketahui. Hal ini dapat dicapai dengan merancang model dan kendali gelombang liquid sistem pengecoran melalui komputer terutama analisa bentuk dan besar gelombang permukaan selama proses pengecoran, sebab untuk mengetahui perilaku permukaan liquid di dalam tungku dan cetakan pada proses pengecoran logam melalui analisa komputer dapat diamati dengan mudah (Terashima *et al.*, 2001). Oleh karena itu biaya dan waktu percobaan di

apangan dapat dikurangi, juga operator dapat memahami lebih mudah untuk mengenal proses pengecoran.

Dengan proses numerik yang dilakukan komputer, analisa akan mudah dilakukan, begitu juga visualisasi perilaku permukaan liquid dapat ditunjukkan dengan interaktif.

Selain hal di atas, penelitian ini juga berusaha agar diperoleh suatu model matematik yang tepat dari perilaku liquid (zat cair) pada proses pengecoran logam. Hal ini sangat diperlukan untuk upaya proses pengendalian secara otomatis dengan tujuan agar gelombang permukaan liquid (zat cair) pada tungku (ladle) dapat dikurangi atau dihilangkan ketika proses putar balik berlangsung setelah penuangan.

Gelombang permukaan ini akan sangat berpengaruh terhadap proses dan hasil pengecoran karena akan menimbulkan ketidak-teraturan jatuhnya logam cair ke cetakan. Juga getaran yang timbul akan berpengaruh terhadap sistem perangkat pengecorannya.

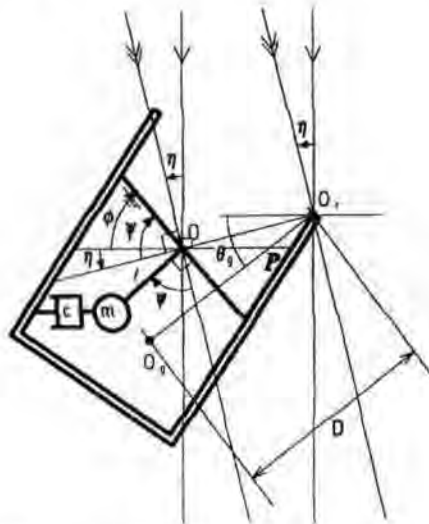
Telah banyak peneliti yang melakukan upaya di atas namun pengendalian untuk meredam gelombang permukaan hanya melalui pengaturan gerak putar motor dengan titik putar yang tetap. Hal ini diperlukan motor yang memiliki torsi yang sangat besar, sehingga energi yang diperlukan juga cukup besar (Terashima *et al.*, 1999, 1997).

Pada penelitian ini akan diupayakan proses pengendalian untuk meredam gelombang permukaan liquid (zat cair) melalui pengaturan posisi titik putar yang berubah serta mengatur gerak putar motor pada tungku (ladle). Hal ini diharapkan akan diperoleh hasil peredaman gelombang permukaan yang lebih baik serta dapat mengurangi konsumsi energi.

2. Metoda Penelitian

Jadi, metode penelitian yang digunakan adalah melalui pendekatan simulasi yang dibandingkan dengan hasil eksperimen. Simulasi diawali dengan membangun model matematik dan algoritma untuk menyusun program pengendali. Program yang digunakan untuk pengendali sistem adalah program MATLAB. Model matematik dikembangkan melalui model bandul matematis (pendulum) berayun yang dipengaruhi oleh tinggi permukaan, gesekan akibat pengaruh viskositas zat cair serta gravitasi yang mempengaruhi massa zat cair yang ada dalam tungku (ladle). Model bandul matematis tersebut dapat dilihat pada Gambar 2 berikut ini.

Titik O adalah titik pusat perputaran pendulum. Dimana m adalah massa liquid, c adalah ekivalen dengan koefisien fiskositas, l ekivalen dengan panjang pendulum, η = sudut putar dari sudut putar inisialisasi, ψ = sudut vibrasi dari garis permukaan, θ = sudut putar inisialisasi, $\Phi = \psi + \eta$, D = jarak antara O_r dan O_g .



Gambar 2. Model gelombang permukaan tipe pendulum untuk tanki (lade) berputar ke belakang (backward-tilting)

Model tipe pendulum akan dengan mudah dapat diturunkan dari kesetimbangan momen pada sekitar titik pusat perputaran O sebagai berikut.

$$\frac{d^2(\eta + \psi)}{dt^2} = -c \frac{d\{l(\eta + \psi)\}}{dt} l \cos(\eta + \psi) - mgl \sin(\eta + \psi) - m \frac{d^2\{D \cos \theta_g \eta\}}{dt^2} l \sin(\eta + \psi) - m \frac{d^2\{D \sin \theta_g \eta\}}{dt^2} l \cos(\eta + \psi) \quad (1)$$

$$\ddot{\phi} = -\frac{c}{m} \dot{\phi} - \frac{g}{l} \phi - \frac{D \sin \theta_g}{l} \ddot{\eta}, \quad J = ml^2 \quad (2)$$

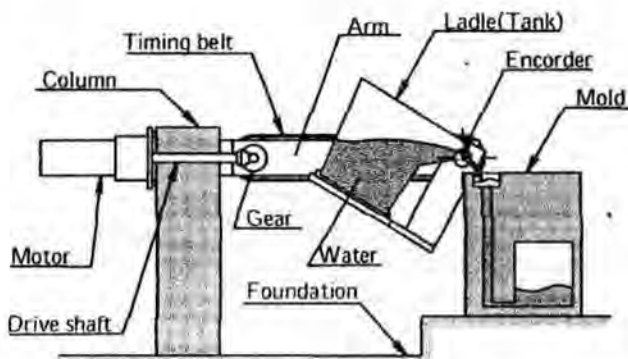
Fungsi Transfer Q(s) menjadi :

$$Q(s) = \frac{\phi(s)}{\eta(s)} = -\frac{(D \sin \theta_g / l) s^2}{s^2 + (c/m)s + (g/l)} = -\frac{(D \sin \theta_g / l) \omega^2}{-\omega^2 + 2\xi \omega_n \omega + \omega_n^2} \quad (3)$$

$$\omega_n = 2\pi f_n = \sqrt{\frac{g}{l}}, \quad \xi = \frac{c}{2m} \sqrt{\frac{l}{g}}$$

J adalah momen inersia, ω_n adalah frekwensi angular natural, ξ adalah rasio peredam. Model matematik yang diperoleh disubstitusikan dengan persamaan gerak motor (sistem motor) yang digunakan, kemudian dilakukan pemeriksaan kekontrolan (controllable) dan keteramatan (observable) dari matrik ruang keadaan yang diperoleh. Apabila sudah memenuhi syarat, maka dapat dibangun perangkat keras sistem pengecoran logam.

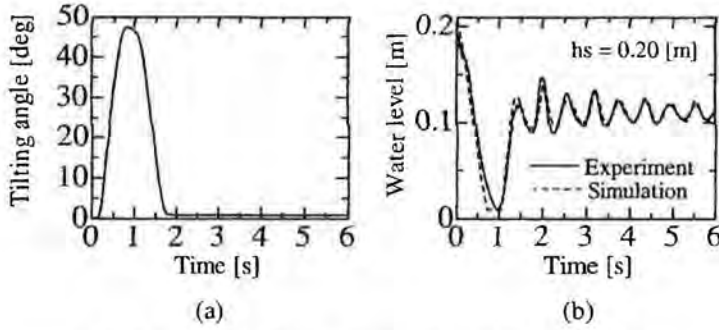
Ilustrasi model alat eksperimen sistem pengecoran logam otomatis yang dirancang pada tahap II ini dapat dilihat pada Gambar 3 berikut ini. Pada Gambar 3 tersebut terlihat tungku dapat bergerak berputar ke depan dan ke belakang sehingga diharapkan dapat menghilangkan gelombang permukaan liquid (zat cair) yang terdapat di dalam tungku (ladle).



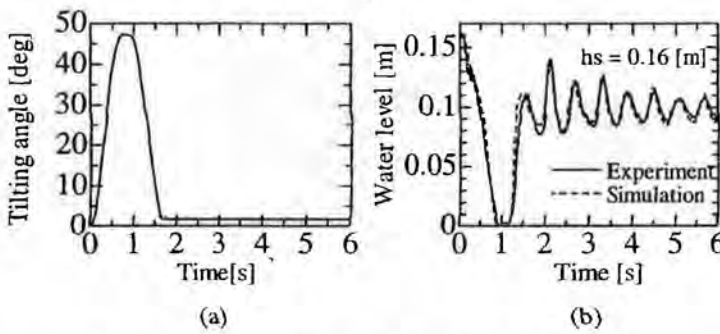
Gambar 3. Ilustrasi model alat eksperimen sistem pengecoran otomatis

3. Hasil dan Pembahasan

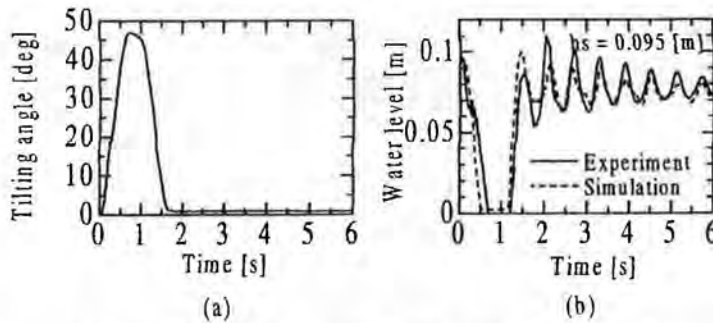
Hasil penelitian tahap kedua ini diperoleh data hasil simulasi dan eksperimen seperti grafik yang ditunjukkan pada Gambar 4 sampai Gambar 7 di bawah ini. Sedangkan dalam bentuk visual hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 8 sampai Gambar 13 dan eksperimen ditunjukkan pada Gambar 14 sampai Gambar 19.



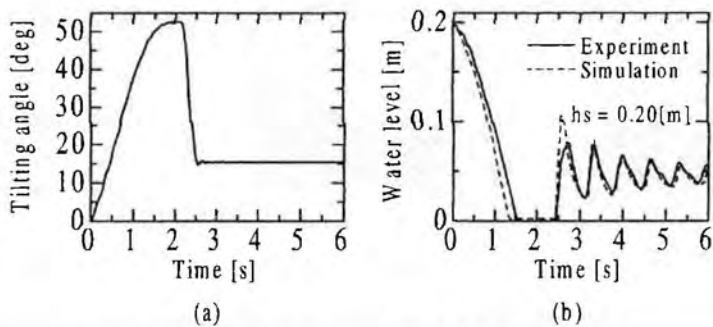
Gambar 4. (a) Hubungan sudut putar dan waktu
(b) Hubungan gelombang permukaan liquid dengan waktu hasil simulasi dan eksperimen pada $h_s = 20$ cm



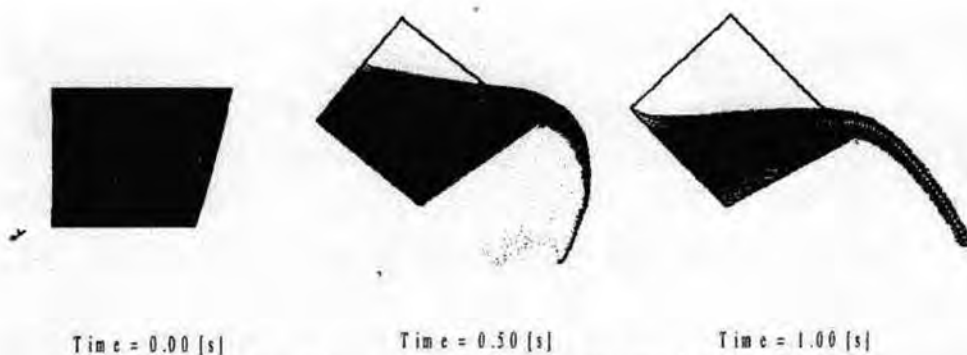
Gambar 5. (a) Hubungan sudut putar dan waktu
(b) Hubungan gelombang permukaan liquid dengan waktu hasil simulasi dan eksperimen pada $h_s = 16$ cm



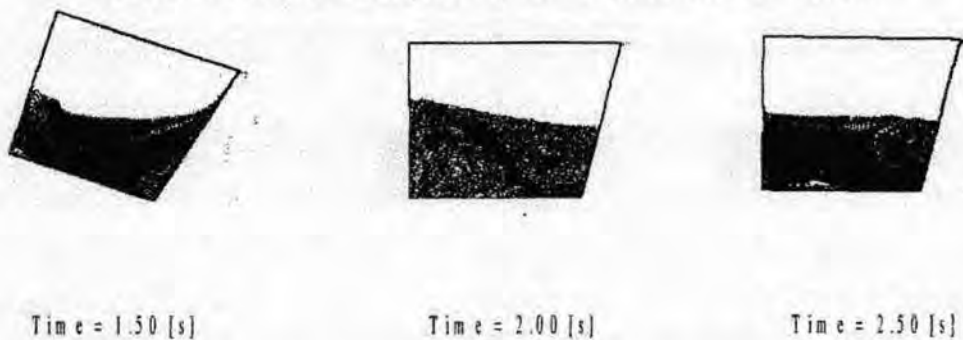
Gambar 6. (a) Hubungan sudut putar dan waktu
(b) Hubungan gelombang permukaan liquid dengan waktu hasil simulasi dan eksperimen pada $h_s = 9,5$ cm



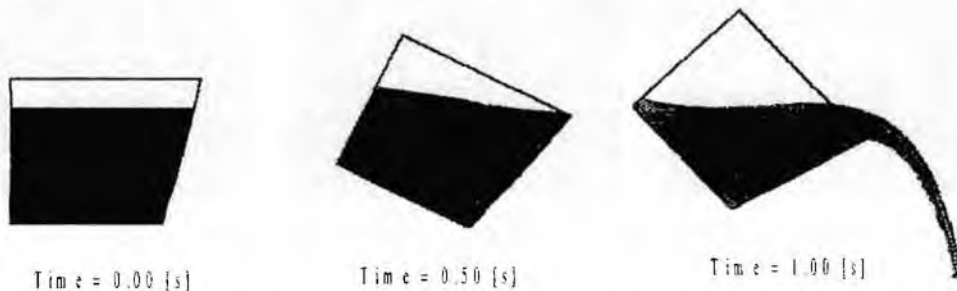
Gambar 7. (a) Hubungan sudut putar dan waktu
 (b) Hubungan gelombang permukaan liquid dengan waktu hasil simulasi dan eksperimen pada $h_s = 20$ cm



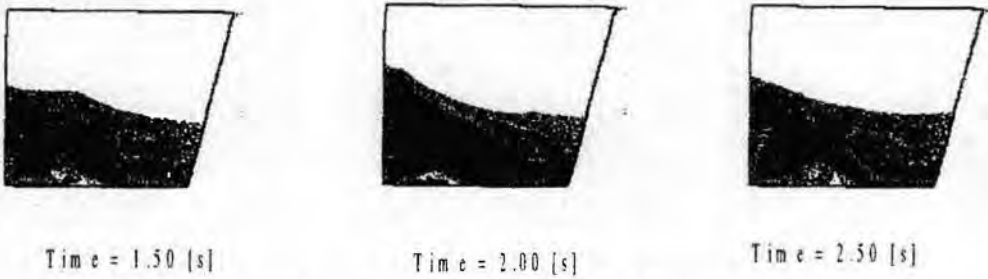
Gambar 8. Hasil simulasi pada saat 0 – 1 detik untuk $h_s = 20$ cm



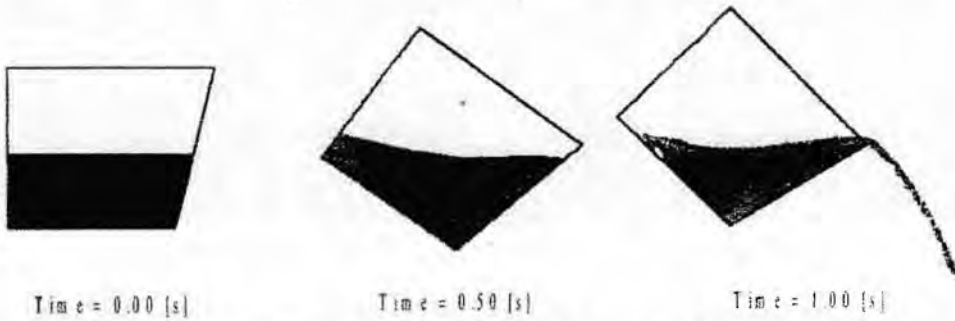
Gambar 9. Hasil simulasi pada saat 1,5 – 2,5 detik untuk $h_s = 20$ cm



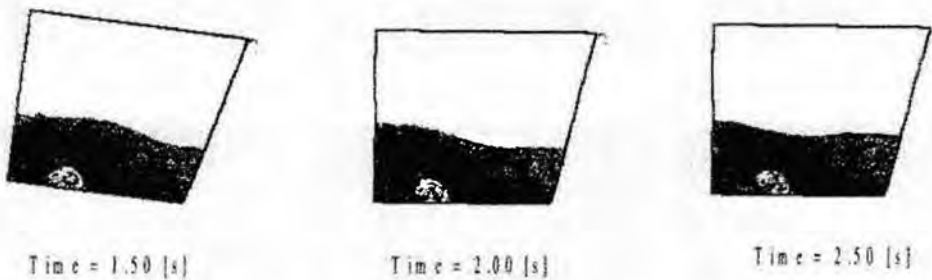
Gambar 10. Hasil simulasi pada saat 0 – 1 detik untuk $h_s = 16$ cm



Gambar 11. Hasil simulasi pada saat 1,5 – 2,5 detik untuk $h_s = 16$ cm



Gambar 12. Hasil simulasi pada saat 0 – 1 detik untuk $h_s = 9,5$ cm



Gambar 13. Hasil simulasi pada saat 1,5 – 2,5 detik untuk $h_s = 9,5$ cm



Gambar 14. Hasil eksperimen pada saat 0 – 1 detik untuk $h_s = 20$ cm



Gambar 15. Hasil eksperimen pada saat 1,5 – 2,5 detik untuk $h_s = 20$ cm



Gambar 16. Hasil eksperimen pada saat 0 – 1 detik untuk $h_s = 16$ cm



Gambar 17. Hasil eksperimen pada saat 1,5 – 2,5 detik untuk $h_s = 16$ cm



Gambar 18. Hasil eksperimen pada saat 0 – 1 detik untuk $h_s = 9,5$ cm



Gambar 19. Hasil eksperimen pada saat 1,5 – 2,5 detik untuk $h_s = 9,5$ cm

3.1. Pembahasan

Data penelitian di atas menggunakan parameter simulasi seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1 sebagai berikut :

Tabel 1. Parameter percobaan pada Simulasi Komputer.

Percobaan	Parameter	Dimensi
Percobaan I	Sudut Putar Mundur	47°
	Kecepatan Putar	31,3°/det
	Tinggi Air dlm. tungku	20 [cm]
Percobaan II	Sudut Putar Mundur	46°
	Kecepatan Putar	30,67°/det
	Tinggi Air dlm. tungku	16 [cm]
Percobaan III	Sudut Putar Mundur	47°
	Kecepatan Putar	31,3°/det
	Tinggi Air dlm. tungku	9,5 [cm]
Percobaan IV	Sudut Putar Mundur	37°
	Kecepatan Putar	74°/det
	Tinggi Air dlm. tungku	20 [cm]

Apabila kita memperhatikan bentuk gelombang permukaan zat cair yang dihasilkan dan dihubungkan dengan parameter yang diberikan maka dapat ditunjukkan bahwa untuk percobaan pertama sampai ke tiga dengan sudut putar mundur dan kecepatan putar yang relatif hampir sama yaitu berturut-turut 31,3°/det dan 47°/det, bila ketinggian air dalam tungku semakin rendah, maka amplitudo gelombang permukaan yang timbul akan semakin rendah. Sedangkan pada percobaan IV dengan parameter tinggi air 20 cm dan kecepatan 74°/det tinggi gelombang permukaan lebih besar jika dibandingkan dengan ke tiga percobaan sebelumnya. Hal ini diakibatkan oleh massa zat cair yang semakin besar dan kecepatan putar balik semakin tinggi. Hal ini pun terjadi dikarenakan pengereman dilakukan lebih cepat.

Dari semua hasil percobaan secara simulasi komputer di atas menunjukkan bahwa gelombang permukaan muncul ketika tungku diputar mundur hal ini tentu akan mempengaruhi proses penuangan berikutnya. Hal ini dapat dilihat juga pada hasil simulasi secara visual untuk percobaan satu sampai tiga dengan menggunakan program FLOW-3D yang menggunakan metoda SOLA-MAC. Oleh karena itu perlu diupayakan proses pengendalian pada saat putar mundur tersebut agar supaya pada proses penuangan selanjutnya tidak terjadi percikan pada lubang cetakan dan jatuh pada titik yang tepat sehingga akan mengurangi pemborosan bahan cetakan.

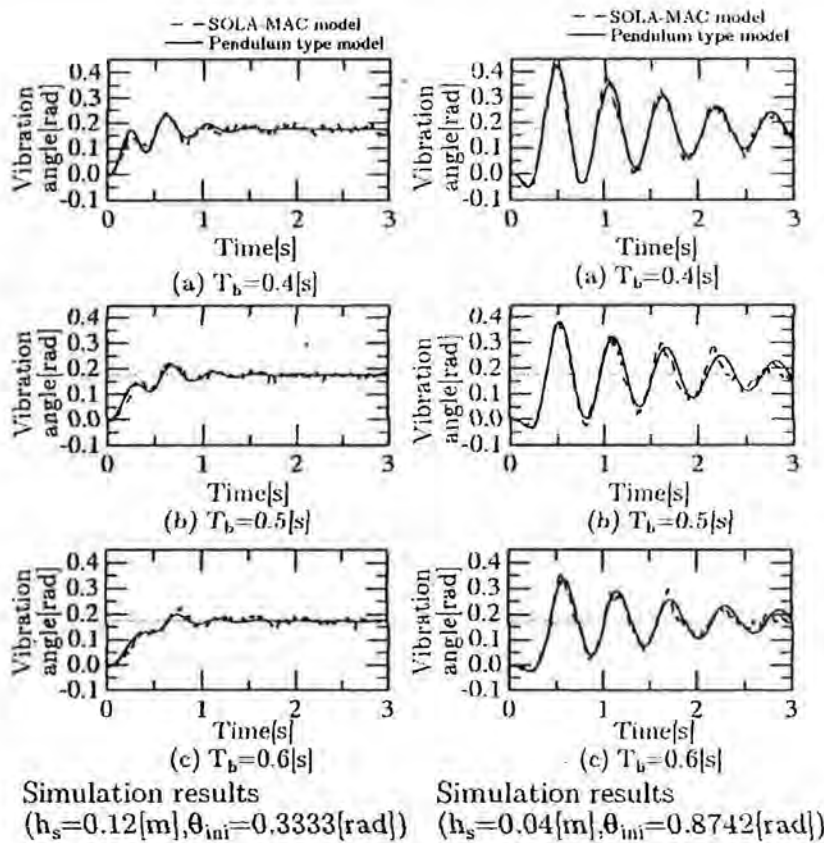
Penelitian ini merekomendasikan pengendali dengan cara menggunakan umpan balik dan tanpa menggunakan umpan balik. Untuk tahap ini terlebih dahulu dilakukan simulasi dan eksperimen dengan menggunakan pengendali tanpa umpan balik yaitu menggunakan metoda *reshaping (input shaping)* yaitu metoda pemberian gelombang yang sama namun dilakukan pergeseran fasa dan lalu dijumlahkan dengan gelombang tersebut setelah terlebih dahulu di-inversi-kan. Keunggulan metoda ini adalah sistem tidak memerlukan sensor sehingga apabila diterapkan pada eksperimen atau kasus yang sebenarnya maka akan mengurangi biaya percobaan dan akan mempermudah pengecekan ketika ada kesalahan.

Pada penelitian ini juga dilakukan percobaan dengan metoda lain yaitu dengan model SOLA-MAC (Solution Algorithm Marker and Cells) dan hasil yang diperoleh dibandingkan dengan model Pendulum yang ditunjukkan pada Gambar 20. Parameter yang digunakan pada simulasi ini adalah ditunjukkan pada Tabel 2 sebagai berikut.

Dari hasil yang diperoleh dapat dilihat bahwa kedua model yaitu model SOLA-MAC dan model Pendulum memiliki hasil simulasi yang hampir mendekati pada setiap percobaan. Hal ini bisa diperhatikan pada Gambar 20. Hasil inipun dapat menunjukkan bahwa dengan kecepatan putar balik semakin besar, diperoleh gelombang permukaan yang semakin besar. Hal ini sesuai dengan hasil percobaan sebelumnya yaitu dengan kecepatan putar balik yang semakin tinggi diperoleh gelombang permukaan semakin besar.

Tabel 2. Parameter simulasi dengan model SOLA-MAC.

Percobaan	Parameter	Dimensi
Percobaan I	Waktu Pengamatan	3 det
	Waktu Putar Mundur T_b	0,4; 0,5; 0,6
	Sudut Inisialisasi	0,33 rad
	Tinggi Air dlm. tungku	12 [cm]
Percobaan II	Waktu Pengamatan	3 det
	Waktu Putar Mundur T_b	0,4; 0,5; 0,6
	Sudut Inisialisasi	0,87 rad
	Tinggi Air dlm. tungku	4 [cm]

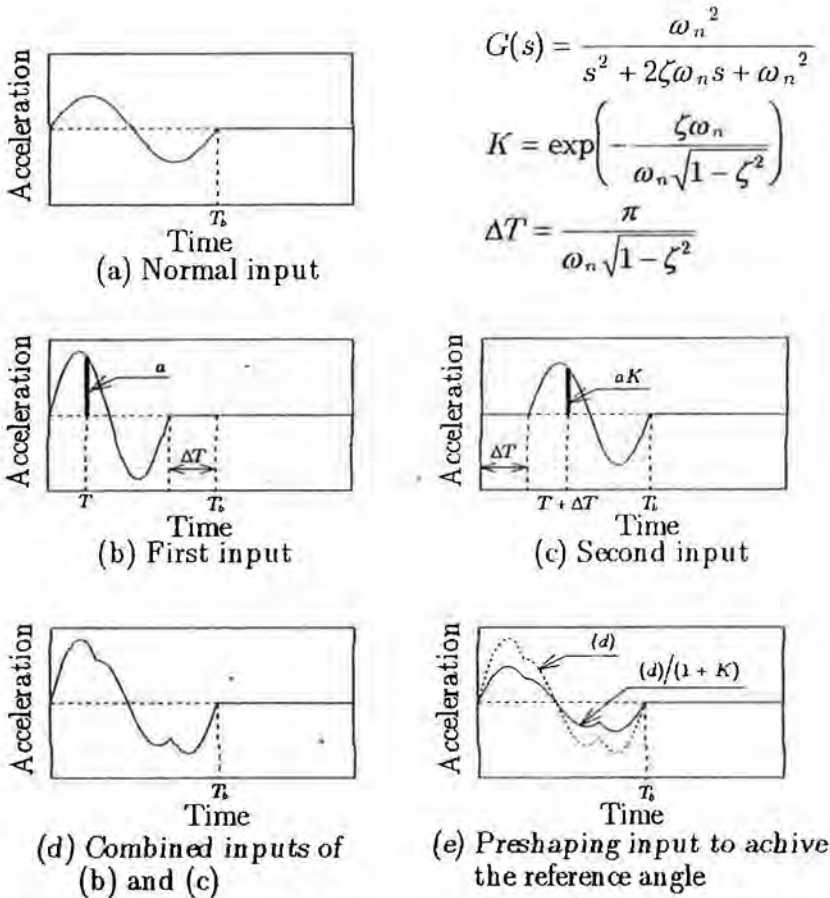


Gambar 20. Perbandingan hasil simulasi antara model SOLA-MAC dan Pendulum.

3.2. Pengendali (Controller)

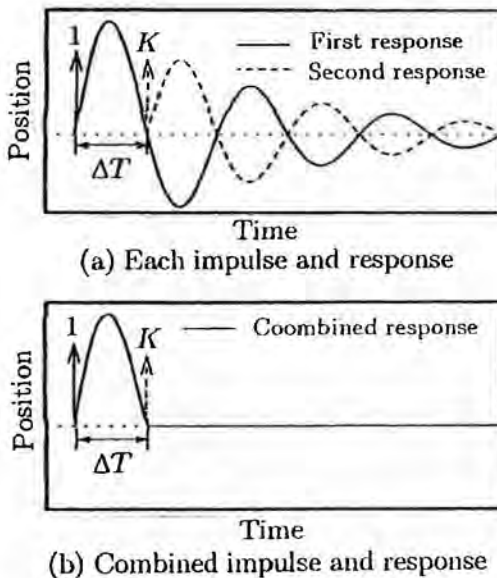
Pengendali yang digunakan pada penelitian tahap kedua ini adalah pengendali *Preshaping methods*. Metoda ini digunakan karena tidak memerlukan sensor sebagai umpan balik, sehingga dalam simulasi akan lebih mudah dilakukan dan dalam eksperimen atau percobaan dilaboratorium akan menghemat biaya dan sistem menjadi lebih sederhana. Namun dalam menggunakan metoda ini kita memerlukan penentuan pergeseran waktu gelombang yang tepat karena hal ini akan sangat berpengaruh kepada hasil pengendaliannya.

Secara teori model *Preshaping* ini ditunjukkan pada Gambar 21. Input normal, input pertama dan kedua ditunjukkan pada Gambar 21 tersebut. Sedangkan gabungan input pertama dan kedua ditunjukkan pada Gambar 21 (d). Dan Input *Preshaping* untuk memperoleh sudut referensi ditunjukkan pada Gambar 21 (e).

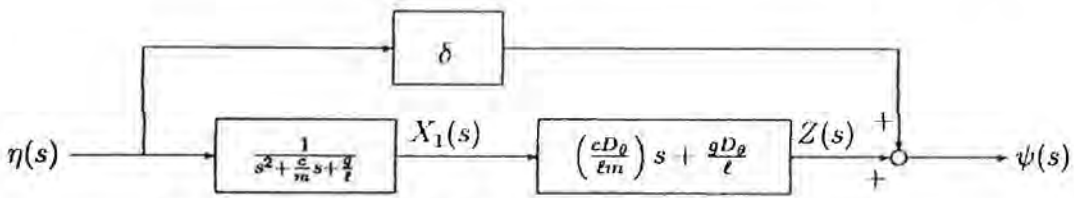


Gambar 21. Penerapan prinsip input shaping pada turunan input kendali kontinu berdasarkan kedua reduksi vibrasi dan kendali sudut putar tungku

Gambar 22 menunjukkan tentang proses mereduksi vibrasi. Gambar 22 (a) menunjukkan respon dan impuls masing-masing sedangkan 22 (b) menunjukkan kombinasi impuls dan respon.



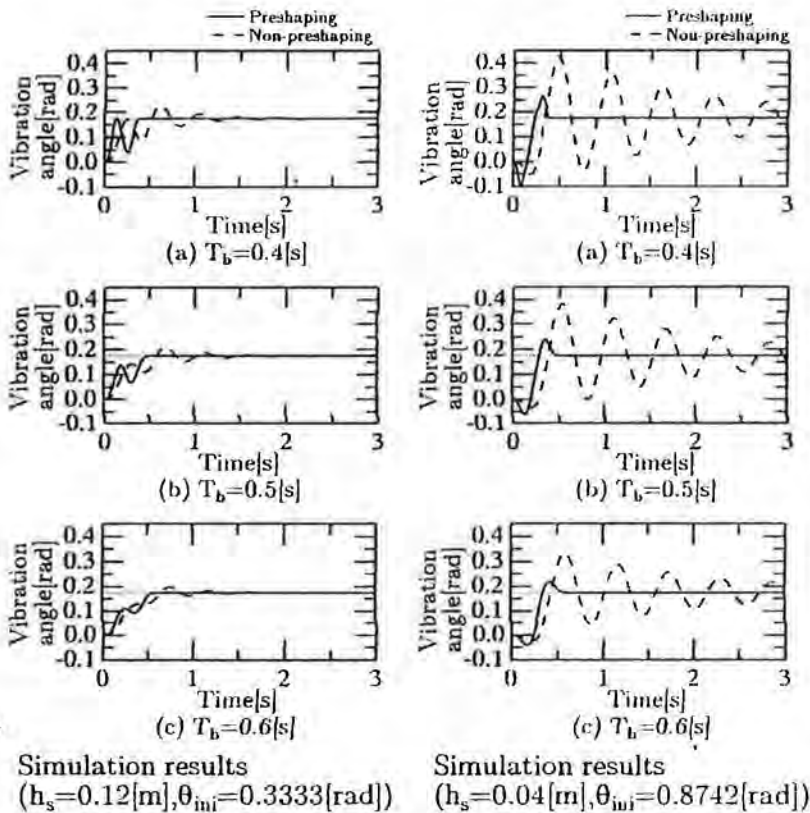
Gambar 22. Prinsip mereduksi vibrasi.



Gambar 23. Sistem kendali fungsi transfer model tipe pendulum.

Gambar 23 menunjukkan sistem kendali fungsi transfer model pendulum yang digunakan. Model ini menjadi acuan didalam merancang program pengendali yang digunakan dari model yang dirancang sebelumnya dengan memasukkan input preshaping.

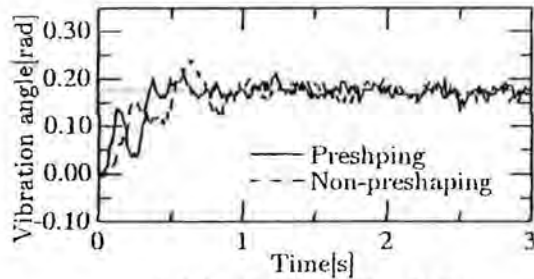
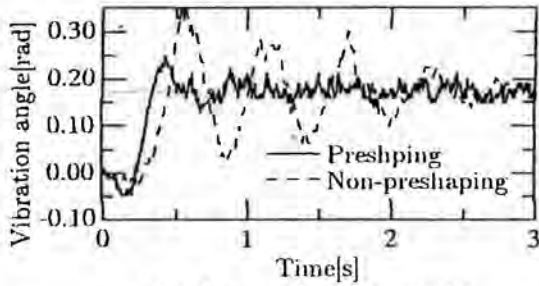
Hasil simulasi tersebut dapat dilihat pada Gambar 24 berikut. Gambar 24 tersebut menunjukkan perbandingan hasil simulasi antara percobaan dengan menggunakan Preshaping dan tanpa menggunakan Preshaping. Pengamatan dilakukan pada saat $T_b = 0,4; 0,5; \text{ dan } 0,6$ detik untuk ketinggian air $h_s = 12 \text{ cm}$ dan 4 cm .



Gambar 24. Hasil simulasi kendali komputer menggunakan model tipe pendulum dengan masukan shaping.

Dari Gambar 24 di atas dapat dilihat bahwa gelombang permukaan ketika putar balik dapat diredam hampir mencapai 90% dengan waktu yang sangat singkat. Hal ini menunjukkan bahwa hasil simulasi dengan menggunakan input shaping dapat membuktikan bahwa input shaping dapat menghilangkan gelombang permukaan dengan baik. Sehingga hal ini dapat digunakan pada eksperimen.

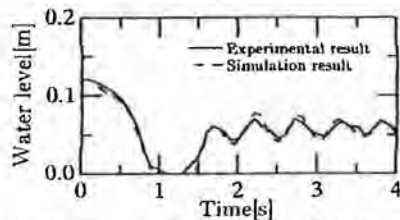
Gambar 25 menunjukkan hasil eksperimen untuk kondisi $h_s = 12 \text{ cm}$ dan $T_b = 0.4$ detik serta $h_s = 4 \text{ cm}$ dan $T_b = 0.6$ detik.

(a) $h_s=0.12$ [m], $T_b=0.4$ [s](b) $h_s=0.04$ [m], $T_b=0.6$ [s]

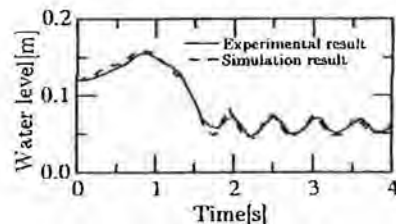
Gambar 25. Perbandingan Hasil Percobaan Antara Menggunakan Preshaping dan Tanpa Preshaping.

Dari hasil eksperimen yang ditunjukkan pada Gambar 25 dapat membuktikan bahwa input shaping dapat meredam gelombang permukaan ketika putar balik dengan cepat.

Gambar 26 menunjukkan hasil pengamatan eksperimen dan hasil simulasi tanpa input shaping di bagian kiri dan kanan tanki untuk ketinggian air h_s 12 cm.



(a) Water level at left position(a) of tank

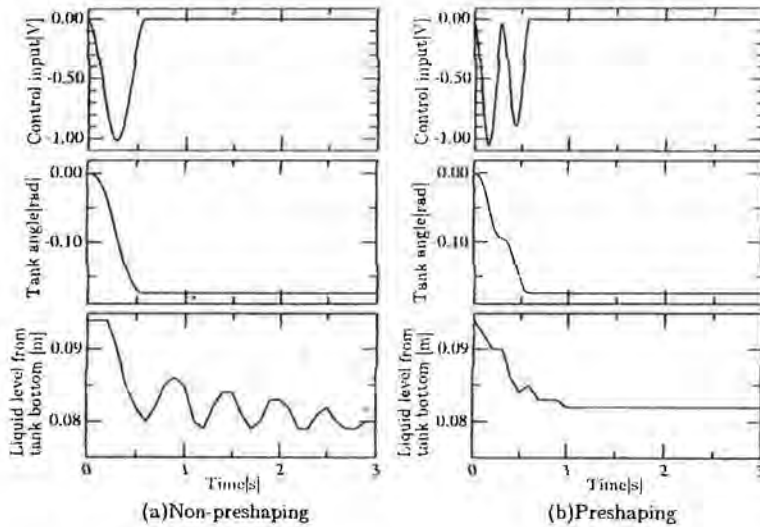


(b) Water level at right position(b) of tank

Gambar 26. Perbandingan Hasil Simulasi dengan Hasil Eksperimen Tanpa Preshaping.

Gambar 27 menunjukkan secara lengkap perbandingan hasil percobaan atau eksperimen antara tanpa preshaping dan dengan preshaping. Gambar 27 tersebut menunjukkan juga tentang kendali input dalam besaran tegangan listrik DC, kemudian sudut putar tanki dalam satuan radial dan bentuk gelombang permukaan air atau likuid dalam meter. Hasil kendali tersebut dapat dilihat bahwa nampak sangat berbeda antara bentuk gelombang permukaan tanpa preshaping dan dengan preshaping. Di mana dengan menggunakan

reshaping gelombang permukaan air pada saat putar alik tidak terlihat lagi pada saat setelah satu detik.



Gambar 27. Perbandingan Hasil Eksperimen Antara Tanpa Preshaping dan dengan Preshaping.

4. Kesimpulan

Dari hasil penelitian awal di atas dapat diambil beberapa kesimpulan, diantaranya adalah :

1. Telah ditunjukkan hasil simulasi komputer dan eksperimen mengenai perilaku fluida pada tungku yang berputar balik (mundur) pada proses pengecoran model tilting.
2. Pada proses tanpa pengendali terlihat bahwa gelombang permukaan fluida semakin besar jika ketinggian fluida bertambah.
3. Identifikasi bentuk gelombang permukaan telah dilakukan dengan menggunakan metoda SOLA-MAC dan model pendulum dengan hasil yang signifikan.
4. Pengendali Preshaping yang digunakan dapat menghilangkan atau mengurangi gelombang permukaan fluida pada saat putar balik.

Hasil simulasi antara tanpa dan dengan pengendali telah dibandingkan dengan variasi sudut putar dan ketinggian fluida dengan hasil yang signifikan.

Daftar Pustaka

- [1] E. Tabatabaei (1998), Automatic Pouring of Molten Metal by Utilizing Real Time Vision Based Control System, AFS Transaction, pp 641-644
- [2] Kazuhiko Terashima, Dadan Ramdan, Ken'ichi Yano, Takahiro Toda (2000), Modeling and Simulation of Fluid Flow in Ladle and Mold of Tilting-type Pouring in Casting Process, Paper, FLUCOME 2000, Sherbrooke, Canada, Vol.18, No. 5 pp. 728-736
- [3] Kazuhiko Terashima, Ken'ichi Yano (2001), Sloshing Analysis and Suppression Control of Tilting-type Automatic Pouring Machine, Control Engineering Practice 9, pp 607-620
- [4] Kazuhiko Terashima, Ken'ichi Yano (1999), Sloshing Suppression Control of Tilting-Type Automatic Pouring Machine, IFAC World Congress, Beijing, vol 0 pp 25-30
- [5] Kazuhiko Terashima and Tomochika Inagaki (1997), Feedforward and Feedback Control on Liquid Vibration and Rotary Angle in Tilting Motion of Automatic Pouring, Proc. Of 2nd Asian Control Conference, Soul (Korea), pp 375-378
- [6] K. Terashima, K. Yano, Y. Sugimoto (2005), Modeling and Robust Control of Liquid Level in a Sprue Cup for Batch-type Casting Pouring Processes, ISIJ Int. vol. 45 pp. 1165 - 1172
- [7] Michael F. Burditt, Paul M. Bralower (1989), Good Pouring Practice Contributor to Quality Castings, Modern Casting, pp 59-63

- Ugay Sugarmansyah, Dharmawan, Hartaya, Ruki Savianto, Irawan Santoso (2003), Analisis Difusi Inovasi Teknologi Pengecoran Logam di Industri Kecil dan Menengah Klaten-Ceper (Tinjauan dari Aspek Kebijakan), Prosiding Seminar Teknologi untuk Negeri, Volume V, hal. 130-139
- W. Lindsay (1983), Automatic Pouring and Metal Distribution Systems, Foundry Trade Journal, pp 151-165
- Y.Noda, K. Yano, K. Terashima (2003), Detection and Tracking Control to Unknown Moving Object Considering Sloshing-Suppression in Pouring Robot, Proceeding Intelligent Systems and Control vol. 388
- N. C. Singer, W. P. Seering (1990) Preshaping Command Inputs to Reduce System Vibration, Transaction of the ASME, Vol. 12 pp 76-82

DRAF ARTIKEL INTERNATIONAL CONFERENCE



The 13th International Conference on QIR

Conference Organizing Committee:

Yogyakarta
25-28 June 2013

Faculty of Engineering Universitas Indonesia
Dekanat Building 3rd floor
Jl. Depok, Depok 16424, Indonesia

P : +62 21 786 3503 / +62 21 9360 1031
F : +62 21 727 0050
E : qir@eng.ui.ac.id or qir.ftui@gmail.com
W : <http://qir.eng.ui.ac.id>

Dear Mr. Dadan Ramdan

We refer to your submission for the 13th International Conference on Quality in Research (QIR) 2013 details as follows:

Author(s) : Dadan Ramdan, Usman Harahap, Mohd Zulkify Abdullah
Title : Fluid Structure Interaction Simulation in IC Encapsulation Process
Symposium : International Symposium on Mechanical and Maritime Engineering 2013

We are pleased to inform you that your above-mentioned submission has been reviewed and accepted for the conference.

For inclusion in the Conference proceeding or designated journal we require that you submit the full paper of your manuscript by 4 January 2013. Submission is online through the website. Guidelines for manuscript preparation are available on the Conference website at: [//qir.eng.ui.ac.id](http://qir.eng.ui.ac.id) (in the menu "Download").

Should you require assistance on submitting the full paper, please contact the Conference Organizing Committee at qir.ftui@gmail.com or qir@eng.ui.ac.id.

We appreciate your participation and look forward to receiving your full paper and welcoming you to QIR 2013 in Yogyakarta, 25-28 June 2013!

Warm regards,

Prof. Dr. Bondan T. Sofyan
QIR 2013 Chairperson

Conference Organizing Committee :

Faculty of Engineering, University of Indonesia
Gedung Dekanat Lt. 3

Kampus UI, Depok 16424, Indonesia

Phone : +62 - 21 - 786 3503 / 98954696

Fax : +62 - 21 - 7270050

Email : qir@eng.ui.ac.id, qir.ftui@gmail.com

Website : <http://qir.eng.ui.ac.id>

Chair Person : Prof. Dr. Bondan T. Sofyan, bondan.sofyan@gmail.com

Secretariat : Herra Astasusmini, SE, herra.asta@gmail.com

Evelyn Octaviani Irawan, S.Si., M.Si., evelynarifman@gmail.com

Editorial Committee : Dr. Nyoman Suwartha, nsuwartha@yahoo.com

FLUID STRUCTURE INTERACTION SIMULATION IN IC ENCAPSULATION PROCESS

Dadan Ramdan^{*1,2}, Usman Harahap¹, Mohd Zulkifly Abdullah²

¹Fakultas Teknik, Universitas Medan Area, Medan, Indonesia

Jl. Kolam No.1 Medan, 30271, Medan, Indonesia

²School of Mechanical Engineering, Universiti Sains Malaysia, Penang, Malaysia

Engineering Campus, 14300 Nibong Tebal, Penang, Malaysia

e-mail: dadan@uma.ac.id, phone: +626185262307704

ABSTRACT

This paper presents three-dimensional (3D) fluid structure interaction (FSI) technique; using Mesh based Parallel Code Coupling Interface (MpCCI), for the visualization of wire sweep during encapsulation. The effect of number of mold cavity vents on the melt flow behavior, wire sweep, and pressure and stress distributions, are mainly studied. 3D model of mold and wire were designed using GAMBIT, simulated fluid flow and structural using FLUENT and ABAQUS. Three type of outlet vents mold cavity simple model namely Type D1, Type D2, and Type D3 were studied for analyzing of wire sweep deformation. Polymer rheology models with curing effect (Castro-Macosko model) have been used in the fluid flow model and Volume of Fluid (VOF) technique was applied for melt front tracking of the Epoxy Molding Compound (EMC). In the present study, Type D3 with minimum outlet vent area of mold cavity shows the highest deformation of wire and highest pressure distributions. The numerical results of wire deformation pattern are compared with the analytical method and found in good conformity. The strength of MpCCI software in handling FSI problems is proved to be excellent. This present work is expected to be reference and guide line for microelectronics industry.

Keywords: Fluid Structure Interaction, Wire Sweep, MpCCI, Castro-Macosko model, Epoxy Molding Compound (EMC), Volume of Fluid (VOF).

1. Introduction

Nowadays, the electronics industry could offer their product in a compact size but also give more functionality, better performance and lower cost. It is widely used in applications including computing, communications, biomedical, automotive, military, and aerospace. They must operate in varying temperature and humidity environments, exposure to moisture and mechanical stresses can be highly detrimental to electronic devices and may lead to device failures. Therefore, it is essential that the electronic devices be packaged for protection from their intended environment. The design, fabrication and encapsulation of the package has become increasingly complex and challenging owing to increased number of components and the need for miniaturization. The major objectives of electronics devices encapsulation are to protect of the device from mechanical and chemical hazards, and thermal path for heat dissipation.

Wire bonding is the one principal ways of connecting the silicon device to the lead frame in molded plastic packaging of encapsulation process. Typical wire bonding process uses gold or aluminum wire to connect the die pads with the leadframe. New packages methods, such as Flip Chip, use Lead-Tin solder bump as interconnection between die and substrates. The purpose of this process is to establish electrical interconnections for signal and power transfer.

During the encapsulation of microelectronic chips by the transfer molding process, the fragile gold wire bonds, which provide electrical connection from the chip to the leadframe, are subjected to flow stresses from the molding compound. The flow stress can cause the leadframe and the wire bond to permanently deform from their original geometry. If the

displacement of a bonding wire is too large, it can result in a package failure; either short circuits due to contact between adjacent wires or open circuit due to a broken wire. Even if the displacement is not so severe, wire deformation can result in deteriorated electrical and mechanical performance of the device, which will shorten its lifetime. Hence, it's important to minimize the wire-sweep deformation during encapsulation.

Wire sweep is a common defect in plastic integrated circuit (IC) packages and becomes more critical in high-density packages. It can occur from any one of a number of causes: high resin viscosity, high velocity, unbalanced flows in the cavities, void transport, late packing, and filler collision. A general routine to minimize wire sweep involves making changes in leadframe design, mold design, device layout, molding compound and process parameter based on experience and trial-and-error. These are expensive and time-consuming exercises. Thus, CAE simulation could be an efficient way to resolve the problem of wire sweep.

There many wire sweep simulation of previous study for predict of wire deformation using application software, but there are not using MpCCI.

2. Mathematical Model

In the simulation model, the encapsulation process material and air are assumed incompressible and the governing equations describing the fluid flow are conservation of mass, conservation of momentum and conservation of mass, conservation of momentum and conservation of energy. FLUENT normally solves the governing equations using Cartesian spatial coordinates and velocity components.

The conservation of mass or continuity equation is:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

Eq. (1) is the general form of the mass conservation equation and is valid for incompressible and compressible flows. Conservation of momentum in i^{th} direction in an inertial (non accelerating) reference frame is described by:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (2)$$

where, P is the static pressure, τ_{ij} is the viscous stress tensor and g_i and F_i are the gravitational acceleration and external body force in the i direction, respectively.

The energy equation cast in terms of h (static enthalpy) can be written as,

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i h) = \frac{\partial}{\partial x_j} (k \frac{\partial T}{\partial x_i}) + \eta \dot{\gamma} \quad (3)$$

where T is the temperature, k is the thermal conductivity, η is the viscosity and $\dot{\gamma}$ is the shear rate. The molding compound was assumed to be a generalized Newtonian fluid (GNF).

Several models have been used to predict the relationship between viscosity and the degree of polymerization. The Castro-Macosko model has been applied by Nguyen et al. [11] and is selected to use in this simulation. It can be described as follows:

$$\mu(T, \dot{\gamma}) = \frac{\mu_0(T)}{1 + \left(\frac{\mu_0(T)\dot{\gamma}}{\tau^*}\right)^{1-n}} \left(\frac{\alpha_g}{\alpha_g - \alpha}\right)^{C_1 + C_2\alpha} \quad (4)$$

where n is the power law index, μ_0 the zero shear rate viscosity, τ^* is the parameter that describes the transition region between zero shear rates and the power law region of the viscosity curve, $\dot{\gamma}$ is the shear rate, α is the conversion, α_g is the conversion at the gel point and C_1 and C_2 are fitting constants.

$$\mu_0(T) = B \exp\left(\frac{T_b}{T}\right) \quad (5)$$

B is an exponential-fitted constant and T_b is a temperature fitted-constant. In addition, Kamal curing kinetics is coupled together with Castro–Macosko model. This model predicts the rate of chemical conversion of the compound as follows:

$$\frac{d\alpha}{dt} = (k_1 + k_2\alpha^{m_1})(1 - \alpha)^{m_2} \quad (6)$$

$$k_1 = A_1 \exp\left(-\frac{E_1}{T}\right) \quad (7)$$

and

$$k_2 = A_2 \exp\left(-\frac{E_2}{T}\right) \quad (8)$$

where α is the conversion, A_1 and A_2 are the Arrhenius pre-exponential factors, E_1 and E_2 are the activation energies, m_1 and m_2 are the reaction orders and T is the absolute temperature.

The basic idea of the VOF scheme is to locate and evolve the distribution of, say, the liquid phase by assigning for each cell in the computational grid a scalar, F , which specifies the fraction of the cell's volume occupied by liquid. Thus, F takes the value of 1 ($F=1$) in cell which contains only resin, the value 0 ($F=0$) in cells which are void of resin, and a value between 0 and 1 ($0 < F < 1$) in "interface" cells or referred as the resin melt front. The equation of melt front over time is governed by the following transport equation:

$$\frac{\partial F}{\partial t} = \frac{\partial F}{\partial t} + \nabla \cdot (uF) = 0 \quad (9)$$

3. Simulation Model and Boundary Conditions

The volume of fluid (VOF) model in FLUENT 6.3.26 is utilized to simulate the process (Khor, 2009, 2010). Air vent outlet types are set at different parameters [8], as shown in Table 1. In the VOF model, a single set of momentum equations is shared by the fluids, and the volume fraction of each of the fluids in each computational cell is tracked throughout the domain [37]. Air and EMC (EME 6300HN Dynamic Modes)(L.Nguyen) are defined as the phases in the analysis. Implicit solution and time dependent formulation are applied for the volume fraction in every time step. The volume fraction of the encapsulation material is defined as one and zero value for air phase.

Besides, viscosity Castro Macosko model and VOF techniques are applied to track the melt front. The model is created by using GAMBIT software and average 3.500 tetrahedral

elements are generated for simulation. The mold chip package model used in the present study and its dimensions are shown in Figs. 1 and 2 respectively [8]. Three type of the air vent namely Type D1, Type D2, and Type D3 as illustrated in Fig. 3 are considered for simulation. The boundary and initial conditions are used in the calculation are as follows (Khor, 2009):

- (a) On Wall : $u = v = w = 0$; $T = T_w$, $\frac{\partial p}{\partial n} = 0$
- (b) On centre line : $\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\partial w}{\partial z} = \frac{\partial T}{\partial z} = 0$
- (c) On melt front : $p = 0$
- (d) At inlet : $u = u_{in}(x, y, z)$; $T = T_{in}$

Table 1: Specification of air vent

Type of Mold	Number of Air Vent	Area of Outlet Vent [mm ²]
D1	2	0.04
D2	1	0.02
D3	1	0.01

3.1 The computational domain and boundary conditions

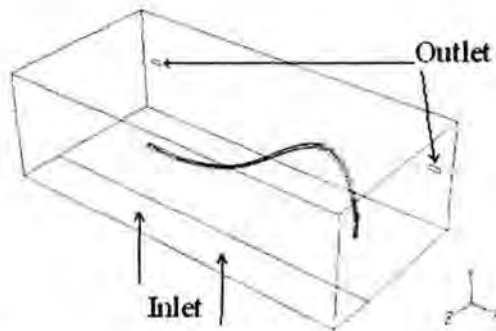


Fig.1. Mold and shape of wire

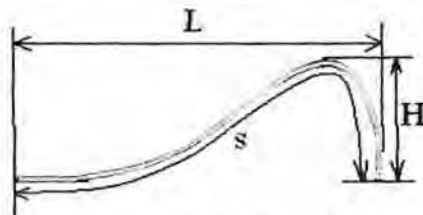
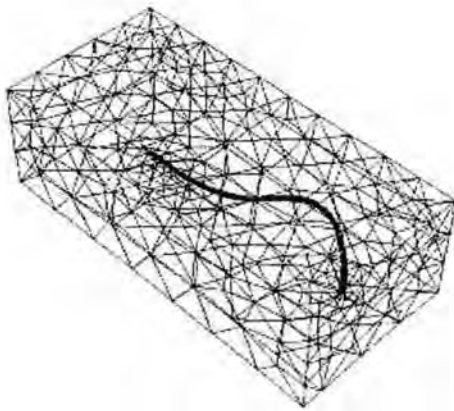


Fig.2 Curved profile of wire

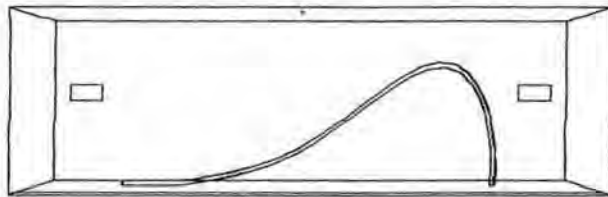


Mesh of cavity in Gambit

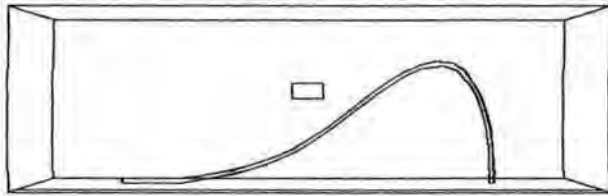


Mesh of wire in Abaqus

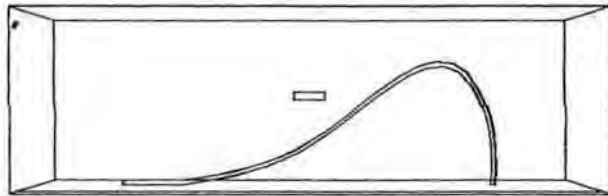
Fig. 3 Mesh profile of mold cavity and wire



Type D1



Type D2



Type D3

Fig. 4 Outlet air vent of mold cavity type

This research introduces a new three-dimensional computational technique for prediction of wire sweep in encapsulation process. Wire sweep is the displacement and deformation of wire loop during the encapsulant flow. The mold and shape of wire which design are shown in Fig. 1. The dimension of mold is $2.75 \times 1.5 \times 1$ mm.

The flow direction is normal to the undeformed wire axis, and the properties are approximately the same as those used in H. Q. Yang [7]: the straight wire has a length $L=2.2 \times 10^{-5}$ m, and a square cross section of 1 mil x 1 mil (i.e., 2.5×10^{-5} m x 2.5×10^{-5} m). A

square cross section was chosen for this case to simplify the derivation of the analytical solution. The elastic modulus is $E=17.73$ GPa. The mold compound properties are as follows: density, $\rho=19300$ kg/m³; viscosity, $\mu=30$ Pas; and reference temperature, $T=175^\circ\text{C}$. The wire profile is shown in Fig. 2, where H has the value 7.3×10^{-4} m.

3.2 Mesh based Parallel Coupling Code Interface (MpCCI)

MpCCI is a software library which enables the exchange of data defined on meshes of two or more simulation codes in the coupling region. Since the meshes need not match point by point, MpCCI performs an interpolation and, in case of parallel codes, keeps track of the distribution of the domains onto different processes. In this way, the intricate details of the data exchange are hidden behind the concise interface of MpCCI. As a consequence, the simulation codes themselves are changed only moderately when they are prepared for coupling via MpCCI (Fig. 5).

The design of MpCCI was driven by the demand for creating a general library for coupling of any simulation code to another. The basic concepts of MpCCI are:

- loose coupling between codes,
- minimal source code changes,
- minimal knowledge of the other codes,
- support for sequential, distributed, parallel execution, and
- portability.

The MpCCI library provides neighborhood search and various types of interpolation. All kinds of coupling areas such as lines, surfaces, and volumes are supported.

For the communication between the involved codes, MPI is used. For parallel simulation codes MpCCI guarantees the separation of the internal and external code communication. MpCCI offers easy to use concepts for implementation of different coupling algorithms. Additionally, MpCCI provides useful control facilities like convergence checks, debugging, and monitor facilities.

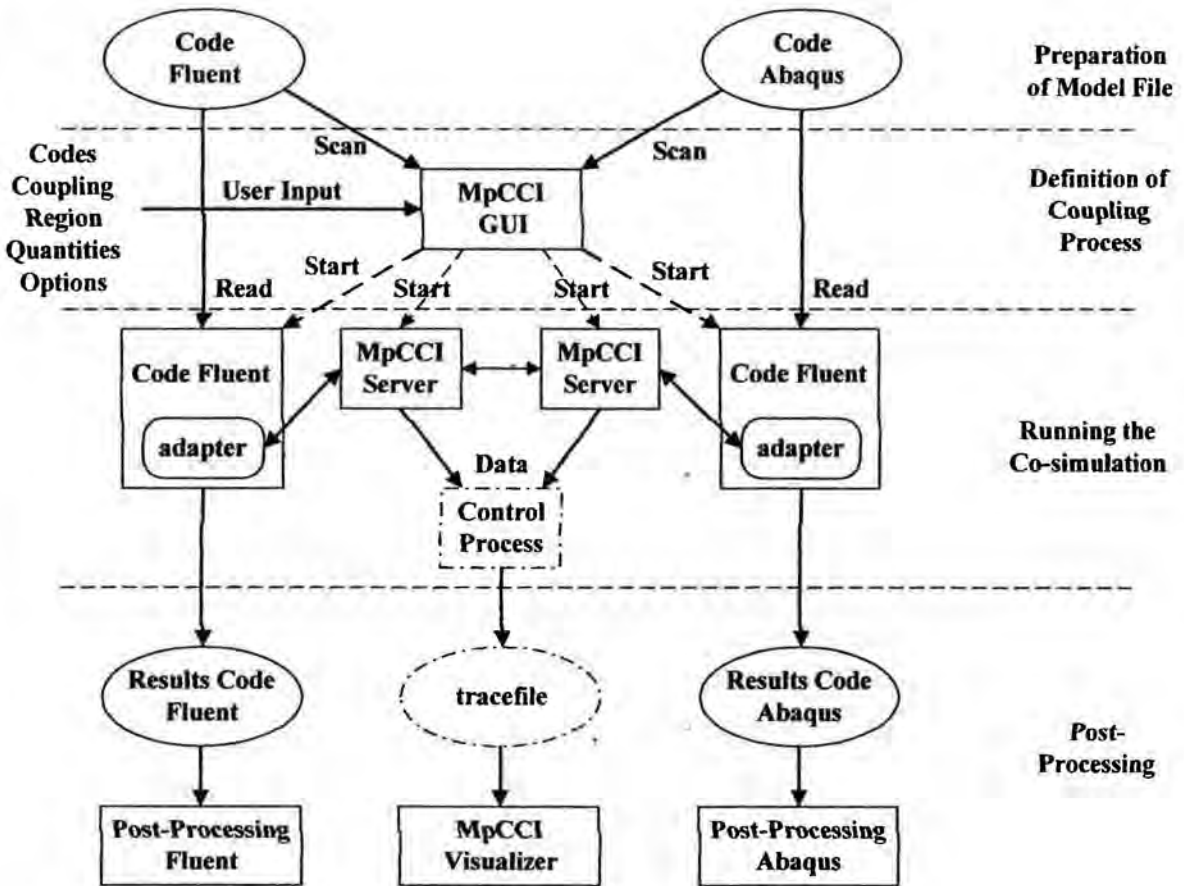


Fig. 5. FLUENT and ABAQUS coupling simulation process [MpCCI 3.1.0-1 Doc. 2009]

3.3 Wire Sweep Analysis

To calculate the drag force exerted on the wires by the resin flow, the value of velocities and viscosities have to be determined from the mold filling simulation. The effect of wire density on the resin flow is considered according to their occupied volume in the three simulation dimensional filling simulation. Then, the Lamb's model is utilized to calculate the drag force as follows [12]:

$$F = \frac{C_D \rho U^2 d}{2}$$

where F is the drag force per unit length, ρ is the fluid density, U is the undistributed upstream velocity, d is the wire diameter and C_D is the drag coefficient, which can be written as:

$$C_D = \frac{8\pi}{Re[2.002 - \ln(Re)]}$$

Where Re is the Reynold number, which can be defined as:

$$Re = \frac{\rho u d}{\eta}$$

where η is the fluid viscosity.

Wire sweep deflection δ can be written as:

$$\frac{\delta}{P} = \left(\frac{4H^3}{3GI_p} + \frac{L^3}{6EI} \right)$$

where P is the concentrated load, G is the shear Modulus of wire, E is the elastic Modulus of wire, I is the momentum of Inertia of wire, I_p is the polar momentum of Inertia of wire.

4. Results and discussion

The wire deformation pattern and the EMC position is shown in Fig.6, whereas Fig. 7 to describe of Von Misses and displacement of wire in ABAQUS for all types.


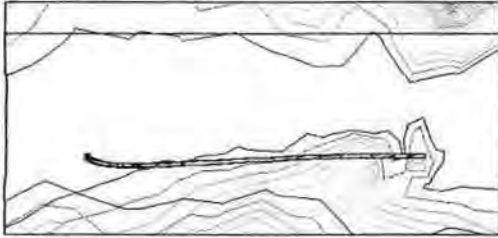
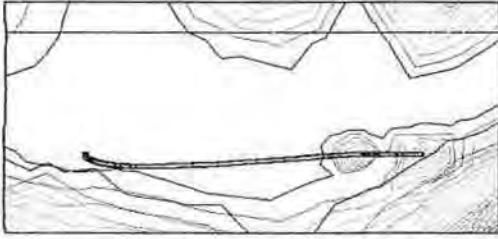
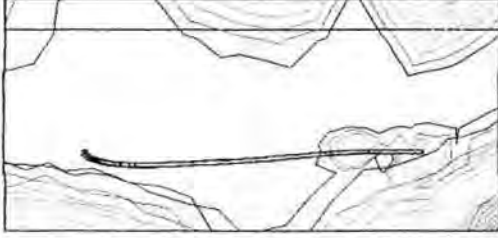
Type	Legend	Wire deform and EMC pattern at 15 [s]	EMC Volume in Cavity [m ³]
D1	 1.00e+00 9.66e-01 9.32e-01 8.98e-01 8.65e-01 8.31e-01 7.97e-01 7.63e-01 7.29e-01 6.95e-01 6.62e-01 6.28e-01 5.94e-01 5.60e-01 5.26e-01 4.92e-01 4.58e-01 4.25e-01 3.91e-01 3.57e-01 3.23e-01		98.4%
D2			96.8%
D3			97.2%

Fig. 6. FSI simulation results and percentage of EMC volume for all cases.

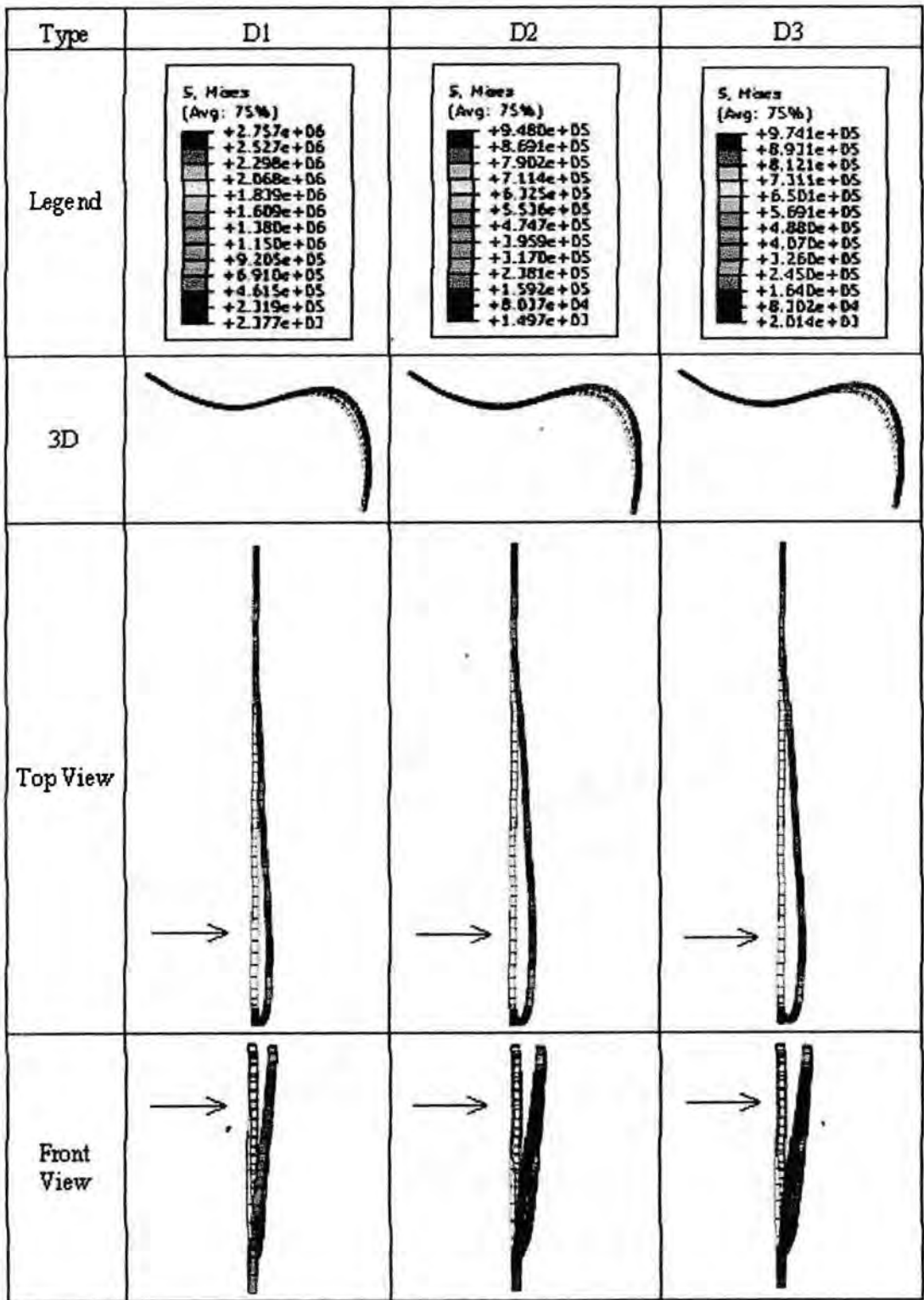


Fig. 7. Von Misses and wire deflection in ABAQUS for all cases.

The value of attached force and wire displacement of each type are shown in Fig. 8 and Fig. 9 respectively.

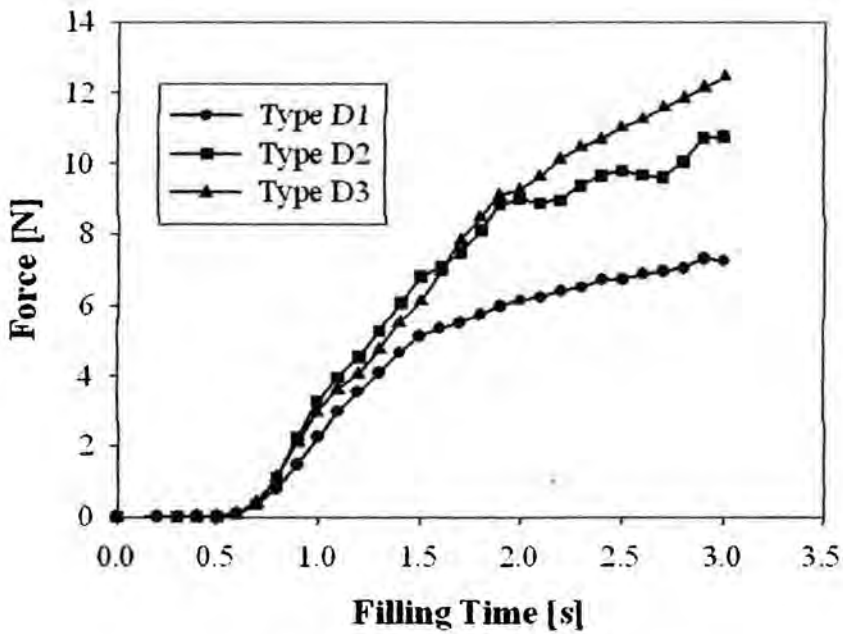


Fig. 8. Contact force of wire for all cases

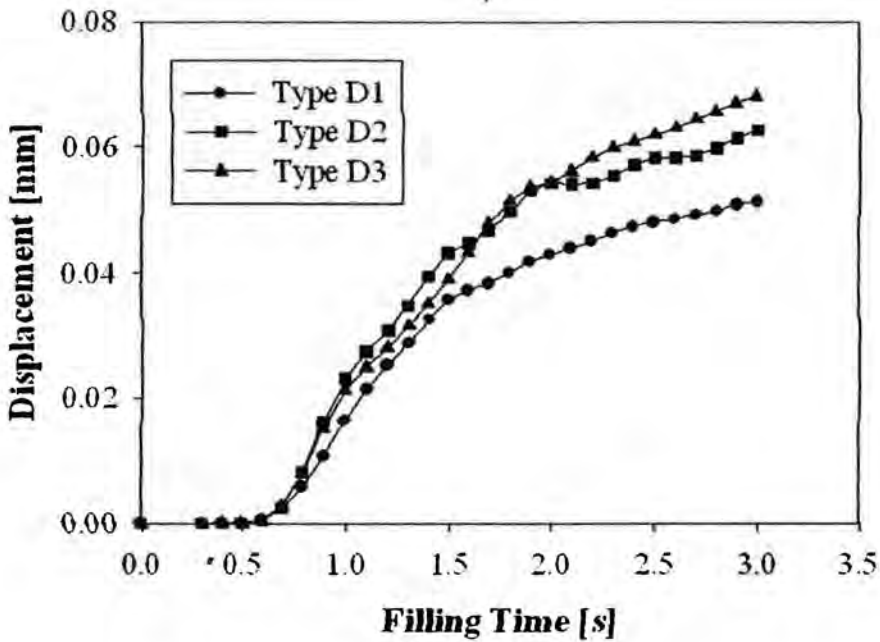


Fig. 9. Wire displacement profile of all cases

The comparison of wire displacement of simulation and analytical results of Type D1, D2 and D3 are shown in Fig. 10, Fig. 11 and Fig. 12 respectively. Fig. 13, described force attached of wire and displacement of wire for Type D3.

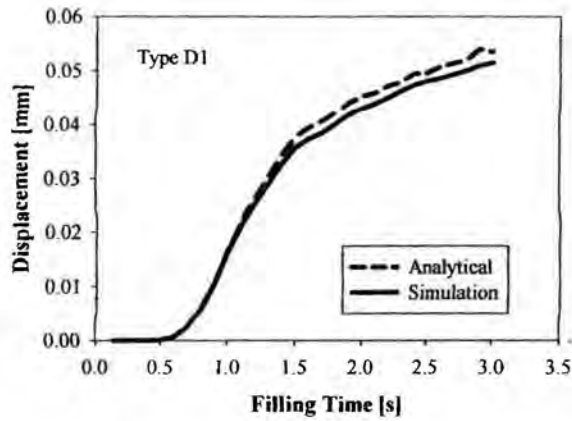


Fig. 10. Comparison wire displacement of simulation and analytical results of Type D1.

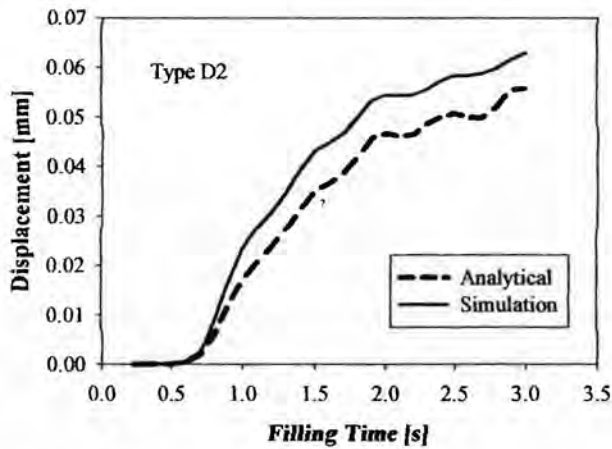


Fig. 11. Comparison wire displacement of simulation and analytical results of Type D2.

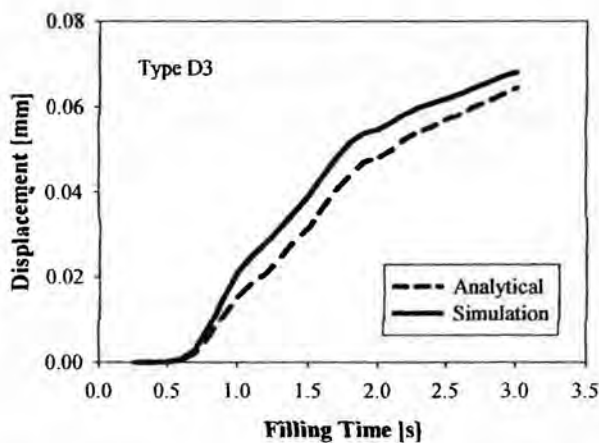
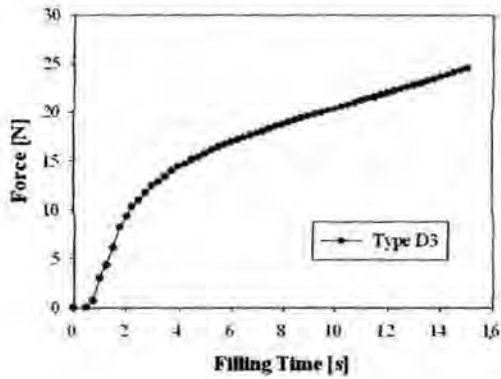
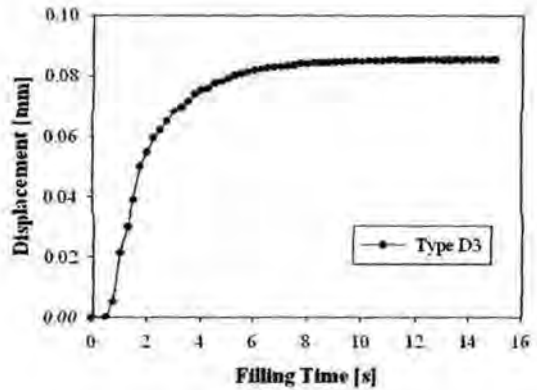


Fig. 12. Comparison wire displacement of simulation and analytical results of Type D3.

Displacement error of analytical and simulation results at 3 s filling time of Type D1, Type D2 and Type D3 are 3.7%, 9.8% and 5.4 % respectively.



(a)



(b)

Fig. 13. (a) Force attached wire for Type D3, (b) Displacement of wire for Type D3

5. Conclusion

The analysis of wire deformation of encapsulation process with the specific purpose of studying the effect of air vent type arrangement is presented. The parameter such as viscosity and cure effect that control the mould quality are also incorporated. Three different arrangement of air vent outlet of mould have been investigated. The size, position and type of air vent outlet give effect to encapsulation result in electronics packaging process.

The plastic packages encapsulation process was investigated numerically using Gambit and FLUENT and validated with the analytical results using FVM based simulation study. The three dimensional simple die was simulated to study the flow visualization in different number of outlet vent of the process. Besides, the different location of pressure of the package is also discussed and expected to be the references for wire sweep deformation design of the package. Thus, the strength of MpCCI software in handling wire sweep in encapsulation process is proved to be excellent.

Three type outlet air vent of mold were examined to distinguish the wire sweep deformation of wire bon and the results show that the methodology works very well. From simulation results, the D3 type of outlet air vent shows a higher wire sweep deformation value than the value of the D1 and D2 type of outlet air vent.

References

- [1] Jason M. Brand, Salvatore A. Ruggero, Amip J. Shah, 2008, Wiresweep Reduction via Direct Cavity Injection During Encapsulation of Stacked Chip-Scale Packages, *Journal of Electronics Packaging*, March, Vol. 130, pp. 011011-1 – 011011-6.
- [2] Huang-Kuang Kung, Yun-Ping Sun, Jeng-Nan Lee, Hung-Shyong Chen, 2008, A Method to Determine the Sweep Resistance of Wire Bonds for Microelectronic Packaging, *Microelectronic Engineering* 85, pp. 1902-1909.
- [3] Huang-Kuang Kung, Jeng-Nan Lee, Chin-Yu Wang, 2006, The Wire Sweep Analysis Based on the Evaluation of the Bending and Twisting Moments for Semiconductor Packaging, *Microelectronics Engineering* 83, pp. 1931-1939.
- [4] Masayasu Ishiko, Masanori Usui, Takashi Ohuchi, Mikio Shirai, 2006, Design Concept for Wire Bonding Reliability Improvement by Optimizing Position in Power devices, *Microelectronics Journal* 37, pp. 262 – 268.

- [5] Chien-Chang Pei, Sheng-Jye Hwang, 2005, Prediction of Wire Sweep During the Encapsulation of IC Packaging with Wire Density effect, *Journal of Electronic Packaging ASME* September 2005, Vol. 127, pp. 335-339.
- [6] W.R. Jong, Y.R. Chen, T.H. Kuo, 2005, Wire Density in CAE analysis of high pin-count IC packages: Simulation and verification, *International Communication in Heat and Mass Transfer* 2, pp. 1350-1359.
- [7] Y.F. Yao, B. Njoman, K.H. Chua, T.Y. Lin, 2005, New Encapsulation Development for Fine Pitch IC Devices, *Microelectronics Reliability* 45, pp. 1222-1229.
- [8] Jerry Su, Sheng-Jye Hwang, Francis Su, Shou-Kang Chen, 2003, An Efficient Solution for Wire Sweep Analysis in IC Packaging, *Journal of Electronic Packaging, ASME*, March 2003, Vol. 125, pp. 139-143.
- [9] Y.F. Yao, T.Y. Lin, K.H. Chua, 2003, Improving the Deflection of Wire Bond in Stacked Chip Scale Package (CSP), *Microelectronics Reliability* 43, pp. 2039-2045.
- [10] D.S. Liu, Y.C. Chao, C.H. Wang, 2004, Study of Wire Bonding Looping Formation in the Electronics Packaging Process Using the Three-Dimensional Finite Element Method, *Finite Elements in Analysis and Design*, 40, pp. 263-286.
- [11] H.-Q. Yang, S. Bayyuk, S. Mazumder, S. Lowry, A. Krishnan, A. Przekwas, L. Nguyen, 2001, Time-Accurate, 3-D Computation of Wire Sweep During Plastic Encapsulation of Electronic Components, *Journal of Pressure Vessel Technology, ASME*, November, Vol. 123, pp.501-509
- [12] Se-Jin Han and Yong-Jeong Huh, 2000, A Study of Wire Sweep During Encapsulation of Semiconductor Chips, *Journal of the Microelectronics & Packaging Society* Vol 7, No. 4, pp. 17-22.
- [13] Sen-Yeu Yang, Shin-Chang Jiang, and Wen-Shu Lu, 2000, Ribbed Package Geometry for Reducing Thermal Warpage and Wire Sweep During PBGA Encapsulation, *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, December 2000, Vol. 23, No. 4, pp. 700-706.