

**PENGENDALIAN ALIRAN *LIME STONE* PADA *WEIGHFEEDER*  
PT HOLCIM INTERNATIONAL TBK PABRIK CILACAP  
DENGAN *MODEL REFERENCE ADAPTIVE SYSTEM***

**SKRIPSI**

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan  
memperoleh gelar sarjana teknik



Disusun oleh :

**D. ADHITYA CHANDRA WILAGA**  
**0001060300 – 63**

DEPARTEMEN PENDIDIKAN NASIONAL  
UNIVERSITAS BRAWIJAYA  
FAKULTAS TEKNIK

2007

**PENGENDALIAN ALIRAN *LIME STONE* PADA *WEIGHFEEDER*  
PT HOLCIM INTERNATIONAL TBK PABRIK CILACAP  
DENGAN *MODEL REFERENCE ADAPTIVE SYSTEM***

**SKRIPSI**

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan  
memperoleh gelar sarjana teknik



Disusun oleh :

**D. ADHITYA CHANDRA WILAGA**  
0001060300 – 63

**DOSEN PEMBIMBING:**

**Dipl-Ing.Ir.Mochammad Rusli**  
NIP.131 653 473

**Fitriana Suhartati, ST, MT.**  
NIP. 132 206 527

**PENGENDALIAN ALIRAN *LIME STONE* PADA *WEIGHFEEDER*  
PT HOLCIM INTERNATIONAL TBK PABRIK CILACAP  
DENGAN *MODEL REFERENCE ADAPTIVE SYSTEM***

Disusun oleh :

**D. ADHITYA CHANDRA WILAGA**  
0001060300 – 63

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada tanggal  
12 Juli 2007

**DOSEN PENGUJI :**

**Rusmi Ambarwati, ST, MT**  
NIP. 132 258 188

**Ir. Purwanto, MT**  
NIP. 131 574 847

**Ir. Erni Yudaningtyas, MT**  
NIP. 131 879 035

**Goegoes Dwi Nusantoro, ST, MT**  
NIP. 132 318 316

**Mengetahui,**  
**Ketua Jurusan Teknik Elektro**

**Ir. Heru Nurwarsito, M.Kom**  
NIP. 131 879 033



*Teriring Ucapan Terima Kasih kepada :  
Papah dan Mamah tercinta*

## KATA PENGANTAR

Penulis menghaturkan puji dan ucapan syukur yang sebesar-besarnya ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa karena atas rahmat, berkat, cinta kasih dan karunia-Nya-lah maka penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.

Skripsi dengan judul ”Pengendalian Aliran *Lime Stone* Pada *Weighfeeder* PT Holcim International TBK Pabrik Cilacap Dengan *Model Reference Adaptive System*” ini disusun untuk memenuhi persyaratan kelulusan dalam menyelesaikan pendidikan dan memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Fakultas Teknik Jurusan Elektro Universitas Brawijaya Malang.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa dalam menyelesaikan skripsi ini banyak memperoleh dorongan serta bantuan dari berbagai pihak. Maka dalam kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih yang tak terhingga kepada:

1. Papah R.A.Y. Soeroto Soedjadi, Mamah MS. Sri Banowati, Mbak Iken, Mas Wahyu, dan saudara-saudari penulis yang merupakan rahmat dan karunia terbesar dari Tuhan Yesus Kristus, yang selalu memberikan motivasi, dorongan, semangat dan kasih sayang demi keberhasilan penulis.
2. Bapak Dipl. Ing. Ir. M. Rusli dan Ibu Fitriana Suhartati. ST, MT selaku dosen pembimbing atas kesabarannya dan petunjuknya dalam memberikan bimbingan, ide, koreksi, pengarahan, saran, dan masukan selama pengerjaan skripsi ini.
3. Bapak Dipl. Ing. Ir. M. Rusli selaku KKDK Program Studi Teknik Kontrol yang telah memberikan bantuan dan ide dalam pengerjaan proposal skripsi ini.
4. Bapak Ir. H. Heru Nurwarsito, M.Kom dan Bapak Rudy Yuwono, ST, Msc selaku Ketua Jurusan dan Sekretaris Jurusan yang telah memberi fasilitas dalam pengerjaan skripsi ini.
5. Bapak Soenaryo, Bapak Yuli, Bapak Edi, Bapak Slamet Fujianto dan Bapak Sapto dari Departemen Pemeliharaan Listrik dan Instrumentasi CC 1 PT Semen Cibinong Tbk Pabrik Cilacap yang telah memberikan bantuan, bimbingan, inspirasi dan motivasi yang sangat besar.
6. Segenap karyawan PT Holcim International Tbk Pabrik Cilacap yang telah memberikan bantuan sehingga proses pengerjaan skripsi ini dapat berjalan dengan baik.

7. Wijaya Kurniawan ST, Novrizal Aryaka Putra ST, dan Andi Kurniawan ST atas arahan dan masukan yang sangat berguna.
8. Seluruh dosen, karyawan dan segenap laboran Jurusan Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya yang tak dapat disebutkan satu persatu, terima kasih atas ilmu, bimbingan dan bantuannya selama penulis menjalani masa studi.
9. James Hetfield dan Kirk Hammet, untuk ketegarannya yang selalu menjadi inspirasi dan ketegaran bagi penulis.
10. Sahabat mayaku Quinta Stigma yang telah membantu penulis dalam melewati masa-masa yang sulit.
11. Seluruh rekan, sahabat, kolega dan pihak-pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu yang telah banyak sekali membantu penulis dalam proses penyelesaian skripsi ini.

Semoga segala bantuan yang telah diberikan kepada penulis menjadi suatu amal yang baik dan mendapat berkat dari Tuhan Yang Maha Pengasih.

Penulis menyadari bahwa pada skripsi ini masih terdapat banyak sekali kekurangan, oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran dari para pembaca. Semoga skripsi ini dapat membawa manfaat yang baik bagi penulis sendiri maupun bagi pembaca dan semoga Tuhan senantiasa membimbing kita ke jalan yang penuh kebaikan dan kebenaran.

Malang, 25 Juli 2007

D. Adhitya Chandra W

## DAFTAR ISI

|  |      |
|--|------|
| <b>KATA PENGANTAR</b>  | v    |
| <b>DAFTAR ISI</b>  | vii  |
| <b>DAFTAR GAMBAR</b>   | ix   |
| <b>DAFTAR TABEL</b>  | xii  |
| <b>DAFTAR SIMBOL</b>   | xiii |
| <b>ABSTRAK</b>   | xv   |
| <b>BAB I. PENDAHULUAN</b>                                      | 1    |
| 1.1. Latar Belakang  | 1    |
| 1.2. Rumusan Masalah   | 2    |
| 1.3. Batasan Masalah   | 3    |
| 1.4. Tujuan Penulisan  | 3    |
| 1.5. Sistematika Penulisan                                     | 3    |
| <b>BAB II. WEIGHFEEDER DAN MODEL REFERENCE ADAPTIVE SYSTEM</b> | 5    |
| 2.1. Pengendali Adaptif  | 5    |
| 2.2. <i>Model Reference Adaptive System (MRAS)</i>             | 7    |
| 2.3. <i>Weighfeeder Lime Stone</i>                             | 12   |
| 2.4. Motor DC  | 14   |
| 2.5. <i>Reducer dan Pulley Belt</i>                            | 16   |
| 2.6. <i>Torsi Load</i>   | 17   |
| <b>BAB III. METODOLOGI PENELITIAN</b>                          | 19   |
| 3.1. Alat Penelitian   | 19   |
| 3.2. Rancangan Penelitian                                      | 19   |
| 3.3. Cara Kerja Penelitian                                     | 20   |
| 3.2. Analisa   | 20   |
| <b>BAB IV. PEMODELAN SISTEM WEIGHFEEDER DAN DESAIN MRAS</b>    | 21   |
| 4.1. <i>Weighfeeder Lime Stone</i>                             | 21   |
| 4.2. Motor DC  | 22   |
| 4.3. <i>Reducer Dan Pulley</i>                                 | 25   |
| 4.4. <i>Belt Load</i>  | 27   |
| 4.5. <i>Torsi Load</i>   | 28   |
| 4.6. Penentuan Fungsi Alih <i>Plant Weighfeeder</i>            | 30   |
| 4.7. Penentuan Fungsi Alih Model Referensi                     | 36   |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 4.8.  | Penetapan Parameter Pengendali  | 39 |
| 4.9.  | Persamaan <i>Error</i>  | 41 |
| 4.10. | Penentuan Hukum Adaptasi  | 42 |
| 4.11. | Penentuan Daerah Kerja <i>Weighfeeder Lime Stone</i>                        | 45 |
| 4.12. | Simulasi Sistem Lup Terbuka   | 46 |
| 4.13. | Skema Simulasi <i>Weighfeeder Lime Stone</i> dengan MRAS pada MATLAB        | 48 |
| 4.14. | Alasan Penggunaan <i>Model Reference Adaptive System</i> sebagai pengendali | 50 |

## **BAB V. PENGUJIAN DAN ANALISIS SISTEM** 51

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 5.1.  | Simulasi <i>Model Reference Adaptive System</i> pada <i>Weighfeeder Lime Stone</i>   | 51 |
| 5.2.  | Hasil Simulasi Model Referensi   | 51 |
| 5.3.  | Hasil Simulasi Sistem Tanpa <i>Tuning</i> Parameter Pengendali dan Tanpa Gangguan  | 52 |
| 5.4.  | Hasil Simulasi Sistem Dengan <i>Tuning</i> Parameter Pengendali dan Tanpa Gangguan   | 54 |
| 5.5.  | Hasil Simulasi Sistem Tanpa <i>Tuning</i> Parameter Pengendali dengan Gangguan   | 56 |
| 5.6.  | Tabel Hasil Pengujian  | 59 |
| 5.7.  | Analisis Hasil Simulasi Sistem Tanpa <i>Tuning</i> Parameter Pengendali dan Tanpa Gangguan   | 59 |
| 5.8.  | Analisis Hasil Simulasi Sistem Dengan <i>Tuning</i> Parameter Pengendali dan Tanpa Gangguan  | 60 |
| 5.9.  | Analisis Hasil Simulasi Sistem Dengan <i>Tuning</i> Parameter Pengendali dan Dengan Gangguan   | 60 |
| 5.10. | Perbandingan Dengan Penggunaan Robust $H_{\infty}$ Sebagai Pengendali Pada <i>Weighfeeder Lime Stone</i> PT Holcim International Tbk | 60 |

## **BAB VI. KESIMPULAN DAN SARAN** 62

|      |            |    |
|------|------------|----|
| 6.1. | Kesimpulan | 62 |
| 6.2. | Saran      | 62 |

## **DAFTAR PUSTAKA** 63

## **LAMPIRAN** 64

## DAFTAR GAMBAR

|  |    |
|--|----|
| Gambar 2.1. <i>Gain Scheduling Controller</i>  | 5  |
| Gambar 2.2. <i>Self Tuning Controller</i>  | 6  |
| Gambar 2.3. <i>Model Reference Adaptive System</i>   | 8  |
| Gambar 2.4. Struktur Dasar Pengendali Adaptif  | 10 |
| Gambar 2.5. <i>Weighfeeder</i>   | 12 |
| Gambar 2.6. Distribusi <i>load</i> material di atas <i>belt</i>  | 13 |
| Gambar 2.7. Diagram Kerja Sistem <i>Weighfeeder</i>  | 14 |
| Gambar 2.8. Kawat berarus di dalam medan magnet  | 15 |
| Gambar 2.9. Hubungan roda-roda bersinggungan   | 16 |
| Gambar 2.10. Diagram Kerja <i>Belt Conveyor</i>  | 17 |
| Gambar 4.1. Diagram kerja <i>weighfeeder</i>   | 21 |
| Gambar 4.2. Motor DC penguat terpisah  | 22 |
| Gambar 4.3. Blok diagram Motor DC  | 23 |
| Gambar 4.4. Roda gigi yang saling bersinggungan  | 25 |
| Gambar 4.5. Blok <i>reducer</i>  | 24 |
| Gambar 4.6. <i>Conveyor</i>  | 26 |
| Gambar 4.7. Blok <i>reducer</i> dan <i>pulley</i>  | 25 |
| Gambar 4.8. Distribusi <i>Load</i> pada <i>Weigh Feeder</i>  | 27 |
| Gambar 4.9. Blok <i>belt load</i>  | 28 |
| Gambar 4.10. Blok Diagram <i>Weighfeeder</i>   | 30 |
| Gambar 4.11. Blok Diagram Motor DC Penguat Terpisah Pada <i>Weighfeeder</i>  | 30 |
| Gambar 4.12. Grafik Hubungan Tegangan Jangkar Sebagai Masukan dengan <i>Flow Limestone</i> Pada <i>Weighfeeder</i> | 34 |
| Gambar 4.13. Pemodelan <i>plant</i> dengan <i>Simulink</i>   | 35 |
| Gambar 4.14. Simulasi Motor DC Dengan <i>Simulink</i>  | 36 |
| Gambar 4.15. Respon Kecepatan Sudut Motor DC <i>Weighfeeder</i> dengan <i>Simulink</i>                             | 36 |
| Gambar 4.16. Respon Model Referensi Terhadap Masukan Unit Step   | 39 |
| Gambar 4.17. Struktur Dasar Pengendali Adaptif   | 40 |
| Gambar 4.18. Diagram blok generator sinyal 1 dan parameter $c_1$ pada $F_1$  | 40 |
| Gambar 4.19. Diagram blok generator sinyal 2 dan parameter $d_1$ pada $F_2$  | 41 |

|  |    |
|--|----|
| Gambar 4.20. Respon lup terbuka <i>plant</i> pada sistem <i>weighfeeder</i> dengan tegangan jangkar 120 volt, <i>load</i> 140 kg   | 46 |
| Gambar 4.21. Respon lup terbuka tegangan jangkar pada sistem <i>weighfeeder</i> dengan tegangan jangkar 120 volt, <i>load</i> 140 kg   | 47 |
| Gambar 4.22. Simulasi <i>weighfeeder lime stone</i> dengan MRAS pada <i>Simulink</i>   | 48 |
| Gambar 4.23. Kontroler MRAS pada <i>Simulink</i>   | 49 |
| Gambar 4.24. <i>Plant weighfeeder lime stone</i> pada <i>Simulink</i>  | 50 |
| Gambar 5.1. Respon model referensi pada sistem <i>weighfeeder</i> dengan <i>set point</i> 120 ton/jam, <i>load</i> 140 kg  | 51 |
| Gambar 5.2. Respon <i>plant</i> pada sistem <i>weighfeeder</i> dengan <i>set point</i> 120 ton/jam, <i>load</i> 140 kg. Tanpa <i>tuning</i> parameter pengendali, tanpa gangguan                         | 52 |
| Gambar 5.3. Sinyal kontrol pada sistem <i>weighfeeder</i> dengan <i>set point</i> 120 ton/jam, <i>load</i> 140 kg. Tanpa <i>tuning</i> parameter pengendali, tanpa gangguan                              | 52 |
| Gambar 5.4. Sinyal parameter pengendali <i>k0</i> pada sistem <i>weighfeeder</i> dengan <i>set point</i> 120 ton/jam, <i>load</i> 140 kg. Tanpa <i>tuning</i> parameter pengendali, dan tanpa gangguan   | 53 |
| Gambar 5.5. Sinyal parameter pengendali <i>c1</i> pada sistem <i>weighfeeder</i> dengan <i>set point</i> 120 ton/jam, <i>load</i> 140 kg. Tanpa <i>tuning</i> parameter pengendali, dan tanpa gangguan   | 53 |
| Gambar 5.6. Sinyal parameter pengendali <i>d1</i> pada sistem <i>weighfeeder</i> dengan <i>set point</i> 120 ton/jam, <i>load</i> 140 kg. Tanpa <i>tuning</i> parameter pengendali, dan tanpa gangguan   | 53 |
| Gambar 5.7. Respon <i>plant</i> pada sistem <i>weighfeeder</i> dengan <i>set point</i> 120 ton/jam, <i>load</i> 140 kg. Dengan <i>tuning</i> parameter pengendali, dan tanpa gangguan                    | 54 |
| Gambar 5.8. Sinyal kontrol pada sistem <i>weighfeeder</i> dengan <i>set point</i> 120 ton/jam, <i>load</i> 140 kg. Dengan <i>tuning</i> parameter pengendali, dan tanpa gangguan                         | 54 |
| Gambar 5.9. Sinyal parameter pengendali <i>k0</i> pada sistem <i>weighfeeder</i> dengan <i>set point</i> 120 ton/jam, <i>load</i> 140 kg. Dengan <i>tuning</i> parameter pengendali, dan tanpa gangguan  | 55 |
| Gambar 5.10. Sinyal parameter pengendali <i>c1</i> pada sistem <i>weighfeeder</i> dengan <i>set point</i> 120 ton/jam, <i>load</i> 140 kg. Dengan <i>tuning</i> parameter pengendali, dan tanpa gangguan | 55 |

- Gambar 5.11. Sinyal parameter pengendali d1 pada sistem *weighfeeder* dengan *set point* 120 ton/jam, *load* 140 kg. Dengan *tuning* parameter pengendali, dan tanpa gangguan 55
- Gambar 5.12. Sinyal gangguan berupa kenaikan *load lime stone* pada detik ke 20 sebesar 20 kg 56
- Gambar 5.13. Respon *plant* terhadap gangguan pada gambar 5.12 56
- Gambar 5.14. Respon gangguan berupa sinyal acak pada berat *lime stone* dengan kisaran 20 kg setiap 3 detik 57
- Gambar 5.15. Respon *plant* pada sistem *weighfeeder* dengan *set point* 120 ton/jam, *load* 140 kg. Dengan *tuning* parameter pengendali, dengan gangguan pada gambar 5.14 57
- Gambar 5.16. Sinyal kontrol pada sistem *weighfeeder* dengan *set point* 120 ton/jam, *load* 140 kg. Dengan *tuning* parameter pengendali, dengan gangguan pada gambar 5.14 57
- Gambar 5.17. Sinyal parameter pengendali k0 pada sistem *weighfeeder* dengan *set point* 120 ton/jam, *load* 140 kg. Dengan *tuning* parameter pengendali, dengan gangguan pada gambar 5.14 58
- Gambar 5.18. Sinyal parameter pengendali c1 pada sistem *weighfeeder* dengan *set point* 120 ton/jam, *load* 140 kg. Dengan *tuning* parameter pengendali, dengan gangguan pada gambar 5.14 58
- Gambar 5.19. Sinyal parameter pengendali d1 pada sistem *weighfeeder* dengan *set point* 120 ton/jam, *load* 140 kg. Dengan *tuning* parameter pengendali, dengan gangguan pada gambar 5.14 58
- Gambar 5.20. Pengujian sistem *weighfeeder* dengan Robust  $H_{\infty}$  pada *set point* sebesar 120 ton/jam, *load* 140 kg 61

## DAFTAR TABEL

|   |    |
|---|----|
| Tabel 4.1. Data <i>Weighfeeder Lime Stone</i>   | 21 |
| Tabel 4.2. Data Nominal Motor DC <i>Weighfeeder Lime Stone</i>  | 24 |
| Tabel 5.1. Data Pengujian <i>Weighfeeder Lime Stone</i> , tanpa gangguan Dengan<br><i>Set Point</i> 120 ton/jam, <i>Load</i> 140 kg Pada Variasi Nilai $k_0$ , $c_1$ , $d_1$  | 59 |
| Tabel 5.2. Data Pengujian <i>Weighfeeder Lime Stone</i> , tanpa gangguan<br>Dengan $k_0 = 0.01$ , $c_1 = 14$ , $d_1 = 14$   | 59 |
| Tabel 5.3. Data Pengujian <i>Weighfeeder Lime Stone</i> , dengan gangguan berupa variasi<br>perubahan beban secara acak sebesar 20 kg tiap 3 detik<br>Dengan $k_0 = 0.01$ , $c_1 = 14$ , $d_1 = 14$ (pada detik ke 100) | 59 |
| Tabel 5.4. Respon sistem pada pengendalian <i>plant</i> dengan Robust $H_\infty$  | 61 |
| Tabel 5.5. Respon sistem pada pengendalian <i>plant</i> dengan MRAS   | 61 |



## DAFTAR SIMBOL

|                |  |           |
|----------------|--|-----------|
| $y_m$          | = Respon keluaran model referensi  | (ton/jam) |
| $y_p$          | = Respon keluaran plant <i>weighfeeder</i>   | (ton/jam) |
| $e$            | = Selisih keluaran model referensi dengan <i>plant</i>                                   | (ton/jam) |
| $r$            | = Sinyal masukan sistem  | (volt)    |
| $u$            | = Sinyal kontrol   | (volt)    |
| $W_p$          | = Fungsi alih <i>plant</i>   |           |
| $W_m$          | = Fungsi alih model referensi  |           |
| $\theta$       | = Parameter pengendali   |           |
| $k_o$          | = Parameter pengendali   |           |
| $c_1$          | = Parameter pengendali   |           |
| $c_2$          | = Parameter pengendali   |           |
| $F_1$          | = Penguat pada pengendali MRAS   |           |
| $F_2$          | = Penguat pada pengendali MRAS   |           |
| $\omega^{(1)}$ | = Generator sinyal bantu   |           |
| $\omega^{(2)}$ | = Generator sinyal bantu   |           |
| $C(s)$         | = Polinomial dengan orde m-1 pada generator sinyal bantu $\omega^{(1)}$                  |           |
| $D(s)$         | = Polinomial dengan orde m-1 pada generator sinyal bantu $\omega^{(1)}$                  |           |
| $N(s)$         | = Polinomial dengan orde m pada generator sinyal bantu $\omega^{(1)}$ dan $\omega^{(2)}$ |           |
| $\theta^*$     | = Parameter pengendali pada saat $y_p$ sama dengan $y_m$                                 |           |
| $\phi$         | = Parameter <i>error</i>   |           |
| $P_{LS}$       | = <i>Flow rate</i> material  | (kg/s)    |
| $Q$            | = Berat material   | (kg)      |
| $q$            | = <i>Belt load</i>   | (kg/m)    |
| $L_b$          | = Panjang <i>belt</i>  | (m)       |
| $v$            | = Kecepatan  | (m/s)     |
| $F$            | = Gaya   | (N)       |
| $B$            | = Kerapatan fluks magnet   | (weber)   |
| $I$            | = Arus listrik   | (ampere)  |
| $l$            | = Panjang penghantar   | (meter)   |
| $T$            | = Torsi  | (Nm)      |
| $r$            | = Jari-jari  | (m)       |

|            |   |                                     |
|------------|---|-------------------------------------|
| $\omega_1$ | = Kecepatan sudut rotor                       | (rad/s)                             |
| $\omega_2$ | = Kecepatan sudut <i>reducer</i>              | (rad/s)                             |
| $a$        | = Percepatan                                  | (m/s <sup>2</sup> )                 |
| $\tau_p$   | = Torsi pada pulley                           | (Nm)                                |
| $X$        | = Rasio <i>reducer</i>                        |                                     |
| $T_L$      | = Torsi beban                                 | (Nm)                                |
| $V_f$      | = Sumber tegangan kumparan medan              | (volt)                              |
| $I_f$      | = Arus pada kumparan medan                    | (ampere)                            |
| $T_m$      | = Torsi elektromagnetik motor                 | (Nm)                                |
| $E_a$      | = Tegangan induksi                            | (volt)                              |
| $I_a$      | = Arus pada kumparan jangkar                  | (ampere)                            |
| $\omega_m$ | = Kecepatan sudut rotor                       | (rad/s)                             |
| $V_s$      | = Tegangan masukan                            | (volt)                              |
| $K_m$      | = Konstanta motor                             | (Nm/A)                              |
| $L_a$      | = Induktansi pada kumparan jangkar            | (henry)                             |
| $R_a$      | = Tahanan pada kumparan jangkar               | (ohm)                               |
| $J_m$      | = Momen inersia rotor                         | (kgm <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> ) |
| $T_L$      | = Torsi Beban mekanik yang terhubung ke rotor | (Nm)                                |
| $b$        | = Koefisien gesekan viskos                    | (Nms)                               |
| $Q$        | = Berat material <i>lime stone</i>            | (kg)                                |
| $P$        | = Daya  | (watt)                              |
| $Q$        | = Berat material                              | (kg)                                |
| $q$        | = <i>Belt load</i>                            | (kg/m)                              |
| $L_b$      | = Panjang <i>belt</i>                         | (m)                                 |
| $P_{LS}$   | = <i>Flow rate lime stone</i>                 | (kg/s)                              |

## ABSTRAK

D. Adhitya Chandra Wilaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Juni 2007, **Pengendalian Aliran Lime Stone Pada Weighfeeder PT Holcim International Tbk Pabrik Cilacap Dengan Model Reference Adaptive System**, Dosen Pembimbing : Dipl. Ing. Ir. M.Rusli dan Fitriana Suhartati, ST. MT.

Dalam industri semen, khususnya pada PT Holcim International Tbk *weighfeeder* memegang peranan yang penting dalam menentukan kualitas produk semen yang dihasilkan. Pada prinsipnya *weighfeeder lime stone* secara otomatis menentukan banyaknya *lime stone* yang akan diumpangkan ke proses selanjutnya. Oleh karena itu, agar laju aliran *lime stone* mendekati *setpoint* maka tegangan jangkar yang masuk ke motor DC sebagai *plant* harus dikendalikan. Pengendali yang dirancang untuk simulasi *plant* ini adalah pengendali adaptif dengan metode *Model Reference Adaptive System*.

Perancangan simulasi pengendalian dilakukan dengan program Matlab 7.0 dengan menentukan terlebih dahulu pemodelan dari sistem *weighfeeder*, dengan motor DC penguat terpisah sebagai aktuator. Dalam pengendalian dengan *Model References Adaptive Systems* (MRAS), keluaran dari sistem ditentukan melalui keluaran model referensi, dan nilai parameter pengendali disesuaikan besarnya dengan kesalahan (*error*) yang terjadi antara keluaran model referensi dengan keluaran sistem yang dikendalikan. Prinsip pengendalian dengan menggunakan MRAS adalah dengan membuat keluaran sistem yang dikendalikan sedemikian rupa sehingga bertingkah laku sama dengan tingkah laku referensi yang diberikan.

Gangguan yang diberikan pada sistem berupa berat *lime stone* yang berubah-ubah, yang mempengaruhi torsi dari motor DC. Simulasi sistem tanpa gangguan menghasilkan sistem dengan *error* sebesar 0% dan *settling time* 8,8 detik. Pada simulasi dengan gangguan berupa kenaikan berat *lime stone* sebesar 20 kg pada detik ke 20, menghasilkan sistem dengan *error* 0 %, dengan waktu pulih sebesar 3,4 detik. Sedangkan pada simulasi dengan gangguan berupa pemberian berat *lime stone* secara acak dengan keacakan kurang lebih 20 kg tiap 3 detik, didapatkan *error* sistem sebesar 0,25 % pada detik ke 100.



## BAB I

### PENDAHULUAN

#### 1.1. Latar Belakang

Semen merupakan bahan dasar bangunan yang berfungsi sebagai perekat bahan-bahan dasar bangunan lainnya. Semen merupakan campuran bahan-bahan kimia yang bila dicampur dengan air akan bereaksi dan berubah menjadi bahan yang mempunyai sifat perekat, sehingga bisa mengikat bahan-bahan lain menjadi suatu satuan massa padat dan mengeras. Karena daya rekat yang dimilikinya, semen mempunyai peranan penting dalam kerja konstruksi bangunan dan pembangunan sarana lainnya seperti : jalan, bendungan, perumahan, landasan pesawat terbang dan lain-lain.

PT. Semen Cibinong Tbk merupakan produsen semen swasta pertama di Indonesia yang terus berupaya meningkatkan kuantitas dan efektivitas produk yang dihasilkan guna memenuhi kebutuhan semen di dalam dan luar negeri. Pada tahun 2006 PT. Semen Cibinong Tbk telah melakukan pergantian nama perusahaan menjadi PT. Holcim International Tbk dalam rangka peningkatan efisiensi operasi dan *volume* penjualan guna mencapai masa depan yang lebih baik di Indonesia. Kapasitas produksi terpasang yang dicapai pada tahun 2005 mencapai 4,1 juta ton / tahun.

Salah satu proses dari pembuatan semen yang mempengaruhi kualitas semen pada PT. Holcim International, Tbk adalah proses pencampuran awal bahan baku semen pada *Raw Mill Departement*. Proses pencampuran ini terdiri dari empat bahan baku dasar yaitu batu kapur (*lime stone*), tanah liat (*clay*), pasir silika (*silica sand*) dan bijih besi (*iron ore*). Pengaturan aliran bahan baku ini dikerjakan oleh pengumpan yang disebut *weighfeeder*. *Weighfeeder* pada *Raw Mill Departement* ini menimbang dan mengalirkan material secara kontinu menuju bagian penggilingan dan pencampuran bahan baku. Pengaturan *flow rate* material bahan baku yang dilakukan pada *Raw Mill Departement* ini berperan sangat penting dalam menentukan kualitas semen yang akan dihasilkan.

*Weighfeeder* sebagai sarana pengendali aliran material meliputi proses penimbangan material dan proses pengaturan kecepatan *belt conveyor*. Proses penimbangan pada *weighfeeder* menggunakan *load cell* yang dipasang di bawah *conveyor* pada area penimbangan, pengaturan kecepatan *belt conveyor* dilakukan oleh

motor DC. Kedua proses tersebut mengendalikan keluaran berupa aliran material dengan satuan berat per satuan waktu (kg per detik atau ton per jam).

Ada beberapa macam jenis *weighfeeder* di dalam industri semen, perbedaan jenis *weighfeeder* ini menurut karakteristik material yang diangkut. Parameter *weighfeeder* berbeda untuk setiap material seperti *limestone* (batu gamping), *clay* (tanah liat), *silica sand* (pasir silika), *iron ore* (pasir besi), *clinker* (semen setengah jadi), *gypsum* dan batu bara.

Pada *weighfeeder lime stone*, gangguan yang timbul diakibatkan oleh sifat material *lime stone* itu sendiri. Bentuk fisik *lime stone* memiliki tekstur yang cenderung tidak lembut, yaitu berupa bongkahan dan gumpalan dengan diameter maksimum kurang lebih 9 cm (PT. Semen Cibinong, Tbk). Faktor cuaca dalam hal ini panas dan hujan juga menimbulkan gangguan tersendiri karena mengakibatkan *lime stone* menjadi tergumpal. Gumpalan *lime stone* ini mengakibatkan besar *load* yang ditimbang oleh *load cell* menjadi berubah-ubah.

Karena variabel *load* (berat *lime stone*) berubah-ubah, penyesuaian harus dilakukan sedemikian rupa sehingga keluaran sistem dapat terus dipertahankan sesuai dengan *set point* yang diinginkan. Pengendali adaptif merupakan pengendali yang mampu untuk melakukan penyesuaian terhadap perubahan *load* tersebut. Sistem kontrol adaptif adalah sistem kontrol yang secara kontinu dan otomatis mengukur karakteristik dinamis sistem, membandingkan dengan karakteristik dinamik yang kita inginkan, dan menggunakan selisihnya untuk mengubah parameter sistem yang dapat diatur atau membangkitkan sinyal penggerak yang dengan demikian kinerja optimalnya dapat dipertahankan tanpa menghiraukan perubahan lingkungannya (Ogata, 1997 : 421).

## 1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana mendesain kontroler adaptif menggunakan MRAS pada *weighfeeder lime stone* guna mengendalikan *flow* agar sesuai dengan *set point* yang diinginkan?
2. Bagaimana mendesain kontroler MRAS pada *weighfeeder lime stone* agar dapat mengatasi pengaruh dari gangguan berupa berat material *lime stone* yang selalu berubah-ubah?

### 1.3 Batasan Masalah

Untuk membatasi permasalahan agar tepat sesuai dengan tujuan, maka batasan masalah dalam skripsi ini adalah :

1. Parameter sistem berdasarkan data yang diperoleh dari PT. Semen Cibinong, Tbk Pabrik Cilacap.
2. Masukan tegangan pada aktuator motor DC dianggap sempurna dan tidak ada gangguan.
3. Gangguan dari sistem adalah berat *lime stone* yang berubah-ubah secara acak dalam batasan tertentu.
4. Sifat kimia dari *lime stone* dan bahan *plant* secara detail tidak dibahas lebih lanjut.
5. *Belt* pada *conveyor* dianggap tegar sehingga tidak ada ayunan pada saat material dari *hopper* jatuh ke *belt*.
6. Simulasi dilakukan dengan menggunakan paket program Matlab 7.

### 1.4 Tujuan Penulisan

Tujuan dari penyusunan skripsi ini adalah untuk memberikan alternatif lain dengan metode *Model Reference Adaptive System* pada sistem pengendalian aliran material *lime stone* di PT. Holcim International, Tbk.

### 1.5 Sistematika Penulisan

#### Bab I Pendahuluan

Membahas tentang latar belakang masalah, batasan masalah, rumusan masalah, tujuan penulisan, dan sistematika penulisan penelitian.

#### Bab II *Weighfeeder* dan *Model Reference Adaptive System*

Membahas dasar teori tentang *Model Reference Adaptive System*, prinsip kerja dari *weighfeeder*.

#### Bab III Metodologi Penelitian

Berisi mengenai metode penelitian yang dilakukan untuk mencapai sasaran penelitian.

**Bab IV Pemodelan Sistem *Weighfeeder* dan desain MRAS**

Metodologi awal untuk merepresentasikan *plant* di lapangan menjadi model matematika untuk dilanjutkan dalam tahapan analisis pengendalian dan perancangan pengendali MRAS.

**Bab V Analisis dan Simulasi Pengendalian**

Merupakan pembahasan inti dari skripsi yang akan membahas lebih lanjut dari metodologi yang dilakukan dari Bab III. Pada akhir analisis akan dilakukan simulasi pengendalian untuk mengetahui respon keluaran sistem kendali.

**Bab VI Kesimpulan dan Saran**

Bab ini berisi mengenai penarikan kesimpulan dan saran untuk pengembangan yang lebih baik.



## BAB II

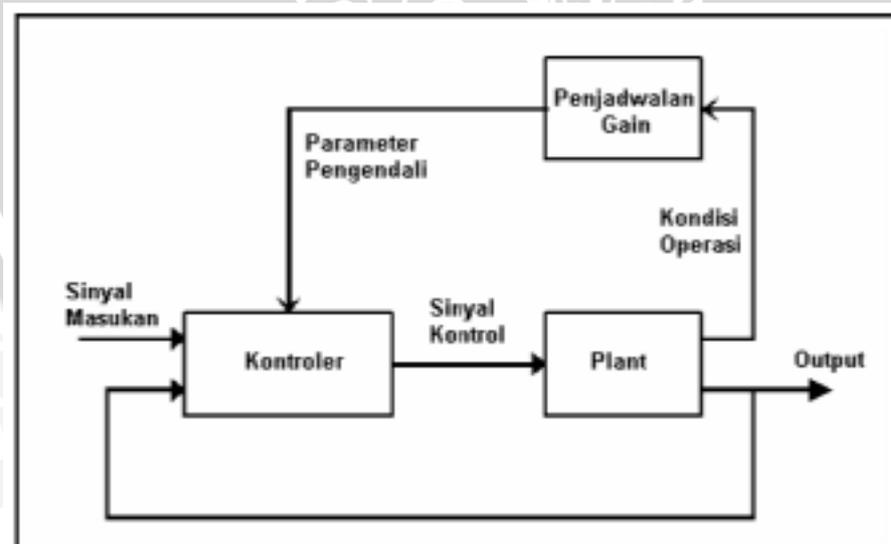
### ***WEIGHFEEDER DAN MODEL REFERENCE ADAPTIVE SYSTEM***

#### **2.1. Pengendali Adaptif**

Menurut Kamus Besar Bahasa Indonesia, adaptasi berarti penyesuaian terhadap lingkungan. Sedangkan pengendali adaptif dapat diartikan sebagai sistem pengendalian yang secara kontinu dan otomatis mengukur karakteristik dinamis sistem, membandingkan dengan karakteristik dinamik yang kita inginkan, dan menggunakan selisihnya untuk mengubah parameter sistem yang dapat diatur atau membangkitkan sinyal penggerak yang dengan demikian kinerja optimalnya dapat dipertahankan tanpa menghiraukan perubahan lingkungannya (Ogata, 1997 : 421).

Pendekatan yang digunakan dalam pengendalian adaptif dibagi menjadi tiga, yaitu (Sastry and Bodson, 1989 : 4):

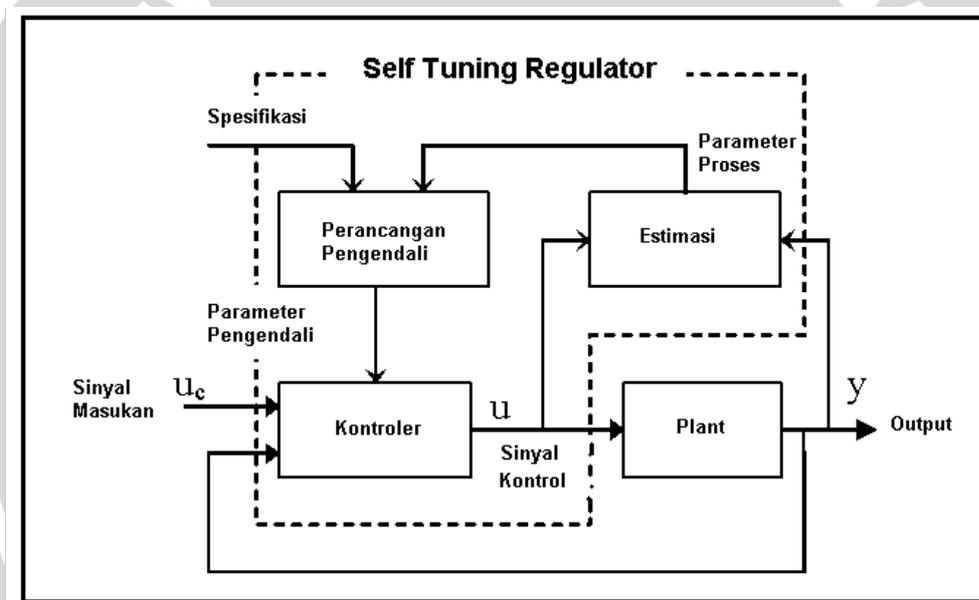
1. *Gain Scheduling*
2. *Self Tuning Controller*
3. *Model References Adaptive Systems*



**Gambar 2.1 . Gain Scheduling Controller**  
**Sumber :** Bodson, 1989 : 4 (dengan modifikasi)

Kendali adaptasi penjadwalan gain (*Gain Scheduling*) bekerja dengan mengadaptasi gain kendali sesuai dengan perubahan kondisi operasi suatu proses di

industri. Kendali ini juga telah digunakan pada kendali penerbangan dimana gain kendali berubah sesuai perubahan kondisi terbang. Pada pengendalian adaptif metode *Gain Scheduling*, ide pokoknya adalah untuk mendapatkan variabel pelengkap yang berhubungan dengan dinamika dari kondisi operasi. Kemudian dimungkinkan untuk mengkompensasi variasi parameter dari *plant* dengan merubah parameter pengendali dari kontroler sebagai fungsi dari variabel pelengkap (Sastry and Bodson, 1989 : 4). Pada pengendalian dengan metode *gain scheduling* diperlukan pengetahuan yang mendalam tentang *plant* yang akan dikendalikan karena parameter pengendali ditentukan langsung pada saat perancangan. (Sastry and Bodson, 1989 : 5). Pengendalian metode ini digunakan apabila keluaran *plant* dan variasi gangguannya dapat diprediksi.



**Gambar 2.2 . Self Tuning Controller**  
 Sumber : Bodson, 1989 : 4 (dengan modifikasi)

Metode *Self Tuning Controller* diajukan pertama kali oleh Kalman [1958] dan diklarifikasi oleh Astrom & Wittenmark [1973] (Sastry and Bodson, 1989 : 8). Pada proses adaptasi dengan *Self Tuning Controller* merupakan proses adaptasi tak langsung (Sastry and Bodson, 1989 : 9). Kendali adaptif *Self Tuning Controller* merupakan sistem kendali yang mempunyai parameter-parameter yang dapat ditala (dituning) sesuai dengan perubahan kondisi eksternal dan internal proses kendalian. *Self Tuning Controller* mengestimasi parameter-parameter proses kendalian secara *on-line*. Dari data hasil estimasi tersebut, parameter kontroler ditala sedemikian hingga karakteristik proses kendalian menjadi lebih baik. Bila parameter proses berubah akibat perubahan

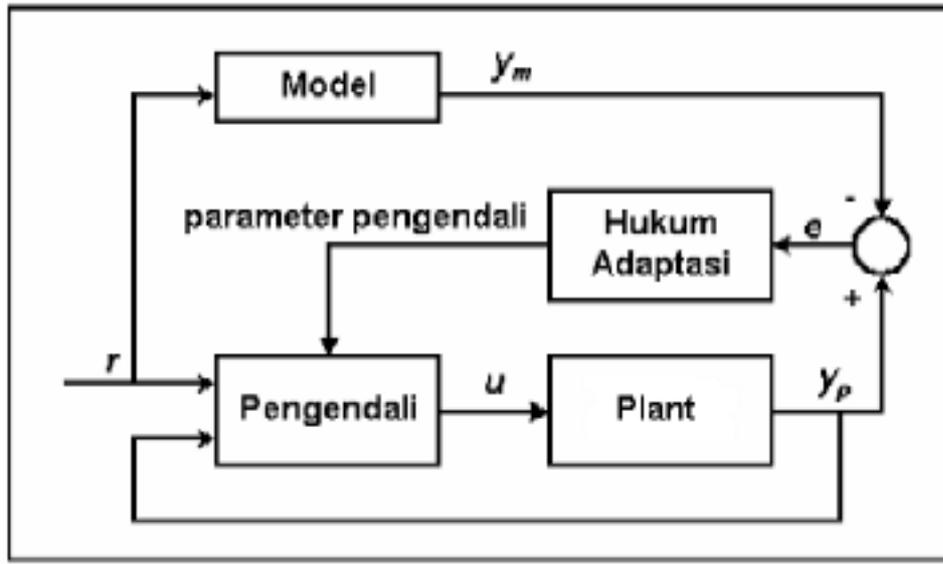
lingkungan operasi plant, maka estimasi parameter juga berubah secara on-line, sehingga parameter kontroler ditala kembali sedemikian hingga karakteristik yang diharapkan dapat dipertahankan. Sedangkan proses adaptasi dalam pengendalian adaptif metode *Model References Adaptive Systems* adalah proses adaptasi langsung tanpa terlebih dahulu melakukan estimasi parameter *plant*. Jadi proses adaptasi pada pengendalian metode *Self Tuning Controller* lebih kompleks untuk dilakukan daripada pengendalian adaptif metode *Model References Adaptive Systems* karena harus terlebih dahulu melakukan estimasi parameter *plant* (Sastry and Bodson, 1989 : 9).

Pada skripsi ini, keluaran *plant weighfeeder* dan gangguannya tidak selalu dapat diprediksi karena akses pengambilan data terbatas disebabkan oleh rutinitas dan aktifitas pabrik yang tidak dapat dihentikan sewaktu-waktu. Di samping itu proses adaptasi tak langsung tidak dapat dilakukan karena parameter *plant* tidak dapat diestimasi seluruhnya. Oleh karena itu, maka dalam penulisan skripsi ini digunakan pengendalian adaptif dengan metode *Model Reference Adaptive System*.

## 2.2. *Model Reference Adaptive System (MRAS)*

*Model References Adaptive Systems* (MRAS) pertama kali diperkenalkan oleh Whitacker pada tahun 1958. Dalam *Model References Adaptive Systems* (MRAS), respon dari sistem yang diinginkan ditentukan oleh model referensi (Butler, 1992 : 4).

Prinsip pengendalian dengan menggunakan MRAS adalah dengan membuat keluaran sistem yang dikendalikan sedemikian rupa sehingga bertingkah laku sama dengan tingkah laku referensi yang diberikan. Diagram blok MRAS diberikan pada Gambar 2.3. Dalam pengendalian ini, keluaran model referensi digunakan untuk menentukan keluaran sistem agar sesuai dengan yang diinginkan. Model referensi menghasilkan sinyal keluaran  $y_m$ , selanjutnya sinyal keluaran referensi ini dibandingkan dengan sinyal keluaran *plant*  $y_p$ . Bila terdapat adanya *error*  $e$  diantara  $y_m$  dengan  $y_p$ , maka parameter yang ada pada pengendali akan berubah melalui hukum adaptasi. Melalui hukum ini, pengendali akan menghasilkan sinyal kendali  $u$  yang selanjutnya menjadi masukan bagi *plant* sehingga keluaran  $y_p$  akan sesuai dengan keluaran model referensi (Butler, 1992 : 4).



Gambar 2.3 . Model Reference Adaptive System  
 Sumber : Butler, 1992 : 4 (dengan modifikasi)

**a. Plant**

Plant merupakan obyek fisik yang dikontrol (Ogata, 1995 : 2). Plant dinyatakan dalam fungsi alih. Fungsi alih didefinisikan sebagai perbandingan antara transformasi Laplace fungsi keluaran terhadap transformasi fungsi masukan (Ogata, 1995 : 72). Fungsi alih plant  $W_p(s)$  dengan keluaran  $Y_p(t)$  terhadap sinyal kendali  $u(t)$  dapat dinyatakan dengan Persamaan (2-1), (Saubhayana, 1999 : 1 pada Mariani, 2005 : 6) :

$$W_p(s) = \frac{Y_p(s)}{u(s)} \tag{2.1}$$

**b. Model Referensi**

Model Referensi  $W_m(s)$  menyatakan fungsi alih keluaran  $Y_m(t)$  terhadap sinyal masukan  $r(t)$ . Fungsi alih  $W_m(s)$  dinyatakan sebagai berikut (Saubhayana, 1999 : 2 pada Mariani, 2005 : 6) :

$$W_m(s) = \frac{Y_m(s)}{r(s)} \tag{2.2}$$

Dalam menentukan model referensi, derajat relatif model referensi lebih besar atau sama dengan derajat relatif dari *plant* (Narendra and Annaswamy, 1989 : 183). Derajat relatif adalah selisih antara orde polinomial *pole* dan *zero* (Butler, 1992: 54).

### c. Pengendali Adaptif

Struktur pengendali adaptif terdiri dari penguat  $k_o$ ,  $F_1$  dan  $F_2$ .  $F_1$  terdiri atas generator sinyal bantu dan parameter  $c_i$ , dengan  $i = 1, 2, \dots, n$ .  $F_2$  terdiri atas generator sinyal bantu dan parameter  $d_j$ , dengan  $j = 1, 2, \dots, n$ . Generator sinyal yang ada pada  $F_1$  dan  $F_2$  masing-masing menghasilkan sinyal  $\omega^{(1)}$  dan  $\omega^{(2)}$  (Mariani, 2005 : 7).

Sinyal kendali  $u(t)$  terdiri atas sinyal masukan  $r$  dan sinyal  $\omega^{(1)}$  dan  $\omega^{(2)}$ , sehingga dapat dituliskan sebagai berikut (Mariani, 2005 : 8) :

$$u(t) = (r(t), \omega^{(1)}(t), \omega^{(2)}(t)) \quad (2.3)$$

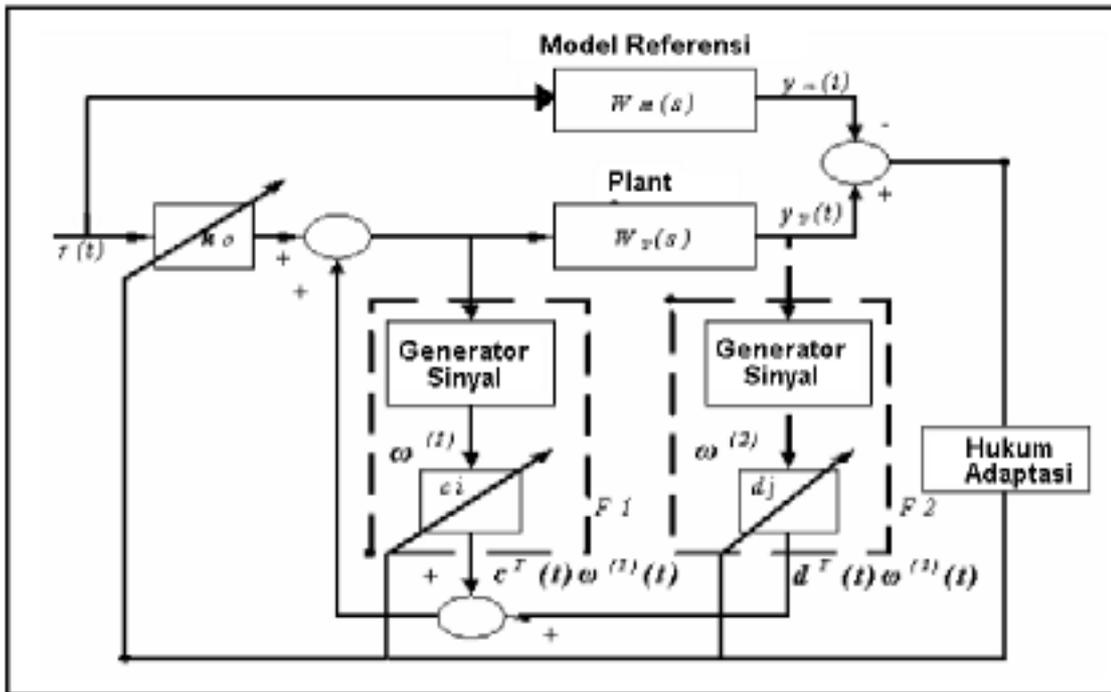
Parameter-parameter yang terdapat dalam pengendali didefinisikan sebagai parameter pengendali yang dituliskan sebagai berikut (Mariani, 2005 : 8):

$$\theta(t) = [k_o(t), c_1(t), \dots, c_n(t), d_1(t), \dots, d_n(t)] \quad (2.4)$$

Sinyal kendali  $u$  yang dihasilkan oleh pengendali adalah (Narendra and Annaswamy, 1989 : 194) :

$$u(t) = \theta^T(t) \cdot \omega(t) \\ u(t) = k_o(t) r(t) + c(t) \omega^{(1)}(t) + d(t) \omega^{(2)}(t) \quad (2.5)$$

Sinyal kendali  $u(t)$  ini digunakan sebagai masukan bagi *plant*.



**Gambar 2.4** Struktur dasar pengendali adaptif  
**Sumber :** Mariani, 2005: 8

$F_1$  dan  $F_2$  masing-masing terdiri atas generator sinyal bantu dan parameter pengendali yang dinyatakan dengan fungsi alih  $W_1$  dan  $W_2$ , yaitu (Butler, 1997 : 64) :

$$\begin{aligned}
 W_1(s) &= \frac{C(s)}{N(s)} \\
 W_2(s) &= \frac{D(s)}{N(s)}
 \end{aligned}
 \tag{2.6}$$

Polinomial  $N(s)$  pada generator sinyal bantu harus terdiri dari *zero* dari model referensi (Sastry and Bodson, 1993 :105).  $N(s)$  adalah polinomial dengan orde  $m$  atau  $n-1$ ,  $C(s)$  dan  $D(s)$  adalah polinomial dengan orde  $n-2$  (Narendra and Annaswamy, 1989 : 194).

#### d. Persamaan Error

Pada pengendalian dengan MRAS, proses adaptasi akan berhenti apabila keluaran *plant* sama dengan keluaran model referensi. Dengan kata lain *error* sama dengan 0. Sedangkan persamaan *error* antara model referensi dengan *plant* adalah (Mariani, 2005 : 37) :

$$e_1(t) = y_p(t) - y_m(t) \quad (2.7)$$

Parameter pengendali  $\theta$  dalam MRAS adalah (Butler, 1997 :54) :

$$\theta(t) = \theta^*(t) + \phi(t) \quad (2.8)$$

dengan  $\theta^*$  adalah parameter pengendali pada saat fungsi alih *plant* dan pengendalinya sesuai dengan fungsi alih model referensi.  $\phi(t)$  adalah parameter *error* (Sasthy and Bodson, 1993 :105).  $\theta$  adalah parameter pengendali yang akan disesuaikan menjadi  $\theta^*$ .  $\theta$  dapat dinyatakan sebagai :

$$\theta(t) = [k_o(t), c_n(t), d_n(t)] \quad (2.9)$$

Proses adaptasi berlangsung dengan mengubah  $\theta(t)$  menjadi  $\theta^*$ . Pengubahan ini dilakukan agar keluaran *plant* bergerak menuju ke keluaran yang diinginkan sesuai dengan keluaran model referensi.

#### e. Hukum Adaptasi

Proses adaptasi terjadi melalui adanya perubahan nilai pada parameter pengendali. Proses ini berlangsung selama terjadi *error* antara keluaran *plant*  $y_p(t)$  dan keluaran model referensi  $y_m(t)$  (Mariani, 2005 : 11). Proses adaptasi dilakukan berdasarkan hukum adaptasi (Narendra and Annaswamy, 1989 : 195).

Dalam hukum adaptasi parameter pengendali diubah sedemikian hingga *error* antara  $y_p(t)$  dengan  $y_m(t)$  sama dengan 0 . Penyesuaian parameter pengendali menghasilkan sinyal kendali  $u(t)$  sebagai masukan bagi *plant*, sehingga keluaran

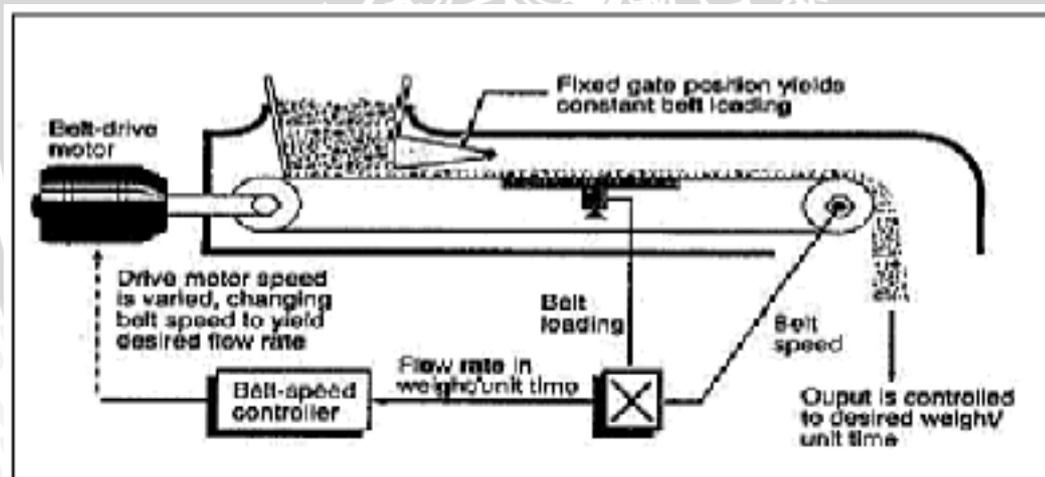
$y_p(t)$  akan mendekati  $y_m(t)$  pada saat  $t$  menuju tak hingga. Hal tersebut dapat dituliskan sebagai berikut (Narendra and Annaswamy, 1989 : 195):

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |y_p(t) - y_m(t)| = 0 \quad (2.10)$$

Pada MRAS, *error* antara  $y_p$  dengan  $y_m$  digunakan secara langsung untuk mengubah nilai parameter pengendali. Proses adaptasi pada MRAS ini disebut dengan adaptasi langsung. (Sastry and Bodson, 1993 : 110).

### 2.3. *Weighfeeder Lime Stone*

*Weighfeeder* adalah alat pengumpan material curah padat secara kontinyu dengan peralatan mekanis kontrol yang digunakan untuk menimbang dan mengendalikan laju aliran material sesuai dengan setting aliran yang ditentukan (PT. Semen Cibinong, Tbk). Desainnya dibuat untuk membawa material kasar seperti batu, pasir, kerikil, logam dan material kasar lainnya.



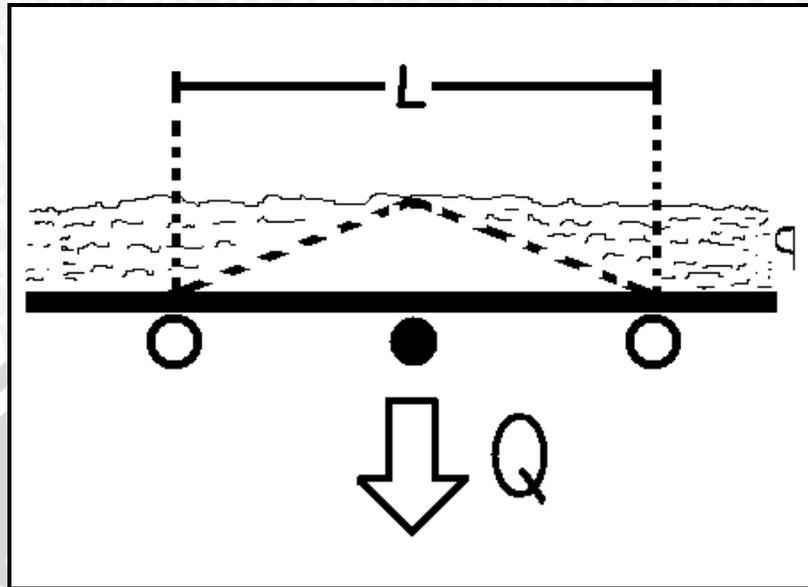
Gambar 2.5 *Weighfeeder*

Sumber : PT. Semen Cibinong, Tbk

Fungsi *weighfeeder* dalam proses produksi semen sangat penting karena berkaitan dengan komposisi bahan baku semen dan kapasitas produksi yang direncanakan. Komposisi yang tepat atau sesuai yang diinginkan akan menghasilkan kualitas produksi yang baik sesuai dengan yang diharapkan.

*Weighfeeder* melayani penimbangan dan pengumpanan secara kontinyu material padat bahan baku semen. Pada *weighfeeder lime stone*, yang ditimbang dan diumpan adalah material *lime stone* atau batu kapur. Sensor berupa *weighbridge (load cell)* yang

terpasang dibawah *belt conveyor* akan mengirim informasi berupa *belt load* yang menunjukkan tingkat beban material yang berada di atas *belt* area penimbangan.



**Gambar 2.6** Distribusi *load* material di atas *belt*.

Sumber : PT. Semen Cibinong, Tbk

*Belt load*  $q$  diperoleh dari hasil bagi berat material yang ditimbang oleh *load cell*  $Q$  dengan jarak antara dua *idler*  $L_b$  (panjang platform penimbangan).

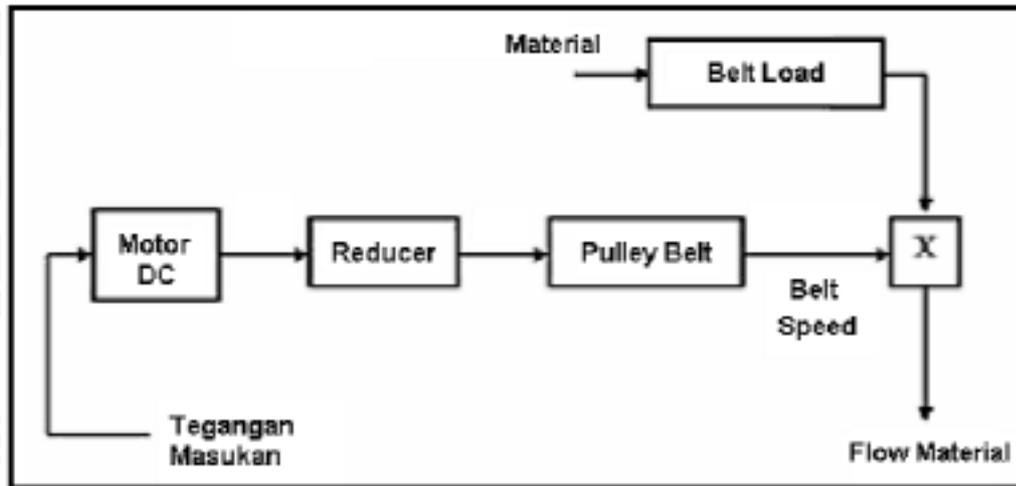
$$q = \frac{Q}{\frac{1}{2}L_b} \text{ (kg/m)} \quad \text{(PT. Semen Cibinong, Tbk)} \quad (2.11)$$

Kontroler yang digunakan untuk menentukan *flow rate material*,  $P_{LS}$  (kg/det), yaitu dengan mengalikan *belt load*,  $q$  (kg/m), dan kecepatan *belt*,  $v$  (m/det). Dengan *loop* tertutup, kontroler mempertahankan nilai *flow rate material* ini sesuai dengan *set point* dengan mengubah-ubah laju *belt* berdasarkan beban material pada *belt*.

$$P_{LS} = q \cdot v \text{ (kg/s)} \quad \text{(PT. Semen Cibinong, Tbk)} \quad (2.12)$$

atau dalam satuan ton/jam,

$$P_{LS} = 3,6 \cdot q \cdot v \text{ (ton/jam)}$$



Gambar 2.7 Diagram Kerja Sistem *Weighfeeder*.

Sumber : Perancangan

Dari Gambar 2.7, diperlihatkan bagaimana sistem *weighfeeder* bekerja, dengan komponen-komponen penyusunnya. Berikut ini akan dijelaskan lebih lanjut mengenai komponen-komponen penyusun dari sistem *weighfeeder*.

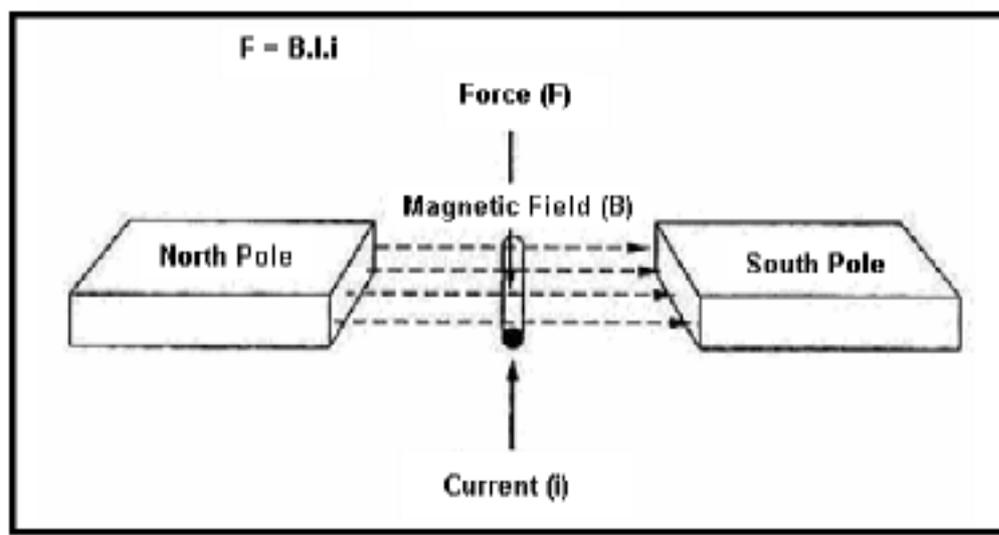
#### 2.4. Motor DC

Motor DC adalah suatu alat yang mengubah tenaga listrik menjadi tenaga mekanik dengan sumber arus searah sebagai *supply* energi listriknya. Motor listrik banyak kita jumpai pemakaiannya untuk keperluan industri sebagai mesin penggerak peralatan – peralatan misalnya : *screw*, *conveyor*, *fan*, *compresor*, dan sebagainya. Dengan demikian peran motor listrik pada industri mempunyai arti yang sangat penting (PT. Semen Cibinong, Tbk : 1). Mesin-mesin DC pada umumnya jauh lebih sesuai untuk keperluan yang kecepatannya dapat diatur dibandingkan dengan mesin-mesin AC. Alasan utama mengapa pilihan jatuh pada mesin DC dalam industri modern adalah karena kecepatan kerja motor-motor DC mudah diatur dalam suatu rentang kecepatan yang lebar, di samping banyaknya metoda yang dapat digunakan (Achmanto, 1992:263). Motor DC yang digunakan pada *weighfeeder lime stone* dalam skripsi ini adalah motor DC penguat terpisah dengan pengaturan tegangan jangkar dan tegangan medan konstan.

Prinsip dasar dari motor arus searah adalah, jika sebuah kawat berarus diletakkan antara kutub magnet (U-S), maka pada kawat tersebut akan bekerja suatu gaya yang menggerakkan kawat itu. Besarnya gaya yang bekerja pada kawat tersebut adalah (Kurniawan, 2006: 24):

$$F = B.I.l \quad (\text{N}) \quad (2.13)$$

dengan  $B$  adalah kerapatan fluks magnet dalam satuan weber,  $I$  adalah arus listrik yang mengalir dalam satuan ampere, dan  $l$  adalah panjang penghantar dalam satuan meter.



Gambar 2.8 : Kawat berarus di dalam medan magnet  
Sumber : Nise, 1993 : 811

Persamaan (2.13) merupakan prinsip dasar sebuah motor, dimana terjadinya proses perubahan energi listrik ( $I$ ) menjadi gaya mekanik ( $F$ ). Jika motor mempunyai jari-jari rotor  $r$ , maka gaya akan menimbulkan torsi sebesar (Kurniawan, 2006: 24):

$$T = F r = B I L r \quad (\text{Nm}) \quad (2.14)$$

Pada saat gaya  $F$  dibangkitkan, konduktor akan bergerak di dalam medan magnet dan akan menimbulkan gaya gerak listrik (ggl),  $E_a$ , yang merupakan reaksi lawan terhadap tegangan penyebabnya. Persamaannya adalah (Bueche, 1985:228) :

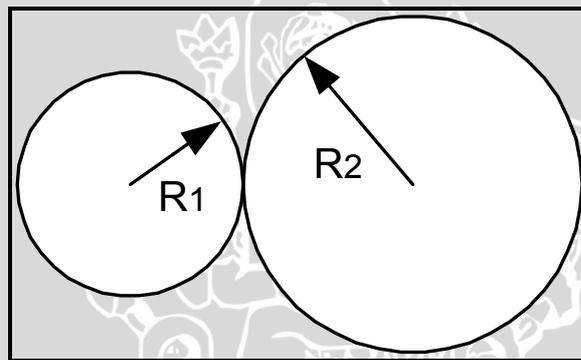
$$E_a = B L v \quad (\text{volt}) \quad (2.15)$$

Dengan  $v$  adalah kecepatan gerak. Untuk gerak berputar dengan jari-jari rotor  $r$  persamaannya adalah (Kurniawan, 2006: 25):

$$E_a = B L \omega r \quad (\text{volt}) \quad (2.16)$$

### 2.5. Reducer dan Pulley Belt

Roda gigi adalah suatu blok mekanik yang berfungsi untuk menurunkan putaran motor. Hubungan mekanik di dalamnya di buat sedemikian rupa sehingga keluaran roda gigi ini adalah putaran yang lebih rendah dari masukan putarannya. Salah satu hubungan mekanik untuk menurunkan putaran motor adalah dengan hubungan roda gigi.



Gambar 2.9 : Hubungan roda-roda bersinggungan  
Sumber : Kuo, 1995

Hubungan antara torsi  $T$ , kecepatan sudut  $\omega$ , jumlah gigi  $N$ , dan jari-jari  $R$  pada Gambar 2.7 adalah sebagai berikut (Kuo, 1995:104)

1. Jumlah gigi pada permukaan roda gigi sebanding dengan jari-jari  $R_1$  dan  $R_2$ , yaitu

$$R_1 N_2 = R_2 N_1 \quad (2.17)$$

2. Kecepatan sudut tiap roda gigi memiliki hubungan,

$$\omega_1 R_1 = \omega_2 R_2 \quad (2.18)$$

3. Usaha yang dilakukan tiap roda gigi adalah sama dengan asumsi tidak ada rugi-rugi.

$$T_1 \omega_1 = \omega_2 T_2 \quad (2.19)$$

Dari pernyataan tersebut, maka dapat dirumuskan bahwa

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{R_1}{R_2} \quad (2.20)$$

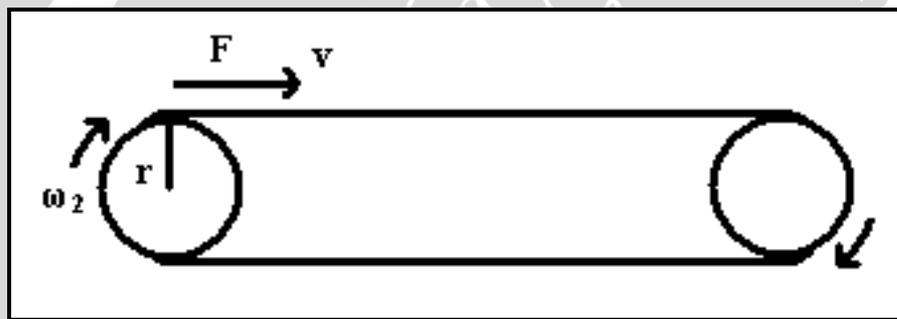
*Pulley* adalah silinder penggerak *belt* pada *conveyor*, kecepatan translasi *belt* berbanding lurus dengan kecepatan sudut *pulley* dan dirumuskan sebagai berikut (Putra, 2006)

$$\omega_2 r = v \quad (2.21)$$

dengan

$r$  = jari-jari *pulley* = 0,1542 m (PT. Semen Cibinong, Tbk)

$v$  = kecepatan translasi *belt*



Gambar 2.10 Diagram Kerja *Belt Conveyor*  
Sumber : PT. Semen Cibinong, Tbk

## 2.6. Torsi Load

*Belt* bergerak dengan kecepatan translasi  $v$ , disebabkan karena adanya torsi pada *pulley*. Gaya translasi yang dibutuhkan untuk menggerakkan *belt* dengan material yang dibawanya berbanding lurus dengan massa dan percepatannya, yaitu (Sears and Zemansky, 1994 : 94)

$$F = m \cdot a \quad (\text{N}) \quad (2.22)$$

dengan

$F$  = gaya translasi yang diperlukan untuk menggerakkan massa  $m$  (N)

$m$  = massa benda yang bergerak (material + *belt*) (kg)

$a$  = percepatan gerak translasi pada *belt* ( $\text{m/s}^2$ )

Gaya translasi terhadap torsi pada *pulley* dirumuskan sebagai berikut (Putra, 2006 : 29)

$$T_p = F \cdot r \text{ (N.m)} \quad (2-23)$$

dengan  $\tau_p$  adalah torsi pada *pulley* dengan jari-jari  $r$ . Substitusi persamaan (2-22) ke persamaan (2-23),

$$T_p = m \cdot a \cdot r \text{ (N.m)} \quad (2-24)$$

Dan torsi yang dibutuhkan motor untuk menggerakkan belt dengan material dengan rasio *reducer* atau torsi load ( $T_L$ ) adalah (Putra, 2006 : 30)

$$T_L = X \cdot m \cdot a \cdot r \text{ (N.m)} \quad (2-25)$$

dengan  $X$  adalah rasio *reducer*.



## BAB III

### METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1. Alat Penelitian

Alat yang digunakan dalam pengerjaan skripsi ini adalah:

1. Seperangkat *personal computer* dengan prosesor AMD Sempron 2200+ dan sistem operasi Windows XP.
2. Program MATLAB versi 7.0.

#### 3.2 Rancangan Penelitian

Untuk memudahkan dalam penyusunan skripsi ini, tahap pengerjaan dibagi menjadi :

##### 1. Pengumpulan data

Pengumpulan data dilakukan melalui kajian literatur yang meliputi data mengenai sistem *weighfeeder* beserta bahasan yang berkaitan dengan sistem tersebut antara lain, motor DC, *belt load*, *reducer*, *pulley belt*, dan torsi *load*.

##### 2. Pemodelan matematika sistem

Pemodelan yang dilakukan meliputi:

- a. Penentuan fungsi alih dari *plant*.
- b. Penentuan model referensi.
- c. Penentuan persamaan *error*.
- d. Penentuan hukum adaptasi.
- e. Penentuan dan tuning awal parameter pengendali.

##### 3. Simulasi model matematik

Simulasi model matematik dilakukan dengan menggunakan fasilitas-fasilitas yang ada pada *software* MATLAB versi 7.0.

##### 4. Analisa respon sistem dinamik

Analisis respon sistem dilakukan dengan mengamati respon sistem pengendalian menggunakan metode MRAS.

### 3.3. Cara Kerja Penelitian

Dalam menjawab masalah-masalah dalam suatu penelitian dan pembuktian tentang ditolak dan diterimanya hipotesis yang diajukan, diperlukan cara-cara ilmiah berupa ketentuan-ketentuan yang sudah baku dan dapat dipertanggungjawabkan kebenarannya. Berdasarkan hal tersebut, cara kerja penelitian ini dilakukan dengan tahap-tahap sebagai berikut:

1. Studi literatur, yaitu membaca, mempelajari dan memahami literatur tentang sistem pengendali MRAS dan plant yaitu sistem weighfeeder serta literatur lain yang erat kaitannya dan menunjang perancangan sistem tersebut.
2. Merancang sistem *weighfeeder* dengan pengendali MRAS.
3. Membuat simulasi program dalam MATLAB dan menganalisa hasil simulasinya.

### 3.4 Analisa

Proses analisa dilakukan melalui tiga tahap, yaitu:

1. Penurunan model matematis

Pada tahap ini dilakukan perhitungan dan penurunan model matematis.

2. Analisa Pemodelan

Analisis pemodelan dimaksudkan untuk menjelaskan metode-metode yang digunakan dalam perancangan sistem *weighfeeder*.

3. Visualisasi

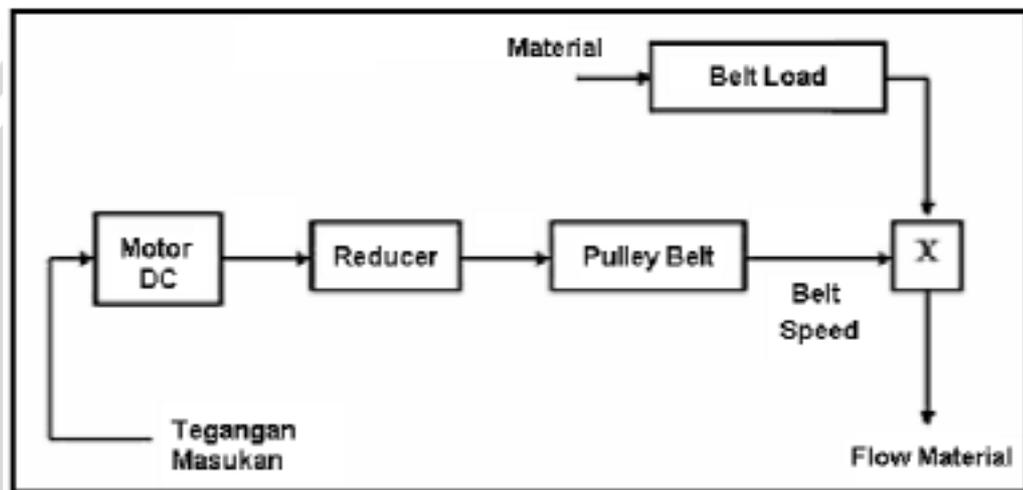
Kedua proses tadi berguna untuk mengetahui perilaku dari sistem, yang diperoleh dalam bentuk respon terhadap masukan dengan melihat tampilan grafik setelah melakukan simulasi pemodelan matematis pada *software* MATLAB 7.0.

## BAB IV

### PEMODELAN SISTEM *WEIGHFEEDER* DAN DESAIN MRAS

#### 4.1 *Weighfeeder Lime Stone*

*Weighfeeder lime stone* pada PT Holcim International. Tbk terdiri dari beberapa bagian yang dicari modelnya agar bisa disimulasikan. Gambar 4.1 menunjukkan diagram kerja dari *weighfeeder*.



Gambar 4.1 Diagram kerja *weighfeeder*  
Sumber : Perancangan

Data fisik *weighfeeder* untuk material *lime stone* pada PT Holcim International. Tbk ditunjukkan pada Tabel 4.1

Tabel 4.1 Data *Weighfeeder Lime Stone*

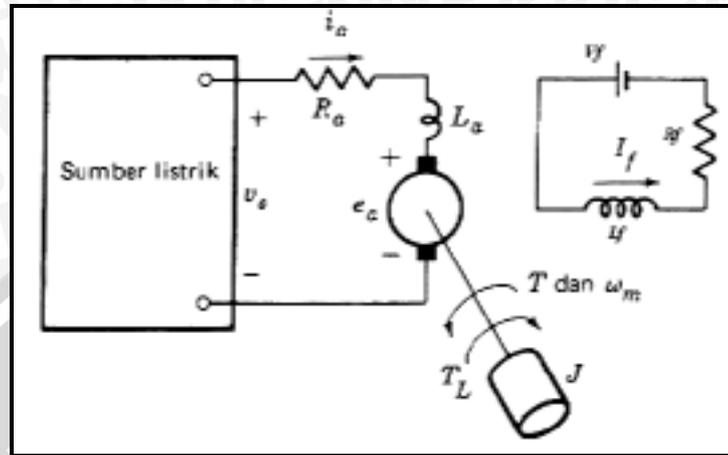
| <i>Reducer Ratio</i> | $r_{pulley} (m)$ | <i>Kapasitas Load Cell</i> |
|----------------------|------------------|----------------------------|
| 1:99,04              | 0,1542           | 30 kg - 700 kg             |

Sumber : PT. Semen Cibinong, Tbk

Masing-masing bagian dari Gambar 4.1 dijelaskan lebih lanjut dalam perhitungan fungsi matematis di bawah ini.

## 4.2 Motor DC

Motor DC pada *weighfeeder* adalah motor DC penguat terpisah, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.2



Gambar 4.2 Motor DC penguat terpisah  
Sumber : Achmanto, 1992:277

Persamaan torsi elektromagnetik  $T_m$  dan tegangan induksi  $E_a$  adalah (Chapman, 1985:206 pada Kurniawan, 2006 : 30),

$$T_m = K_m \cdot i_a \quad (\text{Nm}) \quad (4.1)$$

$$i_a = \frac{T_m}{K_m} \quad (\text{A}) \quad (4.2)$$

$$E_a = K_m \cdot \omega_m \quad (\text{V}) \quad (4.3)$$

Torsi yang dibangkitkan pada rotor digunakan untuk menggerakkan beban mekanik. Tegangan induksi  $e_a$  yang berlawanan arah dengan tegangan masukan disebut juga tegangan lawan atau tegangan balik (*counter emf*).

Persamaan dinamis Motor DC tergantung pada beban mekanik yang dihubungkan ke batang rotor. Torsi yang dibangkitkan oleh motor adalah (Kuo, 1987: 103),

$$T_m = J_m \frac{d\omega_m}{dt} + b\omega_m + T_L \quad (4.4)$$

dengan

$J_m$  = momen inersia rotor =  $0,02 \text{ kgm}^2\text{s}^{-2}$  (*control system toolbox Matlab*)

$T_L$  = beban mekanik yang dihubungkan ke batang rotor (Nm)

$b$  = koefisien gesekan viskos =  $0,02 \text{ Nms}$  (*control system toolbox Matlab*)

transformasi *laplace* persamaan (4.4) adalah

$$T_m(s) = sJ\omega_m(s) + b\omega_m(s) + T_L(s) \quad (4.5)$$

dengan

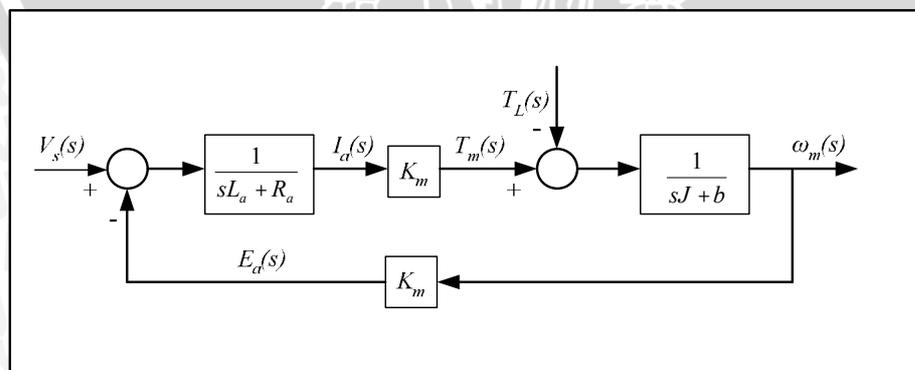
$V_s$  = Tegangan masukan (volt)

$K_m$  = Konstanta motor (Nm/A)

$L_a$  = Induktansi jangkar (henry)

$R_a$  = Tahanan jangkar (ohm)

$\omega_m$  = Kecepatan sudut (rad/s)



**Gambar 4.3** Blok diagram Motor DC

Sumber : Kuo, 1987 :174

Data nominal yang tertera pada *plate* Motor DC *weighfeeder* untuk material *lime stone* terlampir pada Tabel 4.2.

**Tabel 4.2** Data Nominal Motor DC *weighfeeder Lime Stone*

| Daya                                  | Putaran Nominal                                | $V_{arm}$        | $I_{arm}$        | $V_{field}$                        | $I_{field}$                         |
|---------------------------------------|--|------------------|------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| 1,5 <sub>HP</sub> /1,12 <sub>KW</sub> | 1750 <sub>rpm</sub> / 183,167 <sub>rad/s</sub> | 180 <sub>V</sub> | 7,5 <sub>A</sub> | 100 <sub>V</sub> /200 <sub>V</sub> | 0,25 <sub>A</sub> /0,5 <sub>A</sub> |

Sumber : PT. Semen Cibinong, Tbk

Dari data nominal pada Tabel 4.2, maka torsi nominal, konstanta motor, tegangan induksi dan tahanan jangkar dapat dihitung dengan

$$\text{Daya} = \text{Torsi} \times \text{Putaran}$$

$$P = T_m \times \omega_m$$

$$1120 = T_m \times 183,167$$

$$T_m = \frac{1.120}{183,167} = 6,115 \text{ Nm}$$

Dari persamaan (4.2), maka konstanta motor dapat dicari dengan

$$K_m = \frac{T_m}{I_a} = \frac{6,115}{7,5} = 0,8153 \text{ Nm/A}$$

Dari persamaan (4.3), maka tegangan induksi dapat dicari dengan

$$E_a = K_m \cdot \omega_m = 0.8153 \times 183,167 = 149,34 \text{ V}$$

saat arus jangkar mencapai nilai mantapnya, maka tahanan jangkar dapat dicari dengan

$$V_s - E_a = R_a \cdot I_a$$

$$R_a = \frac{V_s - E_a}{I_a} = \frac{180 - 149,34}{7,5} = 4,1 \Omega$$

daya motor DC juga dapat dihitung dengan

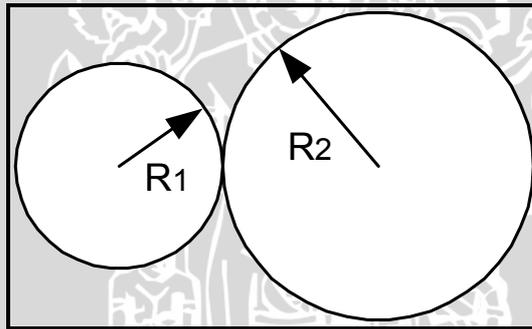
$$\text{Daya} = E_a \times I_a = 149,34 \times 7,5 = 1120,05 \text{ W} \approx 1,12 \text{ KW}$$

Sedangkan nilai induktansi jangkar yang dipilih adalah

$$L_a = 0,5 \text{ H (control system toolbox, Matlab R13)}$$

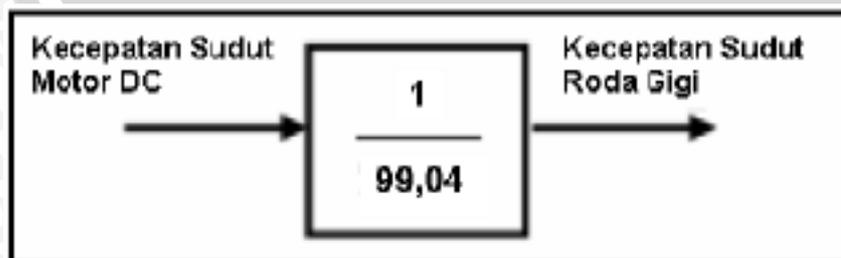
### 4.3 Reducer Dan Pulley

*Reducer* adalah suatu blok mekanik yang berfungsi untuk menurunkan putaran motor. Hubungan mekanik di dalamnya adalah hubungan roda gigi sehingga keluaran *reducer* ini adalah putaran yang lebih rendah dari masukan putarannya. Sedangkan *pulley* adalah drum penggerak *conveyor* untuk mengubah gerak dari gerak rotasi menuju gerak translasi (Kurniawan, 2006 : 33).



Gambar 4.4 : Roda gigi yang saling bersinggungan  
Sumber : Kuo, 1995

Dari data pada Tabel 4.1, rasio *reducer* sama dengan 1/99,04. Maka blok *reducer* dimodelkan sebagai berikut



Gambar 4.5 Blok *reducer*  
Sumber : Perancangan

$$\omega_2 = \frac{1}{99,04} \omega_1 \quad (4.6)$$

dengan

$$\omega_1 = \omega_m = \text{kecepatan sudut rotor} \quad (\text{rad/s})$$

$$\omega_2 = \omega_p = \text{kecepatan sudut pulley} \quad (\text{rad/s})$$

*Pulley* adalah drum penggerak *belt* pada *conveyor*, kecepatan translasi *belt* berbanding lurus dengan kecepatan sudut *pulley* dan dirumuskan sebagai berikut

$$\omega_2 r = v \quad (4.7)$$

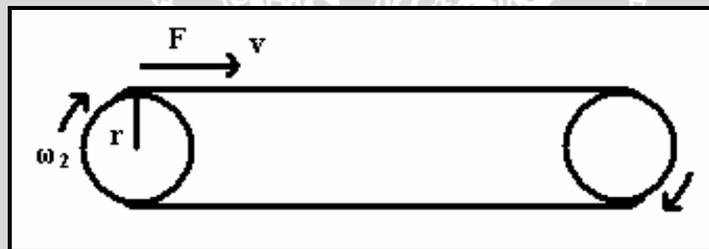
dengan

$$r = \text{jari-jari pulley} = 0,1542 \text{ m} \quad (\text{PT. Semen Cibinong, Tbk})$$

$$v = \text{kecepatan translasi belt} \quad (\text{m/s})$$

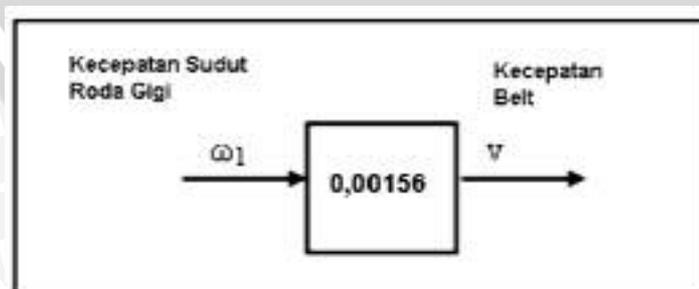
dengan nilai  $r$  diketahui sebesar  $0,1542\text{m}$ , dihasilkan

$$v = 0.00155694 \omega_1 \quad (4.8)$$



Gambar 4.6 Conveyor  
Sumber : PT. Semen Cibinong, Tbk

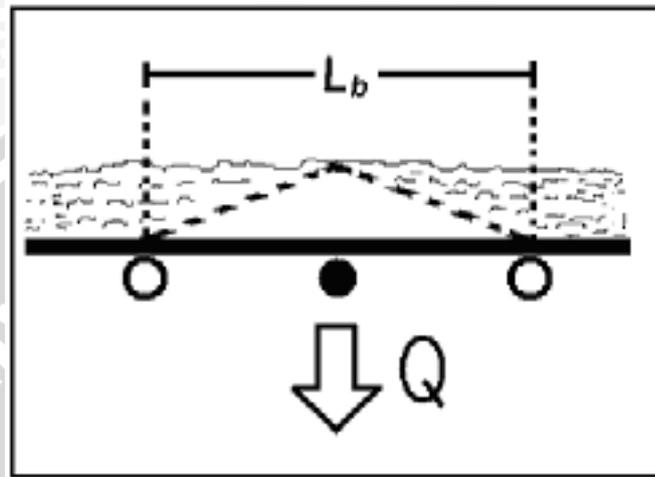
Sehingga blok dari *reducer* dan *pulley* adalah sebagai berikut.



Gambar 4.7 Blok *reducer* dan *pulley*  
Sumber : Perancangan

#### 4.4 Belt Load

*Belt load* merupakan berat material tiap meter yang terukur oleh *load cell*. Distribusi *lime stone* pada *weighfeeder* ditunjukkan pada gambar 4.8. Kedua *idler* yang mengapit *load cell* berfungsi untuk menjaga agar *belt* tidak terayun saat *load cell* bekerja.



Gambar 4. 8 Distribusi Load pada *WeighFeeder*  
Sumber : PT Semen Cibinong Tbk

*Belt load* dihitung sebagai berikut,

$$Q = q \cdot \frac{1}{2} \cdot L_b \text{ (kg)} \quad (\text{PT. Semen Cibinong, Tbk}) \quad (4.9)$$

dengan

- $Q$  = berat material (kg)
- $q$  = *belt load* (kg/m)
- $L_b$  = panjang area penimbangan/ jarak antara 2 *idler* (m)

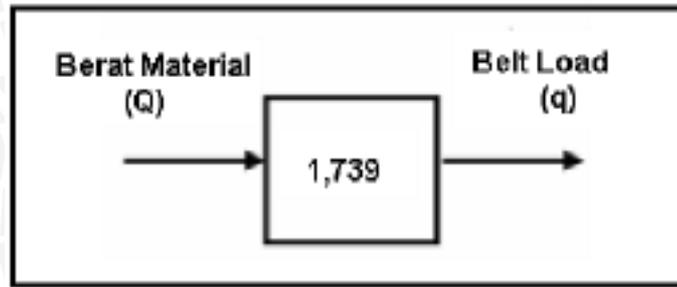
sehingga,

$$q = Q / L_{\text{eff}} \text{ (kg/m)}, \quad \text{dengan } L_{\text{eff}} = \frac{1}{2} \cdot L_b \text{ (m)}$$

dengan panjang area penimbangan sepanjang 1,15 meter (PT Semen Cibinong. Tbk), sehingga persamaan *belt load* adalah,

$$q = 1.739 Q \quad (4.10)$$

Sehingga blok dari *belt load* adalah sebagai berikut



Gambar 4.9 Blok *belt load*  
Sumber : Perancangan

*Flow rate* material  $P_{LS}$  merupakan perkalian antara *belt load* dengan *belt speed*, persamaannya ditulis sebagai berikut (PT. Semen Cibinong Tbk),

$$P_{LS} = q \cdot v \quad (4.11)$$

dengan

$$P_{LS} = \text{Flow rate lime stone} \quad (\text{kg/s})$$

$$v = \text{kecepatan belt} \quad (\text{m/s})$$

Dalam satuan ton / jam (t/h),

$$P_{LS} = q \cdot 1/1000 \cdot v \cdot 3600 \text{ t/h}$$

$$P_{LS} = q \cdot v \cdot 3,6 \quad (\text{t/h}) \quad (4.12)$$

#### 4.5 *Torsi Load*

*Belt* yang bergerak dengan kecepatan translasi disebabkan karena adanya gaya torsi pada *pulley*, gaya translasi yang dibutuhkan untuk menggerakkan *belt* dengan material yang dibawanya berbanding lurus dengan massa dan percepatannya, dirumuskan sebagai berikut (Sears and Zemansky, 1994 : 94),

$$F = m \cdot a \quad (\text{N}) \quad (4.13)$$

dengan

$F$  = gaya translasi yang diperlukan untuk menggerakkan massa  $m$  (N)

$m$  = massa material yang bergerak di atas *belt* (kg)

$a$  = percepatan  $\left(\frac{m}{s^2}\right)$

Gaya translasi terhadap torsi pada *pulley* dirumuskan sebagai berikut

$$T_p = F \cdot r \text{ (Nm)} \quad (4.14)$$

dengan  $T_p$  adalah torsi pada *pulley* dengan jari-jari  $r$ . Substitusi persamaan (4.13) ke persamaan (4.14),

$$T_p = m \cdot a \cdot r \text{ N.m} \quad (4.15)$$

Berdasarkan data rasio *reducer* pada tabel 4.1, maka torsi yang dibutuhkan motor untuk menggerakkan *belt* dengan material atau torsi load ( $T_L$ ) adalah

$$\begin{aligned} T_L &= X \cdot m \cdot a \cdot r \quad \text{(Nm)} \\ T_L &= 99,04 \cdot m \cdot a \cdot r \quad \text{(Nm)} \end{aligned} \quad (4.16)$$

Percepatan *belt* dirumuskan sebagai berikut (Sears and Zemansky, 1994 : 69),

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} \quad \left(\frac{m}{s^2}\right)$$

dengan  $v_1$  dan  $t_1$  adalah kondisi awal, dengan nilai  $v_1 = 0$  m/s dan  $t_1 = 0$  s, maka

$$a = \frac{v_2 - 0}{t_2 - 0}$$

$$a = \frac{v_2}{t_2} = \frac{v}{t}$$

$$a = \frac{v}{t} = \frac{v}{\frac{L_T}{v}} = \frac{v^2}{L_T} \quad \left(\frac{m}{s^2}\right)$$

$$L_T = \text{lintasan belt} = 2 \times 7,3 + 2\pi r \text{ m} \quad (\text{PT. Semen Cibinong, Tbk})$$

Sehingga persamaan (4.16) menjadi

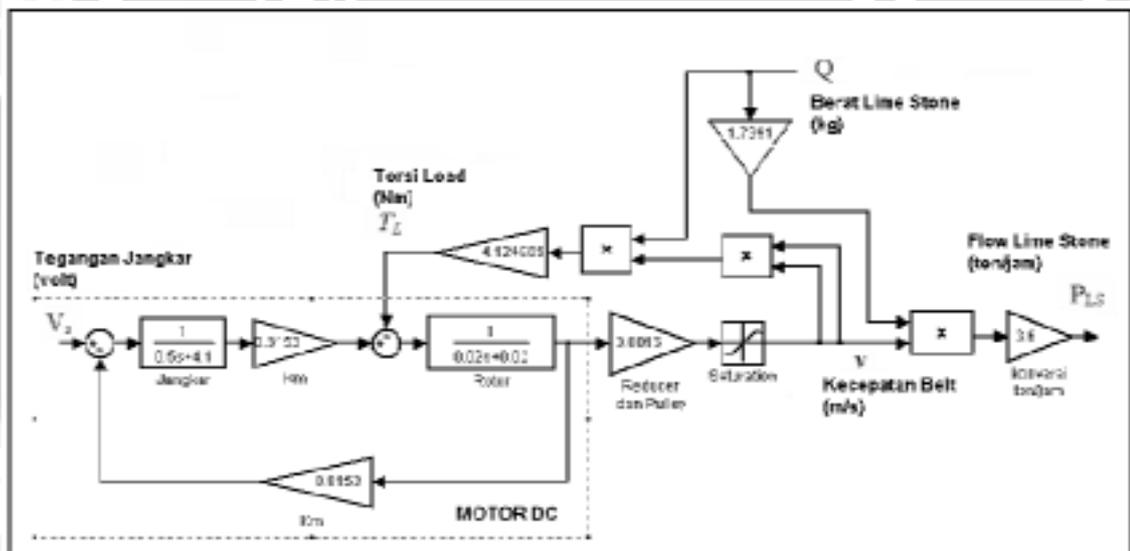
$$T_L = \frac{99,04 \cdot Q \cdot v^2 \cdot r}{L} \text{ (Nm)}$$

$$T_L = \frac{99,04 \cdot Q \cdot v^2 \cdot 0,154}{(2 \cdot 7,3 + 2\pi \cdot 0,154)} \text{ (Nm)}$$

$$T_L = 4.12486 \cdot Q \cdot v^2 \text{ Nm} \quad (4.17)$$

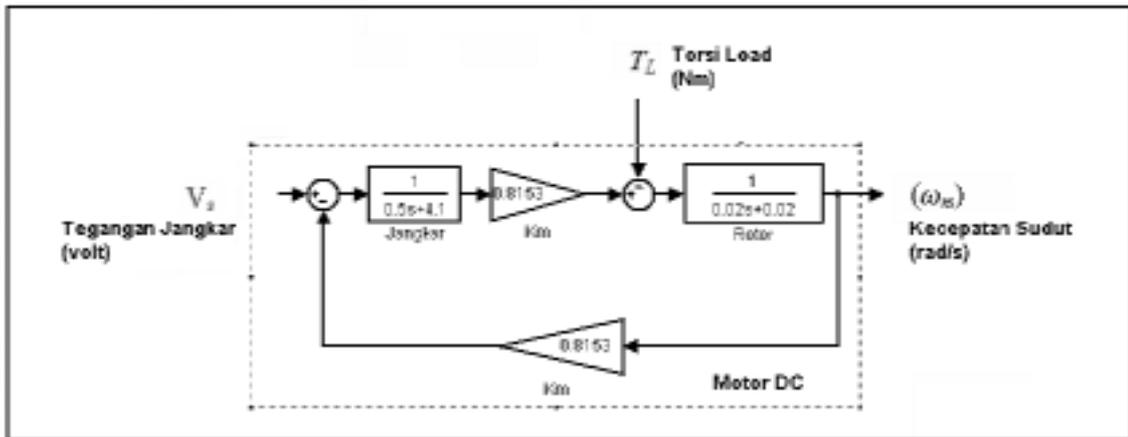
#### 4.6 Penentuan Fungsi Alih *Plant Weighfeeder*

Di bawah ini adalah blok diagram *weighfeeder*



Gambar 4.10 Blok Diagram *Weighfeeder*  
Sumber : Perancangan

Dari blok diagram motor DC penguat terpisah pada gambar di atas, dapat diketahui fungsi alih keluaran motor DC berupa kecepatan sudut ( $\omega_m$ ) terhadap masukan berupa tegangan jangkar ( $V_s$ ).



**Gambar 4.11** Blok Diagram Motor DC Penguat Terpisah Pada *Weighfeeder*  
**Sumber** : Perancangan

Fungsi alih  $\omega_m$  terhadap  $V_s$  pada saat  $T_L$  sama dengan nol adalah

$$\frac{\omega_m(s)}{V_s(s)} = \frac{0,8153}{(0,05s + 4,1)(0,02s + 0,02)} \cdot \frac{1}{1 + \frac{(0,8153)^2}{(0,05s + 4,1)(0,02s + 0,02)}}$$

$$\frac{\omega_m(s)}{V_s(s)} = \frac{0,8153}{0,001s^2 + 0,083s + 0,7467} \quad (4.18)$$

Fungsi alih  $\omega_m$  terhadap  $T_L$  pada saat  $V_s$  sama dengan nol adalah

$$\frac{\omega_m(s)}{T_L(s)} = \frac{1}{(0,02s + 0,02)} \cdot \frac{1}{1 + \frac{0,6647}{(0,05s + 4,1)(0,02s + 0,02)}}$$

$$\frac{\omega_m(s)}{T_L(s)} = \frac{(0,05s + 4,1)}{0,001s^2 + 0,083s + 0,7467} \quad (4.19)$$

Sehingga fungsi alih dari motor DC adalah penjumlahan dari persamaan 4.18 dan 4.19, yaitu

$$\omega_m(s) = \frac{0,8153V_s(s) - (0,05s + 4,1)T_L(s)}{0,001s^2 + 0,083s + 0,7467} \quad (4.20)$$

Dari persamaan 4.12 diketahui bahwa besar *flow limestone* yang mengalir adalah,

$$P_{LS} = 3,6. q . v. \quad (\text{dalam ton/jam})$$

sesuai dengan persamaan 4.8, kecepatan *belt* adalah

$$v = 0.00155694 \omega_m$$

sedangkan sesuai dengan persamaan 4.10 *belt load* adalah

$$q = 1.739 Q$$

sehingga persamaan 4.12 menjadi

$$P_{LS} = 0,00936. Q. \omega_m \quad (4.21)$$

dengan transformasi laplace, persamaan 4.21 menjadi :

$$P_{LS}(s) = 0,00936. Q(s). \omega_m(s) \quad (4.22)$$

Fungsi alih *plant weighfeeder* didapatkan dengan mensubstitusikan persamaan 4.20 dan persamaan 4.22 yaitu:

$$P_{LS}(s) = 0,00936Q(s) \left[ \frac{0,8153V_s(s) - (0,05s + 4,1)T_L(s)}{0,001s^2 + 0,083s + 0,7467} \right] \quad (4.23)$$

Dari fungsi alih tersebut, diketahui bahwa *plant* memiliki orde 2, dan merupakan sistem yang stabil karena terlihat dari persamaan bahwa sistem memiliki pole yang berada di sebelah kiri sumbu imajiner (pole bernilai negatif), yaitu

$$s = -72,7338$$

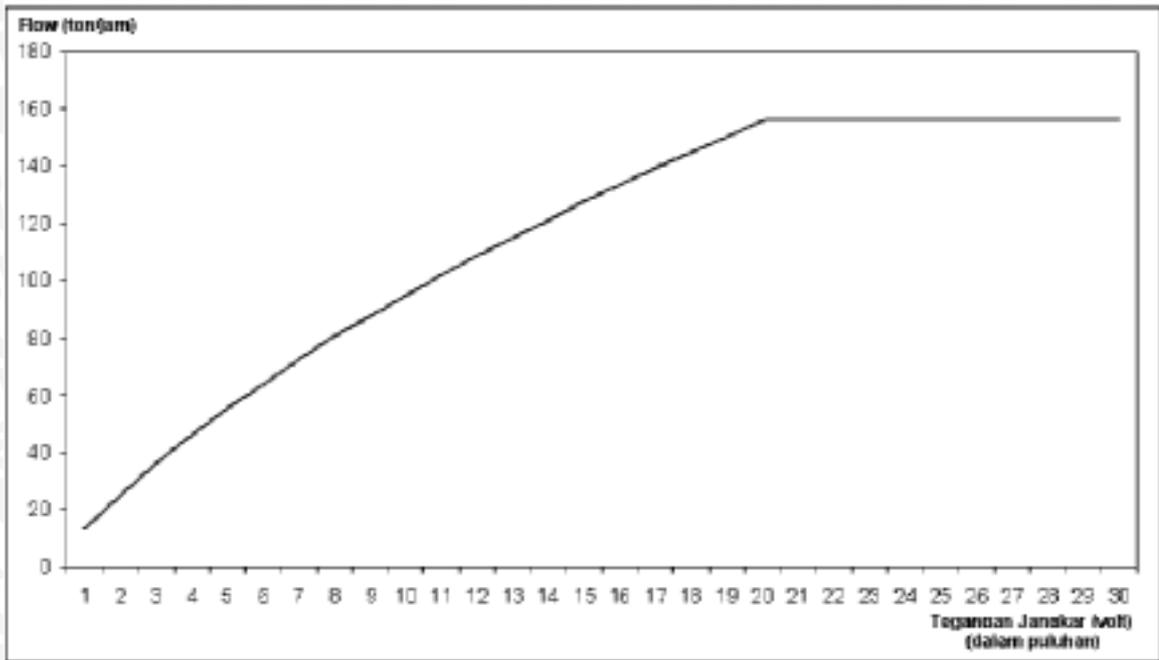
$$s = -10,2662$$

Dari persamaan 4.23, pada *plant* diujikan beberapa masukan untuk mengetahui *plant* termasuk sistem linier atau sistem nonlinier

**Tabel 4.3** Tabel Uji Linieritas *Weighfeeder Lime Stone*

| Tegangan Jangkar<br>(volt) | Flow LimeStone<br>(ton/jam) | Kecepatan Sudut Motor<br>(rad/s) | Kecepatan Belt<br>(m/s) |
|----------------------------|-----------------------------|----------------------------------|-------------------------|
| 10                         | 13,38                       | 10,18                            | 0,01527                 |
| 20                         | 25,26                       | 19,21                            | 0,02882                 |
| 30                         | 36,05                       | 27,42                            | 0,04112                 |
| 40                         | 45,96                       | 34,95                            | 0,05243                 |
| 50                         | 55,24                       | 42,02                            | 0,06302                 |
| 60                         | 63,93                       | 48,63                            | 0,07294                 |
| 70                         | 72,2                        | 54,92                            | 0,08238                 |
| 80                         | 80,07                       | 60,9                             | 0,09135                 |
| 90                         | 87,57                       | 66,6                             | 0,09991                 |
| 100                        | 94,79                       | 72,1                             | 1,1081                  |
| 110                        | 101,8                       | 77,39                            | 0,1161                  |
| 120                        | 108,5                       | 82,49                            | 0,1237                  |
| 130                        | 114,9                       | 87,42                            | 0,1311                  |
| 140                        | 121,2                       | 92,19                            | 0,1383                  |
| 150                        | 127,4                       | 96,86                            | 0,1453                  |
| 160                        | 133,3                       | 101,4                            | 0,152                   |
| 170                        | 139,1                       | 105,8                            | 0,1587                  |
| 180                        | 144,7                       | 110,1                            | 0,1651                  |
| 190                        | 150,3                       | 114,3                            | 0,1714                  |
| 200                        | 155,7                       | 118,4                            | 0,1776                  |
| 210                        | 155,7                       | 118,4                            | 0,1776                  |
| 220                        | 155,7                       | 118,4                            | 0,1776                  |
| 230                        | 155,7                       | 118,4                            | 0,1776                  |
| 240                        | 155,7                       | 118,4                            | 0,1776                  |
| 250                        | 155,7                       | 118,4                            | 0,1776                  |
| 260                        | 155,7                       | 118,4                            | 0,1776                  |
| 270                        | 155,7                       | 118,4                            | 0,1776                  |
| 280                        | 155,7                       | 118,4                            | 0,1776                  |
| 290                        | 155,7                       | 118,4                            | 0,1776                  |
| 300                        | 155,7                       | 118,4                            | 0,1776                  |

Sumber : Pengujian



**Gambar 4.12** Grafik hubungan Tegangan jangkar sebagai masukan dengan *flow limestone* pada weighfeeder

Sumber : Pengujian

Definisi dari sistem yang linier adalah sistem yang memenuhi kriteria superposisi. Prinsip superposisi harus memenuhi 2 kriteria, yaitu syarat *additivity* dan *homogeneity* (Sinha, 1996 :4).

Kriteria *additivity* yaitu:

$$y_1 = f(u_1)$$

$$u_3 = u_1 + u_2$$

maka keluaran  $y_3$  haruslah :

$$y_3 = f(u_1 + u_2)$$

Sedangkan kriteria *homogeneity* adalah :

$$y_1 = f(u_1)$$

$$u_2 = n.u_1$$

maka keluaran  $y_2$  haruslah :

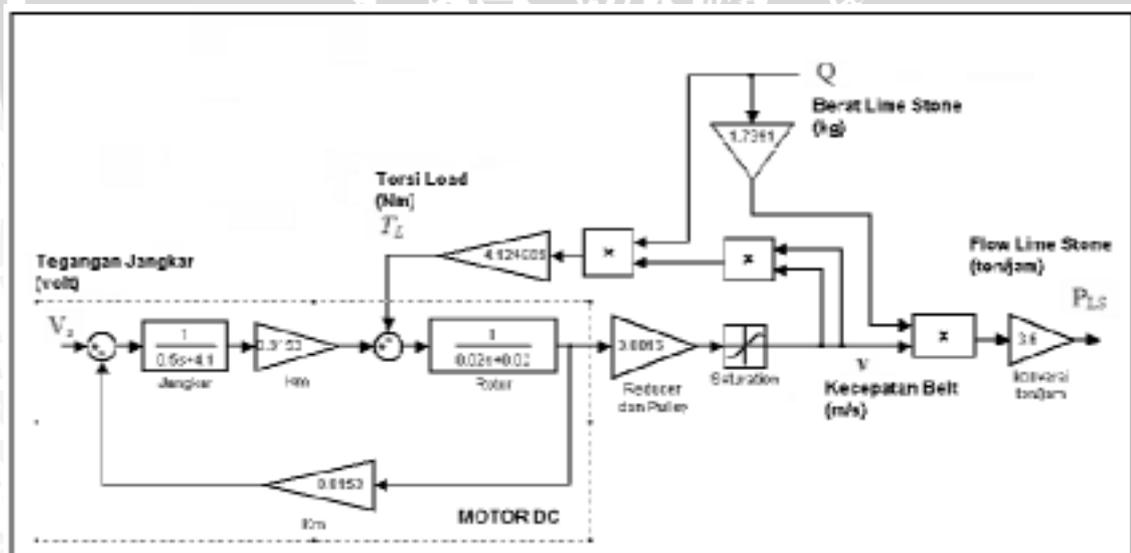
$$y_2 = n.f(u_1)$$

Dari tabel 4.3 dapat dilihat bahwa pada masukan tegangan jangkar sebesar 50 volt, keluaran *flow* sebesar 55,24 ton/jam. Dan pada masukan tegangan jangkar sebesar

100 volt, keluaran *flow* sebesar 94,79 ton/jam. Berdasarkan kriteria *additivity*, pada masukan sebesar 150 volt, seharusnya keluaran *flow* sebesar 55,24 ton/jam ditambah 94,79 ton/jam, yaitu 150.03 ton/jam. Namun dari tabel 4.3 dapat dilihat bahwa keluaran *flow* pada saat masukan sebesar 150 volt adalah 127,4 ton/jam. Dari analisa ini terlihat bahwa kriteria *additivity* tidak terpenuhi.

Untuk pengujian berikutnya, pada masukan tegangan jangkar sebesar 50 volt, keluaran *flow* sebesar 55,24 ton/jam. Berdasarkan kriteria *homogeneity*, pada masukan sebesar 100 volt, seharusnya keluaran *flow* sebesar 2x 55,24 ton jam, yaitu 110,48 ton/jam. Namun dari tabel 4.3 dapat dilihat bahwa keluaran *flow* pada saat masukan sebesar 100 volt adalah 94,79 ton/jam. Dari analisa ini terlihat bahwa kriteria *homogeneity* tidak terpenuhi.

Dari uji dua kriteria tersebut, diketahui bahwa *plant* tidak memenuhi baik kriteria *additivity* maupun kriteria *homogeneity*. Sehingga prinsip superposisi tidak berlaku. Oleh karena itu dapat diketahui bahwa *plant* adalah *plant* nonlinier. Hal ini merupakan salah satu pertimbangan juga dalam penggunaan kontroler adaptif sebagai elemen pengendali pada sistem.

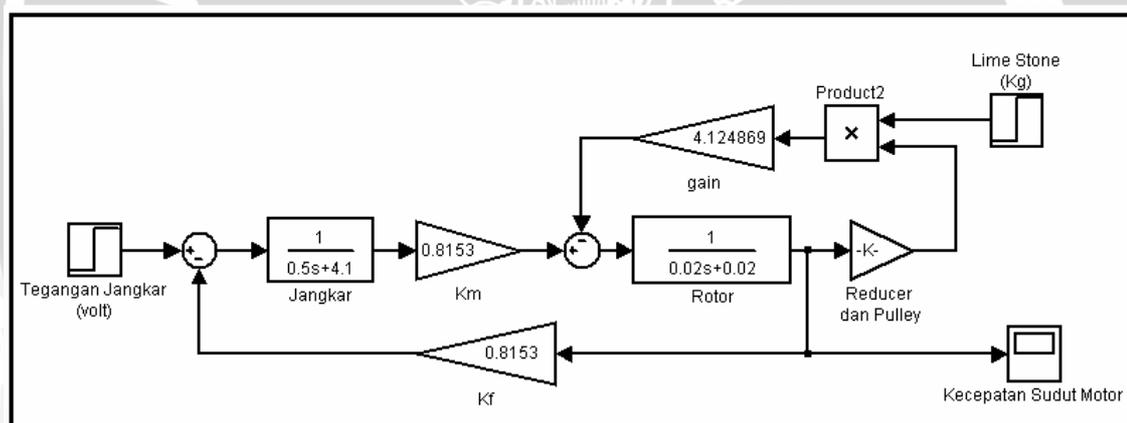


Gambar 4.13 Pemodelan *plant* weighfeeder dengan Simulink  
Sumber : Perancangan

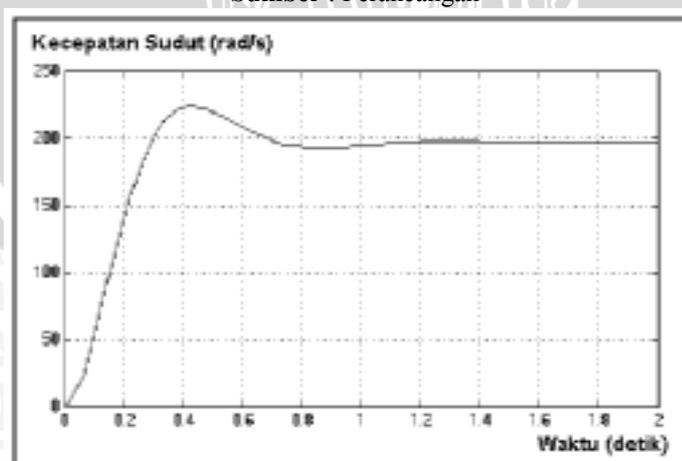
#### 4.7 Penentuan Fungsi Alih Model Referensi

Model referensi ditentukan dengan mempertimbangkan derajat relatif *plant*. Derajat relatif model referensi harus sama dengan atau lebih besar dari derajat relatif *plant* (Narendra and Annaswamy, 1989 : 183). Derajat relatif adalah selisih antara derajat tertinggi polinomial pada *pole* dengan derajat tertinggi polinomial pada *zero* (Butler, 1992: 54). Penentuan fungsi alih model referensi pada simulasi ini ditentukan dengan kriteria, *settling time* model referensi tidak lebih cepat daripada waktu yang dibutuhkan oleh motor DC *weighfeeder* untuk mencapai putaran nominalnya. Hal ini bertujuan untuk menjaga agar motor DC tidak rusak. Sebab jika motor DC dipaksakan mengikuti *settling time* model referensi yang lebih cepat daripada *settling time* kondisi nominalnya, motor DC dapat rusak karena keterbatasan kemampuan mekanis.

Dari data pada tabel 4.2, tegangan jangkar nominal pada motor DC adalah 180 volt, dan kecepatan sudut nominal motor DC adalah 183,67 rad/s. Kemudian dari data tersebut disimulasikan pada *Simulink* pada Matlab 7.0. Pada kondisi tanpa beban, berat *lime stone* adalah 0 kg.



**Gambar 4.14** Simulasi motor DC *weighfeeder* dengan *Simulink*  
**Sumber** : Perancangan



**Gambar 4.15** Respon kecepatan sudut motor DC *weighfeeder* dengan *Simulink*  
**Sumber** : Perancangan

Dari simulasi kecepatan sudut motor DC *weighfeeder* tanpa beban, didapatkan waktu untuk mencapai kecepatan sudut nominal adalah 1,4 detik.

*Plant* yang akan dikendalikan adalah *weighfeeder lime stone* pada PT Holcim International Tbk. Pabrik Cilacap. Dari persamaan (4.23), *plant weighfeeder* adalah:

$$P_{LS}(s) = 0,00936Q(s) \left[ \frac{0,8153V_s(s) - (0,05s + 4,1)T_L(s)}{0,001s^2 + 0,083s + 0,7467} \right]$$

*Plant* yang akan dikendalikan mempunyai orde sama dengan dua. Derajat relatif terhadap  $V_s$  sama dengan dua, sedangkan derajat relatif terhadap  $T_L$  sama dengan satu. Derajat relatif yang dipilih adalah derajat relatif terhadap tegangan jangkar  $V_s$ , karena tegangan jangkar adalah variabel yang dimanipulasi pada sistem pengendalian.

Untuk sistem dengan orde 2, memiliki fungsi alih dengan bentuk (Phillips dan Harbor, 1998 : 111):

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4.24)$$

dengan  $\zeta$  adalah rasio redaman dan  $\omega_n$  adalah frekuensi natural. Dari persamaan tersebut, perhitungan *settling time*  $T_s$  adalah:

$$T_s = \frac{k}{\zeta\omega_n} \quad (4.25)$$

untuk nilai error steady state lebih kecil dari 2 %, diambil nilai  $k = 6$ . Dari kriteria tersebut diinginkan *settling time* 4 detik, dengan rasio redaman 1,06. Kriteria ini dimasukkan ke persamaan 4.25:

$$4 = \frac{6}{1,06 \cdot \omega_n}$$

didapatkan  $\omega_n = 1,414$

sehingga persamaan 4.24 menjadi :

$$G(s) = \frac{2}{s^2 + 3s + 2} \quad (4.26)$$

Derajat relatif *plant* adalah 2, namun harus menjadi pertimbangan bahwa *zero* model referensi digunakan pada generator pembangkit sinyal pada pengendali. Oleh karena itu persamaan di atas tidak memenuhi. Agar memenuhi, maka ditambahkan *pole* dan *zero* pada persamaan di atas.

Penambahan *pole* dilakukan dengan ketentuan, penambahan *pole* dengan *pole* yang semakin jauh di sebelah kiri *pole* asal, memiliki pengaruh yang semakin kecil terhadap respon awal sistem sebelum ditambah *pole* (d'azzo dan Houpis, 1988 : 351).

Sedangkan kriteria untuk penambah *zero*, penambahan *zero* yang bernilai negatif dan jauh berada di kiri *pole* asal, maka respon secara kualitatif sama dengan respon sistem aslinya (d'azzo dan Houpis, 1988 : 353).

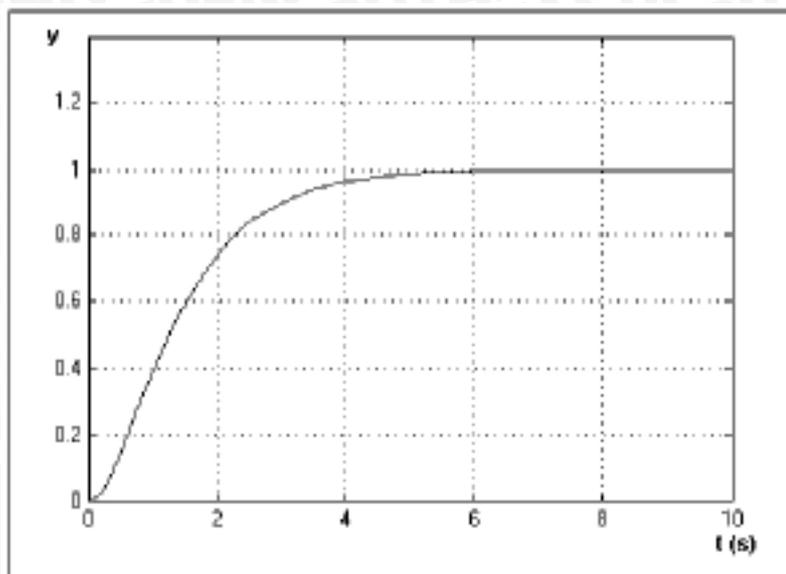
Pada persamaan 4.26 ditambahkan *pole* sebesar -15 dan *zero* -30, sehingga persamaan 4.26 menjadi :

$$G(s) = \frac{2(s + 30)}{(s^2 + 3s + 2)(s + 15)}$$

sehingga persamaan model referensi adalah :

$$W_m(s) = \frac{2(s + 30)}{s^3 + 18s^2 + 47s + 30} \quad (4.27)$$

Respon transien dari model referensi terhadap masukan unit step adalah



**Gambar 4.16** Respon model referensi terhadap masukan unit *step*

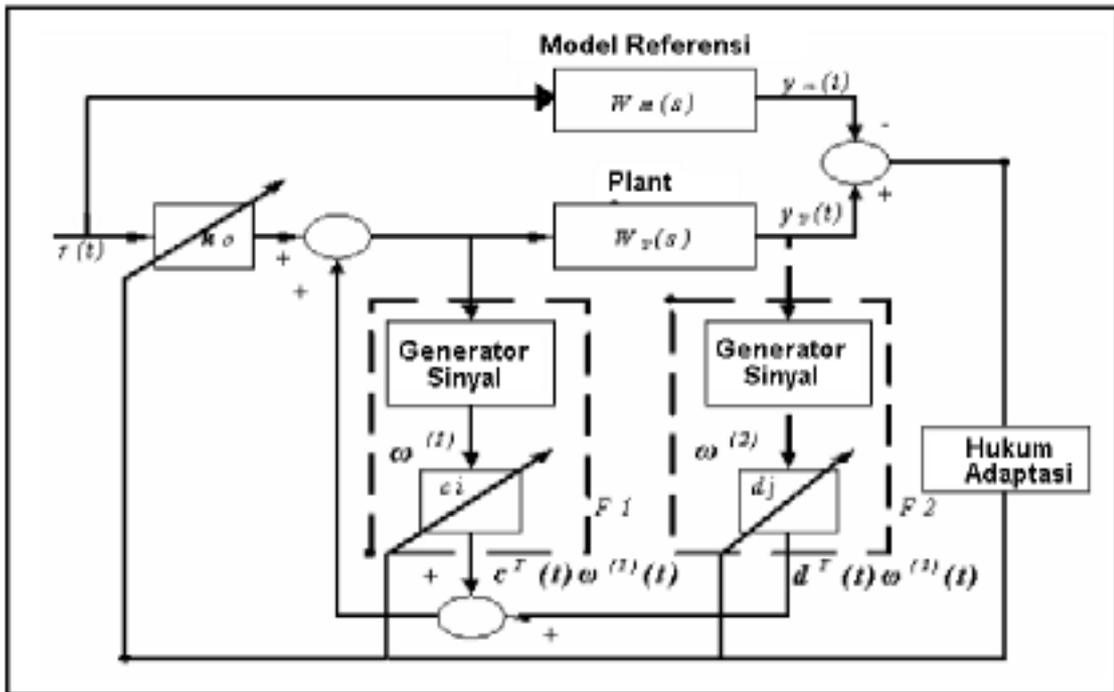
Sumber : Perancangan

Pada model referensi tidak terdapat *overshoot*, dan *settling time* ( $t_s$ ) tercapai pada detik ke-5.

#### 4.8 Penetapan Parameter Pengendali

Sistem pengendalian MRAS mempunyai syarat, mampu menyesuaikan fungsi alih  $y_p(t)$  terhadap  $r(t)$  sama dengan  $y_m(t)$  terhadap  $r(t)$ . Struktur pengendali mempunyai generator sinyal bantu yang menghasilkan parameter sinyal  $\omega$  sehingga sinyal kendali yang dihasilkan pengendali adalah  $u = \theta \cdot \omega$ . Dalam hal ini  $\theta$  adalah parameter pengendali.

*Plant* yang akan dikendalikan mempunyai orde sama dengan dua dan derajat relatif sama dengan dua. Sinyal kendali diberikan kepada *plant* agar sinyal keluaran *plant* dapat mengikuti sinyal keluaran model referensi. Pada gambar 4.17, pengendali terdiri atas penguat  $k_0, F_1$ , dan  $F_2$ .  $F_1$  terdiri atas generator sinyal bantu dan parameter  $c$ .  $F_2$  terdiri atas generator sinyal bantu dan parameter  $d$ .



Gambar 4.17 Struktur dasar pengendali adaptif  
Sumber : Butler, 1992: 53

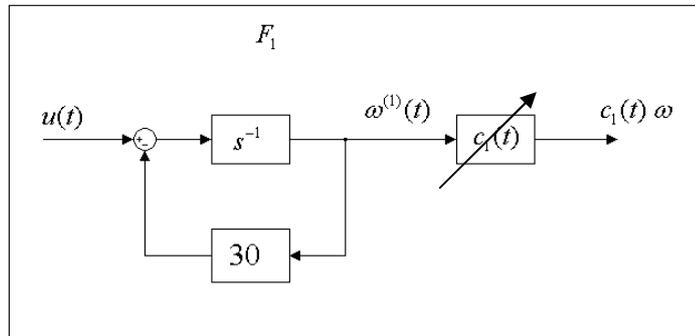
$F_1$  dan  $F_2$  dinyatakan dalam fungsi alih  $W_1$  dan  $W_2$ , dengan persamaan :

$$W_1(s) = \frac{C(s)}{N(s)} \quad \text{dan} \quad W_2(s) = \frac{D(s)}{N(s)}$$

Polinomial  $N(s)$  pada generator sinyal bantu sama dengan *zero* model referensi (Sastry dan Bodson, 1993 : 105). Sehingga fungsi alih  $W_1$  dan  $W_2$  adalah :

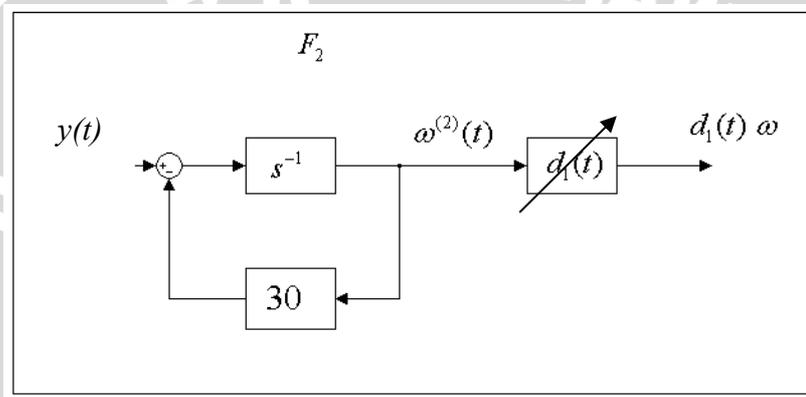
$$W_1(s) = \frac{30}{s+30} \quad \text{dan} \quad W_2(s) = \frac{30}{s+30} \quad (4.28)$$

Dalam diagram blok,  $F_1$  dan  $F_2$  digambarkan sebagai berikut:



**Gambar 4.18** Diagram blok generator sinyal 1 dan parameter  $c_1$  pada  $F_1$

**Sumber :** Perancangan



**Gambar 4.19** Diagram blok generator sinyal 2 dan parameter  $d_1$  pada  $F_2$

**Sumber :** Perancangan

Parameter pengendali adalah  $\theta$ , dan parameter generator sinyal adalah  $\omega$ , dengan

$$\theta(t) = [k_0(t), c_1(t), d_1(t)]$$

$$\omega(t) = [r(t), \omega^{(1)}(t), \omega^{(2)}(t)]$$

maka sinyal kendali adalah

$$u(t) = \theta^T(t) \cdot \omega(t)$$

$$u(t) = k_0(t) \cdot r(t) + c_1(t) \cdot \omega^{(1)}(t) + d_1(t) \cdot \omega^{(2)}(t) \quad (4.29)$$

#### 4.9 Persamaan *Error*

Pada pengendalian dengan MRAS, proses adaptasi akan berhenti apabila keluaran *plant* sama dengan keluaran model referensi. Dengan kata lain *error* sama dengan 0. Sedangkan persamaan *error* antara model referensi dengan *plant* adalah (Mariani, 2005 : 37) :

$$e_1(t) = y_p(t) - y_m(t) \quad (4.30)$$

Proses adaptasi berakhir jika keluaran *plant* dapat mengikuti keluaran model referensi. Selama berlangsung proses adaptasi, berlaku parameter *error*  $\phi$  yang besarnya (Butler, 1997 :54)

$$\phi(t) = \theta(t) - \theta^*(t) \quad (4.31)$$

Dalam hal ini,  $\theta^*$  adalah parameter pengendali yang diharapkan dalam proses adaptasi. Sedangkan  $\phi$  adalah parameter *error* (Sasthy dan Bodson, 1993 : 109).

$$\theta^* = [k_0^*, c_1^*, d_1^*] \quad (4.32)$$

sehingga sinyal kendali dinyatakan sebagai

$$u(t) = k_0^*(t).r(t) + c_1^*(t).\omega^{(1)}(t) + d_1^*(t).\omega^{(2)}(t) \quad (4.33)$$

#### 4.10 Penentuan Hukum Adaptasi

Proses adaptasi berlangsung dengan adanya perubahan nilai parameter pengendali. Proses ini berlangsung selama terjadi *error* antara keluaran *plant* dengan keluaran model referensi. Proses adaptasi diatur melalui cara yang disebut dengan hukum adaptasi (Narendra dan Annaswamy, 1989 : 184). Nilai parameter pengendali akan diubah sedemikian rupa sehingga *error* antara  $y_p$  dan  $y_m$  sama dengan nol. Penyesuaian parameter pengendali akan menghasilkan sinyal kontrol  $u$  sebagai masukan bagi *plant.*, sehingga keluaran *plant* mendekati model referensi pada saat  $t$  sama dengan tak terhingga. Hal tersebut dinyatakan sebagai,

$$\lim_{t \rightarrow \infty} |y_p(t) - y_m(t)| = 0 \quad (4.34)$$

Pada pengendalian adaptif dengan MRAS, *error* antara keluaran *plant* dengan keluaran model referensi digunakan secara langsung untuk mengubah nilai parameter pengendali. Proses adaptasi pada MRAS disebut dengan adaptasi langsung (Sastry dan Bodson, 1993 : 110).

Hukum adaptasi yang digunakan adalah metode *Lyapunov*. Metode *Lyapunov* dipilih karena melalui metode ini akan diperoleh sistem pengendalian adaptif yang stabil (Sastry dan Bodson, 1993 : 8).

Untuk mencapai kestabilan, fungsi *Lyapunov*  $V(x)$  harus mempunyai syarat (Butler, 1997 : 12):

$$V(x) > 0, \text{ untuk } x \neq 0 \text{ (definit positif)}$$

$$\dot{V}(x) < 0, \text{ untuk } x \neq 0 \text{ (definit negatif)}$$

$$V(x) \rightarrow \infty, \text{ untuk } |x| \rightarrow \infty$$

$$V(x) = 0$$

Untuk menerapkan metode *Lyapunov*, diperlukan tahapan :

1. Adanya persamaan *error*. Persamaan *error* tersebut dapat berupa *error* keluaran yaitu  $y_p - y_m$ .
2. Untuk mendapatkan hukum adaptasi, dipilih fungsi *Lyapunov* yang mengandung sinyal *error*  $e$  dan parameter *error*  $\phi$ , yang dituliskan sebagai (Butler, 1997 : 12)

$$V = e^T P e + \phi^T \xi \phi \quad (4.35)$$

Dengan  $e$  merupakan sinyal *error*, dan  $\phi$  adalah parameter *error*.  $\phi = \theta - \theta^*$ . Sedangkan  $\xi$  adalah penguatan adaptasi yang memenuhi syarat definit positif, matriks ditentukan sebagai matriks diagonal sehingga  $\xi$  juga memenuhi syarat definit positif. Matriks  $P$  merupakan matriks simetri definit positif.

Dengan menurunkan fungsi Lyapunov terhadap waktu maka langsung diperoleh hukum adaptasi.  $V$  mempunyai bentuk  $V = -e^T Q e + \{\text{beberapa persamaan yang mengandung } \phi\}$  (Butler, 1997 : 13). Persamaan yang mengandung  $\phi$  dibuat sama dengan nol, sehingga diperoleh hukum adaptasi.

$V$  definit negatif jika  $Q$  definit positif. Matriks  $A$  adalah matriks state pada model referensi.  $Q$  dinyatakan sebagai matriks identitas  $I$ .

$$A^T P + PA = -Q \quad (4.36)$$

Fungsi *Lyapunov* yang digunakan yaitu fungsi yang mengandung vektor sinyal *error*  $e$  dan vektor parameter *error*  $\phi$ , yaitu:

$$V = e^T P e + \phi^T \xi^{-1} \phi \quad (4.37)$$

dengan penurunan  $V$ , maka diperoleh (Butler, 1997 : 39) :

$$\dot{V} = e^T (A_m^T P + P A_m) e + 2(\phi^T \omega) b_m^T P e + 2\phi^T \xi^{-1} \dot{\phi} \quad (4.38)$$

Matriks  $P$  dan  $Q$  sebagai matriks simetris definit positif, seperti pada persamaan berikut (Butler, 1997 :39) :

$$A_m^T P + P A_m = -Q \quad (4.39)$$

$$b_m^T P e = e_1 \quad (4.40)$$

Dengan demikian maka persamaan (4.38) dituliskan lagi menjadi:

$$\dot{V} = -e^T Q e + 2(\phi^T \omega) e_1 + 2\phi^T \xi^{-1} \dot{\phi} \quad (4.41)$$

Untuk memastikan bahwa  $V$  adalah definit negatif, maka dua suku terakhir pada persamaan (4.41) dibuat sama dengan nol, sehingga:

$$\begin{aligned} 2(\phi^T \omega)e_1 + 2\phi^T \xi^{-1}\phi &= 0 \\ (\phi^T \omega)e_1 &= -\phi^T \xi^{-1}\phi \end{aligned} \quad (4.42)$$

Dengan demikian, diperoleh hukum adaptasi :

$$\theta = \phi = -\xi\omega e_1 \quad (4.43)$$

Dalam fungsi waktu, hukum adaptasi dinyatakan dengan (Butler, 1997 : 40) :

$$\theta(t) = \theta(t-1) - \xi\omega(t)e_1(t) \quad (4.44)$$

Sehingga,

$$\dot{\theta}(t) = \theta(t) - \xi\omega(t)e_1(t) \quad (4.45)$$

Dengan penguatan adaptasi yang telah ditentukan dan parameter pengendali yang telah ditentukan,

$$\theta = [k_0(t), c_1(t), d_1(t)]$$

$$\omega = [r(t), \omega^{(1)}(t), \omega^{(2)}(t)]$$

maka persamaan hukum adaptasi dinyatakan sebagai :

$$\dot{k}_0(t) = k_0(t) - \xi r(t)e_1(t) \quad (4.46)$$

$$\dot{c}_1(t) = c_1(t) - \xi\omega^{(1)}(t)e_1(t) \quad (4.47)$$

$$\dot{d}_1(t) = d_1(t) - \xi\omega^{(2)}(t)e_1(t) \quad (4.48)$$

#### 4.11 Penentuan Daerah Kerja *Weighfeeder Lime Stone*

Daerah kerja dari *weighfeeder lime stone* dibatasi oleh kecepatan sudut nominal dari motor DC *weigh feeder* dan tegangan jangkar nominal motor DC. Kecepatan sudut nominal motor DC yang digunakan pada *weighfeeder* berdasarkan data pada tabel 4.2 adalah sebesar 183,167 rad/s.

Dari persamaan 4.8,

$$v = 0.00155694 \omega_1$$

dengan  $v$  adalah kecepatan *belt* dalam m/s dan  $\omega_1$  adalah kecepatan sudut motor DC.

Maka, kecepatan maksimal dari *belt* adalah sebesar :

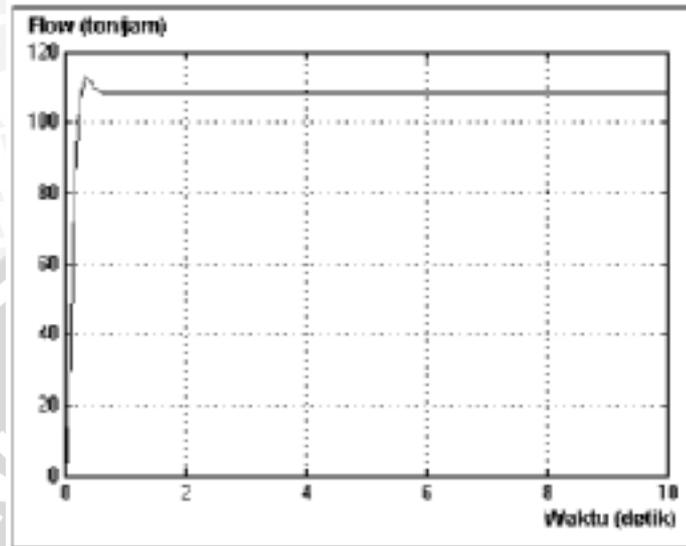
$$v = 0.00155694 \cdot 186.167$$

$$v = 0.2898 \quad \text{m/s}$$

Tegangan jangkar nominal motor DC *weigh feeder* berdasarkan data pada tabel 4.2 adalah sebesar 180 volt, dengan nilai toleransi nilai maksimumnya 200 volt (PT Semen Cibinong Tbk). Untuk membatasi agar kecepatan *belt* maksimal sebesar 0,2898 m/s dan tegangan jangkar maksimum sebesar 200 volt, maka pada keluaran kontroler dan keluaran dari *reducer* dan *pulley* pada simulasi diberikan elemen saturasi.

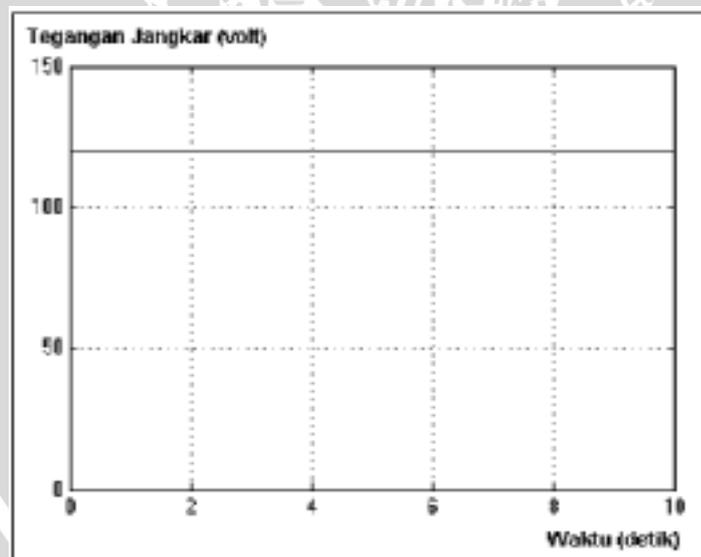
#### 4.12 Simulasi Sistem Lup Terbuka

Hasil simulasi sistem lup terbuka dengan tegangan jangkar 120 volt dengan berat *lime stone* sebesar 140 kg, ditunjukkan pada Gambar 4.20 dan Gambar 4.21.



**Gambar 4.20** Respon lup terbuka *plant* pada sistem *weighfeeder* dengan tegangan jangkar 120 volt, *load* 140 kg.

**Sumber** : Perancangan



**Gambar 4.21** Respon lup terbuka tegangan jangkar pada sistem *weighfeeder* dengan tegangan jangkar 120 volt, *load* 140 kg.

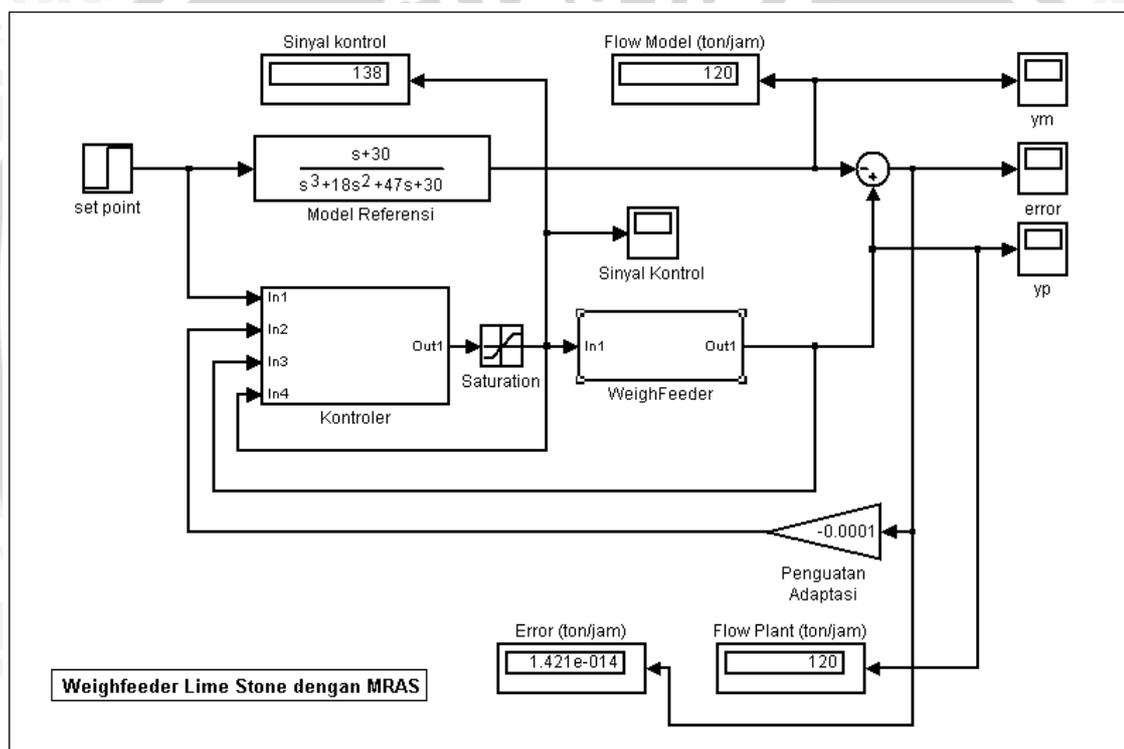
**Sumber** : Perancangan

Pada simulasi sistem lup terbuka dengan tegangan jangkar 120 volt dengan *load* 140 kg, dari Gambar 4.17, sistem mempunyai *overshoot* sebesar 113 ton/jam, sebelum mencapai *set point* sebesar 108,4 ton/jam. Sistem mempunyai *overshoot* sebesar 4,24 %, dengan *settling time* 0,6 detik. Dengan *error steady state* sebesar -9,67% jika

dibandingkan dengan respon dari model referensi dengan masukan 120 volt dan keluaran 120 ton/jam.

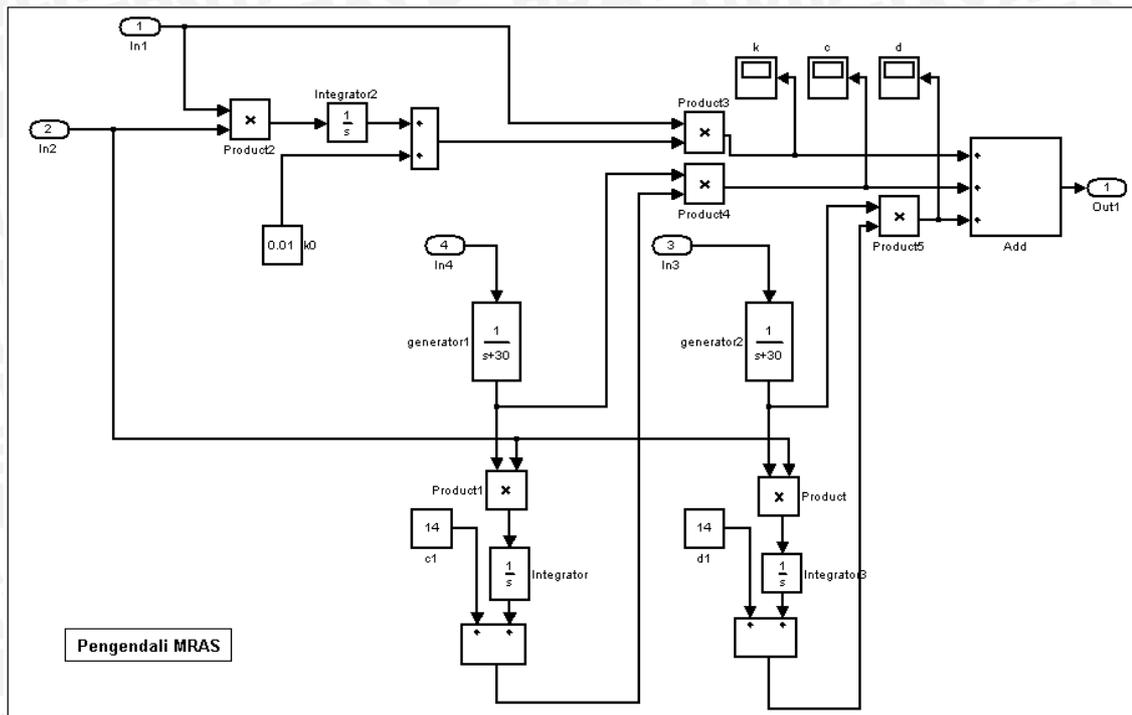
#### 4.13 Skema Simulasi *Weighfeeder Lime Stone* dengan *Model Reference Adaptive System* Pada Simulink Matlab 7.0

Dari hasil pemodelan dari masing-masing bagian pada *weighfeeder lime stone*, kemudian disimulasikan pada Simulink, dengan besar penguatan adaptasi yang diambil adalah sebesar 0,1. Besarnya nilai penguatan adaptasi berdasarkan metode *trial and error*, sampai didapatkan respon yang terbaik pada keluaran *plant*.



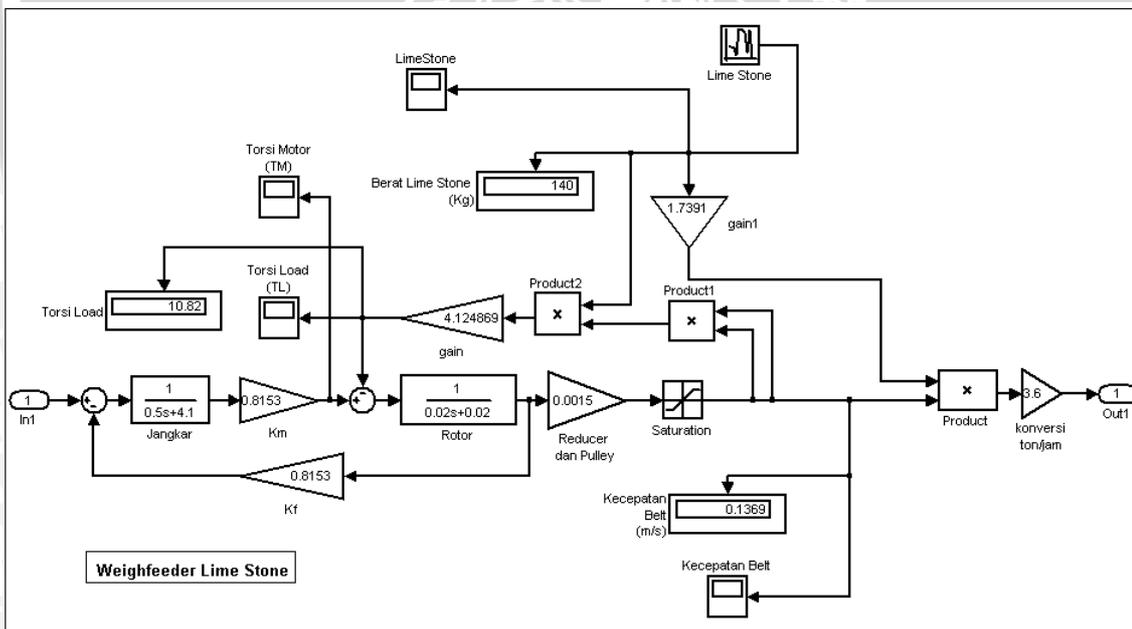
Gambar 4.22 Simulasi *weighfeeder lime stone* dengan MRAS pada Simulink.

Sumber : Perancangan



Pengendali MRAS

Gambar 4.23 Kontroler MRAS pada Simulink  
Sumber : Perancangan



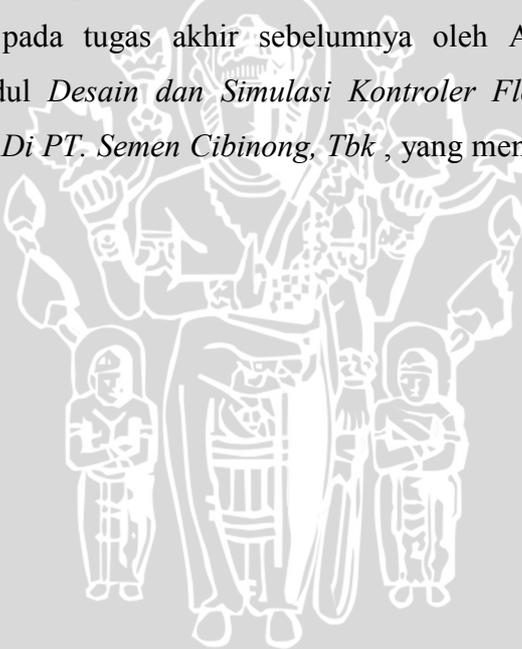
Weighfeeder Lime Stone

Gambar 4.24 Plant weighfeeder lime stone pada Simulink  
Sumber : Perancangan

#### 4.14 Alasan Penggunaan *Model Reference Adaptive System* sebagai pengendali

Dalam penulisan tugas akhir ini, *Model Reference Adaptive System* dipilih sebagai pengendali dengan pertimbangan sebagai berikut:

- a. Sistem *weighfeeder lime stone* adalah sistem yang non linier seperti ditunjukkan pada gambar 4.12 dan pengendali adaptif adalah salah satu pengendali yang dapat diterapkan pada sistem non linier
- b. Pengendali adaptif dengan metode MRAS dipilih karena pada perancangan dengan metode MRAS, parameter *plant* dan gangguan tidak perlu diketahui secara detail seperti pada perancangan dengan *Gain Scheduling* ataupun *Self Tuning Regulator*. Pada perancangan tugas akhir ini parameter dan gangguan secara detail tidak dapat diketahui disebabkan oleh terbatasnya akses pada PT Holcim International Tbk.
- c. Pengujian dengan MRAS dilakukan untuk membandingkan dengan pengujian pada tugas akhir sebelumnya oleh Andi Kurniawan, ST dengan judul *Desain dan Simulasi Kontroler Flow material Dengan Robust  $H_{\infty}$  Di PT. Semen Cibinong, Tbk*, yang menggunakan pengendali Robust  $H_{\infty}$ .



## BAB V

### PENGUJIAN DAN ANALISIS SISTEM

#### 5.1 Simulasi Model Reference Adaptive System Pada Weighfeeder Lime Stone

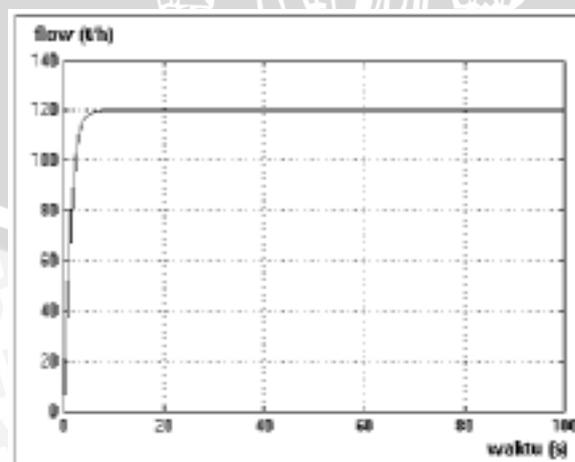
Simulasi dalam bab ini merupakan simulasi penggunaan metode MRAS pada pengendalian *flow rate weighfeeder lime stone*. Tujuan dari simulasi ini untuk mendapatkan data hasil pengendalian pada sistem *weighfeeder*.

Dalam simulasi ini dilakukan tahap-tahap:

1. Simulasi sistem tanpa *tuning* parameter pengendali tanpa gangguan.
2. Simulasi sistem dengan *tuning* parameter pengendali tanpa gangguan. *Tuning* parameter pengendali pada MRAS digunakan untuk mendapatkan respon *plant* yang dapat menjejaki respon keluaran model referensi. Jika keluaran *plant* sudah dapat menjejaki respon keluaran dari model referensi dengan baik, maka *tuning* parameter pengendali tidak perlu dilakukan. *Tuning* dilakukan dengan cara memberikan nilai awal parameter pengendali pada nilai tertentu sebelum simulasi dilakukan.
3. Simulasi sistem dengan *tuning* parameter pengendali dengan gangguan.

#### 5.2 Hasil Simulasi Model Referensi

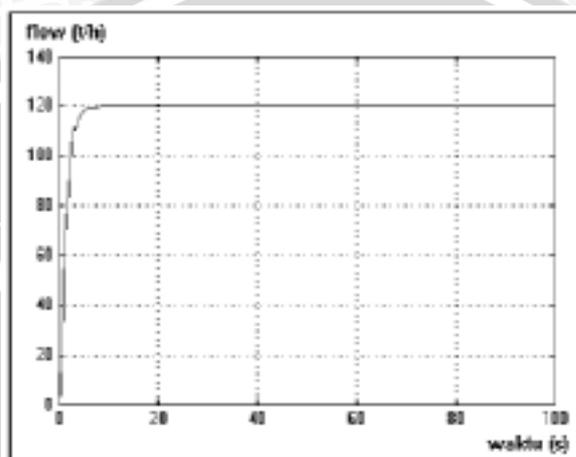
Hasil simulasi model referensi dengan *set point flow* sebesar 120 ton/ jam. Penentuan ini berdasarkan *set point* aktual pada PT. Semen Cibinong Tbk, yaitu antara 100 – 140 ton/jam. Dengan berat *lime stone* sebesar 140 kg (pada kondisi lapangan berat antara 120 – 160 kg), ditunjukkan pada gambar 5.1



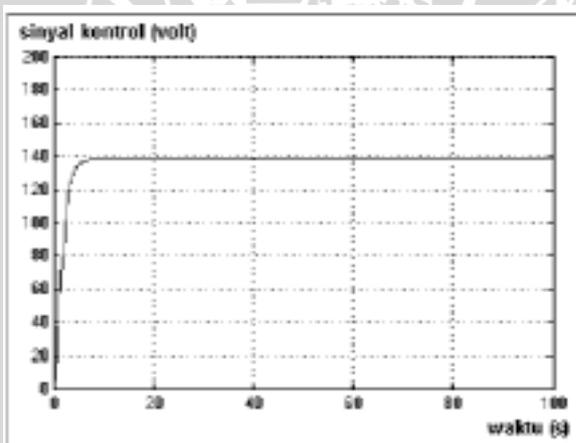
**Gambar 5.1** Respon model referensi pada sistem *weighfeeder* dengan *set point* sebesar 120 ton/jam, dan *load* 140 kg.

### 5.3 Hasil Simulasi Sistem Tanpa *Tuning* Parameter Pengendali dan Tanpa Gangguan.

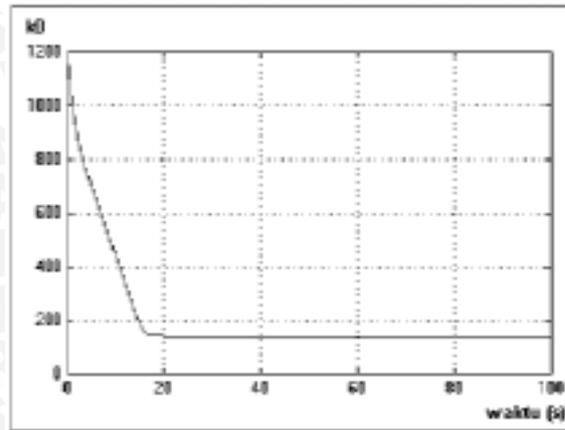
Hasil simulasi sistem tanpa *tuning* parameter pengendali tanpa gangguan dengan *set point flow* sebesar 120 ton/ jam dengan berat *lime stone* sebesar 140 kg, ditunjukkan pada Gambar 5.2 sampai dengan Gambar 5.6. Parameter awal dari  $k_0$  adalah 10,  $c_1$  sebesar 0 dan  $d_1$  sebesar 0.



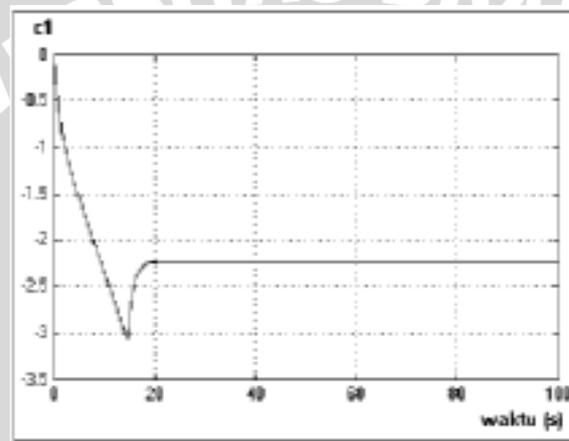
**Gambar 5.2** Respon *plant* pada sistem *weighfeeder* dengan *set point* sebesar 120 ton/jam, *load* 140 kg. Tanpa *tuning* parameter pengendali, tanpa gangguan



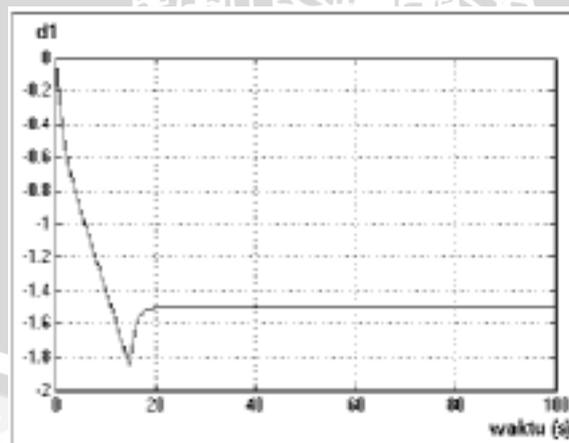
**Gambar 5.3** Sinyal kontrol pada sistem *weighfeeder* dengan *set point* sebesar 120 ton/jam, *load* 140 kg. Tanpa *tuning* parameter pengendali, tanpa gangguan



**Gambar 5.4** Sinyal parameter pengendali  $k_0$  pada sistem *weighfeeder* dengan *set point* sebesar 120 ton/jam, *load* 140 kg. Tanpa *tuning* parameter pengendali, tanpa gangguan



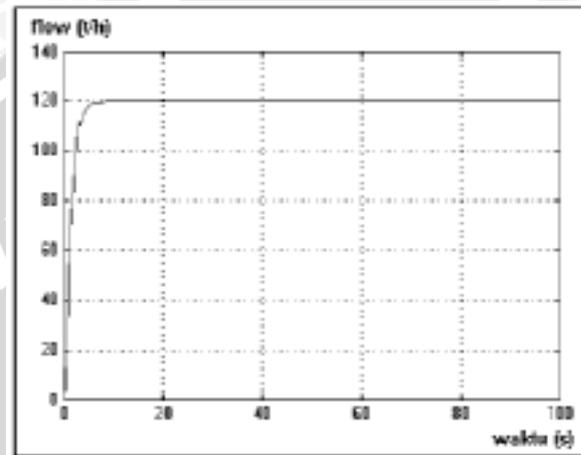
**Gambar 5.5** Sinyal parameter pengendali  $c_1$  pada sistem *weighfeeder* dengan *set point* sebesar 120 ton/jam, *load* 140 kg. Tanpa *tuning* parameter pengendali, tanpa gangguan



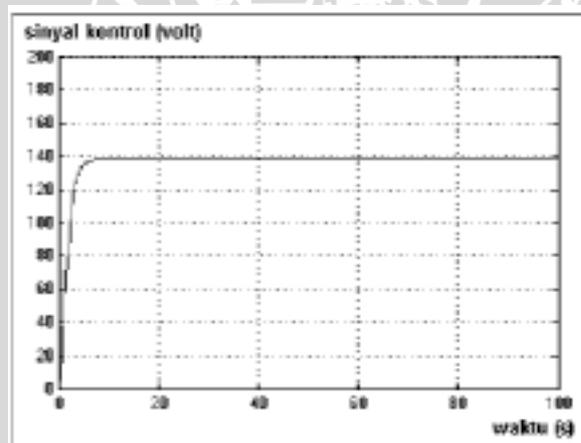
**Gambar 5.6** Sinyal parameter pengendali  $d_1$  pada sistem *weighfeeder* dengan *set point* sebesar 120 ton/jam, *load* 140 kg. Tanpa *tuning* parameter pengendali, tanpa gangguan

#### 5.4 Hasil Simulasi Sistem Dengan *Tuning* Parameter Pengendali Tanpa Gangguan.

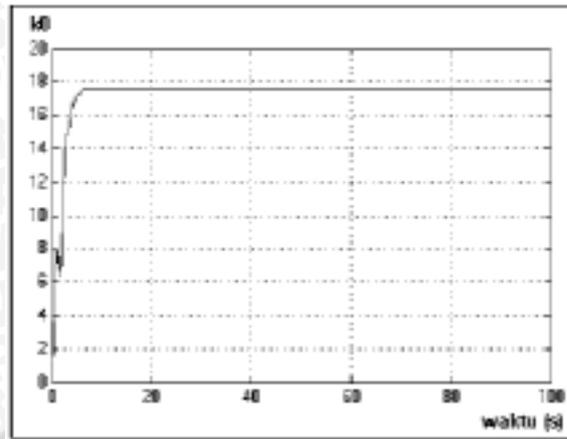
Hasil simulasi sistem dengan *tuning* parameter pengendali (pada gambar 4.20) tanpa gangguan dengan *set point flow* sebesar 120 ton/ jam dengan berat *lime stone* sebesar 140 kg, ditunjukkan pada Gambar 5.7 sampai dengan Gambar 5.11. Parameter setelah *dituning* menjadi,  $k_0$  adalah 0.01,  $c_1$  sebesar 14 dan  $d_1$  sebesar 14.



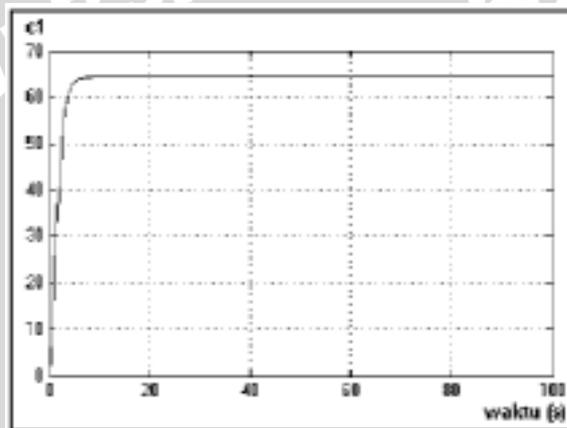
Gambar 5.7 Respon *plant* pada sistem *weighfeeder* dengan *set point* sebesar 120 ton/jam, *load* 140 kg. Dengan *tuning* parameter pengendali, tanpa gangguan



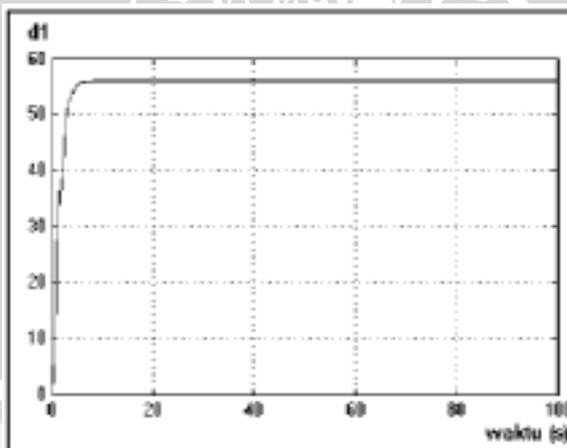
Gambar 5.8 Sinyal kontrol pada sistem *weighfeeder* dengan *set point* sebesar 120 ton/jam, *load* 140 kg. Dengan *tuning* parameter pengendali, tanpa gangguan



**Gambar 5.9** Sinyal parameter pengendali  $k_0$  pada sistem *weighfeeder* dengan *set point* sebesar 120 ton/jam, *load* 140 kg. Dengan *tuning* parameter pengendali, tanpa gangguan



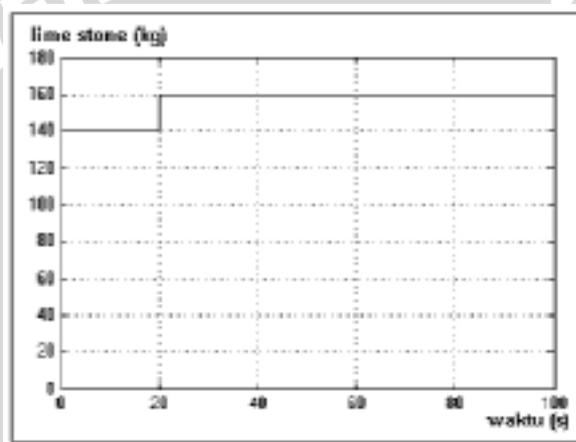
**Gambar 5.10** Sinyal parameter pengendali  $c_1$  pada sistem *weighfeeder* dengan *set point* sebesar 120 ton/jam, *load* 140 kg. Dengan *tuning* parameter pengendali, tanpa gangguan



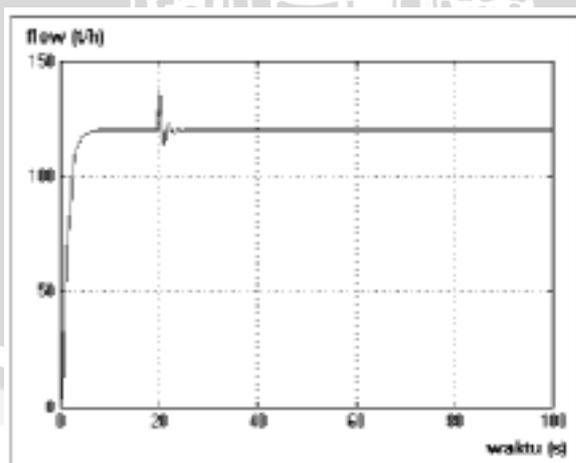
**Gambar 5.11** Sinyal parameter pengendali  $d_1$  pada sistem *weighfeeder* dengan *set point* sebesar 120 ton/jam, *load* 140 kg. Dengan *tuning* parameter pengendali, tanpa gangguan

### 5.5 Simulasi Sistem Dengan *Tuning* Parameter Pengendali Dengan Gangguan.

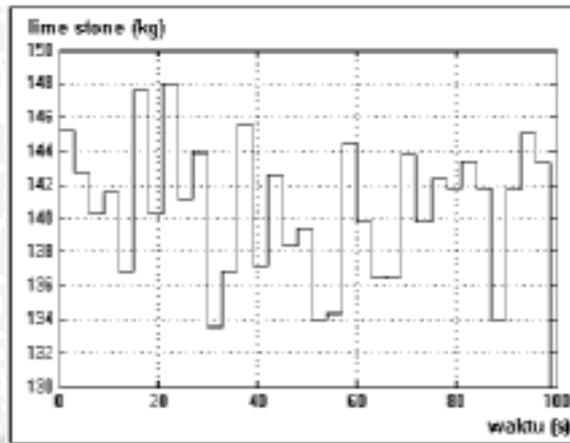
Hasil simulasi sistem dengan *tuning* parameter pengendali tanpa gangguan dengan *set point flow* sebesar 120 ton/jam dengan berat *lime stone* sebesar 140 kg, ditunjukkan pada gambar 5.12 sampai dengan gambar 5.19. Parameter dari  $k_0$  adalah 0.01, sedangkan parameter  $c_1$  sebesar 14 dan  $d_1$  sebesar 14. Simulasi gangguan yang pertama adalah pemberian gangguan berupa perubahan *load lime stone* menjadi 160 kg pada detik ke 20 dari proses, untuk mengamati waktu pulih dari sistem. Sedangkan simulasi gangguan yang kedua adalah pemberian gangguan acak pada berat *lime stone* dengan kisaran 20 kg, yang terjadi setiap 3 detik (sesuai dengan keadaan sebenarnya pada lapangan).



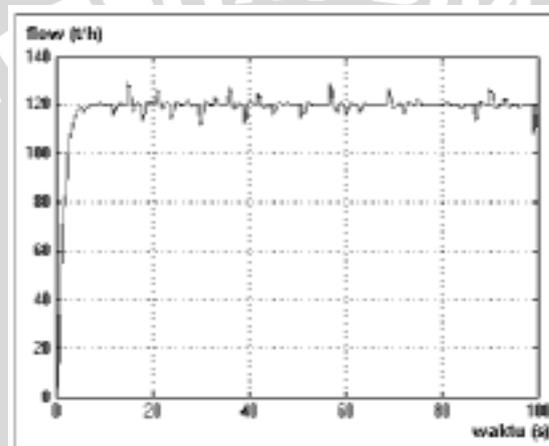
Gambar 5.12 Sinyal gangguan berupa kenaikan *load lime stone* pada detik ke 20 sebesar 20 kg.



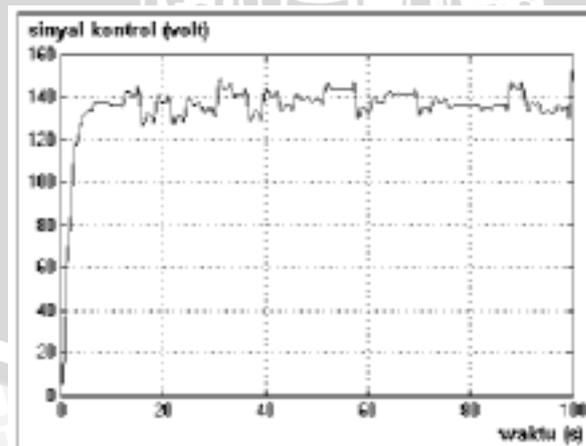
Gambar 5.13 Respon *plant* terhadap gangguan pada gambar 5.12



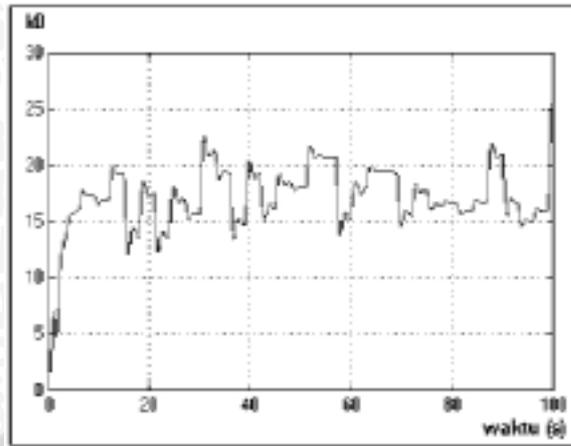
Gambar 5.14 Sinyal gangguan berupa sinyal acak pada berat *lime stone* dengan kisaran 20 kg setiap 3 detik.



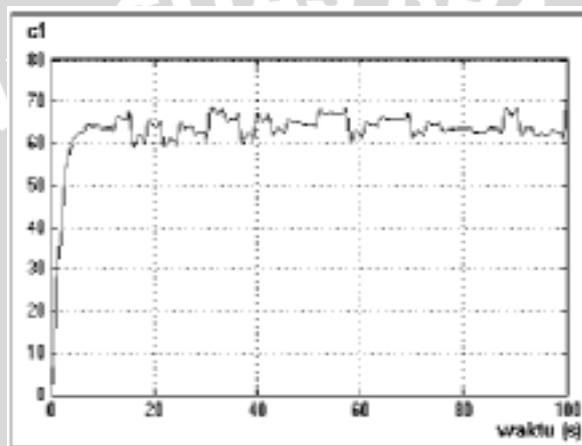
Gambar 5.15 Respon *plant* pada sistem *weighfeeder* dengan *set point* sebesar 120 ton/jam, *load* 140 kg. Dengan *tuning* parameter pengendali, dengan gangguan pada gambar 5.14



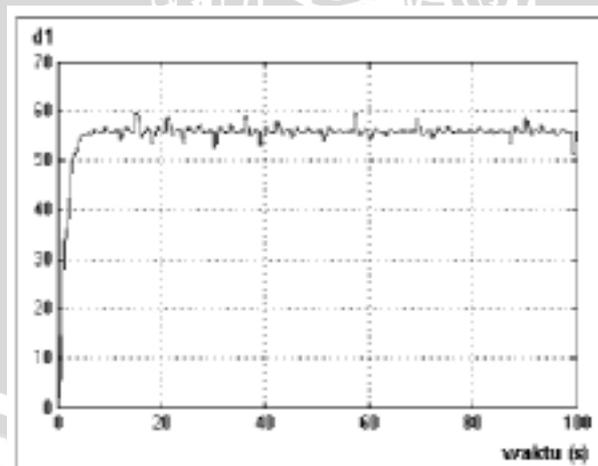
Gambar 5.16 Sinyal kontrol pada sistem *weighfeeder* dengan *set point* sebesar 120 ton/jam, *load* 140 kg. Dengan *tuning* parameter pengendali, dengan gangguan pada gambar 5.14



**Gambar 5.17** Sinyal parameter pengendali  $k_0$  pada sistem *weighfeeder* dengan *set point* sebesar 120 ton/jam, *load* 140 kg. Dengan *tuning* parameter pengendali, dengan gangguan pada gambar 5.14



**Gambar 5.18** Sinyal parameter pengendali  $c_1$  pada sistem *weighfeeder* dengan *set point* sebesar 120 ton/jam, *load* 140 kg. Dengan *tuning* parameter pengendali, dengan gangguan pada gambar 5.14



**Gambar 5.19** Sinyal parameter pengendali  $d_1$  pada sistem *weighfeeder* dengan *set point* sebesar 120 ton/jam, *load* 140 kg. Dengan *tuning* parameter pengendali, dengan gangguan pada gambar 5.14

## 5.6 Tabel Hasil Pengujian

**Tabel 5.1** Data Pengujian *Weighfeeder Lime Stone*, tanpa gangguan  
Dengan *Set Point* 120 ton/jam, *Load* 140 kg Pada Variasi Nilai  $k_0$ ,  $c_1$ ,  $d_1$

| $k_0$ | $c_1$ | $d_1$ | <i>Flow Model</i><br>(ton/jam) | <i>Flow Plant</i><br>(ton/jam) | <i>Error</i><br>(%) | <i>Kecepatan Belt</i><br>(m/s) | <i>Overshoot</i><br>(%) | <i>Settling Time</i><br>(s) | <i>Sinyal Kontrol</i><br>(volt) |
|-------|-------|-------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------|--------------------------------|-------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 10    | 0     | 0     | 120                            | 120                            | 0                   | 0,1369                         | 29,67                   | 23                          | 138                             |
| 0,01  | 0     | 0     | 120                            | 120                            | 0                   | 0,1369                         | 0                       | 10,9                        | 138                             |
| 0,01  | -5    | -5    | 120                            | 120                            | 0                   | 0,1369                         | 0                       | 12,8                        | 138                             |
| 0,01  | 10    | 10    | 120                            | 120                            | 0                   | 0,1369                         | 0                       | 9,8                         | 138                             |
| 0,01  | 14    | 14    | 120                            | 120                            | 0                   | 0,1369                         | 0                       | 8,8                         | 138                             |
| 0,01  | 15    | 15    | 120                            | 120                            | 0                   | 0,1369                         | 0                       | 8,7                         | 138                             |
| 0,01  | 16    | 16    | 120                            | 120                            | 0                   | 0,1369                         | 1,17                    | 11                          | 138                             |
| 0,01  | 20    | 20    | 120                            | 155,6                          | 29,67               | 0,1775                         | -                       | -                           | 200                             |

**Tabel 5.2** Data Pengujian *Weighfeeder Lime Stone*, tanpa gangguan  
Dengan  $k_0 = 0.01$ ,  $c_1 = 14$ ,  $d_1 = 14$

| <i>Set Point</i><br>(ton/jam) | <i>Load</i><br>(kg) | <i>Flow Model</i><br>(ton/jam) | <i>Flow Plant</i><br>(ton/jam) | <i>Error</i><br>(%) | <i>Kecepatan Belt</i><br>(m/s) | <i>Settling Time</i><br>(s) | <i>Sinyal Kontrol</i><br>(volt) |
|-------------------------------|---------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------|--------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| 120                           | 80                  | 120                            | 104,6                          | -12,83              | 0,2089                         | 3,8                         | 200                             |
| 120                           | 100                 | 120                            | 120                            | 0                   | 0,1917                         | 9                           | 193,2                           |
| 120                           | 120                 | 120                            | 120                            | 0                   | 0,1597                         | 8,9                         | 161                             |
| 120                           | 140                 | 120                            | 120                            | 0                   | 0,1369                         | 8,8                         | 138                             |
| 120                           | 160                 | 120                            | 120                            | 0                   | 0,1198                         | 8,5                         | 120,8                           |

**Tabel 5.3** Data Pengujian *Weighfeeder Lime Stone*, dengan gangguan berupa variasi perubahan beban secara acak sebesar 20kg tiap 3 detik dengan  $k_0 = 0.01$ ,  $c_1 = 14$ ,  $d_1 = 14$  (pada detik ke 100)

| <i>Set Point</i><br>(ton/jam) | <i>Load</i><br>(kg) | <i>Flow Model</i><br>(ton/jam) | <i>Flow Plant</i><br>(ton/jam) | <i>Error</i><br>(%) | <i>Kecepatan Belt</i><br>(m/s) | <i>Sinyal Kontrol</i><br>(volt) |
|-------------------------------|---------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| 120                           | 80                  | 120                            | 94,15                          | -21,54              | 0,2168                         | 200                             |
| 120                           | 100                 | 120                            | 113,5                          | -5,41               | 0,2029                         | 200                             |
| 120                           | 120                 | 120                            | 118,8                          | -1                  | 0,1736                         | 176,8                           |
| 120                           | 140                 | 120                            | 120,7                          | 0,25                | 0,149                          | 152,6                           |
| 120                           | 160                 | 120                            | 122,2                          | 1,833               | 0,1306                         | 134,2                           |

## 5.7 Analisis Hasil Simulasi Pengendalian Sistem Tanpa Gangguan dan Tanpa Tuning Parameter Pengendali

Dari tabel pengujian pada Tabel 5.1, pada pengujian dengan nilai  $k_0$  10,  $c_1$  0 dan  $d_1$  0, *error* antara *plant* dengan model referensi sama dengan 0 ton/jam pada detik ke 100, namun terjadi *overshoot* sebesar 29,67% pada awal simulasi sebelum *plant* mencapai keadaan mantap, dengan *settling time* sebesar 23 detik.

### 5.8 Analisis Hasil Simulasi Pengendalian Sistem Tanpa Gangguan Dengan Tuning Parameter Pengendali

Dari percobaan kedua pada tabel 5.1, nilai  $c_1$  dan  $d_1$  tetap nol, sementara nilai  $k_0$  diubah menjadi 0,01. *Overshoot* hilang, dan *settling time* menjadi lebih cepat. Kemudian untuk mempercepat *settling time*, nilai  $c_1$  dan  $d_1$  diperbesar, didapatkan nilai  $c_1$  dan  $d_1$  sebesar 14, dan *settling time* 8,8 detik. Pada nilai  $c_1$  dan  $d_1$  sebesar 15, *settling time* lebih cepat, yaitu 8,7 detik, namun pada awal repon terdapat *ripple*. Saat nilai  $c_1$  dan  $d_1$  sama dengan 16 dan lebih besar, timbul *overshoot*.

### 5.9 Analisis Hasil Simulasi Pengendalian Sistem Dengan Gangguan Dengan Tuning Parameter Pengendali

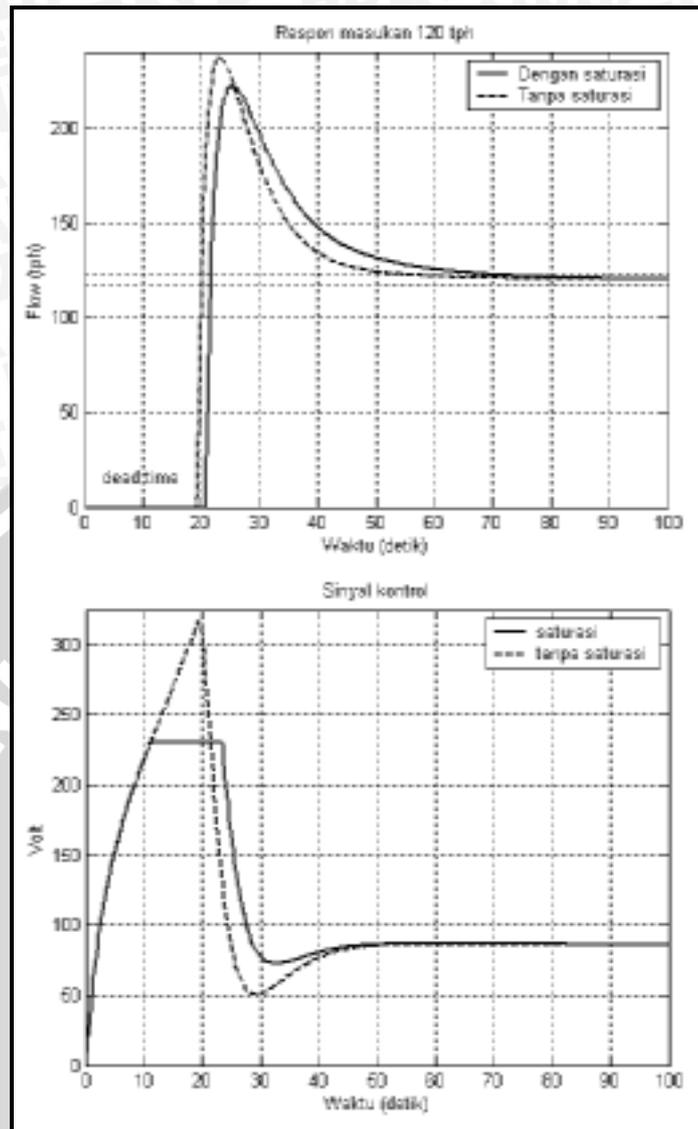
Gangguan yang diberikan pada sistem dua macam. Gangguan yang pertama adalah pemberian gangguan berupa perubahan *load lime stone* menjadi 160 kg pada detik ke 20 dari proses, untuk mengamati waktu pulih dari sistem. Sedangkan simulasi gangguan yang kedua adalah pemberian gangguan acak pada berat *lime stone* dengan kisaran 20 kg, yang terjadi setiap 3 detik.

Pada pemberian gangguan yang pertama, dari Gambar 5.13 kontroler dapat mengatasi gangguan, dengan waktu pulih sebesar 3,4 detik. Sedangkan pada pemberian gangguan yang kedua, pada pengujian saat detik ke 100 *error steady state* sistem sebesar 0,25 % dengan.

### 5.10 Perbandingan Dengan Penggunaan **ROBUST $H_\infty$** Sebagai Pengendali pada **Weighfeeder Limestone PT Holcim Intenational Tbk**

Pada tugas akhir terdahulu oleh Andi Kurniawan, ST dengan judul *Desain dan Simulasi Kontroler Flow material Dengan Robust  $H_\infty$  Di PT. Semen Cibinong, Tbk* pengendali Robust  $H_\infty$  diterapkan pada *Weighfeeder Limestone PT Holcim International Tbk*. Adapun jenis dan parameter dari *plant* yang digunakan adalah sama dengan jenis dan parameter *plant* yang digunakan dalam tugas akhir ini.

Pengujian sistem dengan pengendali Robust  $H_\infty$  dilakukan dengan memberikan *set point* sebesar 120 ton per jam, *load lime stone* 140 kg, dengan respon dapat dilihat pada Gambar 5.20. Dari pengujian ini dilihat bahwa lama waktu mati sistem (*dead time*) sebesar 20,05 detik, waktu *settling* 2 % *set point* sebesar 70 detik dan maksimum *overshoot* sebesar 222,35 ton per jam atau 85,29 % *set point*.



Gambar 5.20 Pengujian sistem *weighfeeder* dengan Robust  $H_{\infty}$  pada *set point* sebesar 120 ton/jam, *load* 140 kg.

Perbandingan penggunaan pengendali MRAS dan Robust disajikan pada tabel 5.4. Penggunaan pengendali MRAS ternyata dapat memberikan respon yang lebih baik. Hal ini ditunjukkan pada tabel 5.4 dengan waktu *settling time* yang lebih cepat, dan tidak adanya *overshoot* pada respon sistem dengan MRAS.

Tabel 5.4 Respon sistem pada pengendalian *plant* dengan Robust  $H_{\infty}$ .

| <i>Set point</i> | <i>Dead time</i> | <i>Waktu settling 2 %</i> | <i>Maksimum overshoot</i> | <i>Stabil</i> |
|------------------|------------------|---------------------------|---------------------------|---------------|
| 120 tph          | 20,05 detik      | 70 detik                  | 85,29 %                   | ya            |

Tabel 5.5 Respon sistem pada pengendalian *plant* dengan MRAS

| <i>Set point</i> | <i>Dead time</i> | <i>Waktu settling 2 %</i> | <i>Maksimum overshoot</i> | <i>Stabil</i> |
|------------------|------------------|---------------------------|---------------------------|---------------|
| 120 tph          | 0 detik          | 8,8 detik                 | 0 %                       | ya            |

## BAB VI

### KESIMPULAN DAN SARAN

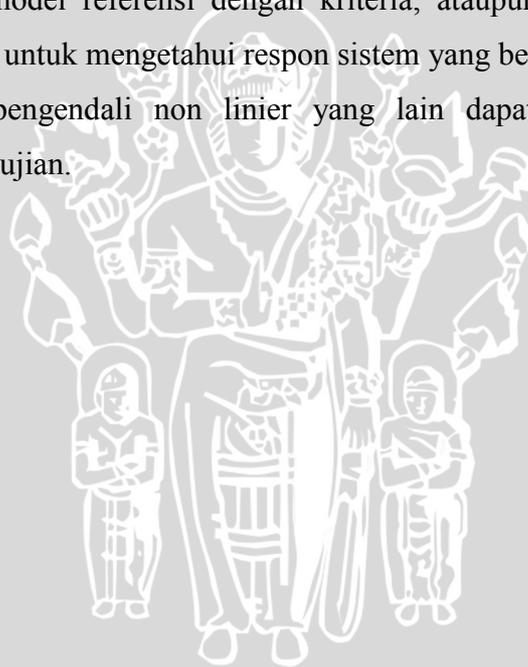
#### 6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan dengan *Model Reference Adaptive System* pada *weighfeeder lime stone* PT Holcim International Tbk Pabrik Cilacap, melalui pengujian dan analisis yang dilakukan maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Desain simulasi pengendalian *weighfeeder lime stone* dengan MRAS pada kondisi tanpa gangguan dengan *tuning* parameter pengendali  $k_0 = 0.01$ ,  $c_1 = 14$ , dan  $d_1 = 14$  dapat meminimalkan *error steady state* sistem sampai 0 %, pada set point 120 ton/jam dan load 140 kg. Sedangkan *overshoot* tidak terjadi, dan *settling time* 8,8 detik.
2. Pada simulasi dengan gangguan, pengendali MRAS dapat mengatasi gangguan. Gangguan yang diberikan berupa pemberian sinyal *step* dan sinyal acak. Pada pemberian sinyal *step*, *load* dinaikkan dari 140 ton/jam menjadi 160 ton/jam pada detik ke 20. Pengendali MRAS mampu mengatasi gangguan ini, dengan waktu pulih sebesar 3,4 detik. Pada gangguan berupa sinyal acak, *load* berubah secara acak dengan kisaran 20 kg tiap 3 detik. Respon sistem pada detik ke 100 dari pengujian dengan gangguan acak ini didapatkan *error steady state* sistem sebesar 0,25 %.
3. Penggunaan *Model Reference Adaptive System* sebagai pengendali dapat menunjukkan respon yang lebih baik jika dibandingkan dengan penggunaan pengendali Robust pada sistem. Hal ini dapat dilihat dari perbedaan *settling time* yang cukup mencolok, yaitu 8,8 detik dengan MRAS dan 70 detik pada Robust  $H_\infty$  sebagai pengendali. Hal lain diindikasikan dengan tidak adanya *overshoot* pada penggunaan *Model Reference Adaptive System* sebagai pengendali.

## 6.2 Saran

1. Daerah kerja dari sistem dibatasi oleh tegangan jangkar nominal dan kecepatan putaran nominal dari motor. Agar daerah kerja sistem lebih lebar, maka penggunaan motor dengan tegangan jangkar nominal lebih besar dan kecepatan putaran yang lebih tinggi dapat digunakan.
2. Untuk pengembangan dan sebagai alternatif lain perancangan, dapat digunakan pengendali adaptif dengan skema *Gain Scheduling* maupun *Self Tuning Regulator*.
3. Untuk meningkatkan keakuratan pemodelan dalam skripsi ini, dapat dikembangkan dengan penggunaan fungsi alih sensor berat, sensor kecepatan dan jenis motor DC yang sesuai dengan penggunaan pada lapangan.
4. Penggunaan model referensi dengan kriteria, ataupun orde yang berbeda dapat diujikan untuk mengetahui respon sistem yang berbeda.
5. Penggunaan pengendali non linier yang lain dapat digunakan sebagai alternatif pengujian.



## DAFTAR PUSTAKA

- Achmanto, D. 1992. *Mesin-Mesin Listrik (alih bahasa)*. Cetakan ke-empat. PT. Gelora Aksara Pratama. Jakarta.
- Astrom, K.J., Whittenmark, B. 1989. *Adaptive Control*. Addison-Wesley Publishing Company. USA
- Bueche, F. J. 1985. *Teori dan soal-soal Fisika*. Edisi Ke-tujuh, Penerbit Erlangga. Jakarta.
- Butler, H. 1992. *Model Reference Adaptive Control from Theory to Practice*. Prentice Hall Inc. UK
- Cibinong, Semen PT. *Motor Listrik*. Cilacap
- D’Azzo, J. J, Houpis, C. H. 1989. *Linear Control System Analysis and Design: Conventional and Modern, Third Edition*. McGraw-Hill Book Company. Singapore
- Kuo, B. C. 1995. *Teknik Kontrol Automatik*. Jilid 1. Prentice Hall. Inc. UK
- Kurniawan, A. 2006. *Desain dan Simulasi Kontroler Flow material Dengan Robust  $H_{\infty}$  Di PT. Semen Cibinong, Tbk*. Teknik Elektro Universitas Brawijaya. Malang.
- Mariani, D. E. 2005. *Perancangan Pengendalian Kecepatan Pada Horizontal Axis Wind turbine (HAWT) Menggunakan Model Reference Adaptive System (MRAS) Untuk Mendapatkan Daya Keluaran Yang Maksimal*. Teknik Elektro Universitas Brawijaya. Malang.
- Narendra, K. S. Annaswamy, N . 1989. *Stable Adaptive Control*. Prentice Hall Inc. Englewood Cliffs, NJ.
- Nise, N. S. 1993. *Control System Engineering*. 2<sup>nd</sup> edition. Addison-Mosley Publishing Company. USA
- Ogata, K. 1995. *Teknik Kontrol Automatik Jilid I, Cetakan Ketujuh*. Erlangga. Jakarta.
- Ogata, K. 1997. *Teknik Kontrol Automatik Jilid II, Cetakan Pertama*. Erlangga. Jakarta.
- Phillips, C.L, Harbor, R.D. 1998. *Sistem Kontrol : Dasar-dasar*. PT Prenhallindo. Jakarta.
- Putra, N .A. 2006. *Perancangan Kontroler Logika Fuzzy Untuk Pengendalian Aliran Clinker Pada Weight Feeder Di PT Semen Gresik (Persero), Tbk*. Teknik Elektro Universitas Brawijaya. Malang.

Sastry, S., Bodson, M. 1993. *Adaptive Control, Stability, Convergence and Robustness*.

Prentice Hall Inc. Englewood Cliffs, NJ

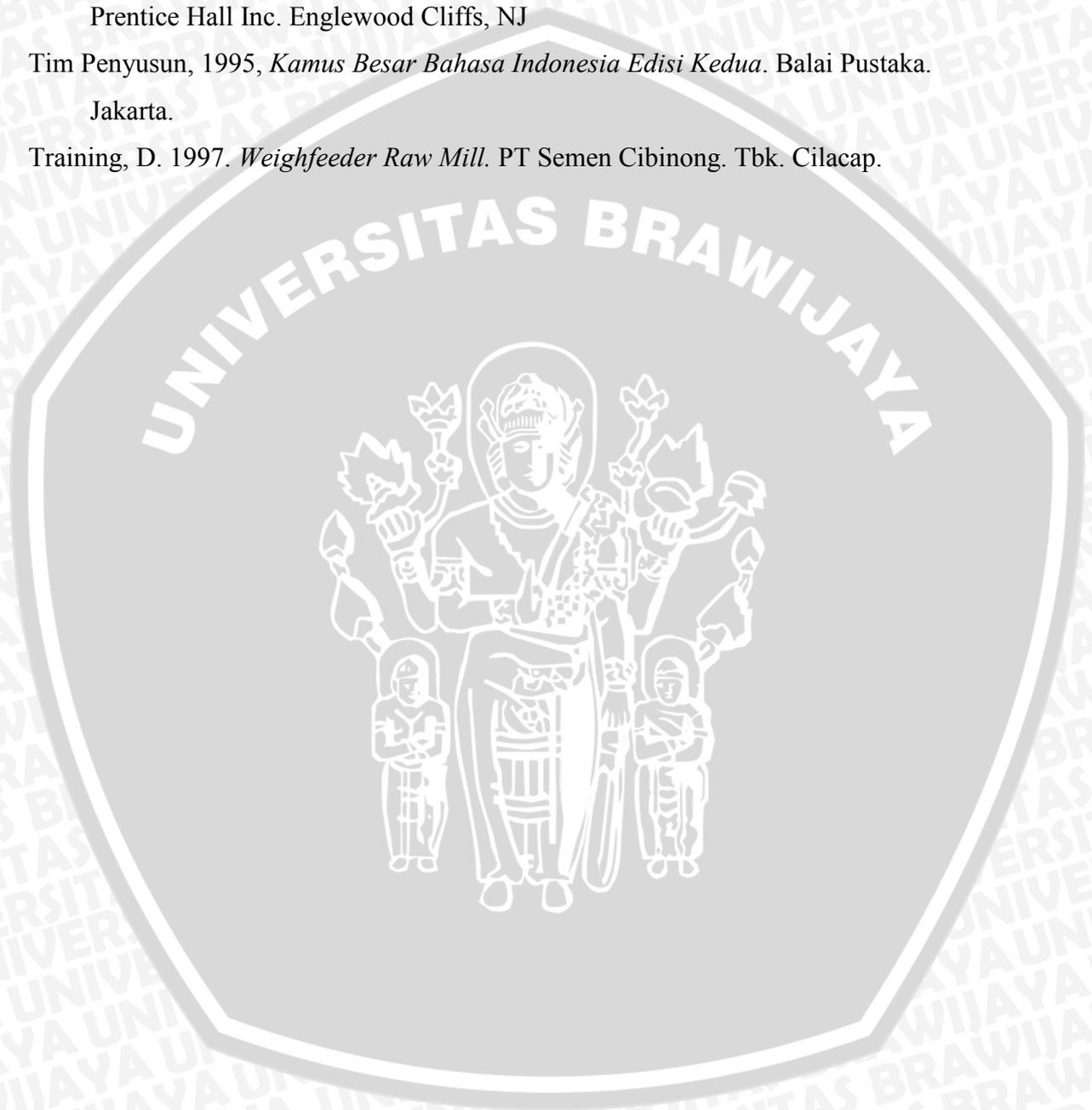
Sears, F., Zemansky, M. 1994. *Fisika Untuk Universitas 1 Mekanika, Panas dan Bunyi*.

Prentice Hall Inc. Englewood Cliffs, NJ

Tim Penyusun, 1995, *Kamus Besar Bahasa Indonesia Edisi Kedua*. Balai Pustaka.

Jakarta.

Training, D. 1997. *Weighfeeder Raw Mill*. PT Semen Cibinong. Tbk. Cilacap.



# LAMPIRAN



## **Proses Pembuatan Semen Pada PT. Holcim International Tbk**



**Data Sheet Weighfeeder Schenck  
Pada PT Holcim International Tbk**



**Simulasi Matlab Weighfeeder Lime Stone  
Pada PT. Holcim International Tbk**



