PERANCANGAN DAN ANALISIS ALGORITMA PROPORTIONAL-INTEGRAL-DERIVATIVE UNTUK MEMINIMASI TIME DIFFERENCE ERROR LORAN-C

Design and Analysis of Proportional-Integral-Derivative Algorithm for Minimizing Loran-C Time Difference Error

[1] Katamso [2]Dr. Ir. Bambang Hidayat [3] Unang Sunarya, ST.MT

[1,2,3]Jurusan Teknik Telekomunikasi – Universitas Telkom
Jl. Telekomunikasi, Dayeuh Kolot Bandung 40257 Indonesia
[1] katamso@students.telkomuniversity.ac.id [2]bbhtelkom@gmail.com, [3]usatelkom@gmail.com

Abstrak

Dalam penilitian ini dilakukan Penilitian penggunaan algoritma Proportional Integral Derivative (PID) untuk melakuan kontrol terhadap TDE Loran-C. Loran (Long Range Navigation) adalah sitem radio navigasi terrestrial yang berfrekuensi rendah dengan memanfaatkan sifat perambatan gelombang radio di atas permukaan bumi (groundwave). Loran-C adalah Loran tipe C yang bekerja pada frekuensi 90-110 KHz. Sistem navigasi ini terdiri dari sebuah stasiun master (master station), dan minimum dua stasiun sekunder (secondary station), kesatuan sistem ini disebut loran chain. Konsep dasar dari sistem ini adalah penentuan posisi geografis berdasar interseksi dua atau lebih gelombang radio dari master station dan secondary station yang tentu memliki selisih waktu kedatangan sinyal atau time difference (TD). Pengaruh langsung dari noise kanal maupun noise frekuensi tinggi komponen adalah TD yang tercatat mengalami error menyimpang dari toleransi Controlling Standard Time Difference (CSTD). Kesalahan TD ini disebut Time Difference Error (TDE), menyebabkan penentuan posisi geografis tidak akurat. United States Coast Guard (USCG) lembaga yang menaungi riset dan pengembangan Loran menetapkan spesifikasi CSTD untuk toleransi TDE sebesar ±50 ns dan TDE kumulatif sebesar ±100 ns, namun pada praktisnya sejumlah data TDE belum memenuhi standar tersebut. PID merupakan persamaan matematis dengan tiga buah variabel kontrol : proportional controller, integral controller, derivative controller. PID dapat diimplementasikan pada sistem yang tidak dapat dimodelkan sebagai sistem linear time invariant, pada Penilitian ini adalah sistem pengolahan data TDE LORAN-C. Dengan adaptive PID diharapkan proses tuning konstanta control PID yang merupakan kelemahan PID konvensional dapat dieliminasi.

Dari hasil simulasi yang telah dilakukan, implementasi algoritma kontrol PID ini menunjukan respon TDE dan TDE kumlatif yang lebih baik daripada sebelum pemberian kontrol. TDE menurun secara signifikan sebesar 97,08% dari sebelumnya, dan TDE kumulatif sudah di batas jangkauan toleransi meski masih ditemui beberapa data TDE yang masih di luar toleransi.

Kata kunci : LORAN-C, TDE, PID

Abstract

The purpose of this final project is about controlling Time Difference Error (TDE) using Proportional-Integral-Derivative (PID) Algorithm. Loran-C is a terrestrial radio navigation system used to be worked on low frequencies from 90 to 110 Khz. This system basically consists of a master station, and two secondary stations, all of these are called by loran chain. Loran chain operates on the principle that radio waves travel at a constant velocity. The time difference (TD) is a measurement of the difference in arrival time of radio pulses from two time-synchronized transmitting loran chain stations, establishes a hyperbolic line of position. The intersection between two or more lines of position provides a location. Many noises came from channel or high frequency devices at transmitter and receiver side directly affect untconstantly time difference, this time difference error (TDE) causes unsure position. United States Coast Guard provides the standard limit tolerances of TDEs are ±50 ns and ±100 for cumulative TDE. TDE of Loran-C system can be modeled as a linear time invariant, while PID consists of controllers: proportional controller, integral controller, derivative controller,those three are applicable to control problem on a feedback system with constant parameters. Using adaptive PID will remove the disadvantage of PID constants variables tuning.

Implementation of this PID controller on simulation showed better response TDE and cumulative TDE than uncontrolled one. TDE was significantly decreased to 94.21 percents after controlling, and cumulative TDEs did not across the limit tolerance, although there were still some TDEs exceeded the limit.

Keywords : Loran-C,TDE, PID

I. PENDAHULUAN

LORAN-C pada mulanya diusulkan oleh R.J Dippy pada tahun 1937 dan menjadi sangat diminati mulai tahun 1942 untuk berbagai keperluan navigasi terkhusus sektor maritim dan militer di era perang duina ke-2. Hal tersebut mendasar pada keunggulan LORAN yang mampu menjangkau jarak yang cukup jauh pada sebuah sistem pemancar. Selain itu sifat propagasinya yang merupakan groundwave dapat menjangkau ke tempat terrtutup misalnya gedung atau gua. [6]

LORAN-C terdiri dari beberapa loran chain yang terpisah pada jarak tertentu. Tiap chain minimal terdiri atas satu stasiun master (master station) dan dua stasiun sekunder (secondary station). Tiap stasiun akan mengirimkan pulsa secara kontinu pada interval waktu tertentu kepada penerima. Perbedaan waktu kedatangan pulsa di user antara master dan masing-masing secondary yang disebut Time Difference (TD).

Pada praktisnya LORAN dikontrol oleh Loran Consolidated Control System (LCCS). LCCS inilah yang mengolah TD (Time Difference) data dari stasiun monitoring. Data TD yang diterima ini difungsikan sebagai penentu posisi dan tingkat keakuratan LORAN. Akibat dari propagasi sinyal LORAN dilewatkan pada kanal dengan jarak antar stasiun yang cukup jauh maka sinyal akan dipengaruhi beberapa noise-noise, antara lain bentuk permukaan bumi yang tidak rata, interferensi dengan sinyal lain, pantulan dari objek-objek sekitar. Akibatnya TD yang diperoleh mengalami error atau disebut Time Difference Error (TDE) menyebabkan penentuan posisi geografis tidak akurat. [2]United States Coast Guard (USCG) telah menetapkan batas kontrol untuk TDE adalah 0 hingga ±50 ns dan TDE komulatif tidak lebih dari ±100 ns.

Dalam tugas akhir ini akan dilakukan Penilitian penggunaan algoritma Proportional Integral Derivative (PID) untuk melakuan kontrol terhadap TDE. PID merupakan persamaan matematis dengan tiga buah variabel kontrol : proportional controller, integral controller, derivative controller. Dengan kelebihan ini, PID dapat diimplementasikan pada sistem yang tidak dapat dimodelkan sebagai sistem linear time invariant, pada Penilitian ini adalah sistem pengolahan data TDE LORAN-C, sehingga diharapkan TDE dapat terminimalisasi sesuai ketetapan USCG dan penentuan lokasi lebih presisi.

Penyususunan Penilitian ini memiliki beberapa tujuan sebagai berikut: Merancang dan mensimulasi persmaan algoritma adaptive Proportional Integral Derivative khusus untuk minimalisasi TDE. Menganalisa hasil kinerja algoritma yang telah dibuat dalam hal peminimalisasian Time Difference Error (TDE).

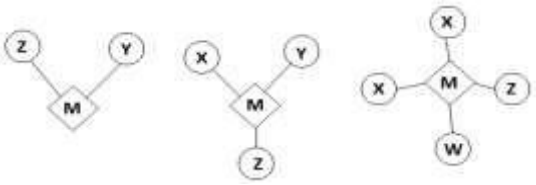
Identifikasi masalah yang harus diperoleh pemecahanya dalam penelitian ini adalah sebagai berikut : Bagaimana perancangan dan simulasi algoritma adaptive Proportional Integral Derivative untuk meminimalisasi Time Difference Error (TDE) ? Apakah hasil keluaran dari algoritma yang dibuat dapat meminimalisasi Time Difference Error (TDE) ?

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut : Studi Literatur yaitu penelitian dilakukan dengan dasar penemuan masalah serta proses pembelajaran dengan kajian berbagai sumber pustaka baik berupa buku, jurnal ilmiah, maupun media elektronik. Konsultasi dengan Dosen Pembimbing, diperlukan untuk mengkaji dan merumuskan sekaligus objek rujukan metode yang tepat untuk diimplementasikan kedalam sistem. Selain itu konsultasi juga bertujuan untuk memecahkan masalah yang terjadi selama pengerjaan tugas akhir ini. Simulasi, dimana penelitian dilakukan dalam bentuk perancangan dan simulasi dengan menggunakan software aplikasi Matlab R2009a. Kemudian dilakukan analisa terhadap keluaran algoritma yang dirancang.

II. DASAR TEORI DAN METODE

A. Loran-C

Pada Loran-C User Handbook [1] disebutkan *"loran is an acronym for long-range navigation. It is a radionavigation system using land-based radio transmitters (operated in the United States by the USCG) and eceivers to allow mariners, aviators, and (more recently) those interested in terrestrial navigation to determine their position."*. Dari referensi tersebut juga disebutkan bahwa United States Coast Guard (USCG) mengembangkan sistem navigasi non-satelit ini dengan konsep pemanfaatan sifat dasar propagasi gelombang radio yang merambat pada kecepatan konstan di medium (udara). Pengukuran dilakukan pada beda waktu kedatangan sinyal radio, dengan adanya selisih waktu kedatangan yang tersinkronisasi dari kedua sinyal tersebut dapat digunakan sebagai acuan untuk menentukan posisi geografis receiver secara akurat. Elemen dasar penyusun Loran-C adalah loran chain. Tiap chain yaitu kesatuan sistem minimal terdiri dari sebuah stasiun master dan dua buah stasiun secondary. Topologinya seperti pada Gambar 1 Penamaan stasiun sekunder biasanya berupa huruf abjad disortir dari huruf Z, Zulu, kemudian Yankee, Xray, Whiskey, Victor, dan seterusnya.



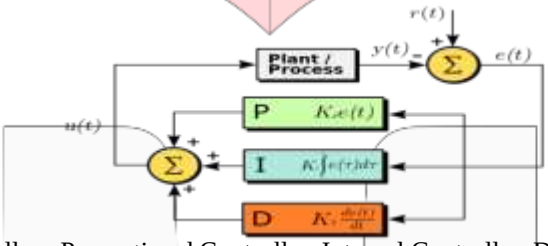
Gambar 1 Topologi loran chain, triad, wye, star. [1]

Konsep dasar sistem Loran-C yaitu pengontrolan Time Difference (TD) antara selisih waktu kedatangan dari sinyal transmisi dimana pada keadaan normal atau steady-state sinyal TD akan bersifat fluktuatif. Karena dipropagasikan pada media wireless (udara), sinyal ini dipastikan terkontaminasi oleh noise sehingga mengakibatkan adanya error pada TD yang diterima, disebut Time Difference Error (TDE). Error yang dimaksud ini adalah TD yang menyimpang dari TD yang ditetapkan USCG untuk sebuah kontrol standar TD atau *Controlling Standard Time Difference* (CSTD) agar maksimum nilai TDE adalah ±50 nanosekon serta TDE kumulatif ±100 nanosekon.

TD pada praktisnya berupa data-data waktu yang tercatat oleh Calculatior-Asisted Loran-C Controller (LCCS), yaitu fluktuatif antara 0 hingga 100 nanosekon dan sebian kecil lebih dari 100 nanosekon. Agar TD tetap sesuai dengan CSTD yaitu ±100 nanosekon perlu disisipkan sejumlah nilai LPA (*Local Phase Adjusment*), yang berupa penyesuaian waktu dalam kelipatan 20 nanosekon oleh operator. [2][7]

B. Adaptive Proportional Integral Derivative (PID)

Proportional Integral Derivative (PID) adalah sebuah algoritma yang sering digunakan untuk menyelesaikan masalah proses industrial dimana sistemnya tidak dapat dimodelkan sebagai bagian-bagian kecil blok sistem dan sistem linear time-invariant. Hal ini dikarenakan kelebihan algoritma ini memiliki tiga bua fungsi kontrol dalam sebuah persamaan : proportional controller, integral controller, derivative controller.[11]



Gambar 2 PID Controller : Proportional Controller, Integral Controller, Derivative Controller. [11]

Persamaan matematika dinomori dengan angka Arab di dalam tanda kurung buka-tutup pada posisi rata kanan kolom. Persamaan ditulis menjorok ke dalam sejauh satu 7,5 mm. Untuk persamaan yang tidak cukup ditulis dalam lebar 1 kolom, penulisannya dapat melintasi 2 kolom, ditulis di bagian bawah halaman dan diberi nomor urut yang sesuai.

Proportional controller merupakan fungsi transfer yang dapat berupa sebuah gain, kp.. Untuk input e(t), diperoleh output : [9][10][11]

$$u(t) = k_p e(t) \quad (1)$$

fungsi ini menunjukan sistem akan memberi feedback pada tiap harga kp . Meski demikian setiap kenaikan harga kp respon transfer akan semakin besar secara eksponensial, feedback dari sistem menjadi tidak stabil. Kelemahan utama dari proportional controller ini adalah output kondisi steady-state untuk tiap nilai kp dengan input referensi sama. Selanjutnya untuk input yang sama, keluaran dari integral controller adalah : [9][10][11]

$$( ) \quad \int ( ) \quad (2)$$

dengan ki adalah konstanta integral. Persamaan integral di atas dapat disederhanakan menjadi sebuah fungsi transfer untuk integral controller : ki/t .Jika sistem memberi feedback stabil maka error dari keluaran steady-state untuk setiap input adalah nol pada semua harga ki. Kelebihan ini maka integral controller dapat menstabilkan feedback dari sistem, karena tidak perlu melakukan mengeset ulang set-point dimana ki berubah.

Derivative controller memberi kontrol pada sistem dengan menggunakan laju perubahan error sinyal sebagai input, sehingga output : [9][10][11]

$$. \quad ( ) \quad \frac{( )}{} \quad (3)$$

Algoritma kontrol PID menerima masukan TDE dalam selang waktu k, memberi keluaran LPA yang direkomendasikan pada waktu k tersebut. Kp adalah gain proporsional yang berpengaruh langsung terhadap TDE. Selanjutnya gain integral Ki mengontrol integral dari TDE yaiut TDE komulatif. Selama durasi waktu antara k-1 hingga k, dipastikan terdapat error ∈(k). Laju perubahan error tersebut dikontrol oleh gain derivatif Kd . Dalam system diskrit dapat ditulis sebagai berikut :

$$( ) \quad ( ) \quad \Sigma \quad ( ) \quad (( ) \quad (\quad)) \quad (4)$$

Dalam fungsi beban z [3] :

( ) – — —

————— (5)

Dengan :

— —

— —

—

Sifat adaptivitas algoritma yang dimaksud di sini adalah penentuan nilai konstanta kontrol PID (Kp,Ki, dan Kd) secara ototomatis sesuai inputan yang diberikan. Prinsip mendasar sifat ini adalah didasarkan pada selisih *error* referensi (R) dengan *error* aktual (E) kemudian dibuat fungsi obyektif kuadrat [4]:

( ) –* ( ) (————————) +

— (———) (————————) (———)

— (———) (————————) (———)

( ) ( ) ( )

dalam fungsi diskrit: — ——— ——————— ———

$$a_n(k+1) = a_n + \beta e2(k) e_1(k-n) \quad n = 0,1,2$$

dengan beta adalah *rate of convergance*. Gradien dari ketiga buah fungsi a di atas digunakan sebagai penentu nilai konstanta kontrol PID.

D. Finite Impulse Response

Untuk masukan algoritma PID yang berupa data-data Loran-C yang tidak hanya terkontaminasi komponen noise media transmisi, tetapi juga noise frekuensi tinggi pada komponen transmisi dan penerimanya, maka eliminasi terhadap noise ini perlu dilakukan. Finite Impulse Response (FIR) adalah filter yang bersifat linear-phase dan impulse respon yang terbatas (finite). Kelebihan filter tersebut juga kemudahanya untuk didesain maka filter ini dipilih sebagai eliminator noise frekuensi tinggi.

FIR dapat didesain dengan cara frequency sampling dan windowing. Metode windowing, w(n), memberi batasan respon sampel unit, h(n), yang bersifat tidak terbatas (infinite) sejauh jangkauan window (M-1) dengan mengalikan h(n) dengan window yang lebarnya M. Filter FIR sepanjang M yang telah dilakukan windowing meberi keluaran respon sampel : [5]

( ) ——— — (6)

Untuk eliminasi *sidelobe* yang lebar, diperlukan sebuah window yang secara bertahap mengecil hingga mendekati nol Salah satu window yang digunakan di penelitian ini misalnya Hamming window, sebagai berikut : [5]

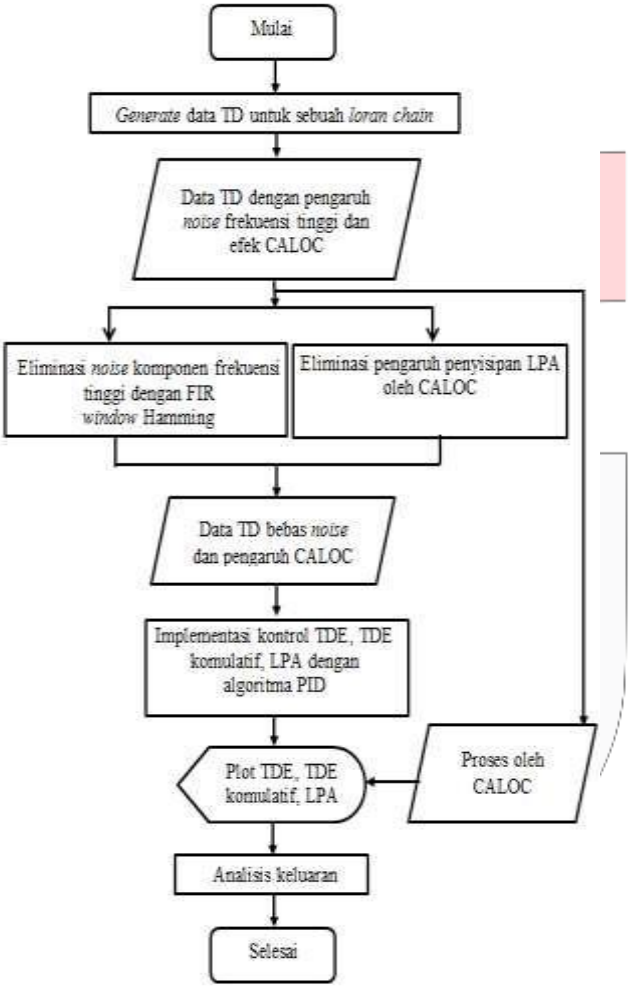
( ) (——) (7)

C. Simulasi

Obyek dari penelitian ini adalah data-data Time Difference (TD) dari sebuah loran chain yang di-generate agar sesuai dengan spesifikasi data yang tercatat Loran Support Unit USCG. LCCS pada sistem monitoring LCCS menambahkan LPA guna mengontrol TD tetap sesuai dengan CSTD yang diset sebelumnya sehingga perlu dilakukan eliminasi efek penambahan LPA oleh LCCS dari set data. Perlu diperhatikan juga bahwa data ini diperoleh dari sinyal loran selain terkontaminasi oleh noise media (udara) juga noise frekuensi tinggi akibat komponen transmitter dan receiver, maka noise tersebut perlu juga untuk dieliminasi. Hingga set data dimungkinkan benar-benar data murni dari loran chain maka selanjutnya penerapan kontroler algoritma PID dibarikan. Output dari kontroler PID pada simulasi ini berupa LPA perbaikan error TD (TDE), dan TDE Komulatif. Monitoring terhadap loran chain selama 24 jam, sejumlah data TD tercatat secara orisinil berupa data dengan jangkauan 0 hingga 99, merepresentasikan skala TDE aktual -50 hingga +49[7]. Tiap satuan skala dari data ini mewakili 10 nano sekon, sehingga perlu dilakukan penskalaan dengan pengali 10 nano sekon pada

proses data yang akan dilakukan. Selain hal tersebut, pada praktisnya terdapat time delay selama proses koreksi data oleh LCCS, evaluasi LPA, dan efek dari durasi pendeteksian sinyal pada stasiun monitor. Time delay ini juga bersifat fluktuatif, namun oleh perhitungan LCCS ditetapkan delay rata-rata yaitu 10 sekon, yang berarti setiap 10 sekon ini diperoleh 1 buah data poin sehingga tiap sampling interval 7,5 menit oleh monitor akan tercatat sejumlah rata-rata 45 data poin[7]. Ini berarti setiap satu hari pengamatan terdapat 8640 data poin yang tercatat oleh LCCS.

Data kuantitatif yang diperoleh adalah dalam nilai numerik TDE, TDE komulatif, dan LPA. Analisis dilakukan dengan membandingkan data keluaran dari algoritma yang telah dibuat dengan beberapa indikator berikut : TDE tidaklah mempunyai nilai yang lebih dari jangkauan ±50 ns, TDE komulatif tidaklah mempunyai nilai yang lebih dari jangkauan ±100ns, jumlah penyisipan LPA sekitar 179 dari buah dengan nilai kelipatan 20ns. Jika ketiga hal tersebut terpenuhi maka dapat ditarik kesimpulan bahwa algoritma yang disimulasikan berhasil. Jika terdapat penyimpangan dari keluaran yang diharapkan selanjutnya akan dilakukan kajian yang lebih mendalam untuk diajukan sebagai pertimbangan penelitian lanjutan pada subbab saran.



Gambar 4 Diagram Alir simulasi

III. ANALISIS

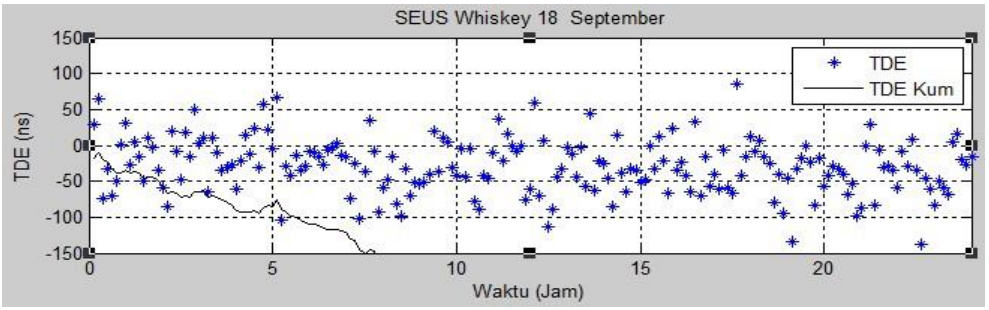
Sejumlah 12 buah data set akan di-*generate* pada simulasi ini, yang merepresentasikan loran chain aktual di bawah kontrol USCG[7][8] yaitu dua kali pengamatan untuk chain SEUS (South-East U.S.) : Whiskey, Xray, Yankee, Zulu; dua kali pengamatan chain SOCUS (South Central U.S.) : Victor, Whiskey, Xray, Yankee, Zulu; dua kali pengamatan chain USWC (U.S. West Coast) : Whiskey, Xray, Yankee.

Secara teknis, penelitian dilakukan dengan melakukan percobaan penggantian 3 buah konstanta kontrol PID : Kp, Ki, Kd, hingga diperoleh respon optimum. Respon optimum diindikasikan oleh grafik TDE dan TDE kumulatif yang memiliki rataan (*mean*) paling minim, serta masih tersebar di jangkauan toleransi, ±50 ns untuk TDE dan ±100 ns untuk TDE kumulatif. Berikut ini adalah tabel properti hasil simulasi :

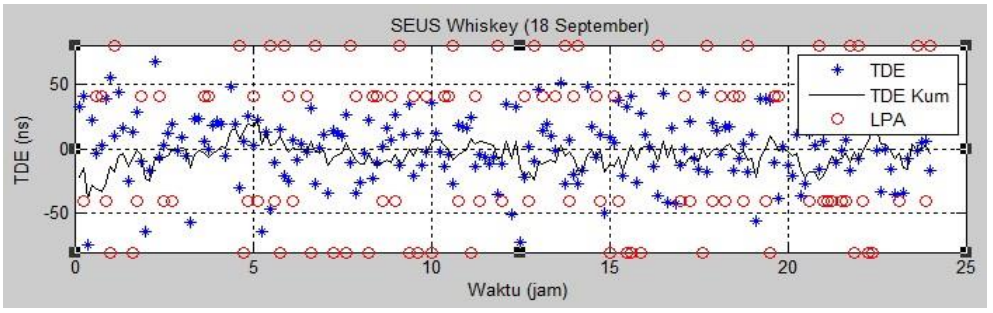
Loran Chain	Secon-dary	Sebelum kontrol PID			Sesudah kontrol PID				Nilai Minimasi (%)
		Min	Max	Mean	Min	Max	Mean	Jumlah TDE luar toleransi	
SEUS	Whiskey	-137,5	84,68	-29,05	-74,02	67,44	1,624	10	94,40964
	Xray	-119,3	51,91	-26,87	-72,44	70,16	1,722	10	93,59137
	Yankee	-127	72,85	-26,73	-69,75	67,89	1,082	9	95,95211
	Zulu	-135,1	73,75	-22,43	-69,75	67,89	0,665	9	97,03522
SOCUS	Victor	-114,4	73,12	-27,74	-94,62	68,73	1,858	10	93,30209
	Whiskey	-136,5	58,56	-25,9	-105	73,29	0,027	8	99,89575
	Xray	-121,6	72,6	-26,92	-67,66	77,07	0,735	16	97,26969
	Yankee	-88,67	46,42	-26,79	-67,05	83,6	1,154	3	95,69242
	Zulu	-140,8	78,66	-30,44	-86,91	59,94	0,563	5	98,15046
USWC	Whiskey	-99,3	56,22	-28,26	-61,94	76,04	0,30	11	98,9384
	Xray	-136,3	80,86	-25,7	-105,5	67,6	-0,038	6	99,85214
	Yankee	-134,6	62,82	-25,29	-59,86	90,34	0,003	2	99,98814

Tabel 1 Nilai properti hasil simulasi respon TDE sebelum dan sesudah kontrol PID

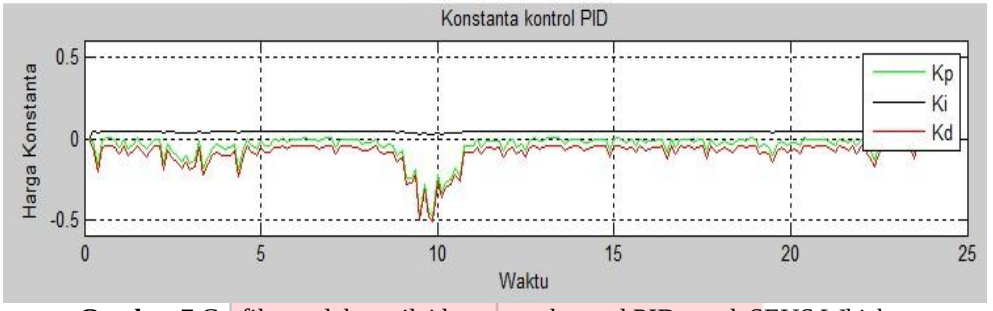
Terlihat dari daftar di atas bahwa beberapa poin data TDE masih tersebar di luar jangkauan toleransi (±50 ns). Hal ini disebabkan *tuning* konstanta PID yang dilakukan secara *trial-eror*. Pemilihan ketiga buah konstanta PID adalah hal yangat asosiatif, pemaksimalan konstanta Kp untuk mengontrol TDE mengakibatkan TDE kumulatif keluar batas toleransi, pemaksimalan Ki untuk mengontrol TDE kumulatif sejumlah data TDE keluar batas toleransi, pemaksimalan keduanya menyebabkan nilai yang lebih besar serta jumlah penyisipan LPA lebih banyak. Tabel di atas menampilkan hasil yang dianggap ideal, dengan memprioritaskan nilai penurunan TDE yang dilihat dari nilai *mean* sebelum dan sesudah kontrol, dengan masih memperhatikan jumlah TDE yang keluar batas toleransi dengan seminim mungkin. Sehingga diperoleh minimasi rata-rata dari ke 12 data set adalah sebesar 97,00%. Di bawah ini gambar beberapa grafik respon hasil simulasi:



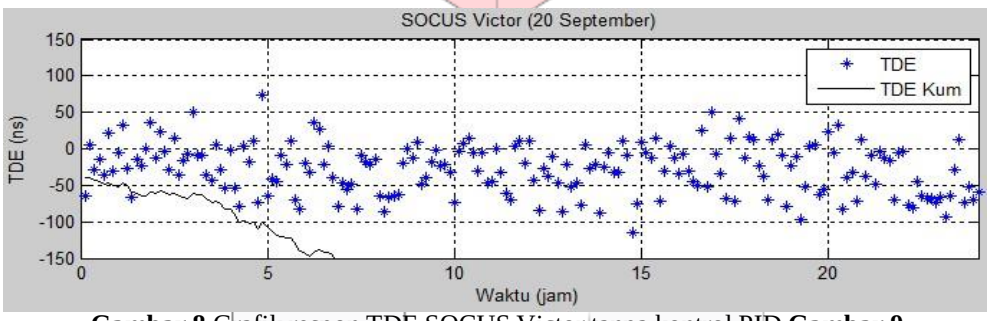
Gambar 5 Grafik respon TDE SEUS Whiskey tanpa kontrol PID



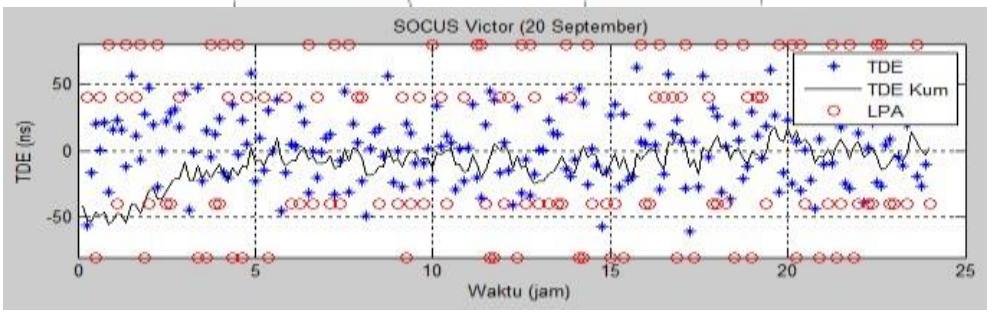
Gambar 6 Grafik respon TDE SEUS Whiskey dengan kontrol PID



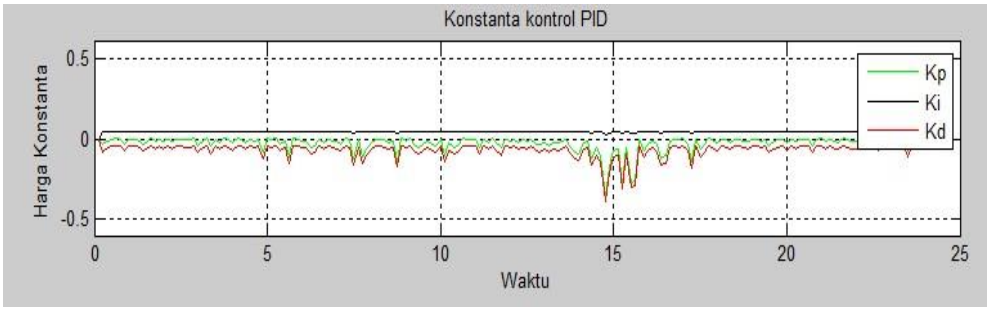
Gambar 7 Grafik perolehan nilai konstanta kontrol PID untuk SEUS Whiskey



Gambar 8 Grafik respon TDE SOCUS Victor tanpa kontrol PID **Gambar 9**



Grafik respon TDE SOCUS Victor dengan kontrol PID



Gambar 10 Grafik perolehan nilai konstanta kontrol PID untuk SOCUS Victor

Dari Gambar 5 hingga Gambar 10 terlihat terlihat contoh beberapa grafik hasil simulasi. Properti hasil keseluruhan simulasi dapat dilihat pada Tabel 1. Beberapa perlu diperhatikan adalah: pertama pada grafik sebelum perlakuan PID, tidak diplot LPA, hal ini karena set data TDE langsung diplot apa adanya tanpa perlakuan penyisipan LPA. Hal ini berdampak pada TDE kumulatif yang secara akumulatif menurun drastis hingga keluar batas toleransi. Kedua pada grafik sesudah perlakuan PID, TDE kumulatif sudah berada di batas toleransi, penyisipan LPA kelipatan 20 ns sebagai *feedback* guna menjaga stabilitas TDE dan TDE kumulatif.

IV KESIMPULAN

Secara umum penggunaan algoritma adaptive PID pada sistem Loran-C ini dapat memberi kontrol pengurangan nilai TDE serta TDE kumulatif hingga ke batas toleransi yang telah ditentukan. Kontrol terhadap TDE kurang berhasil karena sebaran data TDE memang sebagian besar sudah berada di batas toleransi ±50 ns, namun ada beberapa data TDE yang masih di luar toleransi. Kontrol terhadap TDE kumulatif berhasil karena data TDE kumulatif sudah berada di jangkauan ±100 ns. Meski kontrol terhadap TDE kurang berhasil, mengingat tujuan awal dari penelitian ini adalah penurunan nilai TDE, maka indikasi keberhasilan penelitian ini adalah penurunan mean TDE sesudah pemberian kontrol PID dibanding mean sebelum pemberian kontrol hingga sebesar 97,08%.

Tuning konstanta kontrol PID adalah kunci keberhasilan perolehan respon optimum. Pemilihan *error* referensi (R) yang digunakan sebagai parameter penentu konstanta kontrol masih dilakukan secara subyektif. Pengembangan algoritma adaptive lain dengan sifat yang lebih *autotune* pada penelitian berikutnya akan sangat memberi kontribusi bagi penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

[1] "Loran-C User Handbook COMDTPUB P16562.6," U.S. Department of Transportation, U.S. Coast Guard, Commandant (G-NRN-1), 2100 Second Street SW,Washington DC, 1992.

[2] “Specification of the Transmitted LORAN-C Signal COMDTINST M16562.4A,” U.S. Department of Transportation, U.S. Coast Guard, Commandant (G-NRN-1), 2100 Second Street SW, Washington DC, 1994.

[3] Simon Haykin, *Adaptive Filter Theory*, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, 4th Edition, 2001.

[4] J. Tang, R. Chassaing. “Real-Time Adaptive PID Controller Using the TMS320C31 DSK”, Div. of Electrical Engimeerimg, Alfred University, Alfred, NY 14802.

[5] John G. Proakis and Dimitris G. Manolakis, Digital Signal Processing: Principles, Algorithms, and Applications, MacMillan Publishing Company, NY, 4th Edition, 2006.

[6] "Loran-C Engineering Course," Department of Transportation, United States Coast Guard, New London, 1995.

[7] France, Frederick M. Jr. “Design of an Algorithm for Minimizing LORAN-C time Difference Error”, Naval Postgraduate School, Monterey, California, September,1997.

[8] LORAN-C GENERALINFORMATION, http://www.navcen.uscg.gov/?pageName= loranMain, diakses tanggal 20 Juli 2013.

[9] Zhong, Jinghua (2006). “PID Controller Tuning: A Short Tutorial”, Mechanical Engineering, Purdue University.

[10] PID Control with MATLAB and Simulink, http://www.mathworks.com/discovery/pid-control.html, diakses tanggal 20 Juli 2013.

[11] PID Controller, http://en.wikipedia.org/wiki/PID_controller, diakses tanggal 18 Juli 2013.