

# **HUMAN RELIABILITY ANALYSIS DENGAN PENDEKATAN COGNITIVE RELIABILITY AND ERROR ANALYSIS METHOD (CREAM)**

**Zahirah Alifia Maulida, Indri Santiasih<sup>\*)</sup>, Lukman Handoko**

*Program Studi Teknik Keselamatan dan Kesehatan Kerja  
Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya*

## **Abstrak**

Kecelakaan kerja pada bidang *grinding* dan *welding* menempati urutan tertinggi selama lima tahun terakhir di PT. X. Kecelakaan ini disebabkan oleh *human error*. *Human error* terjadi karena pengaruh lingkungan kerja fisik dan non fisik. Penelitian kali menggunakan skenario untuk memprediksi serta mengurangi kemungkinan terjadinya *error* pada manusia dengan pendekatan CREAM (*Cognitive Reliability and Error Analysis Method*).

CREAM adalah salah satu metode *human reliability analysis* yang berfungsi untuk mendapatkan nilai *Cognitive Failure Probability* (CFP) yang dapat dilakukan dengan dua cara yaitu *basic method* dan *extended method*. Pada *basic method* hanya akan didapatkan nilai *failure probability* secara umum, sedangkan untuk *extended method* akan didapatkan CFP untuk setiap *task*.

Hasil penelitian menunjukkan faktor- faktor yang mempengaruhi timbulnya *error* pada pekerjaan *grinding* dan *welding* adalah kecukupan organisasi, kecukupan dari *Man Machine Interface* (MMI) & dukungan operasional, ketersediaan prosedur/ perencanaan, serta kecukupan pelatihan dan pengalaman. Aspek kognitif pada pekerjaan *grinding* yang memiliki nilai *error* paling tinggi adalah *planning* dengan nilai CFP 0.3 dan pada pekerjaan *welding* yaitu aspek kognitif *execution* dengan nilai CFP 0.18. Sebagai upaya untuk mengurangi nilai *error* kognitif pada pekerjaan *grinding* dan *welding* rekomendasi yang diberikan adalah memberikan *training* secara rutin, *work instruction* yang lebih rinci dan memberikan sosialisasi alat.

**Kata kunci:** *CREAM (cognitive reliability and error analysis method), HRA (human reliability analysis), cognitive error*

## **Abstract**

*The accidents in grinding and welding sectors were the highest cases over the last five years in PT. X and it caused by human error. Human error occurs due to the influence of working environment both physically and non-physically. This study will implement an approaching scenario called CREAM (Cognitive Reliability and Error Analysis Method).*

*CREAM is one of human reliability analysis methods which purposely employed to gain a Cognitive Failure Probability (CFP) value which can be conducted with basic and extended method. An application of basic method will result a general value of failure probability whereas a more specific CFP value for every task will be resulted when the extended method is utilized.*

*This study showed that numbers of factors that shall be applied to mitigate error on grinding and welding sector are application of; adequacy of organization, adequacy of Man Machine Interface (MMI) & operational support, availability of procedure /plans and adequacy of training and preparation. This study exhibites that planning has the highest erroneous value of cognitive aspect on grinding task (by CFP value of 0.3). Furthermore, CFP value of 0.18 of cognitive aspect is shown for execution on welding task. To summarize, this study suggests numerous method to trim cognitive erroneous value on grinding and welding work, which are by committing a periodical training, applying more detail work instruction and giving education to operate the equipment.*

**Keywords:** *CREAM (cognitive reliability and error analysis method), HRA (human reliability analysis), cognitive error*

---

<sup>\*)</sup> Penulis Korespondensi.  
email: [indri.santiasih@gmail.com](mailto:indri.santiasih@gmail.com)

## Pendahuluan

Interaksi yang buruk antara elemen manusia, elemen mesin, dan elemen lingkungan dapat menjadi penyebab terjadinya kecelakaan kerja. Holnagell (1998) melakukan analisis pada 180 peristiwa penting dalam industri tenaga nuklir. Hasil studi menunjukkan bahwa lebih dari 51% dari insiden diakibatkan oleh masalah tenaga kerja manusia, 32% akibat kekurangan desain, dan 7% kekurangan pada peralatan yang digunakan. Data menunjukkan bahwa elemen manusia merupakan faktor terbesar penyebab terjadinya kecelakaan.

PT. X adalah perusahaan internasional mempunyai target *zero accident*, tetapi berdasarkan data laporan kecelakaan tahun 2009 sampai tahun 2013 masih banyak kecelakaan yang terjadi. Kecelakaan yang sering terjadi yaitu pada pekerjaan *grinding* sekitar 56,1% kasus kecelakaan dan pekerjaan *welding* yaitu 12,2% kasus yang terjadi di unit 1 (satu) hingga unit 7 (tujuh) PT. X. 95% kasus kecelakaan pada pekerjaan *grinding* disebabkan oleh *human error* dan 100% kecelakaan pada kegiatan *welding* juga disebabkan oleh penyebab yang sama, yaitu kesalahan manusia.

Karyawan dalam melaksanakan proses produksi tidak terlepas dari kesalahan. Kesalahan yang disebabkan oleh karyawan atau manusia biasanya disebut dengan *human error*. *Human error* adalah kegagalan manusia untuk melakukan tugas yang telah didesain dalam batas ketepatan, rangkaian, atau waktu tertentu. Analisis keandalan manusia ditunjukkan untuk menentukan faktor-faktor yang menyebabkan terjadinya kesalahan manusia, mengetahui resiko, dan akibat dari kesalahan manusia, serta bagaimana melaksanakan perbaikan terhadap sistem yang ada.

Metode HRA (*Human Reliability Analysis*) yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode *Cognitive Reliability and Error Analysis Method* (CREAM) yang dikembangkan oleh Erik Hollnagel pada tahun 1998. Metode CREAM menghasilkan struktur hirarki dari metode-metode sebelumnya dengan menetapkan pemisah antara *objective* dan *subjective error*.

Penelitian ini digunakan pada kasus kecelakaan yang terjadi pada proses *grinding* dan *welding* pada PT. X yang disebabkan oleh kesalahan manusia. Dari analisis yang dilakukan akan dapat dihasilkan tindakan apa yang harus diambil untuk mengurangi kemungkinan *error* sehingga dapat mengurangi angka kecelakaan kerja.

## Metode Penelitian

Tahap pertama pada metode CREAM yaitu *basic method*. Hal yang dilakukan yaitu membuat *task analysis* untuk pekerjaan *grinding* dan *welding*. Tahap selanjutnya adalah penilaian CPC (*Common Performance Condition*) yang dilakukan oleh *expert judgement* di PT. X. *Expert judgement* yang diminta untuk melakukan penilaian adalah *supervisor* dan *operator* yang udah memiliki pengalaman di atas lima tahun di bidang *grinding* dan *welding*. Langkah terakhir

pada *basic method* adalah menentukan *probable control mode* yang didapatkan dari hasil penilaian CPC yang diplotkan ke grafik hubungan nilai CPC dengan *control mode*. Lalu hasil akhir dari *basic method* adalah *interval failure* pada suatu pekerjaan.

Tahapan kedua yaitu *extended method*. Pada tahap ini dilakukan analisa kebutuhan *cognitive* yang dibutuhkan untuk setiap *task* dan dilanjutkan dengan menentukan kemungkinan kegagalan untuk setiap *task*. Tahap selanjutnya adalah menentukan pengaruh nilai CPC terhadap tiap fungsi kognitif. Nilai *Cognitive Failure Probability* (CFP) didapatkan dengan cara mengalikan nilai nominal CFP dengan nilai pembobotan CPC.

## Pengolahan Data Basic Method

Tabel 1 menjelaskan *task analysis* pada pekerjaan *grinding* yang dibuat berdasarkan *work instruction* pekerjaan *grinding* di PT. X.

Tabel 1. *Task Analysis* Pekerjaan *Grinding*

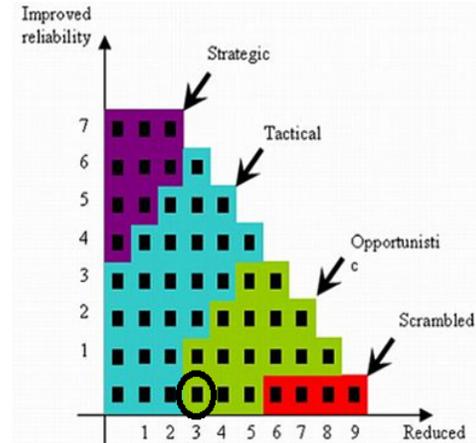
No	Operasi Kerja	No Task	Elemen Kerja
1	Memakai Alat Pelindung Diri (APD)	1.1	Memakai <i>Safety Shoes</i>
		1.2	Memakai <i>APRON</i>
		1.3	Memakai <i>safety gloves</i>
2	Menyiapkan dokumen	2.1	Memastikan menggunakan <i>routing sheet</i> terakhir
		2.2	Memastikan menggunakan <i>drawing</i> revisi terakhir
3	Melakukan pengecekan mesin	3.1	Memastikan mesin berfungsi sebelum digunakan
		3.2	Mengecek <i>emergency switch</i>
4	Memilih dan memasang batu gerinda	4.1	Memilih batu gerinda sesuai dengan jenis material yang akan digerinda dan pekerjaan yang akan dilakukan
		4.2	Memastikan batu gerinda dalam posisi baik dan tidak retak
		4.3	Memastikan rpm batu gerinda batu gerinda lebih besar dari rpm mesin gerinda
5	Proses menggerinda	5.1	Memastikan area kerja rapi sebelum bekerja
		5.2	Menyalakan mesin gerinda
		5.3	Pegang gerinda dengan posisi yang benar
6	<i>Finishing</i>	6.1	Membersihkan mesin
		6.2	Mengembalikan gerinda ke tempat semula
		6.3	Melaksanakan 5S

Tabel 2 menjelaskan detail *task analysis* pada pekerjaan *welding* yang juga dibuat berdasarkan *work instruction* PT. X

**Tabel 2.** Task Analysis Pekerjaan Welding

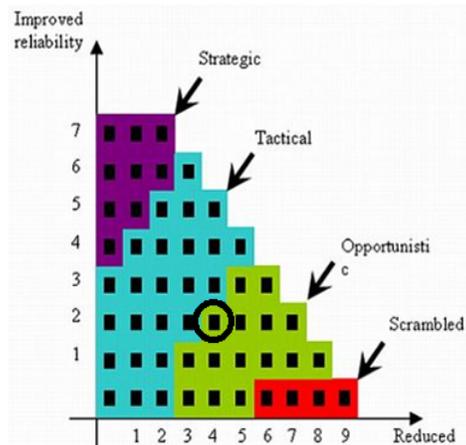
No.	Operasi Kerja	No task	Elemen Kerja
1.	Memakai Alat Pelindung Diri (APD)	1.1	Memastikan menggunakan baju lengan panjang
		1.2	Memakai <i>safety shoes</i>
2.	Mempersiapkan dokumen	2.1	Memastikan menggunakan <i>routing sheet</i> terakhir
		2.2	Memastikan menggunakan <i>drawing</i> (gambar teknik) revisi terakhir
3.	Melakukan pengecekan mesin	3.1	Memastikan mesin berfungsi sebelum digunakan
		3.2	Mengecek <i>emergency switch</i>
4.	Mengambil <i>welding electrode</i>	4.1	Memahami <i>drawing</i> yang akan dikerjakan
		4.2	Memahami WPS
5.	Set-up peralatan	5.1	Menyiapkan peralatan yang akan digunakan
		5.2	Memasang <i>regulator</i> pada tabung CO2
6.	Set-up mesin	6.1	Menyalakan mesin las FCAW
		6.2	Memastikan <i>wire</i> dan gas berjalan normal
		6.3	Memasang <i>ground clamp</i> pada benda kerja secara langsung
7.	Proses pengelasan FCAW	7.1	Melakukan percobaan pengelasan antara 50 s/d 100mm
		7.2	Melakukan <i>set-up</i> ulang
		7.3	Melakukan pengelasan pada benda kerja
8.	Finishing	8.1	Membersihkan mesin las
		8.2	Melaksanakan 5S

Langkah selanjutnya yang dilakukan adalah penilaian CPC (*Common Performance Condition*) oleh *expert judgement*, terdapat 9 item penilaian yang dinilai berkaitan kondisi umum perusahaan. Setelah nilai evaluasi dilakukan untuk mengetahui apakah kondisi memberikan efek *improved*, *reduced*, atau *not significant*. Hasil penilaian diplotkan ke grafik untuk memperoleh *interval failure*.



**Gambar 1.** Hubungan Penilaian CPC Pekerjaan *Grinding* dengan *Control Mode*

Gambar 1 menunjukkan bahwa pekerjaan *grinding* di PT. X berada pada kondisi *opportunistic*. Gambar 2 merupakan grafik hubungan penilaian CPC untuk pekerjaan *welding* dengan *control mode*.



**Gambar 2.** Hubungan Penilaian CPC Pekerjaan *Welding* dengan *Control Mode*

Seperti halnya pekerjaan *grinding*, ternyata pekerjaan *welding* di PT. X juga berada pada status *control mode*, *opportunistic*. Kondisi *opportunistic* mengindikasikan bahwa perencanaan dan antisipasi oleh operator terhadap keadaan darurat yang sangat kecil. Operator melakukan pekerjaannya lebih didasarkan pada kebiasaan bukan karena prosedur. Tabel 3 adalah nilai *interval failure probability* untuk pekerjaan *grinding* dan *welding*.

**Tabel 3.** *Control Modes dan Probability Intervals Pekerjaan Grinding dan Welding di PT. X*

<i>Control mode</i>	<i>Reliability interval (Probability of action failures)</i>
<i>Strategic</i>	0.5 E-5 < p < 1.0 E-2
<i>Tactical</i>	1.0 E-3 < p < 1.0 E-1
<i>Opportunistic</i>	1.0 E-2 < p < 0.5 E-0
<i>Scramble</i>	1.0 E-1 < p < 1.0 E-0

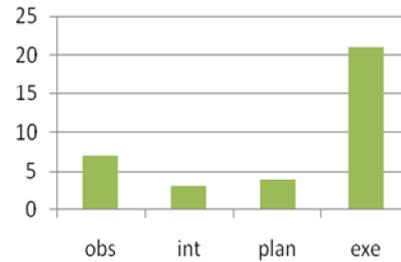
**Extended Method**

Tahap kedua pada pendekatan CREAM yaitu *extended method*. Tahap awal pada metode ini adalah mengidentifikasi kegiatan kognitif yang dibutuhkan untuk setiap *task*. Berikut adalah kegiatan kognitif yang dibutuhkan untuk pekerjaan *grinding*.

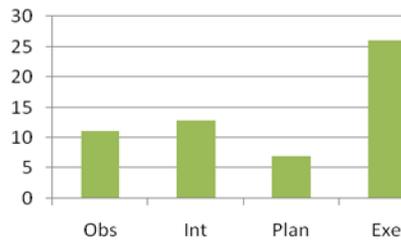
**Tabel 4.** Kegiatan Kognitif pada Pekerjaan *Grinding*

No. task	Operasi Kerja	Kegiatan kognitif
1.1	Memakai <i>Safety Shoes</i>	<i>Execute</i>
1.2	Memakai <i>APRON</i>	<i>Execute</i>
1.3	Memakai <i>safety gloves</i>	<i>Execute</i>
2.1	Memastikan menggunakan <i>routing sheet</i> terakhir	<i>Verify</i>
2.2	Memastikan menggunakan <i>drawing</i> (gambar teknik) revisi terakhir	<i>Verify</i>
3.1	Memeriksa mesin berfungsi baik sebelum digunakan	<i>Execute</i>
3.2	Memeriksa <i>emergency switch</i>	<i>Evaluate</i>
4.1	Memilih batu gerinda sesuai dengan jenis material yang akan digerinda dan pekerjaan yang akan dilakukan	<i>Plan</i>
4.2	Memastikan batu gerinda dalam posisi baik dan tidak retak	<i>Verify</i>
4.3	Memastikan rpm batu gerinda batu gerinda lebih besar dari rpm mesin gerinda	<i>Verify</i>
5.1	Memastikan area kerja rapi sebelum bekerja	<i>Verify</i>
5.2	Menyalakan mesin gerinda	<i>Execute</i>
5.3	Pegang gerinda dengan posisi yang benar	<i>Regulate</i>
6.1	Membersihkan mesin	<i>Execute</i>
6.2	Mengembalikan gerinda ke tempat semula	<i>Execute</i>
6.3	Melaksanakan 5S	<i>Execute</i>

Gambar 3 dan 4 menggambarkan hasil identifikasi seluruh kegiatan kognitif dari seluruh *task* pada pekerjaan *grinding* dan *welding*. Kebutuhan kognitif yang paling banyak dibutuhkan pada kedua pekerjaan tersebut adalah *execution*.



**Gambar 3.** Kebutuhan Kognitif Pekerjaan *Grinding*



**Gambar 4.** Kebutuhan Kognitif Pekerjaan *Welding*

Tahap selanjutnya yaitu menentukan kemungkinan kegagalan untuk setiap *task* pada masing- masing pekerjaan. Kemungkinan kegagalan dipilih berdasarkan CPC serta data- data pendukung seperti data kecelakaan dan wawancara dengan pekerja.

**Tabel 5.** Failure Mode untuk Pekerjaan *Grinding*

Operasi Kerja	Kegiatan kognitif	Error mode
Memakai <i>safety gloves</i>	<i>Execute</i>	E5
Memastikan menggunakan <i>routing sheet</i> terakhir	<i>Verify</i>	O2
Memilih batu gerinda sesuai dengan jenis material yang akan digerinda dan pekerjaan yang akan dilakukan	<i>Plan</i>	E3
Memastikan batu gerinda dalam posisi baik dan tidak retak	<i>Verify</i>	O3
Pegang gerinda dengan posisi yang benar	<i>Regulate</i>	E1
Mengembalikan gerinda ke tempat semula	<i>Execute</i>	E5

Keterangan :  
 E1 = Eksekusi pada tipe yang salah  
 E3 = Eksekusi pada objek yang salah  
 E5 = Eksekusi dilewati  
 O2 = Kesalahan Identifikasi  
 O3 = Tidak melakukan observasi

Tahap terakhir pada *extended method* adalah menentukan *failure probability*. Pada tahap ini yang pertama kali dilakukan adalah menetapkan nominal *cognitive failure probability* untuk setiap kegagalan fungsi kognitif. Tahap berikutnya adalah melakukan penilaian efek CPC pada *cognition function failure* pada masing- masing pekerjaan.

**Tabel 6.** Penilaian Efek CPC pada *Cognition Failure* Pekerjaan *Grinding*

Nama CPC	Level	Keterangan			
		Obs	Int	Plan	Exe
Kecukupan organisasi	Tidak efisien	1	1	1.2	1.2
Kondisi pekerjaan	Sesuai	1	1	1	1
Kecukupan dari MMI dan dukungan operational	Sangat cukup	1	1	1	1
Ketersediaan prosedur/ perencanaan	Tidak cukup	2	1	5	2
Jumlah tugas yang dilakukan	Sesuai dengan kapasitas	1	1	1	1
Ketersediaan waktu	Tidak cukup untuk sementara waktu	1	1	1	1
<i>Time of day</i>	<i>Day time (Diatur)</i>	1	1	1	1
Kecukupan pelatihan dan pengalaman	Tidak cukup	2	5	5	2
Kualitas kerja sama	Efisien	1	1	1	1
<b>Jumlah efek CPC</b>		<b>4</b>	<b>5</b>	<b>30</b>	<b>4.8</b>

**Tabel 7.** Penilaian Efek CPC pada *Cognition Failure* Pekerjaan *Welding*

Nama CPC	Efek	Keterangan			
		Obs	Int	Plan	Exe
Kecukupan organisasi	Tidak Efisien	1	1	1.2	1.2
Kondisi pekerjaan	Sesuai	1	1	1	1
Kecukupan dari MMI dan dukungan operational	Tidak cukup	5	1	1	5
Ketersediaan prosedur/ perencanaan	Tidak cukup	2	1	5	2
Jumlah tugas yang dilakukan	Sesuai dengan kapasitas	1	1	1	1
Ketersediaan waktu	Sesuai	0.5	0.5	0.5	0.5

<i>Time of day</i>	<i>Day-time</i>	1	1	1	1
Kecukupan pelatihan dan pengalaman	Tidak cukup	2	5	5	2
Kualitas kerja sama	Sangat efisien	0.5	0.5	0.5	0.5
<b>Jumlah Efek CPC</b>		<b>1.6</b>	<b>5</b>	<b>1.25</b>	<b>7.5</b>

Nilai CFP didapatkan dengan mengalikan nilai pembobotan nilai CPC dengan nominal CFP untuk setiap *task*. Hasil perhitungan menunjukkan *task* dengan nilai kemungkinan *error* paling tinggi.

**Tabel 8.** *Cognitive Failure Probability* Pekerjaan *Grinding*

<i>Task element</i>	<i>Error mode</i>	Nominal CFP	<i>Weighting factor</i>	<i>Adjusted CFP</i>
Memakai <i>safety gloves</i>	E5	0.03	4.8	0.144
Memastikan menggunakan <i>routing sheet</i> terakhir	O2	0.07	4	0.28
Memilih batu gerinda sesuai dengan jenis material yang akan digerinda dan pekerjaan yang akan dilakukan	E3	0.0005	4.8	0.0024
Memastikan batu gerinda dalam posisi baik dan tidak retak	O3	0.07	4	0.28
Pegang gerinda dengan posisi yang benar	E1	0.003	4.8	0.0144
Mengembalikan garinda ke tempat semula	E5	0.03	4.8	0.0144

Keterangan :  
 E1 = Eksekusi pada tipe yang salah  
 E3 = Eksekusi pada objek yang salah  
 E5 = Eksekusi dilewati  
 O2 = Kesalahan Identifikasi  
 O3 = Tidak melakukan observasi

Setelah menganalisa pekerjaan *grinding* dan *welding* dengan menggunakan metode CREAM fungsi kognitif yang memiliki nilai kemungkinan kegagalan yang paling tinggi dapat diperkirakan.

Pada pekerjaan *grinding*, *task* yang memiliki CFP tertinggi (CFP = nilai 0.3) adalah *task* yang membutuhkan kebutuhan kognitif *planning*. Hal ini mengindikasikan bahwa para pekerja yang bekerja dibidang *grinding* memiliki kelemahan pada kegiatan perencanaan sehingga kemungkinan *error mode* yang paling tinggi adalah perencanaan yang tidak cukup.

Pada pekerjaan *welding* nilai tertinggi CFP adalah 0.18 dengan kebutuhan kognitif *execution*, yang memiliki error mode eksekusi yang dilewati. Hal ini menunjukkan bahwa para pekerja di bagian *welding* pada PT. X banyak yang tidak mengikuti *work instruction* yang telah dibuat, seperti tidak memakai APD, meski *work instruction* terdapat tahapan untuk menggunakan APD.

### Kesimpulan

Faktor yang mempengaruhi timbulnya *human error* pekerjaan *grinding* PT. X adalah faktor kecukupan organisasi, ketersediaan prosedur/perencanaan, dan kecukupan pelatihan dan pengalaman. Sedangkan faktor yang mempengaruhi timbulnya *human error* pada pekerjaan *welding* di PT. X adalah faktor kecukupan organisasi, kecukupan dari MMI & dukungan operasional, ketersediaan prosedur/perencanaan, dan kecukupan pelatihan dan pengalaman.

Nilai probabilitas *error* paling tinggi untuk pekerjaan *grinding* di PT. X dengan menggunakan pendekatan CREAM adalah aspek kognitif *planning* dengan *error mode* perencanaan yang tidak cukup (nilai *cognitive failure probability* = 0.3). Pada pekerjaan *welding*, aspek kognitif *execution* dengan *error mode* eksekusi dilewati (nilai *cognitive failure probability* = 0.18) menghasilkan nilai tertinggi.

Rekomendasi untuk mengurangi probabilitas *human error* yang terjadi pada pekerjaan *grinding* dan *welding* di PT. X adalah memperbaiki komunikasi antara pihak manajemen dan pekerja, memperbaiki *safety management system* berupa peningkatan pengawasan cara bekerja, memberi informasi penting pada mesin las, sosialisasi penggunaan alat secara rutin, membuat *work instruction* dengan lebih rinci untuk setiap *task*, sosialisasi *work instruction*, pelatihan *grinding* dan *welding* yang diadakan secara rutin.

### Daftar Pustaka

Chiara, L.M. (2005). *Human Errors Analysis and Safety Management Systems in Hazardous Activities*. International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg.

- Cooper, S.E., Ramey-Smith, A.M., Wreathall, J., Parry, G.W., Bley, D.C., Luckas, W.J., Taylor, J.H., dan Barriere, M.T., (1994). *A technique for Human Error Analysis (ATHEANA)*, NUREG/CR-6093, US Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC.
- Grozdanovic, Miroljub (2005). *Usage of Human Reliability Quantification Methods*. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics (JOSE) 2005, Vol. 11, No. 2, 153–159.
- Hollnagel, E (1998). *Cognitive Reliability and Error Analysis Method (CREAM)*. Elsevier Science Ltd., Amsterdam.
- Hollnagel, E (2005). *Human Reliability Assessment In Context*. University of Linköping, Sweden.
- Kirwan, B (1994). *A Guide to Practical Human Reliability Assessment*. Taylor & Francis, London.
- Kirwan, B (1998). *Human Error Identification Techniques for Risk Assessment of High Risk Systems*. Part 1: Review and Evaluation of Techniques. Elsevier Science. UK
- Kletz, T (2001). *An Engineer's View Of Human Error*. UK.
- Maulida, Z.A. (2014). *Analisis Probabilitas Human Error dengan Pendekatan Cognitive Reliability and Error Analysis Method (CREAM) Pada Pekerjaan Grinding dan Welding di PT X*. Tugas Akhir. Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya.
- Reason, J (1997). *Managing the risks of organizational accidents*. Aldershot: Ashgate; 1997.
- Sanders. M.S, dan McCormick, E.J. (1992). *Human Factors in Engineering and Design*, 7th Edition. McGraw-Hill, London.
- Swain, A.d dan Guttman, H. E. (1983). *Handbook of Human reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications*. NUREG/CR-1278. US Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC.
- Zhiqiang, Sun., Hongwei, X., Xujian, S., dan Fenggiang. (2009). *Engineering Approach for Human Error Probability Quantification*. Journal of System Engineering and Electronics, Vol 20, No.5, pp.1144-1152.