

ISSN 1412 - 8816  
Vol. VII, No. 2, 2008

# JURNAL TEKNIK



Diterbitkan oleh

**Fakultas Teknik**

Universitas Jenderal Achmad Yani

## JURNAL TEKNIK

*Media Pengembangan Ilmu dan Aplikasi Teknologi*

ISSN 1412-8810

### Penanggung Jawab

H. Urip Subagio  
(Dekan Fakultas Teknik)

### Pemimpin Umum

Nurhadi

### Pemimpin Usaha

Febrianto Adi Nugroho

### Pemimpin Redaksi

Cucu Wahyudin

### Penyunting Ahli

Prof. Waspodo Martodjo, Ir.  
Prof. Dr. Bambang Sutjiatmo  
Prof. Dr. R. J. Widodo  
Dr. Ing. Ir. Soepono Adi Dwiwanto  
Dr. TMA. Ari Samadhi Ir, M.Sc.  
H. Moch. Memed Ir., Dipl., HE., APU., SDA.

### Penyunting Mitra Bestari

Budi Santoso, Ph.D.  
*Institut Teknologi Surabaya*  
Dr. Ir. Bambang Widyanto M.Sc.  
*Institut Teknologi Bandung*

### Penyunting Pelaksana

Pawawoi  
Asep Najmurokhman  
Martijanti

### Tata Usaha & Distribusi

Udin Komaruddin  
Danang K.

**Jurnal Teknik** – Diterbitkan oleh Fakultas Teknik Universitas Jenderal Achmad Yani

Frekuensi terbit Jurnal Teknik dalam satu volume sebanyak 2 nomor per tahun pada setiap bulan : April dan November. Penerbitan perdana Volume 1 Nomor 1 pada Mei 2002

Biaya berlangganan : Institusi Rp. 45.000,-/ tahun  
Individual Rp. 40.000,-/tahun

Biaya eceran : Rp. 25.000,-/nomor

**Alamat Penyunting dan Tata Usaha** : Fakultas Teknik Universitas Jenderal Achmad Yani Jl. Jend. Gatot Subroto (Samping PT PINDAD) Telp. (022) 7312741 Fax. (022) 7309433, E-mail : [Cyu517@yahoo.com](mailto:Cyu517@yahoo.com) & [asepnajmu@lycos.com](mailto:asepnajmu@lycos.com)

ISSN 1412-8810  
Vol. VII, No. 2, 2008

# JURNAL TEKNIK

Vol. VII, No. 2, November, 2008



Diterbitkan oleh  
**Fakultas Teknik**  
Universitas Jenderal Achmad Yani

# JURNAL TEKNIK

## JURNAL FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS JENDERAL ACHMAD YANI

Vol. II, No. 2, November 2008

### DAFTAR ISI

<b>Dissipative Approach in Analysis and Synthesis of Control System via Linear Matrix Inequalities</b> Oleh : Asep Najmurokhman.....	62 - 71
<b>Evaluasi Perbandingan Kinerja Bangunan <i>Momen Frame</i> dengan <i>Eccentrically Brace Frame</i></b> Studi Kasus : Modifikasi Gedung Kuliah AKPER UNJANI Oleh : Sumargo, Rheza Andhy K., Hermansa.....	72 - 89
<b>Analisis Struktur Mikro dan Sifat Mekanik Baja Mangan Austenitik Hasil Proses Perlakuan Panas</b> Oleh : Abrianto A.....	90 - 99
<b>Pengaruh Variasi Proses Peregangan terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Baja St. 37 pada Proses <i>Roll Bending</i></b> Oleh : Adi Ganda Putra.....	100 - 112
<b>Analisis Kegagalan Mur <i>Heavy Hexagonal</i> pada <i>Valve Flange</i> dalam Sistem Jalur Pipa di Industri Minyak dan Gas</b> Oleh : Ahmad Gunawan & Pawawoi.....	113 - 129
<b>Pengembangan Model Pengolahan air Baku dengan Metoda Elektrokoagulasi</b> Oleh : Febrianto Adi Nugroho.....	130 - 144

# JURNAL TEKNIK

## JURNAL FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS JENDERAL ACHMAD YANI

Vol. II, No. 2, November 2008

### DAFTAR ISI

- Dissipative Approach in Analysis and Synthesis of Control System via Linear Matrix Inequalities**  
Oleh : Asep Najmurokhan.....62 - 71
- Evaluasi Perbandingan Kinerja Bangunan *Momen Frame* dengan *Eccentrically Brace Frame***  
Studi Kasus : Modifikasi Gedung Kuliah AKPER UNJANI  
Oleh : Sumargo, Rheza Andhy K., Hermansa.....72 - 89
- Analisis Struktur Mikro dan Sifat Mekanik Baja Mangan Austenitik Hasil Proses Perlakuan Panas**  
Oleh : Abrianto A.....90 - 99
- Pengaruh Variasi Proses Peregangan terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Baja St. 37 pada Proses *Roll Bending***  
Oleh : Adi Ganda Putra.....100 - 112
- Analisis Kegagalan Mur *Heavy Hexagonal* pada *Valve Flange* dalam Sistem Jalur Pipa di Industri Minyak dan Gas**  
Oleh : Ahmad Gunawan & Pawawoi.....113 - 129
- Pengembangan Model Pengolahan air Baku dengan Metoda Elektrokoagulasi**  
Oleh :Febrianto Adi Nugroho.....130 - 144



## Dissipative Approach in Analysis and Synthesis of Control System via Linear Matrix Inequalities

Asep Najmurokhman

Department of Electrical Engineering, University of Jenderal Achmad Yani  
e-mail : asepnajmu@yahoo.com

**Abstract.** This paper discusses about application of dissipative concept in dynamical systems for analysis and synthesis of control systems via linear matrix inequalities (LMIs). Motivated by dissipativity concept in mechanical and electrical circuit system, one could employ this concept to check stability and to design a controller of the underlying system. We derive the solvability condition of dissipativity for an output feedback LTI continuous system via LMIs. An algorithm to design such controller that satisfy the dissipativity of the system is also considered.

**Keywords :** *dissipative, dissipativity, LMI, solvability condition.*

### I. INTRODUCTION

The study of dissipative concept which used to analyze and design of control systems was initially developed by Willems [1]. This concept concerns with analysis and design of control systems using input-output properties based on energy-related description. Practically, a system has the dissipative property if it always dissipates the energy. Dissipation energy is difference between the supply energy and the stored energy in the system. That property includes the notion that a dissipative system never stores more energy than its input energy which come from outside. In the past two decades, there has been a considerable interest in the problems of analysis and synthesis of  $H_\infty$  and positive real (or passivity-based) control system. The  $H_\infty$  approach builds on the small-gain theorem whereas the positive real approach relies on the positivity theorem. In  $H_\infty$  control, the small-gain theorem is used to ensure robust stability by requiring that the loop-gain be less than one at all frequencies. In this scheme, phase information is not used in guaranteeing stability. While, phase information is considered in positivity theory which is widely used in the analysis of passive control system. In the positivity theorem, a (strictly) positive real system has its phase less than 90 degrees so that the loop transfer function of a negative feedback connection of two (strictly) positive real systems has a phase lag of less than 180 degrees. This guarantees stability irrespective of the loop gain. Clearly, both the small-gain and positivity theorems deal with gain and phase performances separately and thus may lead to conservative results in application. A recent paper [2] figures out that the negative feedback interconnection of two causal, stable, linear time-invariant systems, with a "mixed" small gain and passivity property, is guaranteed to be finite-gain stable. However, this lead us to renew dissipative approach which cover both cases.

To be precise, let's take a look two examples in electrical circuit and mechanical system to describe the dissipativity concept. Consider a simple circuit consist of a resistor  $R$ , an inductance  $L$ , and a capacitor  $C$  with current  $i$  and voltage  $v$ . The differential equation which govern that system is

$$L \frac{di}{dt} + Ri + V_c = u \quad (1)$$

The stored energy in the circuit is

$$E(i, V_c) = \frac{1}{2} Li^2 + \frac{1}{2} CV_c^2 \quad (2)$$

The time derivative of equation (2) which states the rate of the energy when system evolves is

$$\frac{d}{dt} E(i, V_c) = Li \frac{di}{dt} + CV_c \frac{dV_c}{dt} \quad (3)$$

Inserting the differential equation of the circuit (1) into (3) we get

$$\frac{d}{dt} E(i, V_c) = ui - Ri^2 \quad (4)$$

Integration of equation (4) from  $t=0$  to  $t=T$  gives

$$E(i(T), V_c(T)) = E(i(0), V_c(0)) + \int_0^T u(t)i(t) dt - \int_0^T Ri^2(t) dt \quad (5)$$

That equation means that energy at time  $t=T$  is the initial energy plus the energy supplied to the system by the voltage  $u$  minus the energy dissipated by the resistor. Note that if the input voltage  $u$  is zero, and if there is no resistance, then energy  $E(\cdot)$  of the system is constant. Here  $R \geq 0$  and  $E[i(0), V_c(0)] > 0$ , and it follows that the integral of the voltage  $u$  and the current  $i$  satisfies

$$\int_0^T u(t)i(t) dt \geq -E(i(0), V_c(0)) \quad (6)$$

The physical interpretation of inequality (6) could be seen from the equivalent inequality

$$-\int_0^T u(t)i(t) dt \leq E(i(0), V_c(0)) \quad (7)$$

which shows that the energy  $-\int_0^T u(t)i(t) dt$  that can be extracted from the system is less than or equal to the initial energy stored in the system. Another example is borrowed from a simple mechanical system. Consider a one dimensional mechanical system with a mass, a spring, and a damper. The equation of motion for small oscillation of the mechanical system about its equilibrium configuration is

$$m\ddot{x} + D\dot{x} + Kx = F(t); x(0) = x_0, \dot{x}(0) = \dot{x}_0 \quad (8)$$

where  $m$  is the mass,  $D$  is the damper constant,  $K$  is the spring stiffness,  $x$  is the position of the mass and  $F$  is the force acting on the mass. The energy of the system is the sum of its kinetic energy and its potential energy, that is

$$E(x(t), \dot{x}(t)) = \frac{1}{2} m\dot{x}^2(t) + \frac{1}{2} Kx^2(t) \quad (9)$$

The rate of change of the energy of the system is

$$L \frac{di}{dt} + Ri + V_c = u \quad (1)$$

The stored energy in the circuit is

$$E(i, V_c) = \frac{1}{2} Li^2 + \frac{1}{2} CV_c^2 \quad (2)$$

The time derivative of equation (2) which states the rate of the energy when system evolves is

$$\frac{d}{dt} E(i, V_c) = Li \frac{di}{dt} + CV_c \frac{dV_c}{dt} \quad (3)$$

Inserting the differential equation of the circuit (1) into (3) we get

$$\frac{d}{dt} E(i, V_c) = ui - Ri^2 \quad (4)$$

Integration of equation (4) from  $t=0$  to  $t=T$  gives

$$E(i(T), V_c(T)) = E(i(0), V_c(0)) + \int_0^T u(t)i(t) dt - \int_0^T Ri^2(t) dt \quad (5)$$

That equation means that energy at time  $t=T$  is the initial energy plus the energy supplied to the system by the voltage  $u$  minus the energy dissipated by the resistor. Note that if the input voltage  $u$  is zero, and if there is no resistance, then energy  $E(\cdot)$  of the system is constant. Here  $R \geq 0$  and  $E[i(0), V_c(0)] > 0$ , and it follows that the integral of the voltage  $u$  and the current  $i$  satisfies

$$\int_0^T u(t)i(t) dt \geq -E(i(0), V_c(0)) \quad (6)$$

The physical interpretation of inequality (6) could be seen from the equivalent inequality

$$-\int_0^T u(t)i(t) dt \leq E(i(0), V_c(0)) \quad (7)$$

which shows that the energy  $-\int_0^T u(t)i(t) dt$  that can be extracted from the system is less than or equal to the initial energy stored in the system. Another example is borrowed from a simple mechanical system. Consider a one dimensional mechanical system with a mass, a spring, and a damper. The equation of motion for small oscillation of the mechanical system about its equilibrium configuration is

$$m\ddot{x} + D\dot{x} + Kx = F(t); \quad x(0) = x_0, \dot{x}(0) = \dot{x}_0 \quad (8)$$

where  $m$  is the mass,  $D$  is the damper constant,  $K$  is the spring stiffness,  $x$  is the position of the mass and  $F$  is the force acting on the mass. The energy of the system is the sum of its kinetic energy and its potential energy, that is

$$E(x(t), \dot{x}(t)) = \frac{1}{2} m\dot{x}^2(t) + \frac{1}{2} Kx^2(t) \quad (9)$$

The rate of change of the energy of the system is

$$\frac{d}{dt} E(x(t), \dot{x}(t)) = m\dot{x}(t)\ddot{x}(t) + Kx(t)\dot{x}(t) \quad (10)$$

Substituting the equation of the motion (8) into (10) yield

$$\frac{d}{dt} E(x(t), \dot{x}(t)) = F\dot{x}(t) - D\dot{x}^2(t) \quad (11)$$

Integration of that equation from  $t=0$  to  $t=T$  gives

$$E(x(T), \dot{x}(T)) = E(x(0), \dot{x}(0)) + \int_0^T F(\tau)\dot{x}(\tau) d\tau - \int_0^T D\dot{x}^2(\tau) d\tau \quad (12)$$

Similar to energy equation in the electrical circuit we could interpret that the energy at time  $t=T$  is the initial energy plus the energy supplied to the system by the control force  $F$  minus the energy dissipated by the damper. Note that if the input  $F$  equals to zero, and if there is no damping, then the energy  $E(\cdot)$  of the system is constant. Here  $D \geq 0$  and  $E[x(0), \dot{x}(0)]$ ,

$$\int_0^T F(\tau)v(\tau) \geq -E(x(0), v(0)) \quad (13)$$

The physical interpretation of inequality (13) could be drawn from the equivalent inequality

$$-\int_0^T F(\tau)v(\tau) \leq E(x(0), v(0)) \quad (14)$$

which shows that the energy  $-\int_0^T F(\tau)v(\tau) d\tau$  that can be extracted from the system is less than or equal to the initial energy stored in the system.

By observing those examples, as seen in equation (4) and (11), one concludes that a dissipative system could be characterized by the power balance equation which states that the rate of change of the energy of the system is equal to the power input injected into the system minus the rate of dissipation energy in the system. Since in real system, dissipation energy always happen, the rate change of the energy of the system always less than or equal to power supply into the system. Using mathematical abstraction of the notions of physical power and energy, researchers have developed the stability analysis and designed the controller for various applications in dissipative systems framework. To name a few, Gupta [3] employed that concept to derive robust stabilization of uncertain systems, Moreno [4] designed observers for a class of nonlinear systems via dissipative method, Stain [5] proposed the dissipative concept for analyze of interconnected oscillators, and Lim, et. al. [6] applied a (non-smooth) dissipative framework for analysis of linear parameter-varying system. The recent paper by Willems [7] introduces dissipativity in the setting of behavioral system.

## II. PRELIMINARIES

Consider a dynamic system in state space form  $\dot{x} = f(x, u, t) = g(x, u, t)$ , where  $x$  denotes the system state,  $u$  represents input to the system,  $y$  is the system output, and two functions  $f$  and  $g$  describe the system dynamics. This system is said to be

dissipative, according to [1], if there exists an absolutely integrable function of the input and the output, the power function  $p(u, y)$  (referred to as the supply rate in [1]) and a function of the system state, the energy-like function  $V(x) \geq 0$  (referred to as the storage function in [1]) such that

$$V(x(t)) \leq V(x(0)) + \int_0^t p(u(s), y(s)) ds \quad (15)$$

holds along all possible trajectories of the system, starting at  $x(0)$ , for all  $x(0)$ ,  $t \geq 0$ , or equivalently: for all admissible controllers  $u(\cdot)$  that drive the state from  $x(0)$  to  $x(t)$  on the interval  $[0, t]$ . In differential form, (15) can be written as follows

$$\dot{V}(x) \leq p(u(t), y(t))$$

Equation (16) stipulates that the rate of change of the stored energy is less than or equal to the input power, the difference being the rate of the energy dissipation. The key property of a dissipative dynamical system is that the total energy stored in the system decreases with time. In this case, there exists an intimately link to Lyapunov stability. Willems [7] said that the notion of a dissipative system is a natural generalization of a Lyapunov function to open systems. A difference between two approaches is that the state of the system and the equilibrium point are notions that required in Lyapunov approach, while the dissipative approach is rather based on the input-output behavior of the plant. The concept of dissipativity is closely connected to that of a storage function. These functions provide convenient Lyapunov functions in stability analysis of the system. Moreover, it has been shown for linear time-invariant systems [1] that dissipativity is equivalent to existence of a storage function. Concerning with Lyapunov stability, equation (16) is a condition for time derivative of Lyapunov function if we set the supply rate  $p(u, y)$  to be zero. Thus, analysis dissipativity was begun with find a storage function (as a Lyapunov function candidate) which satisfy (16) with respect to a certain supply rate.

In  $H_\infty$ -control problem, or more general terminology finite  $L_2$ -gain [11], its performance measure is assigned by system norm  $\|G(s)\|_\infty \leq \gamma$  which satisfy

$$\int_0^T y(t)^T y(t) dt \leq \gamma^2 \int_0^T u(t)^T u(t) dt \quad (17)$$

or all  $T \in [0, \infty)$ . Thus, these systems is dissipative with respect to the supply rate

$$p(u, y) = \gamma^2 u(t)^T u(t) - y(t)^T y(t)$$

While, in passive system are characterized by the input output property

$$\int_0^T y(\tau)^T u(t) dt \geq 0 \quad (18)$$

for all  $T \in [0, \infty)$ . This condition corresponds to dissipativity with respect to  $p(u, y) = y(t)^T u(t) + u(t)^T y(t)$ .

## III. LMI FORMULATION FOR DISSIPATIVE CONTROL

Consider the LTI continuous time system as the following form

$$G: \begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases}$$

where  $x \in \mathfrak{R}^n$  is state vector,  $u \in \mathfrak{R}^p$  and  $y \in \mathfrak{R}^q$  are input and output, respectively. We will assume that  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , and  $D$  are of suitable dimensions. Next, consider quadratic supply rate function of the form

$$p(y, u) = \begin{bmatrix} y \\ u \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} Q & N \\ N^T & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ u \end{bmatrix} \quad (20)$$

where dimension of matrices  $Q$ ,  $N$ , and  $R$  are determined by those of  $y$  and  $u$ , and where  $Q$  and  $R$  are symmetric matrices. The following proposition characterizes the dissipativity of an LTI systems.

**Proposition 1.** Consider the system  $G$  given by (19). If there exists a positive definite matrix  $P$  which satisfies the following

$$\begin{pmatrix} A^T P + PA & PB - C^T N & C^T \Theta \\ B^T P - N^T C & -R - N^T D - D^T N & D^T \Theta \\ \Theta^T C & \Theta^T D & -I \end{pmatrix} \quad (21)$$

the system is dissipative and asymptotically stable, by noting that  $Q = -\Theta^T \Theta$ .

**Proof:** The proposition can be proved by assign a candidate Lyapunov function  $V(x) = x^T P x$ . Taking time derivative of that function, substituting the state space of (19) into that form, and employing the dissipation inequality (16), one can get

$$\begin{pmatrix} A^T P - PA & PB \\ B^T P & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C^T Q C & C^T Q D + C^T N \\ D^T Q C + N^T C & D^T Q D - N^T D - D^T N + R \end{pmatrix} < 0$$

The last matrix inequality is nothing more than Schur Complement of (21).

**Remark :** Finite  $L_2$ -gain control problem is dissipative with respect to the specific supply rate function  $\gamma^2 u^T u - y^T y$  that is the quadratic supply rate in (20) with  $Q = -I$ ,  $N = 0$ , and  $R = \gamma^2 I$ , while passive systems are dissipative with respect to the supply rate (20) with  $R = Q = 0$ , and  $N = I$ . Now, consider the general framework of control synthesis depicted in fig. 1.

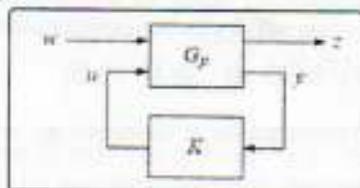


Fig. 1. Closed-loop system

In that figure,  $G_p$  is the generalized plant,  $K$  is the controller to be designed,  $w$  is the disturbance,  $u$  is the control input,  $y$  is the measurement, and  $z$  is the controlled output. We consider an LTI continuous system given in the state space as follows

$$G_p: \begin{cases} \dot{x} = Ax + B_1 w + B_2 u \\ z = C_1 x - D_{11} w + D_{12} u \\ y = C_2 x + D_{21} w + D_{22} u \end{cases} \quad (22)$$

where  $A, B_1, B_2, C_1, C_2, D_{11}, D_{12}, D_{21}, D_{22}$  are matrices whose dimensions compatible with  $x, w, u, z$ , and  $y$ . Dynamics of the controller  $K$  is represented by

$$K: \begin{cases} \dot{\xi} = A_K \xi + B_K y \\ u = C_K \xi + D_K y \end{cases} \quad (23)$$

where  $A_K, B_K, C_K$ , and  $D_K$  are of suitable dimension matrices. The feedback system (22) and (23) is rewritten in state space form as

$$\dot{x}_c = A_c x_c + B_c w \quad (24)$$

$$z = C_c x_c + D_c w$$

where

$$A_c = \begin{pmatrix} A + B_2 R D_K C_2 & B_2 R C_K \\ B_K C_2 + B_K D_{22} R D_K C_2 & A_K + B_K D_{22} R C_K \end{pmatrix}$$

$$B_c = \begin{pmatrix} B_1 + B_2 R D_K D_{21} \\ B_K D_{21} - B_K D_{22} R D_K D_{21} \end{pmatrix}$$

$$C_c = (C_1 + D_{12} R D_K C_2 \quad D_{12} R C_K)$$

$$D_c = D_{11} + D_{12} R D_K D_{21}$$

To simplify calculation, we assume, without loss of generality that  $D_{22} = 0$ . Then the above system matrices can be represented by

$$\begin{aligned} A_c &= A_0 + \hat{B} \Phi \hat{C} \\ B_c &= B_0 + \hat{B} \Phi \hat{D}_{11} \\ C_c &= C_0 + \hat{D}_{12} \Phi \hat{C} \\ D_c &= D_{11} + \hat{D}_{12} \Phi \hat{D}_{11} \end{aligned}$$

where

$$\begin{aligned} A_0 &= \begin{pmatrix} A & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}; \hat{B} = \begin{pmatrix} 0 & B_2 \\ I & 0 \end{pmatrix} \\ B_0 &= \begin{pmatrix} B_1 \\ 0 \end{pmatrix}; \hat{C} = \begin{pmatrix} 0 & I \\ C_2 & 0 \end{pmatrix} \\ C_0 &= (C_1 \quad 0); \hat{D}_{12} = \begin{pmatrix} 0 & D_{12} \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \\ \hat{D}_{11} &= \begin{pmatrix} 0 \\ D_{21} \end{pmatrix} \end{aligned}$$

and

$$\Phi = \begin{pmatrix} A_K & B_K \\ C_K & D_K \end{pmatrix} \quad (26)$$

To formulate the dissipative control synthesis problem for system (24), consider quadratic supply rate function described by

$$p(w, z) = \begin{bmatrix} z \\ w \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} Q & N \\ N^T & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z \\ w \end{bmatrix} \quad (27)$$

Given the closed-loop system (22) and quadratic supply rate (27), the dissipative control synthesis problem is formulated as follows: *Find controller K of the form (23) such that the closed loop system (24) is asymptotically stable when  $w = 0$  and dissipative with respect to quadratic supply rate (27).*

The feedback system is said to have dissipative performance if there is a positive definite symmetric matrix  $P$  which satisfies (21). Now, we will present the main result of this paper in the following theorem.

**Theorem 1.** Consider the feedback system that is constructed by (22)-(23). Suppose that output feedback dissipative performance control problem formulated above has a solution. Then there exists symmetric positive definite matrices  $\Psi$  and  $\Gamma$  such that the following LMIs are satisfied.

$$\begin{pmatrix} N_1 & 0 \\ 0 & I \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} A^T I - I^T A & I^T B_1 - C_1^T N & C_1^T \Theta \\ H_1^T - N^T C_1 & -R - N^T D_{11} - D_{11}^T N & D_{11}^T \Theta \\ \Theta^T C_1 & \Theta^T D_{11} & -I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} N_1 & 0 \\ 0 & I \end{pmatrix} < 0 \quad (28)$$

$$N_1^T \begin{pmatrix} A\Psi + \Psi A^T & B_1 - \Psi C_1^T N & \Psi C_1 \Theta \\ D_1^T - N^T C_1 \Psi & -R - N^T D_{11} - D_{11}^T N & D_{11}^T \Theta \\ \Theta^T C_1 \Psi & \Theta^T D_{11} & -I \end{pmatrix} N_\Psi < 0 \quad (29)$$

$$\begin{pmatrix} \Psi & I \\ I & \Gamma \end{pmatrix} > 0 \quad (30)$$

where  $N_1$  is a matrix whose columns form the bases of null space of  $(C_2 \ D_{21})$  and  $N_\Psi$  is a matrix whose columns form the bases of null space of  $(B_2^T \ -D_{12}^T N \ D_{12}^T \Theta)$ .

**Proof:** Using proposition 1, one can write down the dissipativity condition for the feedback system (22)-(23) with respect to supply rate function (27) is as follows

$$M + \tilde{Q}^T \Phi^T \tilde{P} + \tilde{P}^T \Phi \tilde{Q} < 0 \quad (31)$$

where

$$M = \begin{pmatrix} PA_0 + A_0^T P & PB_0 - C_0^T N & C_0^T \Theta \\ B_0^T P - N^T C_0 & -R - N^T D_{11} - D_{11}^T N & D_{11}^T \Theta \\ \Theta^T C_0 & \Theta^T D_{11} & -I \end{pmatrix} \quad (32)$$

$$\hat{P} = \begin{pmatrix} \rho \hat{R} \\ N^T \hat{D}_{12} \\ \Theta^T \hat{D}_{12} \end{pmatrix} \quad (33)$$

$$\hat{Q} = (\hat{C} \quad \hat{D}_{11} \quad 0) \quad (34)$$

Moreover, by employ the elimination of matrix variable (§2.6.2 in [8]), there exists a matrix  $\Phi$  in (31), if and only if

$$N_Q^T M N_Q < 0, \quad N_P^T M N_P < 0 \quad (35)$$

holds, where  $N_Q$  and  $N_P$  are matrices whose columns form the bases of null space of  $\hat{Q}$  and  $\hat{P}$ , respectively. Partitioning  $P$  and its inverse as follows

$$P = \begin{pmatrix} I & \\ & I \end{pmatrix}, \quad P^{-1} = \begin{pmatrix} \Psi & \\ & Y \end{pmatrix} \quad (36)$$

where  $Y$  and  $\Psi$  are  $n \times n$  symmetric matrices, it can be easily shown that the first inequality of (35) is equivalent to (28).

On the other hand, it can also be readily established that the condition  $N_P^T M N_P < 0$  of (35) is equivalent to (29). Finally, it follows from Lemma 7.2 in [9] that the existence of a matrix  $P > 0$  satisfying (36) is equivalent to (30).

Theorem 1 provides a quite general results regarding convex characterization for the dissipative control problem of an LTI system to have a solution. Generality of this theorem is provided by noting that finite  $L_2$ -gain and passivity condition are obtained by choosing the appropriate supply rate function in the general results. Specifically, finite  $L_2$ -gain are obtained by selecting  $R = \gamma^2 I, N = 0$ , and  $Q = -I$  and setting  $N_\Psi$  as

$$\begin{pmatrix} W_1 & 0 \\ 0 & I \\ W_2 & 0 \end{pmatrix}$$

with  $(W_1^T \quad W_2^T)^T$  is the bases of null space of  $(B_2^T \quad D_{12}^T)$ .

While passivity are recovered by choosing  $Q = R = 0$  and  $N = I$ , and setting  $N_\Psi$  as

$$\begin{pmatrix} W_1 & 0 \\ W_2 & 0 \\ 0 & I \end{pmatrix}$$

where  $(W_1^T \quad W_2^T)^T$  is the bases of null space of  $(B_2^T \quad D_{12}^T)$ .

When the conditions of Theorem 1 are fulfilled, the computation of a controller that solves the dissipative control problem can be carried out along the lines of the procedure proposed by Gahinet and Apkarian [10]. Assuming that the conditions (28)-(30) are satisfied for some matrices  $\Gamma$  and  $\Psi$ , a suitable controller can be found as follows :

- Compute two full-column rank real matrices  $\Pi$  and  $Y$  such that  $Y\Pi^T = I - \Psi\Pi$
- Find the unique solution  $P > 0$  of the linear equation :

$$\begin{pmatrix} \Gamma & I \\ \Pi^* & 0 \end{pmatrix} = P \begin{pmatrix} I & \Psi \\ 0 & Y^* \end{pmatrix} \quad (37)$$

- With the  $P$  matrix, compute the controller parameters  $A_K$ ,  $B_K$ ,  $C_K$  and  $D_K$  by solving the LMI (31).

#### IV. CONCLUSIONS

This paper describes dissipative approach to analyze and design of control systems by using LMIs. The main result presented here is the solvability condition of dissipativity of an output feedback LTI continuous control system problem. Such problem is solvable if there exist two matrices which satisfy three LMIs in Theorem 1. An algorithm to construct the controller for that problem is also derived.

#### REFERENCES

- [1] J.C. Willems, Dissipative dynamical systems Part I : General Theory; Part II : Linear systems with quadratic supply rates, *Arch. Rational Mechanics and Analysis*, vol. 45, no. 5, 1972, pp 321-393.
- [2] W.M. Griggs, et. al., A "mixed" small gain and passivity theorem in the frequency domain, *System and Control Letters* 56 (2007), pp. 596-602.
- [3] S. Gupta, Robust Stabilization of Uncertain Systems based on Energy Dissipation Concepts, *NASA Contractor Report 4713*, 1996.
- [4] J.A. Moreno, A Separation Property of Dissipative Observers for Nonlinear Systems, in *Proc. of the 45th IEEE Conf. on Decision and Control*, San Diego, CA, USA, Dec. 13-15, 2006, pp. 1647-1652.
- [5] G.B. Stain, Analysis of Interconnected Oscillators by Dissipativity Theory, *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 52, 2007, pp. 256-270.
- [6] S. Lim and J.P. How, Analysis of linear parameter-varying systems using a non-smooth dissipative systems framework, *Int. Journal of Robust and Nonlinear Control*, vol. 12, 2002, pp. 1067-1092.
- [7] J.C. Willems, Dissipative Dynamical Systems, *European Journal of Control* vol. 13, 2007, pp. 134-151.
- [8] S. Boyd, et. al., Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory, *SIAM Studies in Applied Mathematics* vol. 15, 1994.
- [9] W.M. Lu and J. C. Doyle,  $H_\infty$  Control of Nonlinear Systems : A Convex Characterization, *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 40, September 1995, pp. 1668-1675.
- [10] P. Gahinet and P. Apkarian, A Linear Matrix Inequality Approach to  $H_\infty$  Control, *Int. J. Robust Nonlinear Control*, vol. 4, 1994, pp. 421- 428.
- [11] A.J. van der Schaft, L2-Gain Analysis of Nonlinear Systems and Nonlinear State Feedback,  $H_\infty$  Control, *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 37, no. 6, June, 1992, pp. 770-784.

## Evaluasi Perbandingan Kinerja Bangunan *Momen Frame* dengan *Eccentrically Brace Frame*

Studi Kasus : Modifikasi Gedung Kuliah AKPER UNJANI

Sumargo, Rheza Andhy K., Hermansa

Jurusan Teknik Sipil

Fakultas Teknik- Universitas Jenderal Achmad Yani

e-mail : sumargo2004@yahoo.com

**Abstract** . Generally, earthquake resistant design is based on elastic structural analysis with load factor to simulate ultimate condition. Actually, behavior of collapse structures during earthquake is in-elastic. Evaluation to predict in-elastic condition of structures during earthquake is needed in order to guarantee that it can perform well during earthquake. Analysis and performance evaluation can be done with pushover analysis given in SAP2000, while evaluation of performance point must be determined manually with various methods (except for capacity spectrum method). Pushover analysis is a non linear static analysis as a behavior of structural failure due to earthquake, while performance point is structural maximum displacement during design earthquake.

Study on steel frame 3D concludes that performance evaluation for pushover in longitudinal direction according to ATC-40 gives displacement target for moment frame building of 0.054 m, building with eccentrically braced frame (EBF): 0.022 m. Pushover in transverse direction according to ATC-40 gives displacement target for moment frame building of 0.022 m, building with EBF: 0.015 m. According to FEMA 356, displacement target in longitudinal direction for moment frame building: 0.0803 m, building with (EBF): 0.0728 m. For building with moment frame in transverse direction: 0.1183 m, building with (EBF): 0.0614 m. According to FEMA 440, displacement target in longitudinal direction for moment frame building: 0.0685 m, building with EBF: 0.0556 m. For moment frame building in transverse direction: 0.0773 m, building with EBF: 0.0342 m. Lastly, according to ultimate limit state SNI 1726, the displacement target in longitudinal direction for moment frame building: 0.0803 m, building with EBF: 0.0476 m, and for moment frame building in transverse direction: 0.0434 m, and building with EBF: 0.0738 m.

**Keywords** : *pushover analysis, eccentrically braced frame, earthquake, steel building.*

### 1 PENDAHULUAN

Kecenderungan terbaru perencanaan bangunan tahan gempa saat ini adalah perencanaan berbasis kinerja (*Performance-Based Design*) sesuai Tabel 1. Konsep perencanaan berbasis kinerja merupakan kombinasi dari aspek ketahanan dan aspek layan.

Dalam studi ini dua gedung rangka baja yang direncanakan dengan struktur rangka pemikul momen dan struktur rangka berpengaku eksentrik yang didesain sesuai SNI 1726-2002 dan SNI 03-1729-2002. Perilaku seismik struktur ini dievaluasi dengan menggunakan evaluasi kinerja static non linear (*Pushover analysis*) dan analisa respon dinamik.

Penggunaan teknik analisis non-linier berbasis komputer digunakan untuk

mengetahui perilaku inelastik struktur dari berbagai macam intensitas gerakan tanah (gempa), sehingga dapat diketahui kinerjanya pada kondisi kritis. Selanjutnya dapat dilakukan tindakan bilamana tidak memenuhi persyaratan yang diperlukan.

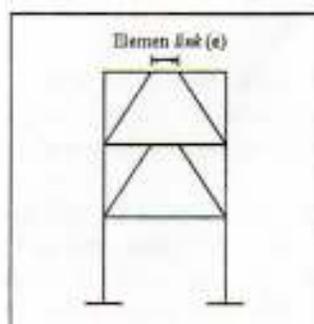
## 2 PEMODELAN, ANALISIS DAN DESAIN

Dalam perancangan struktur bangunan gedung, dilakukan analisis dinamik 3D untuk mengetahui karakteristik dinamik gedung. Pemodelan, analisis dan desain memakai program SAP2000, dengan analisis dinamik respons spektrum [SNI 1726-2002]. Nilai akhir respons dinamik struktur gedung terhadap pembebanan gempa nominal akibat Gempa Rencana dalam suatu arah tertentu, tidak boleh diambil kurang dari 80% nilai respons ragam ke-1 (dalam gaya geser dasar nominal). Faktor partisipasi massa: translasi sumbu-x dan sumbu-y harus memenuhi syarat partisipasi massa ragam efektif minimum 90%. Sistem struktur menggunakan model rigid diaphragm, massa struktur dipusatkan pada satu titik nodal tiap lantai. Kombinasi pembebanan untuk desain sesuai peraturan baja Indonesia [SNI 03-1729-2002]

## 3 PERENCANAAN STRUKTUR RANGKA BERPENGAKU EKSENTRIK (SRBE)

Struktur Rangka Berpengaku Eksentrik (SRBE) diharapkan mampu menahan deformasi in-elastis di link ketika struktur diberi gaya dari gerakan akibat gempa desain. SRBE memiliki kemampuan mengakomodasi kekakuan, kekuatan dan daktilitas yang tinggi dimana hal ini merupakan persyaratan mutlak yang harus dipenuhi oleh struktur bangunan tahan gempa. Berdasarkan pertimbangan ini SRBE sangat layak jika dijadikan alternatif dalam perencanaan struktur bangunan tahan gempa [Sumargo, 2004].

Portal berpengaku eksentris merupakan sistem yang efisien dalam menahan gaya lateral dibandingkan portal berpengaku kosentris, karena adanya elemen link [Sumargo, 2003]. Pada portal berpengaku eksentris, elemen link dimanfaatkan sepenuhnya. Pada bagian ini terjadi momen lentur dan geser pada balok yang cukup besar, memungkinkan terjadinya sendi plastis di daerah ini. Akibat hal tersebut maka daktilitas dari struktur dapat ditingkatkan.



Gambar 1. Elemen link pada portal berpengaku tipe V terbalik

Tabel 1. Kriteria kinerja yang ditetapkan Vision 2000 dan NEHRP

Level Kinerja		Penjelasan
NEHRP	Vision 2000	
<i>Operational</i>	<i>Fully Functional</i>	Tidak ada kerusakan berarti pada struktur dan non-struktur, bangunan tetap berfungsi
<i>Immediate Occupancy</i>	<i>Operational</i>	Tidak ada kerusakan yang berarti pada struktur, dimana kekuatan dan kekakuannya kira-kira hampir sama dengan kondisi sebelum gempa. Komponen non-struktur masih berada ditempatnya dan sebagian besar masih berfungsi jika utilitasnya tersedia. Bangunan dapat tetap berfungsi dan tidak terganggu dengan masalah perbaikan.
<i>Life Safety</i>	<i>Life Safe</i>	Terjadi kerusakan komponen struktur, kekakuan berkurang, tetapi masih mempunyai ambang yang cukup terhadap keruntuhan. Komponen non-struktur masih ada tetapi, tidak berfungsi. Dapat dipakai lagi jika sudah diperbaiki
<i>Collapse Prevention</i>	<i>Near Collapse</i>	Kerusakan yang berarti pada komponen struktur dan non-struktur. Kekuatan struktur dan kekakuannya berkurang banyak, hampir runtuh. Kecelakaan akibat kejatuhan material bangunan yang rusak sangat mungkin terjadi.

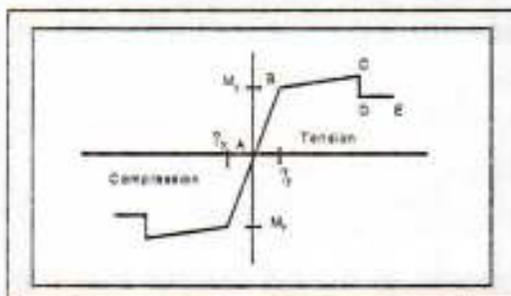
#### 4 ANALISA STATIK NONLINIER (*PUSHOVER ANALYSIS*)

Analisa statik nonlinier merupakan prosedur analisa untuk mengetahui perilaku keruntuhan suatu bangunan terhadap gempa, dikenal pula sebagai analisa *pushover* atau analisa beban dorong statik. Tahapan utama dalam analisa *pushover* adalah:

1. Menentukan titik kontrol untuk memonitor besarnya perpindahan struktur. Rekaman besarnya perpindahan titik kontrol dan gaya geser dasar digunakan untuk menyusun kurva *pushover*.
2. Membuat kurva *pushover* dari berbagai pola distribusi gaya lateral yang ekuivalen dengan distribusi gaya inerti, sehingga diharapkan deformasi yang terjadi hampir sama dengan gempa sebenarnya. Karena gempa sifatnya tidak pasu, perlu dibuat beberapa pola pembebanan lateral.
3. Estimasi besarnya target perpindahan. Titik kontrol didorong sampai target tersebut, yaitu suatu perpindahan maksimum yang diakibatkan oleh intensitas gempa rencana yang ditentukan.
4. Mengevaluasi level kinerja struktur ketika titik kontrol tepat berada pada target perpindahan, merupakan hal utama dari perencanaan berbasis kinerja. Komponen struktur dianggap memuaskan jika memenuhi persyaratan deformasi dan kekuatan karena yang dievaluasi adalah komponen yang jumlahnya relatif sangat banyak maka proses harus dikerjakan oleh komputer (fasilitas *pushover* dan evaluasi kinerja yang terdapat secara built-in pada program SAP2000, mengacu pada FEMA 356). Oleh karena itulah mengapa pembahasan perencanaan berbasis kinerja banyak mengacu pada dokumen FEMA.

## 5 PROPERTI SENDI

Pemodelan sendi digunakan untuk mendefinisikan perilaku nonlinier force-displacement dan/atau momen-rotasi yang dapat ditempatkan pada beberapa lokasi berbeda di sepanjang bentang balok atau kolom. Pemodelan sendi adalah rigid dan tidak memiliki efek pada perilaku linier pada elemen. Dalam studi ini, elemen kolom menggunakan tipe sendi default-PM, dengan pertimbangan bahwa elemen kolom terdapat hubungan gaya aksial dengan momen (diagram interaksi P-M). Sedangkan untuk elemen balok menggunakan tipe sendi default-M3, dengan dengan pertimbangan bahwa balok efektif menahan momen dalam arah sumbu kuat (sumbu-3), sehingga diharapkan sendi plastis terjadi pada balok. Sendi diasumsikan terletak pada masing-masing ujung pada elemen balok dan elemen kolom.



Gambar 2. Properti sendi default-M3 dan default PM

## 6 TARGET PERPINDAHAN

Dalam menentukan target perpindahan terdapat 4 metode yang digunakan, antara lain:

### 1. Koefisien Perpindahan (FEMA 273)

Merupakan metoda utama yang terdapat dalam FEMA 273/356 untuk prosedur statik nonlinier. Penyelesaian dilakukan dengan memodifikasi respons elastis linier dari sistem SDOF ekuivalen dengan faktor koefisien  $C_0$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  dan  $C_3$  sehingga diperoleh perpindahan global maksimum (*elastis dan inelastis*) yang disebut "target perpindahan", ( $\delta_T$ ).

Proses dimulai dengan menetapkan waktu getar efektif ( $T_e$ ), yang memperhitungkan kondisi *inelastik* bangunan. Waktu getar alami efektif mencerminkan kekakuan linier dari sistem SDOF ekuivalen. Jika di-plot-kan pada spektrum respons elastis akan menunjukkan percepatan gerakan tanah pada saat gempa yaitu akselerasi puncak ( $S_a$ ), dan waktu getar ( $T$ ). Redaman yang digunakan selalu 5% yang mewakili level yang diharapkan terjadi pada struktur yang mempunyai respons pada daerah elastis. Puncak perpindahan spektra elastis ( $S_d$ ), berhubungan langsung dengan *acceleration spectrum* ( $S_a$ ), dengan hubungan berikut:

$$S_d = \frac{T^2}{4\pi^2} S_a \quad (1)$$

Selanjutnya target perpindahan pada titik kontrol ( $\delta_r$ ), ditentukan sebagai berikut (Fema 273/356)

$$\delta_r = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \left( \frac{T_g}{2\pi} \right)^2 \quad (2)$$

dengan:

$\delta_r$  = target peralihan.

$T_g$  = waktu getar alami efektif.

$C_0$  = faktor modifikasi untuk mengkonversi *spectral displacement* struktur SDOF ekuivalen menjadi *roof displacement* struktur sistem MDOF, sesuai FEMA 356 Tabel 3-2.  $C_1$  = faktor modifikasi untuk menghubungkan peralihan inelastik maksimum dengan peralihan respons elastik linier. Nilai  $C_1 = 1,0$  untuk  $T_e \geq T_s$  dan untuk  $T_e < T_s$ :

$$C_1 = \frac{\left[ 1 + (R-1) \frac{T_s}{T_e} \right]}{R} \quad (3)$$

$C_2$  = faktor modifikasi untuk memperlihatkan *pinched hysteresis shape*, degradasi kekakuan dan penurunan kekuatan pada respon peralihan maksimum, sesuai FEMA 356 Tabel 3-3.  $C_3$  = faktor modifikasi untuk memperlihatkan kenaikan peralihan akibat efek *p-delta*. Untuk gedung dengan perilaku kekakuan pasca-leleh bernilai positif maka  $C_3 = 1,0$ . Sedangkan untuk gedung dengan perilaku kekakuan pasca-leleh negatif,  $R$  adalah *strength ratio*, besarnya dapat dihitung dengan persamaan:

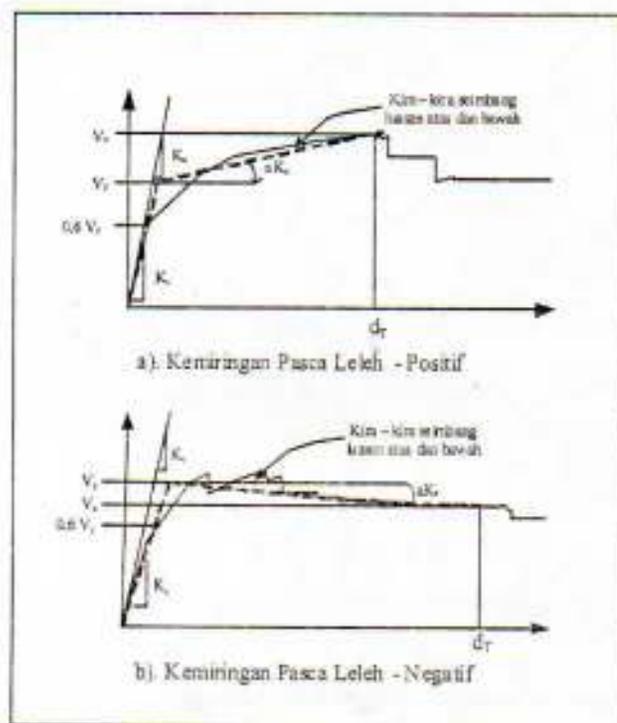
$$R = \frac{S_a}{\frac{V_y}{W} C_m} \quad (4)$$

$S_a$  adalah *acceleration spectrum respons* pada waktu getar alami fundamental efektif dan rasio redaman pada arah yang ditinjau.  $V_y$  adalah gaya geser dasar pada saat leleh.  $W$  adalah berat efektif seismik.  $C_m$  faktor massa efektif, Tabel 3-1 FEMA 356.  $\alpha$  adalah rasio kekakuan pasca leleh dengan kekakuan elastik efektif, dimana hubungan gaya peralihan nonlinier diidealisasikan sebagai kurva bilinear (lihat Gambar 3).  $T_s$  waktu getar karakteristik *respons spektrum g* percepatan gravitasi  $9,81 \text{ m/det}^2$ .

## 2. Metode Displacement Coefficient FEMA 440

Merupakan metode *displacement coefficient* pada FEMA 356 yang telah dimodifikasi dan diperbaiki. Persamaan yang digunakan untuk menghitung target peralihan tetap sama, yaitu sesuai Pers. (2). Akan tetapi mengalami modifikasi dan perbaikan dalam menghitung faktor  $C_1$  dan  $C_2$  sebagai berikut:

$$C_1 = 1 + \frac{R-1}{\alpha T_e^2} \quad (5)$$



Gambar 3. Perilaku pasca leleh sistem struktur

Nilai konstanta  $a$  adalah 130, 90 dan 60 untuk *site* kategori B, C dan D. Untuk waktu getar  $< 0,2$  detik maka nilai  $C1$  pada 0,2 detik dapat dipakai, sedangkan untuk waktu getar  $> 1$  detik maka  $C1 = 1,0$ .

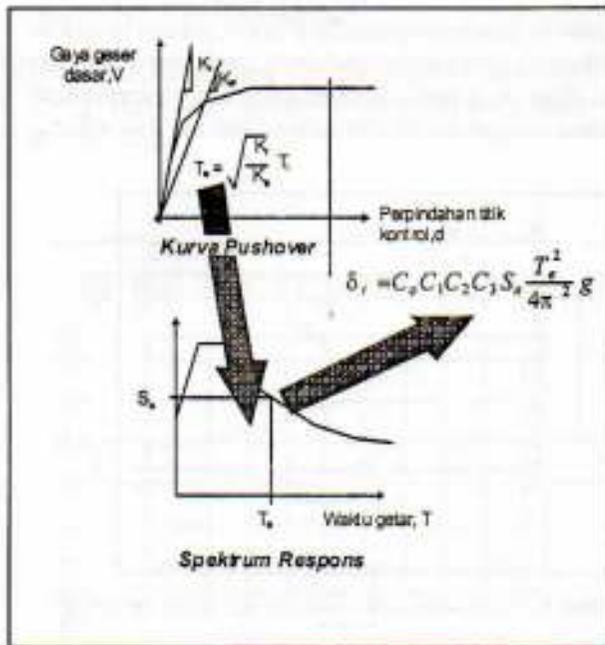
$$C_2 = 1 + \frac{1}{900} \left( \frac{R-1}{T_e} \right)^2 \quad (6)$$

Untuk waktu getar  $< 0,2$  detik maka nilai  $C2$  pada 0,2 detik dapat dipakai, sedangkan untuk waktu getar  $> 0,7$  detik maka  $C2 = 1,0$ .

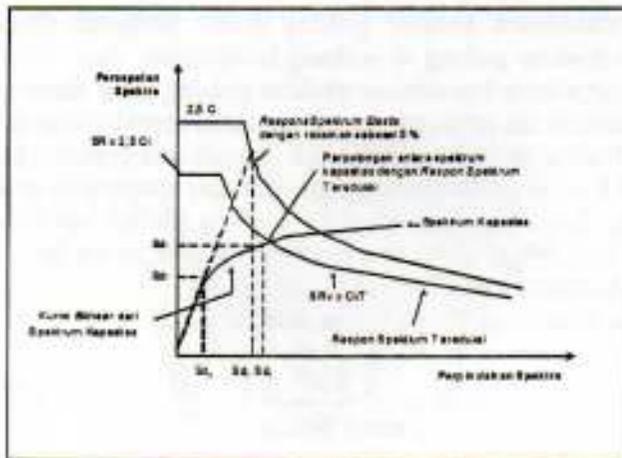
### 3. Metoda Spektrum Kapasitas

Dalam Metoda Spektrum Kapasitas proses dimulai dengan menghasilkan kurva hubungan gaya perpindahan yang memperhitungkan kondisi *inelastis* struktur. Proses tersebut sama dengan Metode Koefisien Perpindahan, kecuali bahwa hasilnya diplot-kan dalam format ADRS (*acceleration displacement response spectrum*).

Format tersebut adalah konversi sederhana dari kurva hubungan gaya geser dasar dengan perpindahan lateral titik kontrol dengan menggunakan properti dinamis sistem dan hasilnya disebut sebagai kurva kapasitas struktur. Gerakan tanah (gempa) juga dikonversi ke format ADRS. Hal ini menyebabkan kurva kapasitas dapat di-plot-kan pada sumbu yang sama sebagai gaya gempa perlu. Pada format tersebut waktu getar ditunjukkan sebagai garis radial dari titik pusat sumbu.



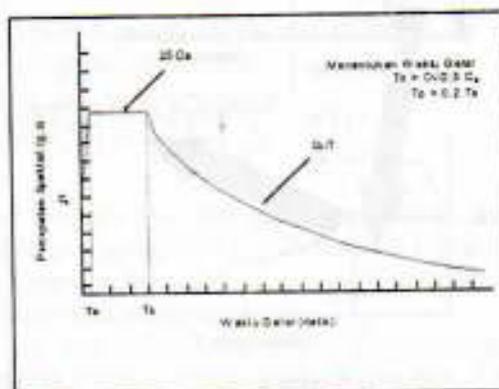
Gambar 4. Skematik prosedur metoda koefisien perpindahan



Gambar 5. Penentuan titik kinerja

Waktu getar ekuivalen ( $T_e$ ), dianggap sebagai *secant* waktu getar, tepat dimana gerakan tanah perlu yang direduksi karena adanya efek redaman ekuivalen bertemu pada kurva kapasitas. Karena waktu getar ekuivalen dan redaman merupakan fungsi dari perpindahan maka penyelesaian untuk mendapatkan perpindahan *inelastik* maksimum (titik kinerja) adalah bersifat iteratif. ATC-40 menetapkan batas redaman ekuivalen untuk mengantisipasi adanya penurunan kekuatan dan kekakuan yang bersifat gradual.

Cara ini telah *built-in* dalam program SAP 2000, proses konversi kurva *pushover* ke format ADRS dan kurva respon spektrum yang direduksi dikerjakan otomatis dalam program. Data yang perlu dimasukkan cukup memberikan kurva Respons Spektrum Rencana dengan parameter dalam Gambar 6 berikut.



Gambar 6. Parameter data respons spektrum rencana

#### 4. Kinerja Batas Ultimit Menurut SNI-1726-2002

Kinerja batas ultimit struktur gedung ditentukan oleh simpangan dan simpangan antar-tingkat maksimum struktur gedung akibat pengaruh Gempa Rencana dalam kondisi struktur gedung di ambang keruntuhan, yaitu untuk membatasi kemungkinan terjadinya keruntuhan struktur gedung yang dapat menimbulkan korban jiwa manusia dan untuk mencegah benturan berbahaya antar-gedung atau antar bagian struktur gedung yang dipisah dengan sela pemisah (sela delatasi). Sesuai Pasal 4.3.3 SNI-1726-2002 simpangan dan simpangan antar-tingkat ini harus dihitung dari simpangan struktur gedung akibat pembebanan gempa nominal, dikalikan dengan suatu faktor pengali ( $\xi$ ) sebagai berikut:

- untuk struktur gedung beraturan :  $\xi = 0.7 R$
- untuk struktur gedung tidak beraturan:

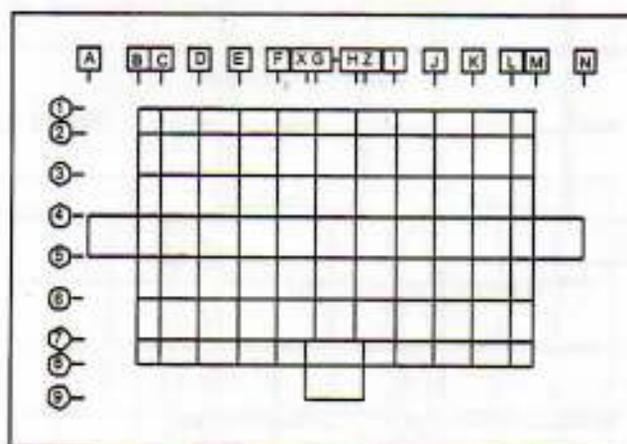
$$\xi = \frac{0,7R}{\text{Faktor Skala}} \quad (7)$$

di mana  $R$  adalah faktor reduksi gempa struktur gedung tersebut dan Faktor Skala adalah seperti yang ditetapkan dalam Pasal 7.2.3 SNI-1726-2002.

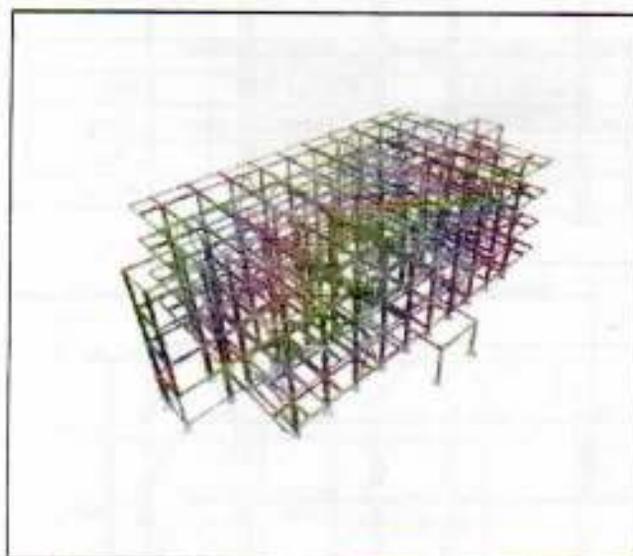
Untuk memenuhi persyaratan kinerja batas ultimit, dalam segala hal simpangan antar-tingkat yang dihitung dari simpangan struktur gedung menurut rumusan di atas tidak boleh melampaui 0,02 kali tinggi tingkat yang bersangkutan. Kriteria simpangan ultimit tersebut selanjutnya digunakan sebagai target perpindahan versi SNI-1726-2002.

## 7. STUDI KASUS DAN PEMBAHASAN

Studi ini membahas model gedung dengan sistem balok-kolom, 4 lantai, fungsi gedung kuliah, ( $I=1$ ). Tinggi tiap lantai 3,8 m. Tebal pelat lantai 120 mm, untuk dak 100 mm [Gambar 7 s.d. 15].

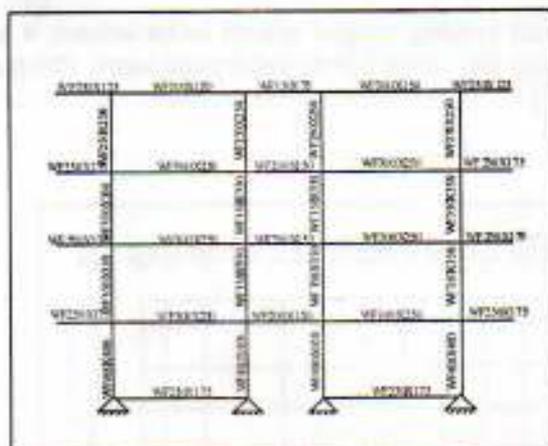


Gambar 7. Denah

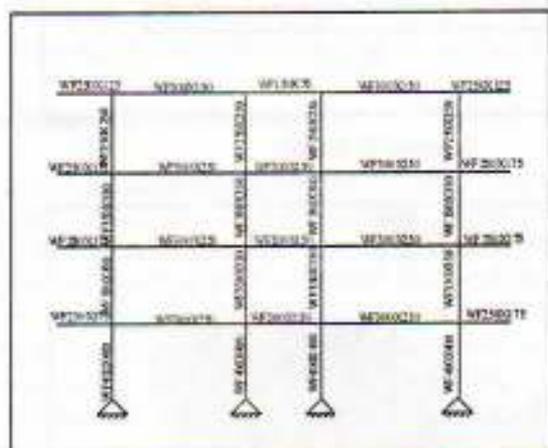


Gambar 8. Model 3D struktur

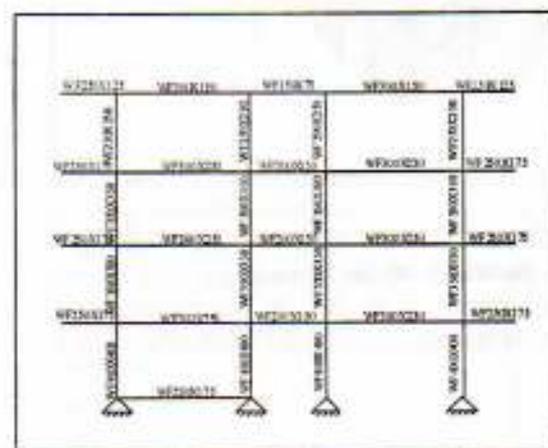
## 1. Struktur moment frame (Rangka Pemikul Momen)



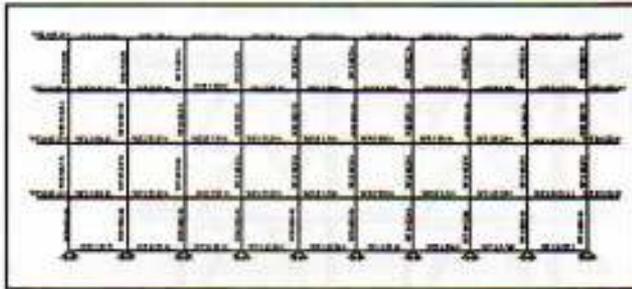
Gambar 9. Portal C dan L



Gambar 10. Portal E-J

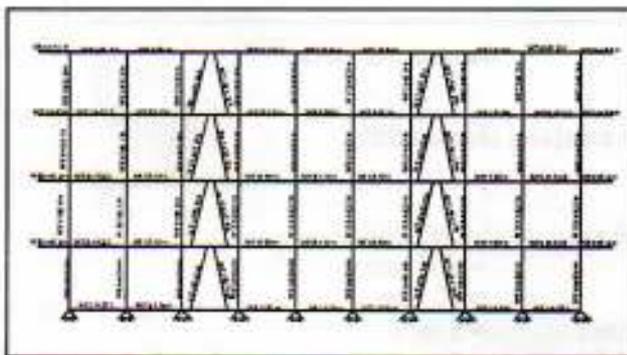


Gambar 11. Portal G-H



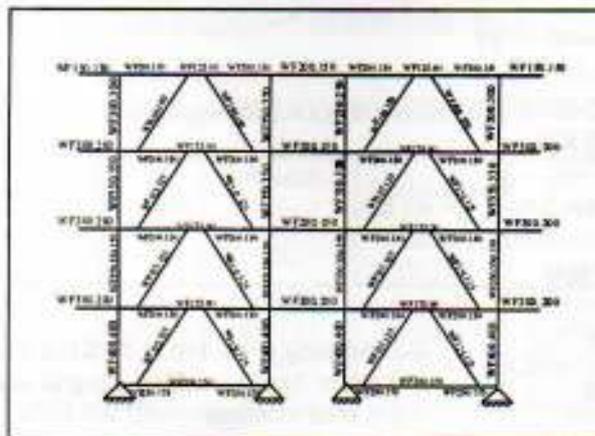
Gambar 12. Portal 2 - 7

1. Struktur SRBE

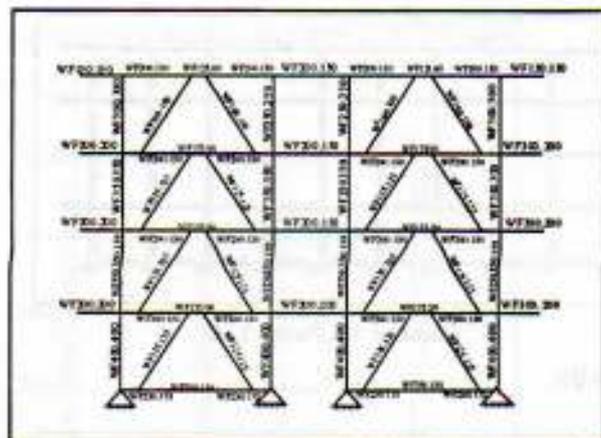


	Elemen Link	Balok di luar Link
Lantai 1	WF 100X50	WF 175X90
Lantai 2	WF 100X50	WF 175X90
Lantai 3	WF 100X50	WF 175X90
Lantai 4	WF 100X50	WF 150X75

Gambar 13. Portal 2 - 7



Gambar 14. Portal C - L



Gambar 15. Portal F - H

### Perhitungan panjang elemen link Arah x

Profil yang dipakai adalah W100X50

Tinggi ( $d_h$ ) = 100 mm

Lebar ( $b_f$ ) = 50 mm

Tebal badan ( $t_w$ ) = 5 mm

Tebal sayap ( $t_f$ ) = 7 mm

Jari-jari kelembaman ( $r_y$ ) = 1,12 cm

Modulus penampang ( $S_x$ ) = 37,5 cm<sup>3</sup>

Tegangan leleh baja ( $F_y$ ) = 240000 Kn/m<sup>2</sup>

Momen Plastis ( $M_p$ )

$$M_p = F_y \cdot Z = (240000 \text{ KN} / \text{m}^2)(37500 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3) \\ = 9 \text{ KN.m}$$

Kuat Nominal Geser ( $V_p$ )

$$V_{p1} = 0,6 \cdot F_y \cdot (d - 2t_f) \cdot t_w \\ = (0,6)(240000)(0,1 - (2(0,007)))(0,005) \\ = 61,920 \text{ KN}$$

$$V_{p2} = 2 \frac{M_p}{e} = 2 \cdot \frac{9}{0,4} = 45 \text{ KN}$$

$V_p$  terkecil = 45 KN

$$1,6 \frac{M_p}{V_p} = 1,6 \frac{9}{45} = 0,32$$

$$2,6 \frac{M_p}{V_p} = 2,6 \frac{9}{45} = 0,52$$

Jadi panjang  $e = 0,4$  m.  $0,32 \leq 0,4 < 0,52$  termasuk link geser dominant. Dan dengan cara yang sama untuk arah y dengan profil W125X60, panjang  $e = 0,8$  m.  $0,64 \leq 0,8 < 1,04$  termasuk link geser dominant.

## Analisa Pushover Struktur Momen Frame

Dalam bagian ini akan dibahas target perpindahan, ada 4 metoda yang akan digunakan metoda spektrum kapasitas, koefisien perpindahan (FEMA 273), metode Koefisien perpindahan FEMA 440, dan kinerja batas layan (SNI 1726-2002).

### 1. Metoda Spektrum Kapasitas

Dari kurva respon spectrum rencana SNI 1726-2002 untuk wilayah 4, kondisi tanah sedang, didapat nilai  $c_a = 0,28$  dan  $c_v = 0,42$  yang diperlukan sebagai input data program SAP. Selanjutnya hitungan sepenuhnya dilakukan komputer. Sedangkan dengan cara sama untuk pola beban Uniform maka  $\delta T$ , Arah X = 0,054 m dan arah Y = 0,05

### 2. Koefisien Perpindahan (FEMA 273)

Didapatkan untuk arah X,  $\delta T = 0,0803$  m sedangkan arah Y,  $\delta T = 0,0418$  m

### 3. Metode Koefisien Perpindahan FEMA 440

Didapatkan untuk arah X,  $\delta T = 0,0685$  m sedangkan arah Y,  $\delta T = 0,0413$  m

### 4. Kinerja Batas Layan

Kinerja batas layan bangunan ditentukan oleh simpangan antar-tingkat akibat pengaruh Gempa Rencana, yaitu untuk membatasi terjadinya pelelehan baja (atau peretakan pada bangunan beton) yang berlebihan, disamping untuk mencegah kerusakan non-struktur dan ketidak-nyamanan penghuni. Simpangan antar-tingkat ini harus dihitung dari simpangan struktur gedung tersebut akibat pengaruh Gempa Nominal yang telah dibagi Faktor Skala. Untuk memenuhi persyaratan kinerja batas layan maka dalam segala hal simpangan antar-tingkat yang dihitung dari simpangan bangunan tidak boleh melampaui 0,03/R kali tinggi tingkat yang bersangkutan atau 30 mm, dan dipilih yang nilainya terkecil. Ratio batas simpangan struktur =  $0,03/8,5 = 0,00353$ .

Tabel 2. Simpangan arah X (arah memanjang)

Level	h tingkat (m)	Simpangan x (m)	Simpangan antar tingkat	Rasio simpangan ket. Antar tingkat
4	3,8	0,0135	0,0025	0,000658
3	3,8	0,0110	0,0031	0,000816
2	3,8	0,0079	0,0038	0,001000
1	3,8	0,0041	0,0041	0,001079

Tabel 3. Simpangan arah Y (arah pendek)

Level	h tingkat (m)	Simpangan y (m)	Simpangan antar tingkat	Rasio simpangan ket. Antar tingkat
4	3,8	0,0349	0,0022	0,000579
3	3,8	0,0327	0,0064	0,001684
2	3,8	0,0263	0,0131	0,003447
1	3,8	0,0132	0,0132	0,003474

Tabel 4. Simpangan Ultimit

Level	Elevasi (m)	Simpangan Nominal		Simpangan Ultimit		Nilai Batas
		x	y	$\xi_R \cdot x$	$\xi_R \cdot y$	
Atap	15,2	0,014	0,035	0,0803	0,207	0,304

Untuk gedung beraturan maka  $\xi_R = (0.7)(8.5) = 5.95$ , dari hitungan pada Tabel diketahui bahwa simpangan ultimit masih lebih kecil dari nilai batas maksimum jadi struktur memenuhi persyaratan kinerja yang ditetapkan oleh SNI 1726-2002.

### Analisa Pushover Struktur SRBE

Dalam bagian ini akan dibahas target perpindahan, ada 4 metoda yang akan digunakan metoda spektrum kapasitas, koefisien perpindahan (FEMA 273), metode Koefisien perpindahan FEMA 440, dan kinerja batas layan (SNI 1726-2002).

#### 1. Metoda Spektrum Kapasitas

Didapatkan  $\delta T$ , Arah X = 0,022 m dan arah Y = 0,011 m

#### 2. Koefisien Perpindahan (FEMA 273)

Didapatkan untuk arah X,  $\delta T = 0,0728$  m sedangkan arah Y,  $\delta T = 0,1183$  m

#### 3. Metode Koefisien Perpindahan FEMA 440

Didapatkan untuk arah X,  $\delta T = 0,0556$  m sedangkan arah Y,  $\delta T = 0,0773$  m

#### 4. Kinerja Batas Layan

Untuk memenuhi persyaratan kinerja batas layan maka dalam segala hal simpangan antar-tingkat yang dihitung dari simpangan bangunan tidak boleh melampaui  $0.03/R$  kali tinggi tingkat yang bersangkutan atau 30 mm, dan dipilih nilai terkecil.

Tabel 5. Simpangan arah X (arah memanjang)

Level	h tingkat (m)	Simpangan x (m)	Simpangan antar tingkat	Rasio simpangan ket. Antar tingkat
4	3,8	0,008	0,00120	0,000316
3	3,8	0,0068	0,0019	0,000500
2	3,8	0,0049	0,0024	0,000632
1	3,8	0,0025	0,0025	0,000658

Tabel 6. Simpangan arah Y (arah pendek)

Level	h tingkat (m)	Simpangan x (m)	Simpangan antar tingkat	Rasio simpangan ket. Antar tingkat
4	3,8	0,0075	0,00020	0,000053
3	3,8	0,0073	0,0013	0,000342
2	3,8	0,006	0,0023	0,000605
1	3,8	0,0037	0,0037	0,000974

### Kinerja Batas Ultimit Menurut SNI 1726 – 2002

Berdasarkan beban gempa nominal yang diperoleh dari analisa struktur dengan cara respons spectrum diperoleh simpangan pada level atap seperti pada Tabel 7.

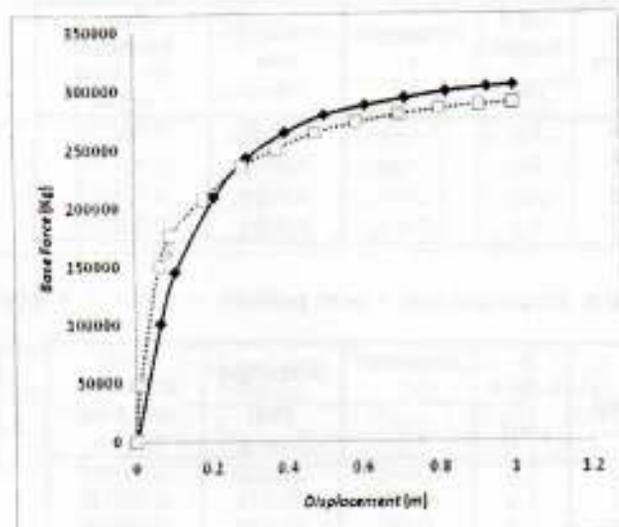
Tabel 7. Simpangan Ultimit

Level	Elevasi (m)	Simpangan Nominal		Simpangan Ultimit		Nilai Batas 0,02H
		x	y	R.x	R.y	
Atap	15,2	0,008	0,0075	0,0476	0,0446	0,304

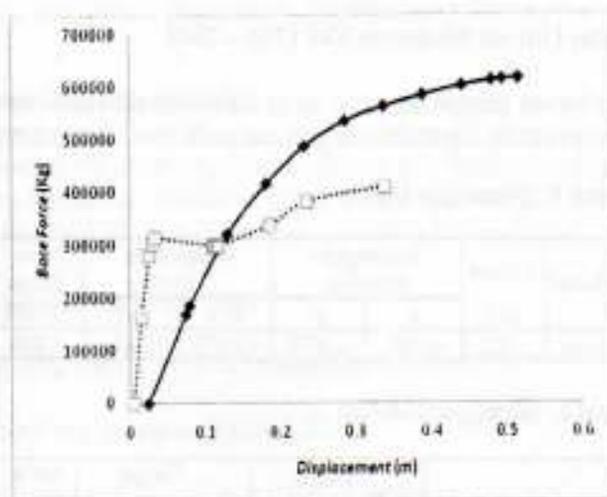
Tabel 8. Target perpindahan

Kriteria	Target Perpindahan		Target Perpindahan		Nilai Batas 0,02H
	Arah x		Arah y		
	Momen Frame	SRBE	Momen Frame	SRBE	
Koef.Perpindahan FEMA356	0,0803	0,0728	0,1183	0,0614	0,304
Kapasitas Spektrum	0,0540	0,022	0,022	0,0150	
Koef.Perpindahan FEMA440	0,0685	0,0556	0,0773	0,0342	
Kinerja Batas Ultimit SNI 1726-2002	0,0803	0,0476	0,0434	0,0738	

Tabel 8 tersebut dinyatakan juga dalam Gambar 16 dan 17



Gambar 16. Kurva kapasitas arah X



Gambar 17. Kurva kapasitas arah Y

Dari ke empat kriteria untuk struktur *Momen Frame* diperoleh target perpindahan yang paling besar (menentukan) untuk arah x adalah 0,0803 m, diperoleh dari metode Koefisien Perpindahan FEMA 273/356 dan Kinerja Batas Ultimit SNI 1726 - 2002, sedangkan untuk arah y target perpindahan yang menentukan adalah Kinerja Batas Ultimit SNI 1726 - 2002, adalah 0,2077 m.

Struktur dengan SRBE, untuk arah x adalah 0,0728 dari metode Koefisien Perpindahan FEMA 273 / 356, dan untuk arah y adalah 0,1183 dari Koefisien Perpindahan FEMA 273 / 356.

Untuk mendapatkan perilaku inelastik pasca runtuh, maka analisa beban dorong standar diteruskan sampai  $\geq 150\%$  dari target perpindahan untuk setiap arah. Sehingga perencana dapat menentukan kriteria mana yang dipilih saat pelaksanaan.

## KESIMPULAN

Program SAP2000 telah menyediakan fasilitas untuk perencanaan berbasis kinerja sesuai dengan FEMA 273/356, meskipun demikian ada beberapa hal yang masih memerlukan cara perhitungan manual, a.l.:

- Menentukan waktu getar alami efektif pasca leleh yaitu pembuatan kurva bilinear berdasarkan kurva pushover.
- Menentukan evaluasi kinerja (target perpindahan,  $\delta T$ ).

Titik evaluasi kinerja atau *target displacement*,  $\delta T$ , merupakan hal yang penting untuk mengevaluasi kinerja struktur terhadap suatu gempa rencana, dan menjadi indikasi sejauh mana kondisi struktur bila ada gempa tertentu. Ternyata beberapa metode yang digunakan yaitu ATC-40, Kinerja Batas Ultimit SNI 1726, FEMA 273/356 dan FEMA 440 untuk menentukan  $\delta T$  tersebut memberikan hasil yang berbeda satu sama lain. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode Koefisien Perpindahan FEMA 273/356 dan persyaratan Kinerja Batas Ultimit SNI 1726 menghasilkan nilai  $\delta T$  yang menentukan. Jadi meskipun kedua portal, yaitu portal Moment Frame dan portal SRBE (arah pendek dan memanjang) telah memenuhi kriteria perencanaan biasa, kriteria perencanaan biasa disini adalah konfigurasi baja maupun perencanaan gempa yang disyaratkan SNI, tetapi ternyata perilaku pasca leleh diantara keduanya berbeda. Hal tersebut tidak bisa dideteksi tanpa melakukan analisa pushover. Kesimpulan yang dapat diperoleh dari tulisan ini adalah bahwa perencanaan berbasis kinerja dapat memberikan informasi sejauh mana suatu gempa akan mempengaruhi struktur. Dengan demikian sejak perencana mendapat informasi bagaimana bangunan tersebut berperilaku bila ada gempa.

Dengan membandingkan analisa struktur gedung tanpa brace (moment frame) dengan bresing, dapat disimpulkan kinerja struktur gedung sebagai berikut:

1. Untuk keseluruhan kasus, mekanisme plastis yang terjadi pertama kali terjadi pertama kali pada balok bawah berlanjut sampai keatas sampai semua balok mengalami mekanisme plastis dan terakhir terjadi mekanisme plastis pada kaki kolom. Dengan begitu perancangan struktur dengan menggunakan metoda strong coloum weak beam terpenuhi.
2. Dapat disimpulkan bahwa bresing berfungsi, karena struktur dengan bresing lebih kuat menahan geser yang lebih besar, saat ditinjau pada perpindahan yang sama, sebagaimana ditunjukkan dalam kurva kapasitas.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Applied Technology Council.(1996). " *ATC 40 - Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*", Redwood City, California, U.S.A.
2. ASCE.(2000). " *FEMA 356 - Prestandard And Commentary For The Seismic Rehabilitation Of Buildings*", Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
3. ATC-33 Project.( 1997a). " *FEMA 273 - NEHRP Guidelines For The Seismic Rehabilitation of Buildings*", Building Seismic Safety Council, Washington, D.C.

4. ATC-33 Project.(1997b) FEMA 274 – NEHRP Commentary On The Guidelines For The Seismic Rehabilitation of Buildings , Building Seismic Safety Council, Washington D.C.
5. ATC-55 Project.(2004). "FEMA 440 – Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
6. BSSC.(1995) "FEMA 222 – NEHRP Recommended Provision for Seismic Regulations for New Building , Washington, D.C.
7. SEAOC.(1995). "Vision 2000 – A Framework for Performance Based Earthquake Engineering. Vol. 1, January, 1995.
8. Departemen Pekerjaan Umum, SNI 03-1729-2002, *Tata Cara Perencanaan Struktur Baja untuk Bangunan Gedung*.
9. Departemen Pekerjaan Umum, SNI 03-1726-2002, *Standar Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung*.
10. Sumargo, Syamsul Basri, Anis Rosyida, "Pengaruh Pengaku Konsentris dan Eksentris pada Struktur Baja dengan Daktilitas Penuh terhadap Gempa, Jurnal Itenas, No. 3, Vol. 7, Sep-Nov. 2003.
11. Sumargo, Syamsul Basri, Helen Grace Mantiri, "Analisis Struktur Rangka Baja dengan Pengaku Konsentris dan Eksentris Tipe X (X-Brace) pada Daktilitas Terbatas terhadap Gempa", Jurnal Itenas, No. 1, Vol. 8, Mar-mei. 2004.

## Analisis Struktur Mikro dan Sifat Mekanik Baja Mangan Austenitik Hasil Proses Perlakuan Panas

Abrianto A.

Jurusan Teknik Metalurgi  
Fakultas Teknik- Universitas Jenderal Achmad Yani

**Abstrak** . Nilai kekerasan tertinggi yaitu 334.2HV untuk material baja mangan austenitik dihasilkan dari hasil proses perlakuan panas annealing. Semakin lambat laju pendinginan proses perlakuan panas (*quenching, normalizing, annealing*) material baja mangan austenitik akan meningkatkan nilai kekerasan material tersebut, yaitu (217.4 HV, 245.0HV, 334.2HV). Struktur mikro material baja mangan austenitik hasil perlakuan panas *quenching* adalah karbida dalam matrik austenit ( $\gamma$ ), sedangkan hasil perlakuan panas *normalizing* dan *annealing* adalah karbida dalam matrik ferrit ( $\alpha$ ).

**Kata kunci** : *baja mangan austenitik, quenching, normalizing, annealing, karbida, ferit dan austenit*

### 1 PENDAHULUAN

Baja mangan austenitik atau baja mangan tinggi dipergunakan sebagai material untuk komponen-komponen yang mengalami gesekan pada saat beroperasinya. Baja mangan austenitik merupakan material yang akan diteliti secara lebih jauh lagi, karena baja tersebut memiliki sifat mekanik yang baik, seperti tahan aus yang sangat baik, kekerasan yang cukup tinggi, ketangguhan yang baik serta ketahanan terhadap korosi yang cukup baik.

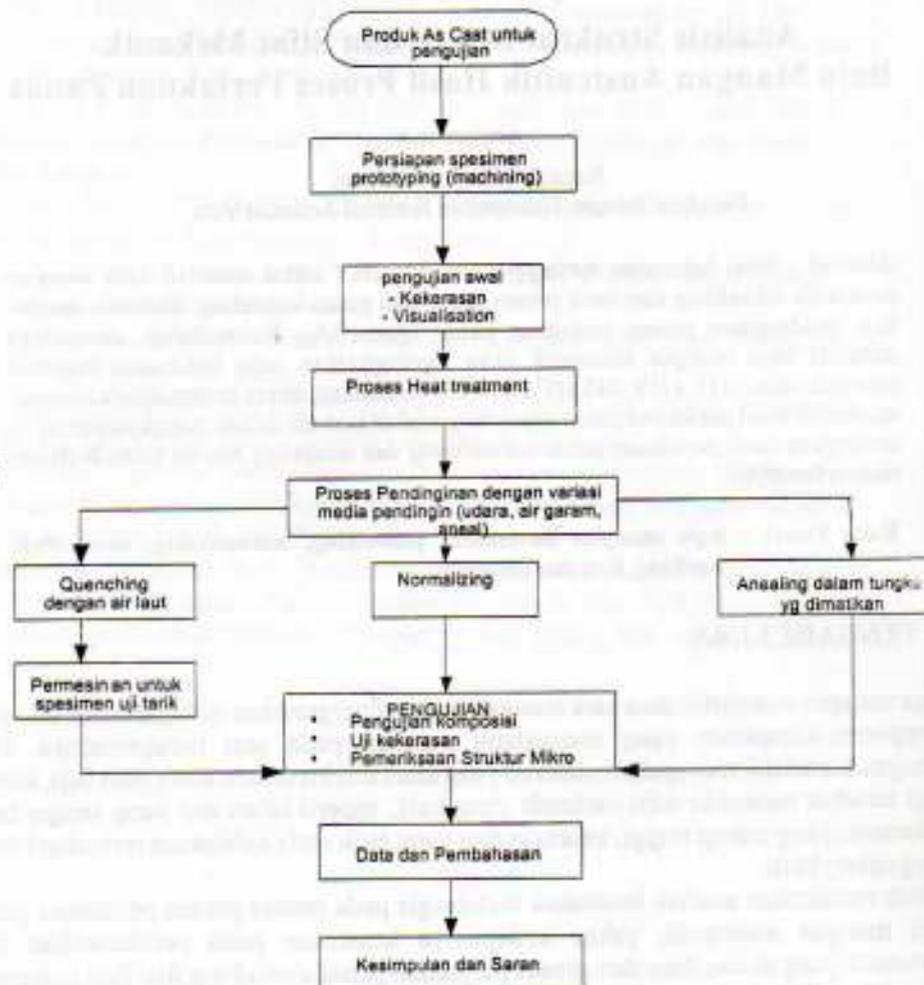
Untuk melakukan analisa fenomena metalurgis pada proses perlakuan panas baja mangan austenitik, yakni terdapatnya kesamaan pada pembentukan fasa austenitik yang di hasilkan dari proses perlakuan panas *quenching* dan fasa austenitik yang dihasilkan dari proses perlakuan panas *normalizing*. Lingkup penelitian pada proses penelitian dibagi menjadi beberapa tahap, yaitu:

1. Melakukan proses perlakuan panas Annealing, Normalizing, dan Quenching untuk menganalisa pengaruhnya terhadap sifat mekanik dan struktur mikro.
2. Pemeriksaan dan pengujian yang dilakukan terhadap spesimen hasil coran baja mangan austenitik ini meliputi; pemeriksaan visual, komposisi kimia dan struktur mikro serta pengujian kekerasan.

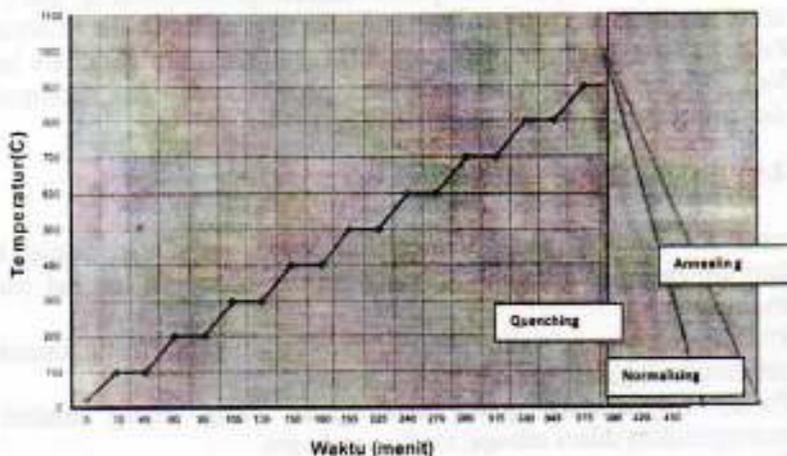
### 2 SKEMA PENELITIAN

Pada proses ini material yang mengalami proses perlakuan panas kemudian didinginkan dengan media pendingin yang bervariasi seperti terlihat pada skema proses penelitian yaitu:

- Proses *quenching*, yaitu pendinginan cepat yang menggunakan media pendingin air garam (air laut).
- Proses *normalizing*, yaitu pendinginan yang cukup lambat dengan menggunakan udara sebagai media pendingin.
- Proses *annealing*, yaitu proses pendinginan yang sangat lambat yang media pendinginnya menggunakan tungku (tungku yang dimatikan).



**Gambar 1. Skema Penelitian**



**Gambar 2. Proses perlakuan panas pada baja mangan austenitik**

### 3 DATADAN PEMBAHASAN

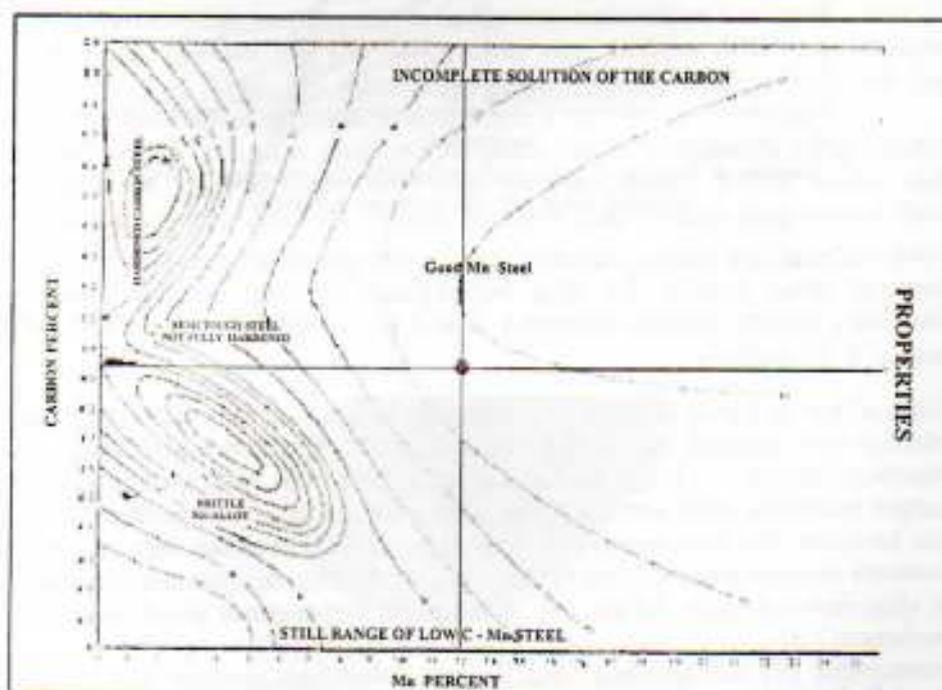
#### 3.1 Komposisi Kimia

Tabel 1. Hasil Pemeriksaan Komposisi Kimia Coran Baja Mangan Austenitik (BMA)

Unsur	Komposisi Kimia (%)	
	Hasil Pengujian	Standar JIS G 5131
C	0.935	0.9 – 1.20
Si	0.40	0.8 ( max )
Mn	11.9	11 – 14
P	0.037	0.07 ( max )
S	–	0.04
Ni	0.22	–
Cr	0.42	–
Al	0.138	–
Fe	sisia	sisia

Dari hasil pengujian komposisi kimia yang ditunjukkan pada Tabel.1 diatas dapat dikatakan bahwa spesimen pengujian hasil proses pengecoran telah sesuai dengan standarnya yaitu JIS G51 kelas SCMnH2.

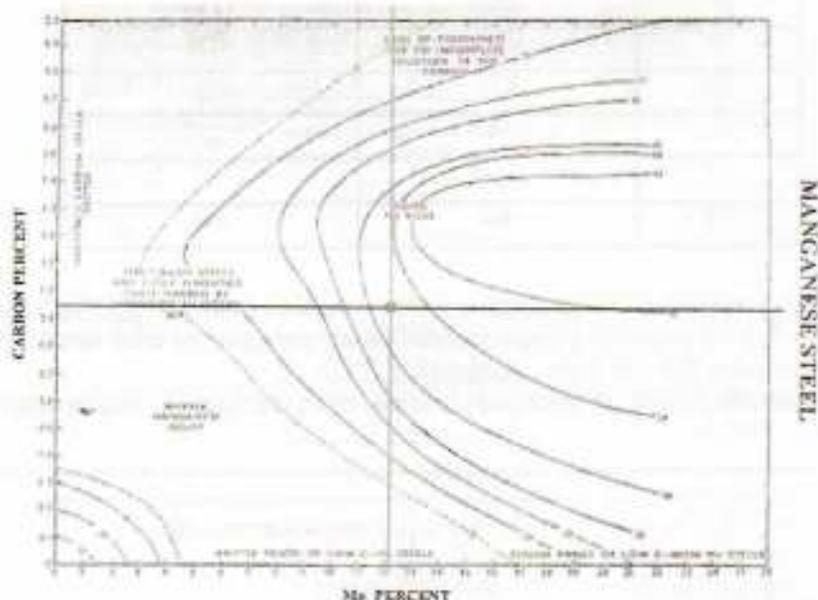
Kandungan unsur yang terdapat pada material akan mempengaruhi terhadap sifat-



Gambar 3. Pengaruh unsur karbon 0.935% dan mangan 11.8% terhadap kekuatan tarik baja mangan austenitik

mekanik dari material tersebut, terutama untuk unsur-unsur yang dominan yang terdapat dalam material.

Unsur karbon (C) antara 0.935% dan unsur mangan 11.8% akan berpengaruh terhadap kekuatan tarik dan elongasi dari baja mangan austenitik, pengaruh dari unsur ini sangat besar terutama untuk baja mangan austenitik dari hasil proses perlakuan panas quenching (pendinginan cepat). Kekuatan tarik untuk baja mangan austenitik hasil perlakuan panas quenching ini bisa mencapai 50-60 ton/in<sup>2</sup>, serta elongasi yang bisa mencapai 40-50. Hal ini dapat ditunjukkan pada Gambar. 3 untuk pengaruh unsur karbon dan unsur mangan terhadap kekuatan tarik, dan Gambar. 4 untuk pengaruh unsur karbon dan unsur mangan terhadap nilai elongasi yang dihasilkan.

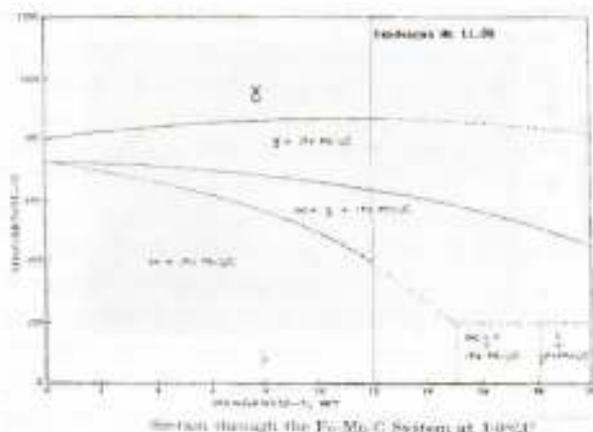


**Gambar 4.** Pengaruh unsur karbon 0.935% dan mangan 11.8% terhadap elongasi baja mangan austenitik

Untuk material baja mangan austenitik hasil proses perlakuan panas normalizing dan ancaling, unsur karbon (C) akan berpengaruh terhadap struktur mikro yang dihasilkan, dimana struktur mikronya adalah  $\alpha + (FeMn)_3C$  seperti terlihat pada gambar 5 dibawah ini.

Unsur silikon (Si) pada baja mangan austenitik secara khususnya tidak berpengaruh terhadap sifat mekanik dari baja mangan austenitik jika kandungan unsur silikon tersebut dibawah 1%. Tetapi jika kandungan unsur silikon yang terdapat dalam baja mangan austenitik lebih dari 1% maka unsur silikon ini akan berpengaruh terhadap sifat keuletan dari baja mangan austenitik ini dimana keuletan dari baja mangan austenitik ini akan menurun, begitu juga dengan kekuatan dari baja mangan austenitik ini akan menurun pula. Silikon (Si) akan sangat berpengaruh secara ekstrim pada kandungan 2,2%.

Unsur sulfur (S) atau belerang yang terdapat dalam baja mangan austenitik harus diusahakan ditekan serendah mungkin karena nantinya akan berikatan dengan mangan (Mn) membentuk mangan sulfida (MnS) yang tidak diinginkan, karena MnS ini nantinya akan membentuk inklusi.



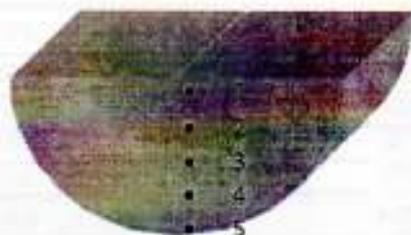
Gambar 5. Diagram pembentukan fasa dari baja mangan austenitik untuk Mn 11.8%

Unsur fosfor pada baja mangan austenitik ini adalah sebagai pengotor, unsur fosfor ini akan menyebabkan kegetasan baja mangan austenitik pada temperatur yang rendah, dan akan menurunkan kekuatan dan keuletan dari baja mangan austenitik ini. Ikatan yang terjadi antara unsur fosfor dengan base metalnya yaitu besi (Fe) membentuk Fe<sub>3</sub>P, sehingga unsur fosfor ini dibatasi sampai 0.07% maksimum, selebihnya dari 0.07% tidak ada pengaruh yang signifikan (konstan) terhadap keuletan. Unsur fosfor (P) ini akan menurunkan kekuatan dari baja mangan austenitik secara terus menerus jika kandungan unsur fosfornya terus meningkat.

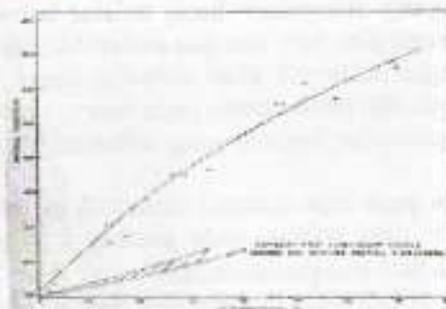
Untuk unsur yang terdapat dalam baja mangan austenitik diluar standarnya dalam hal ini adanya unsur krom (Cr) yang terdapat dalam material lips bucket yaitu baja mangan austenitik tidak berpengaruh terhadap sifat mekanik baja mangan austenitik jika jumlahnya dibawah 3%, jika unsur krom yang terdapat dalam baja mangan austenitik tersebut diatas 3% akan berpengaruh terhadap naiknya kekuatan dan keuletan dari material baja mangan austenitik ini.

Unsur alumunium (Al) akan mulai berpengaruh jika kandungan Al yang terdapat dalam material baja mangan austenitik tersebut diatas 0.75% yaitu akan meningkatkan ketangguhan baja mangan austenitik pada kondisi yang as cast (hasil coran).

### 3.2 Kekerasan



Gambar 6. Titik-titik pengujian kekerasan



Gambar 10. Kekerasan yang diperoleh dari proses lanjutan pengerjaan dingin dengan deformasi 70%.

Peningkatan kekerasan setelah proses perlakuan panas lanjutan tersebut pada baja mangan austenitik disebabkan karena mekanisme interlocking dan blocking pergerakan sepanjang bidang slip pada butir austenitik.<sup>5)</sup> Oliver and Boyd, *Manganese cast steels*, London-Edinburgh, London.

### 3.3 Struktur Mikro



Nital 2,5%

200X



Nital 2,5%

Gambar 11. Struktur mikro baja mangan austenitik as cast



2.5% nital, mechanical stress, 15% HCl, 200X  
5-42. These micrographs manganese steel as for  
100, 5 in thick, as cast. The gray con-  
stituents are large carbides, which are located  
at grain boundaries (compare with cast).

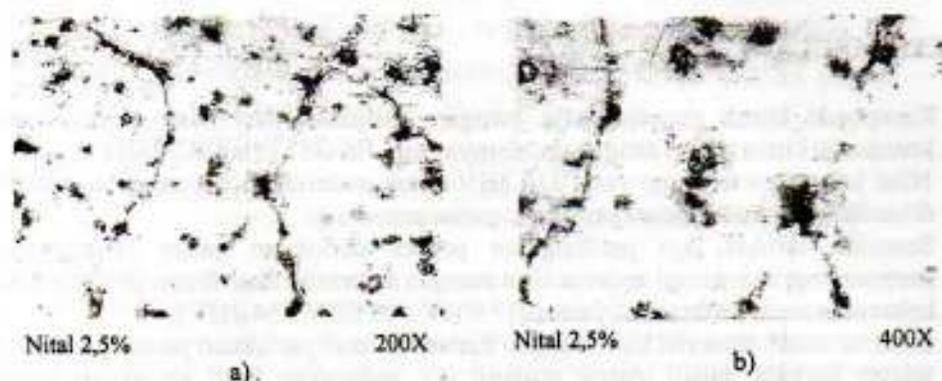
a)



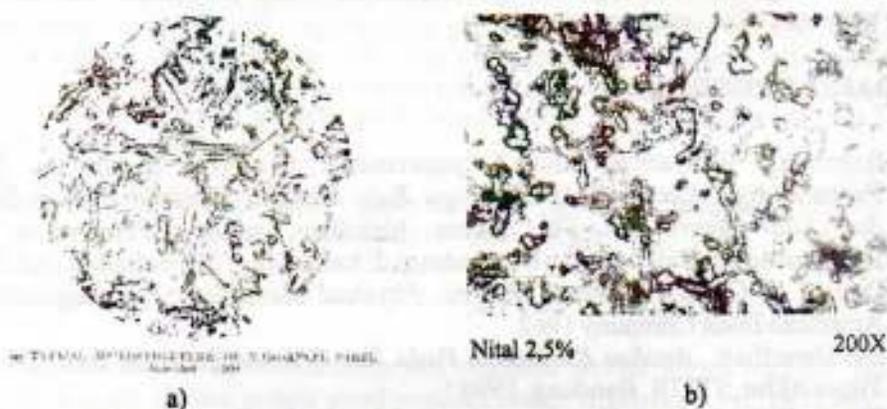
2.5% nital, mechanical stress, 15% HCl, 200X  
6-43. Some austenitic manganese steel as  
cast, 5 in thick, after heating to 2000  
(1121 °C) and quenching in water. Very  
carbides remain after this final treatment.

b)

Gambar 12. Struktur mikro standar material baja mangan austenitik a.) as cast. ( etsa: nital 2,5% dengan pembesaran foto 500X), b.) as quenching



**Gambar 11.** Struktur mikro baja mangan austenitik a) proses quenching  
b) proses normalizing



**Gambar 12.** Struktur mikro baja mangan austenitik a) standar untuk proses annealing  
b) proses annealing

Dari hasil pemeriksaan struktur mikro untuk material baja mangan austenitik hasil pengecoran (as-cast) ini ditunjukkan fasa-fasa yang terbentuk adalah fasa karbida ( $\text{FeMn}$ ),  $\text{C}$  pada batas butir dengan matriks fasa  $\alpha$ . Sedangkan setelah mengalami perlakuan panas quenching fasa yang terbentuk adalah karbida pada batas butir prior austenit ( $\gamma$ ). Karbida tersebut merupakan karbida yang belum larut pada saat proses pemanasan austenisasi, hal ini bisa disebabkan karena kurangnya holding time atau waktu penahanan pada saat proses austenisasi.

Perlakuan panas dengan laju pendinginan yang relatif lambat yaitu proses normalizing dan annealing akan menghasilkan fasa karbida ( $\text{FeMn}$ ),  $\text{C}$  dalam matriks ferit. Semakin lambat laju pendinginan dari proses pemanasan austenisasi maka karbida yang terbentuk akan semakin banyak. Struktur mikro yang terbentuk pada baja mangan austenitik sebagai akibat dari perlakuan yang dialaminya akan sangat menentukan sifat mekanik dari baja mangan austenitik tersebut.

Korelasi struktur mikro yang terbentuk pada baja mangan austenitik terhadap nilai kekerasannya adalah: kekerasan karbida akan lebih tinggi dibanding kekerasan fasa  $\alpha$  dan akan lebih tinggi pula nilai kekerasannya dibanding kekerasan fasa austenit ( $\gamma$ ).

Jadi nilai kekerasan material lips bucket hasil perlakuan panas annealing akan lebih tinggi dari kekerasan hasil perlakuan panas normalizing dan kekerasan hasil

#### 4 KESIMPULAN

1. Komposisi kimia material baja mangan austenitik dari hasil pemeriksaan komposisi kimia sesuai dengan standarnya yaitu JIS G51 kelas SCMnH2
2. Nilai kekerasan tertinggi yaitu 334.2HV untuk material baja mangan austenitik dihasilkan dari hasil proses perlakuan panas annealing.
3. Semakin lambat laju pendinginan proses perlakuan panas (quenching, normalizing, annealing) material baja mangan austenitik akan meningkatkan nilai kekerasan material tersebut, yaitu (217.4 HV, 245.0HV, 334.2HV).
4. Struktur mikro material baja mangan austenitik hasil perlakuan panas quenching adalah karbida dalam matrik austenit ( $\gamma$ ), sedangkan hasil perlakuan panas normalizing dan annealing adalah karbida dalam matrik ferrit ( $\alpha$ )
5. Semakin lambat laju pendinginan proses perlakuan panas (normalizing dan annealing) material baja mangan austenitik maka presipitasi karbida yang terbentuk akan semakin banyak

#### 5 DAFTAR PUSTAKA

1. Bambang Widyanto., Muki Setyapermana., Rochim Suratman, *Studi Perbandingan Karakteristik Beberapa Baja Mangan Hadfield Buatan Dalam dan Luar Negeri dan Eks Import*, Makalah Seminar: Penggunaan dan Pengembangan Baja Mangan bagi Industri di Indonesia, ITB, Bandung, 2002
2. Donald S. Clark., Wilbur R Varney., *Physical Metallurgy For Engineer.*, by American Book Company 1962.
3. Evi Ganefiati., *Analisa Kerusakan Pada Jaw Crusher Pemecah Batu Kwarsa*, Tugas Akhir, STTIB, Bandung, 1990
4. Goerge Krauss., *Steels Heat Treatment and Processing Principles*. Ohio, 1990
5. John D. Verhueren., *Fundamentals of Physical Metallurgy.*, 1975 by John Wiley & Sons. Inc canada
6. Kenneth G. Budinski., Michael K. Budinski., *Engineering Materials Properties and Selection.*, Sixth Edition., 1979 by Prentice Hall. Inc., Niacom company New 07458.USA.
9. Metal Handbook vol.7 *Atlas of Microstructure of Industrial alloy.*, ASM International, 1972
10. Oliver and Boyd., *Manganese Steel.*



## Pengaruh Variasi Proses Peregangan terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Baja St. 37 pada Proses *Roll Bending*

Adi Ganda Putra.

Jurusan Teknik Mesin

Fakultas Teknik- Universitas Jenderal Achmad Yani

**Abstrak** : Proses pembentukan merupakan perubahan bentuk benda kerja yang dilakukan dengan jalan memberikan gaya supaya terjadi deformasi plastis. Besarnya gaya luar untuk pembentukan yang dapat mengubah benda kerja harus diberikan secara permanen. Proses rol tekuk (*roll bending*) merupakan salah satu proses pembentukan pelat dimana pelat material jenis St. 37 merupakan bahan yang sering digunakan karena memiliki kemampuan bentuk yang baik. Dalam proses rol tekuk (*roll bending*) dengan memberikan variasi regangan 5%, 10%, dan 15%, pada suatu material akan mengalami perubahan sifat mekanik dan struktur mikronya.

Semakin tinggi regangan yang diberikan pada proses *roll bending* terhadap pelat baja karbon rendah (Baja St. 37) akan menyebabkan peningkatan kekerasan, kekuatan, keuletan (elongasi dan reduksi penampang) dan perubahan bentuk butir dari *equiaxial* menjadi semakin pipih dalam struktur mikro yang berfasa perlit didalam matrik ferrit.

**Kata kunci**: *roll bending, regangan, sifat mekanik, elongasi, reduksi penampang dan equiaxial*

### 1 PENDAHULUAN

Proses pembentukan logam adalah proses merubah bentuk logam menjadi produk yang diinginkan. Dalam proses pembentukan inipun digunakan perkakas (*tooling*) yang fungsinya memberikan gaya terhadap benda kerja. Salah satu caranya untuk membentuk logam adalah proses rol tekuk (*roll bending*).

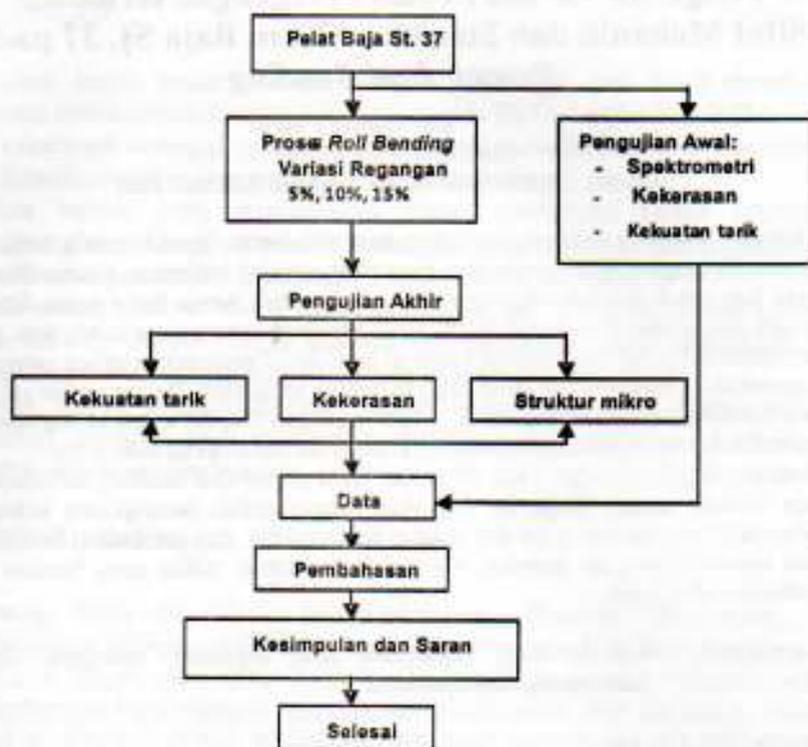
Pemakaian bahan logam memegang peranan penting dalam dunia perindustrian. Salah satu logam yang sering digunakan dalam dunia industri adalah pelat baja St. 37. Baja St. 37 banyak digunakan karena mempunyai mampu bentuk yang baik, selain itu juga mudah didapat dan harganya murah.

Penelitian yang dilakukan yaitu proses pembentukan pelat (*Sheet Metal Forming*) pada pelat baja St. 37 yang dilakukan dengan proses rol tekuk (*roll bending*). Pada proses rol tekuk (*roll bending*) ini sering terjadi kerusakan atau cacat pada pelat baja akibat dari gaya atau regangan. Dengan demikian dilakukan penelitian pengaruh dari proses rol tekuk (*roll bending*) dengan memberikan variasi regangan pada pelat baja St. 37 terhadap sifat mekanik dan struktur mikro.

Dengan latar belakang itu, penulis ingin mengadakan penelitian menganalisa perubahan sifat mekanik dan struktur mikronya setelah mengalami proses rol tekuk (*roll bending*) dengan memberikan variasi regangan 5%, 10%, dan 15%. Sehingga penulis dapat mengetahui sejauh mana perubahan terhadap sifat mekanik dan struktur mikronya pada pelat baja St. 37 setelah mengalami proses rol tekuk (*roll bending*).

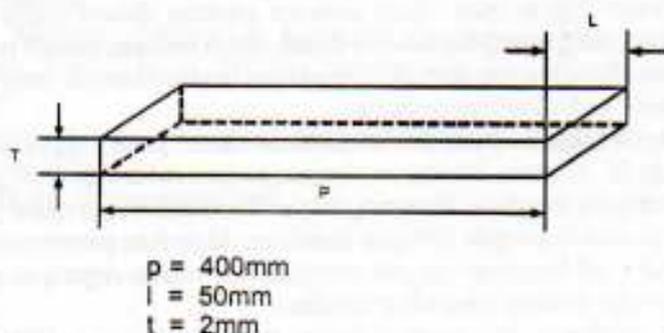
### 2 SKEMA PENELITIAN

Gambar 1 memperlihatkan metodologi penelitian yang dilakukan secara garis besar langkah-langkah yang dilakukan disampaikan dalam bentuk *flowchart*.



Gambar 1. Skema Penelitian

Sampel penelitian merupakan material dari bahan baja St. 37 dalam bentuk pelat dengan dimensi seperti diperlihatkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Bahan awal material baja karbon rendah St. 37

### 3 DATA DAN PEMBAHASAN

Dari serangkaian pengujian dan pemeriksaan serta studi literatur diperoleh data yang dihasilkan, analisa serta pembahasan yang dapat mendukung penelitian yang dilakukan.

### 3.1 Pengujian Komposisi Kimia

Tabel 1. Komposisi kimia spesimen awal

Unsur	Baja AISI 1015	
	Material awal (%)	Standar AISI 1015 (%)
C	0.132	0.13 – 0.18
Si	0.2089	0.103 – 0.3
Mn	0.42	0.3 – 0.6
P	0.0361	0.04 Max
S	0.0206	0.05 Max
Cr	0.059	-
Fe	Sisa	Sisa

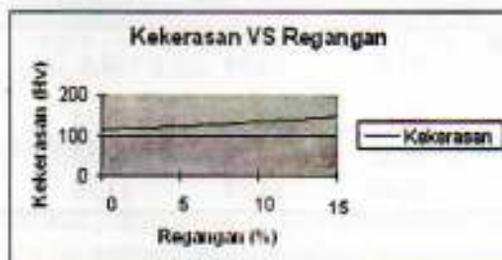
Dari data hasil pemeriksaan komposisi kimia tersebut diketahui bahwa material diatas telah memenuhi spesifikasi material baja karbon AISI 1015 dan setara dengan standar DIN St.37

### 3.2 Pengujian Kekerasan

Tabel 2. Kekerasan material awal AISI 1015

Titik Pengujian	Jarak ( $\mu\text{m}$ )	Kekerasan (HV)
1	10	115
2	30	113
3	50	110
4	70	114
5	90	115
Rata-rata		113.4

Hasil pengujian kekerasan pada material setelah proses *roll bending* dengan variasi regangan yang diberikan yaitu 5 %, 10 % dan 15 % ditunjukkan pada tabel 3 dan gambar 3.



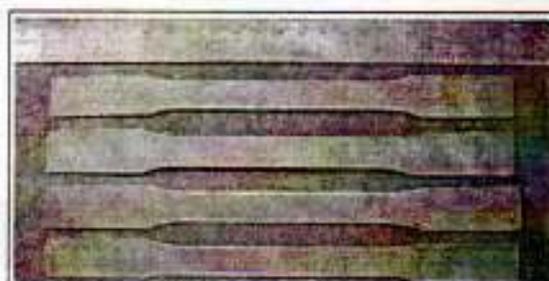
Gambar 3. Kuva kekerasan terhadap regangan

Tabel 3. Kekerasan material proses Roll Bending

Kode Spesimen	Proses Rol Bending	Nilai Kekerasan Vicker's (Hv)					Rata-rata
		1	2	3	4	5	
B	Regangan 5 %	122	121	125	122	123	122,6
C	Regangan 10 %	130	132	136	133	135	133,2
D	Regangan 15 %	142	147	148	147	145	145,8

### 3.3 Pengujian Tarik

Spesimen baja pelat St. 37 untuk proses pengujian tarik berdasarkan standar ASTM E 370

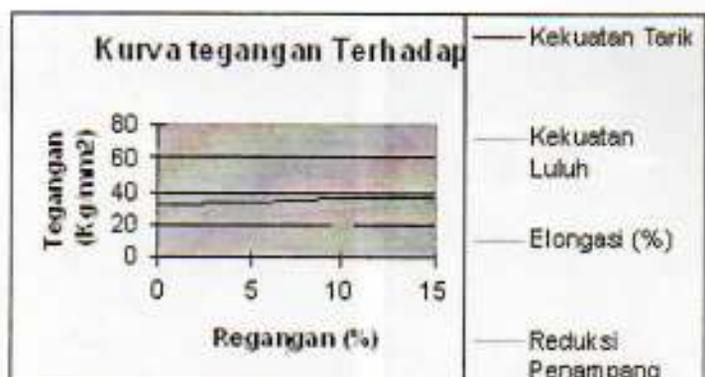


Gambar 4. Spesimen Uji Tarik material pelat Baja St. 37

Data hasil pengujian tarik terhadap material baja pelat St. 37 untuk material awal dan yang telah mengalami proses roll bending dengan variasi regangan 5 %, 10 % dan 15 % ditunjukkan pada tabel 4 dan gambar 5.

Tabel 4. Pengujian Tarik material proses Roll Bending

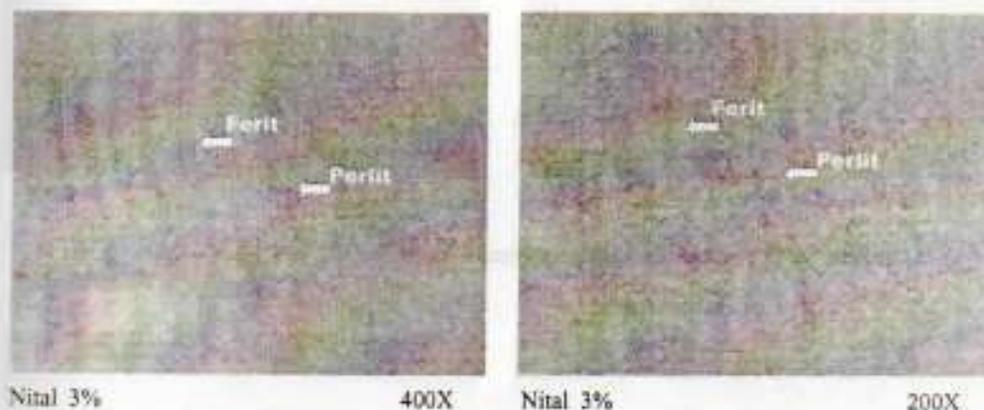
Kode	Proses Rol Bending	Sifat-sifat Mekanik			
		$\sigma_u$ (Kgf/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_y$ (Kgf/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)	Reduksi Penampang (%)
A	Material Awal	31,5	22,84	28,9	63,19
B	5 %	33,31	23,30	23,75	70,71
C	10 %	35,53	28,19	19,38	69,86
D	15 %	36,05	33,57	13,25	67,51



Gambar 5. Kurva tegangan terhadap variasi regangan

### 3.4 Pemeriksaan Struktur Mikro

Hasil pemeriksaan struktur mikro spesimen awal dapat dilihat pada gambar 6. Dari gambar tersebut didapat struktur awal dari baja karbon rendah AISI 1015 yang terdiri dari fasa ferrite ( $\alpha$ ) dan perlite ( $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ ). Komposisi fasa yang terbanyak adalah fasa ferrit ( $\alpha$ ).

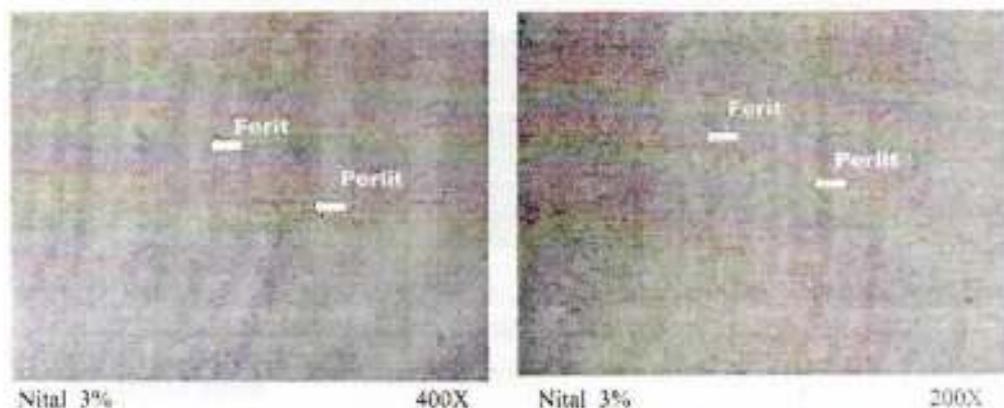


Gambar 6. Struktur Mikro Material Awal terdiri dari Partikel Ferrite dan Perlite

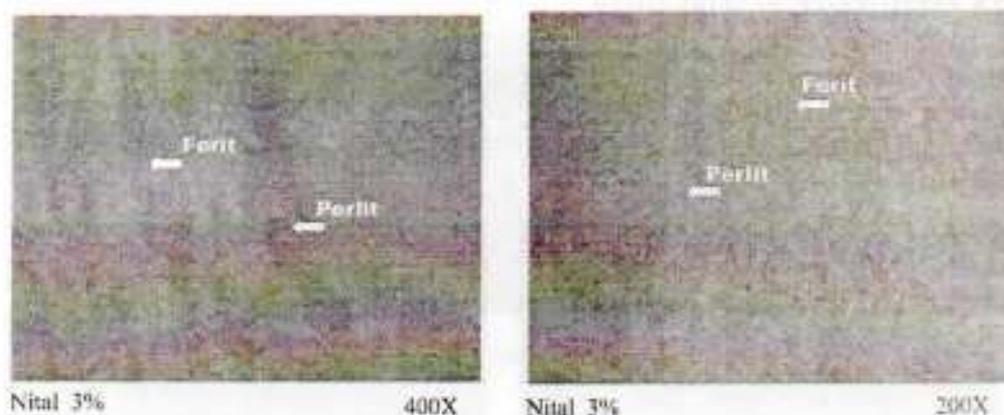
Hasil pemeriksaan struktur mikro pada material baja pelat yang telah mengalami proses roll bending dengan variasi regangan 5%, 10% dan 15% diperlihatkan secara berurutan pada gambar 7, 8 dan 9.

### 3.5 Analisa Gaya, Tegangan dan Regangan

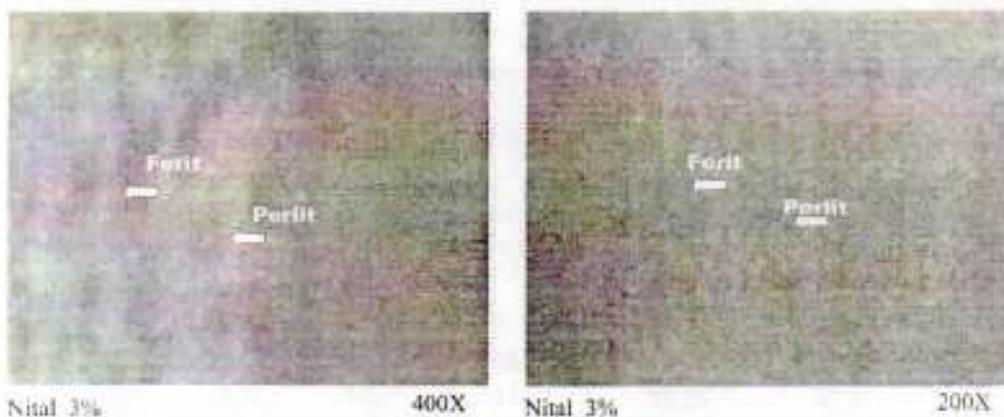
Pada analisa ini dilakukan perhitungan gaya pembentukan pada proses *roll bending* dengan geometri pelat yang secara skematis diperlihatkan pada gambar 10.



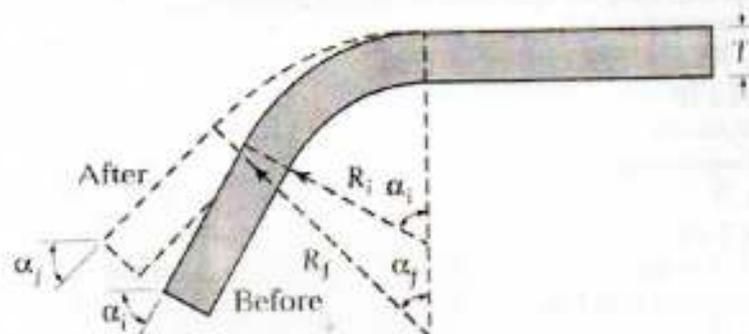
Gambar 7. Struktur Mikro Material Hasil Proses Roll Bending Regangan 5 %



Gambar 8. Struktur Mikro Material Hasil Proses Roll Bending Regangan 10 %



Gambar 9. Struktur Mikro Material Hasil Proses Roll Bending Regangan 15 %



Gambar 10. Skematis pelat baja pada proses Roll Bending

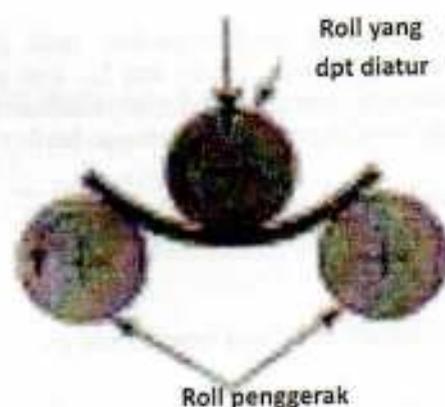
Pada kondisi setiap peregangannya, maka radius bengkokan yang dilakukan adalah sebagai berikut :

$$e = \frac{1}{2R/h+1} \times 100\%$$

$$5\% = \frac{1}{2R/h+1} \times 100\%$$

$$0,05 = \frac{1}{2R/2+1}$$

$$R_5 = 19 \text{ mm}$$



Gambar 11. Proses Roll Bending

Dengan cara yang sama radius bengkokan pada regangan 10%,  $R_{10} = 9 \text{ mm}$  dan regangan 15%,  $R_{15} = 5,7 \text{ mm}$

Panjang pelat baja yang mengalami pembungkakan yaitu:

- a) Pada *elongation* ( $e$ ) 5 %;

$$\begin{aligned} l_5 &= \alpha \cdot R \\ &= \pi/2 \times 19 \\ &= 29,83 \text{ mm} \end{aligned}$$

- b) Pada *elongation* ( $e$ ) 10 %;

$$\begin{aligned} l_{10} &= \alpha \cdot R \\ &= \pi/2 \times 9 \\ &= 14,13 \text{ mm} \end{aligned}$$

- c) Pada *elongation* ( $e$ ) 15 %;

$$\begin{aligned} l_{15} &= \alpha \cdot R \\ &= \pi/2 \times 5,7 \\ &= 8,95 \text{ mm} \end{aligned}$$

Batas mampu bungkakan yang dimiliki pelat baja tersebut adalah:

$$\frac{R_{\min}}{h} = \frac{(1-q)^2}{2q - q^2}$$

dimana;

$q$  = reduksi penampang pelat baja tersebut hasil uji tarik yaitu sebesar 63,19 %.

$$\frac{R_{\min}}{h} = \frac{(1-0,6319)^2}{2(0,6319) - (0,6319)^2}$$

$$\frac{R_{\min}}{2} = 0,16$$

$$R_{\min} = 0,32$$

Sehingga proses *roll bending* yang dilakukan pada pelat baja dengan radius bungkakan masing-masing 19 mm, 9 mm dan 5,7 mm tersebut masih diatas radius bungkakan minimum, sehingga tidak menyebabkan terjadinya retak. Dari hasil pengujian tarik material awal diperoleh data sebagai berikut:

$$S_u = 31,5 \text{ Kg/mm}^2$$

$$S_y = 22,84 \text{ Kg/mm}^2$$

$$e = 28,9 \%$$

$$q = 63,19 \%$$

maka persamaan tegangan alir pelat baja tersebut adalah:

$$\frac{S_u}{S_y} = (n / \text{off} - \text{set})^n \exp(-n)$$

$$\frac{31,5}{22,84} = (n / 0,2\%)^n \exp(-n)$$

$$1,379 = (n/0,02)n \exp(-n)$$

$$n = 0,11$$

$$K = \frac{S_u(1+n)}{n^n}$$

$$K = \frac{31,5(1+0,11)}{0,11^{0,11}}$$

$$K = 44,57 \text{ Kg/mm}^2$$

$$\sigma_0 = K \cdot \epsilon \cdot n$$

$$\sigma_0 = 44,57 \cdot \epsilon \cdot 0,11$$

Gaya pada setiap proses roll bending adalah sebagai berikut :

Pada regangan 5 %

$$\epsilon_5 = h/2r$$

$$= \frac{h}{2(R+h/2)}$$

$$= \frac{2}{2(19+2/2)}$$

$$= 0,05$$

Pada peregangannya 10%,  $\epsilon_{10} = 0,1$  dan pada peregangannya 15%,  $\epsilon_{15} = 0,15$

$$F = A \cdot \sigma_0 \cdot \epsilon$$

$$= w \cdot h \cdot \bar{\sigma}_0 \frac{h}{2(R+h/2)}$$

$$= \frac{\bar{\sigma}_0 \cdot w \cdot h^2}{2(R+h/2)}$$

Dengan faktor koreksi sudut bengkokan, maka :

$$F = \frac{\bar{\sigma}_0 \cdot w \cdot h^2}{2(R+h/2)} \text{tg} \alpha / 2, \text{ dan:}$$

$$\bar{\sigma}_0 = \frac{K \cdot \epsilon^n}{1+n}$$

$$= \frac{44,57 \cdot \epsilon^{0,11}}{1,11}$$

maka:

Pada regangan 5 %,  $F_5 = 144,5 \text{ Kg}$ , regangan 10%,  $F_{10} = 321 \text{ Kg}$  dan regangan 15%,  
 $F_{15} = 486,6 \text{ Kg}$

### 3.6 Hubungan Komposisi Kimia dengan Sifat Mampu Bentuk

Berdasarkan data-data hasil pemeriksaan dan pengujian yang dilakukan pada pelat baja tersebut maka dapat dianalisis karakteristik dan sifat-sifat pelat baja tersebut. Tabel 1 menunjukkan data komposisi kimia yang terkandung pada pelat baja tersebut, maka material tersebut sesuai dengan standar AISI 1015 atau setara dengan DIN St.37 dan termasuk dalam kategori baja karbon rendah. Kandungan karbon 0,132 %. Dalam baja tersebut akan menyebabkan fasa utama yang dimilikinya adalah ferit dengan sedikit fasa perlit yaitu 12,5 %, sehingga baja tersebut relatif lunak dan ulet serta akan memiliki sifat mampu bentuk yang cukup baik.

Unsur lain yang terkandung dalam baja tersebut adalah Mangan (Mn) sebesar 0,42 %, Unsur tersebut berfungsi sebagai pengikat unsur-unsur pengotor pada baja yaitu Sulfur (S) dan akan membentuk Mangan Sulfida (MnS) pada saat peleburannya yang memiliki titik cair relatif lebih tinggi dari Besi Sulfida (FeS) yang akan terbentuk jika tanpa ada penambahan unsur Mangan, sehingga kehadiran mangan tersebut akan mencegah terjadinya cacat rapuh panas (*Hot-shortness*) pada saat proses pengerolan panas dalam pembuatan pelat tersebut dimana temperatur proses yang dilakukan relatif masih dibawah temperatur *melting* dari Mangan Sulfida. Unsur lainnya yang terkandung pada material pelat baja tersebut adalah Silikon (Si) sebesar 0,2086 %, unsur Sulfur (S) sebesar 0,0206 %, unsur-unsur tersebut merupakan unsur yang tidak diharapkan kehadirannya pada pelat baja ini tetapi hadir akibat reaksi dengan lining dapur pada saat peleburan ataupun sebagai unsur bawaan dari bahan baku scrap sebagai muatan. Sifat mampu bentuk (*formability*) dari pelat baja tersebut sangat bergantung pada komposisi kimianya. Hal ini disebabkan oleh karena komposisi kimia akan sangat mempengaruhi sifat-sifat mekanik terutama keuletan dari materialnya berhubungan dengan kemampuan dari bahan tersebut untuk diubah bentuk (deformasi plastis), maka semakin rendah kadar karbon dari baja akan semakin ulet baja tersebut sehingga akan semakin mudah diubah bentuknya.

### 3.7 Pengaruh Deformasi Plastis Terhadap Sifat Mekanik

Proses peregangannya atau perubahan bentuk yang dilakukan pada pelat baja karbon rendah tersebut yaitu sebesar 5 %, 10 %, dan 15 % maka akan menyebabkan peningkatan kekerasan dari baja tersebut (tabel 3 dan gambar 3), Peningkatan deformasi sebesar 5 % akan menyebabkan peningkatan rata-rata kekerasan sebesar diatas 10 Hv. Demikian halnya dengan kekuatan bahan, semakin besar deformasi dilakukan (5 %, 10 % dan 15 %) akan menyebabkan peningkatan kekuatan tarik dan kekuatan luluh dari pelat baja tersebut (tabel 4 dan gambar 5). Rata-rata peningkatan kekuatan tarik dengan meningkatnya deformasi sebesar 5 % adalah 2 Kg/mm<sup>2</sup>, sedangkan rata-rata peningkatan kekuatan luluhnya adalah sebesar 5 Kg/mm<sup>2</sup>.

Dengan demikian dapat dinyatakan bahwa adanya deformasi plastis akan menyebabkan peningkatan kekerasan dan kekuatan dari logam, hal ini merupakan suatu pengaruh baik terhadap logam tersebut sehingga proses deformasi dapat dipergunakan sebagai suatu metoda penguatan atau pengerasan logam. Dilain pihak, deformasi yang terlalu berlebihan akan menyebabkan bahan menjadi getas karena selain meningkatnya kekuatan atau kekerasan bahan, deformasi ini pun akan

menyebabkan penurunan dari keuletan bahan (tabel 4 dan gambar 5) sehingga kemampuan deformasi plastis bahan akan menjadi terbatas. Hal inilah yang akan menyebabkan terjadinya cacat. Pembentukan (retak) jika bahan tersebut dipaksakan di deformasi plastis lagi setelah mengalami deformasi plastis sebelumnya.

Peningkatan kekerasan atau kekuatan dan penurunan keuletan bahan sebagai akibat proses deformasi tersebut, secara teoritis adalah disebabkan oleh adanya fenomena penguatan regangan (*strain hardening*) dimana pada saat deformasi berlangsung akan menyebabkan terjadinya peningkatan kerapatan dislokasi sebagai akibat adanya reaksi antara dislokasi dan multifikasi dislokasi.

### 3.8 Pengaruh Deformasi Plastis Terhadap Struktur Mikro

Proses perangan atau deformasi plastis yang dilakukan pada pelat baja karbon rendah yaitu sebesar 5 %, 10 % dan 15 % tersebut akan menyebabkan perubahan struktur mikro bahan atau dengan istilah lain terjadi fenomena penyeratan mekanis (*mechanical fibbering*). Fenomena tersebut dikarakteristik dengan adanya perubahan dari bentuk butir awalnya yaitu *equiaxial* menjadi bentuk butir yang terdeformasi atau terelongasi (pipih).

Dengan semakin besarnya deformasi akan menyebabkan semakin memipih bentuk butir dalam struktur mikro pelat baja tersebut (gambar 7 sampai dengan 9). Dengan demikian maka dapat dinyatakan bahwa deformasi akan menyebabkan terjadinya penyeratan mekanis dari struktur mikro tanpa adanya transformasi fasa, dimana fasa-fasa yang terkandung dalam struktur mikro pelat baja tersebut adalah fasa perlit dalam matrik ferit.

Struktur dengan butir terdeformasi tersebut akan terdapat sub-sub butir atau jaringan-jaringan deformasi didalam butirnya, hal itu pulalah yang menyebabkan terjadinya peningkatan kekerasan atau kekuatan bahan.

Deformasi yang sangat besar akan menyebabkan butir dengan bentuk sangat pipih (garis-garis deformasi) yang akan menghasilkan sifat mekanik yang cukup besar dan bersifat getas sehingga menyebabkan keterbatasan dilakukannya deformasi plastis lanjutan yang jika dipaksakan akan menimbulkan retak. Hal ini dapat diantisipasi dengan proses pelunakkan kembali logam yang telah dideformasi plastis yaitu dengan cara pemanasan (*intermediate annealing*), dimana pemanasan antara tersebut akan menyebabkan menurunnya kembali kerapatannya dengan pembentukan butir-butir baru menggantikan butir-butir yang pipih sebelumnya.

### 3.9 Analisis Gaya Pembentukan pada Proses Roll Bending

Berdasarkan analisis gaya pembentukan yang dihitung secara ideal tanpa memperhitungkan efek gesekan maupun geseran, maka dapat dinyatakan bahwa peregangannya sebesar 5 %, 10 % dan 15 % atau proses *roll bending* dengan jari-jari bengkokkan 19 mm, 9 mm dan 5,7 mm berhasil dilakukan tanpa menyebabkan

retakan, Hal ini disebabkan oleh karena radius bengkokkan yang dilakukan masih diatas radius bengkokkan minimum ( $R_{min}$ ) yang dimiliki oleh pelat baja tersebut yaitu sebesar 0,32 mm.  $R_{min}$  tersebut merupakan sifat bahan yang tergantung pada keuletan bahan yaitu nilai reduksi penampang hasil uji tarik ( $q$ ) dan tergantung pada ketebalan bahan ( $h$ ).

Proses roll bending dengan regangan sebesar 5 %, 10 % dan 15 % yang dilakukan pada pelat baja karbon rendah setebal 2 mm tersebut akan menyebabkan peningkatan gaya pembentukannya yang diperlukan untuk melakukan perubahan bentuk (deformasi) tersebut. Peningkatan regangan sebesar 5 % dalam proses roll bending tersebut menyebabkan peningkatan gaya pembentukannya sebesar rata-rata 171,1 Kg.

#### 4 KESIMPULAN

1. Hasil analisa pelat baja St. 37 yang dilakukan proses *roll bending* dapat diketahui karakteristik materialnya yaitu :
  - a) Komposisi kimia pelat baja St. 37 merupakan jenis yang setara dengan baja karbon rendah standar AISI 1015.
  - b) Kekerasan awal pelat baja tersebut adalah 113,4 Hv.
  - c) Kekuatan tarik dan kekuatan luluh awal adalah 31,5 Kg/mm<sup>2</sup> dan 22,84 Kg/mm<sup>2</sup>.
  - d) Keuletan awal adalah elongasi ( $e$ ) = 28,9 % dan reduksi penampang ( $q$ ) = 63,19 %
  - e) Struktur mikro pelat baja tersebut adalah terdiri atas fasa perlit dalam matrik ferit.
2. Hasil analisa proses *roll bending* terhadap pelat baja St. 37 tersebut dengan variasi peregangannya sebesar 5 %, 10 % dan 15 % maka dapat diketahui pengaruh peregangannya tersebut terhadap karakteristik materialnya, yaitu :
  - a) Semakin tinggi regangan yang diberikan pada proses *roll bending* terhadap pelat baja karbon rendah tersebut akan menyebabkan peningkatan kekerasan. Setiap peningkatan regangan 5 % terjadi peningkatan kekerasan material rata-rata sebesar 122,6 Hv.
  - b) Semakin tinggi regangan yang diberikan pada proses *roll bending* terhadap pelat baja karbon rendah tersebut akan menyebabkan peningkatan kekuatan. Setiap peningkatan regangan 5 % terjadi peningkatan kekuatan tarik material rata-rata sebesar 33,31 Kg/mm<sup>2</sup> dan rata-rata peningkatan kekuatan luluh sebesar 23,30 Kg/mm<sup>2</sup>.
  - c) Semakin tinggi regangan yang diberikan pada proses *roll bending* terhadap pelat baja karbon rendah tersebut akan menyebabkan peningkatan keuletan. Setiap peningkatan regangan 5 % terjadi peningkatan keuletan (elongasi dan reduksi penampang) material rata-rata sebesar 23,75 % dan 70,71 %.
  - d) Semakin tinggi regangan yang diberikan pada proses *roll bending* terhadap pelat baja karbon rendah tersebut akan menyebabkan perubahan bentuk butir dalam struktur mikro yaitu terbentuknya butir pipih dari yang awalnya berbentuk butir *equaxial*.

## 5 DAFTAR PUSTAKA

1. Robert E. Reed Hill, Reza Abbaschian, "*Physical Metallurgy Principle*". Third Edition PWS-Kent Publishing Company.
2. Vladimir B. Ginzburg, "*Steel-rolling Technology*". International Rolling Mill Consultant, Inc. Pittsburgh, Pennsylvania.
3. Autor C. W. Wegst, "*Stahlschaussel*". Verlag Stahlschaussel Wegst K. G.
4. Anil Kumar Sinha, "*Ferrous Physical Metallurgy*". Butterworths.
5. Robert F. Mehl, "*ASM, Metal Handbook Vol 7. Atlas of Microstructures of Industrial Alloys*". American Society For Metal, 1972.
6. ASM, Metal Handbook Vol 9, "*Metallography Structures and Phase Diagrams*". American Society for Metal, 1973.
7. Vander Voort George F. "*Metallography, Principle and Practice*". McGraw-Hill Book Company, 1984.
8. Dieter, George E. "*Mechanical Metallurgy*". McGraw-Hill Inc. New York, 1986.
9. Abrianto Akuan, Diktat Kuliah "*Teknik Pembentukan Logam*". Teknik Metalurgi UNJANI Bandung, 1996.
10. ASTM, "*Annual Book of ASTM Standard*".



## Analisis Kegagalan Mur *Heavy Hexagonal* pada *Valve Flange* dalam Sistem Jalur Pipa di Industri Minyak dan Gas

Ahmad Gunawan  
Pawawoi

Jurusan Teknik Metalurgi  
Fakultas Teknik- Universitas Jenderal Achmad Yani

**Abstrak.** Pada proses penyambungan sistem jalur pipa di industri minyak dan gas, mur *heavy hexagonal* banyak digunakan. Namun pada penggunaan mur di bagian *valve flange* beberapa mur mengalami patah. Dari hasil penelitian, patah yang terjadi disebabkan adanya retak pada ujung sisi bagian luar dari mur dan bagian dalam permukaan ulir. Pada bagian dalam ini ditemukan cacat yang merupakan awal terjadinya korosi sumur yang kemudian meningkat menjadi korosi retak tegang. Kekerasan pada bagian patah mengalami penurunan dibanding bagian tidak mengalami patah. Sedangkan pada pemeriksaan struktur mikro, awal retakan terjadi pada bagian akar ulir berupa retak intergranular yang selanjutnya merambat pada batas butir. Dari hasil analisa tegangan, terjadi momen lentur sebesar 1943,76 Nmm akibat adanya tegangan sebesar 876,48 Mpa. Gaya lentur yang terjadi disertai adanya lingkungan klor yang korosif merupakan dua komponen utama penyebab terjadinya korosi retak tegang atau *stress corrosion cracking*.

**Kata kunci:** *mur heavy hexagonal, pitting corrosion, stress corrosion cracking, momen lentur dan intergranular*

### 1 PENDAHULUAN

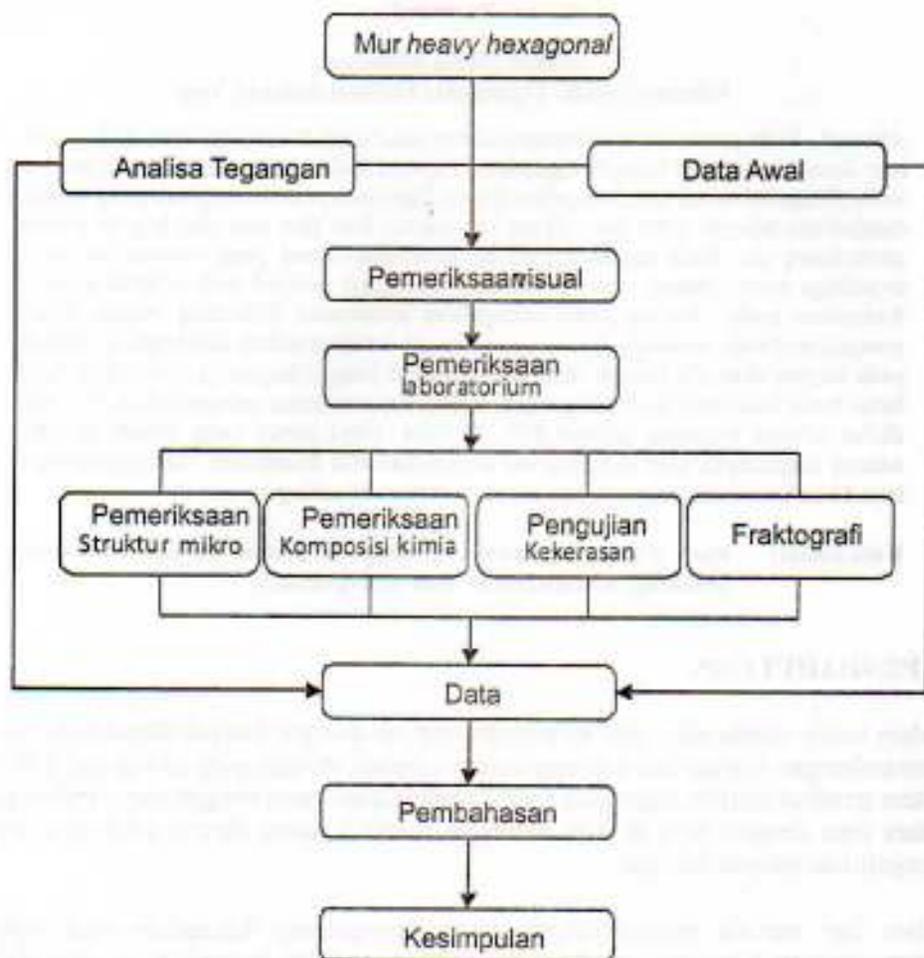
Dalam suatu sistem jalur pipa di industri minyak dan gas banyak digunakan proses penyambungan bagian dari tiap-tiap sistem tersebut, metoda penyambungan dari tiap sistem tersebut banyak digunakan metoda pengelasan yaitu dengan menyambungkan antara pipa dengan pipa lainnya sehingga menjadi suatu sistem jalur pipa untuk mengalirkan minyak atau gas.

Selain dari metoda penyambungan dengan pengelasan digunakan juga metoda penyambungan menggunakan baut dan mur, metoda ini banyak digunakan dalam suatu sistem jalur pipa pada umumnya terdapat pada bagian *flange*. Baut dan mur digunakan juga untuk menyambungkan pipa dengan *valve flange*. Pada *valve flange* terdapat beberapa baut dan mur yang digunakan, beberapa dari mur untuk mengencangkan *valve flange* tersebut mengalami patah.

Dalam penelitian ini dibahas mengenai analisa kegagalan pada mur *heavy hexagonal* sebagai pengikat *valve flange* yang digunakan bersama dengan baut, dimana mur mengalami retak pada saat digunakan disalah satu bagian dari *valve flange*. Mur yang retak mengalami patah dan menyebabkan suatu sistem tidak dapat digunakan karena salah satu komponen yang mendukung tidak berfungsi sebagaimana mestinya. Hal ini yang menjadi dasar pemikiran untuk dilakukannya penelitian mengenai aspek-aspek penyebab retak pada mur tersebut, dan dapat diperoleh solusi untuk menghindari kemungkinan terjadi kembali hal yang serupa.

## 2 SKEMAPENELITIAN

Metodologi penelitian yang dilakukan secara garis besar ditunjukkan pada gambar *flow chart* di bawah ini:



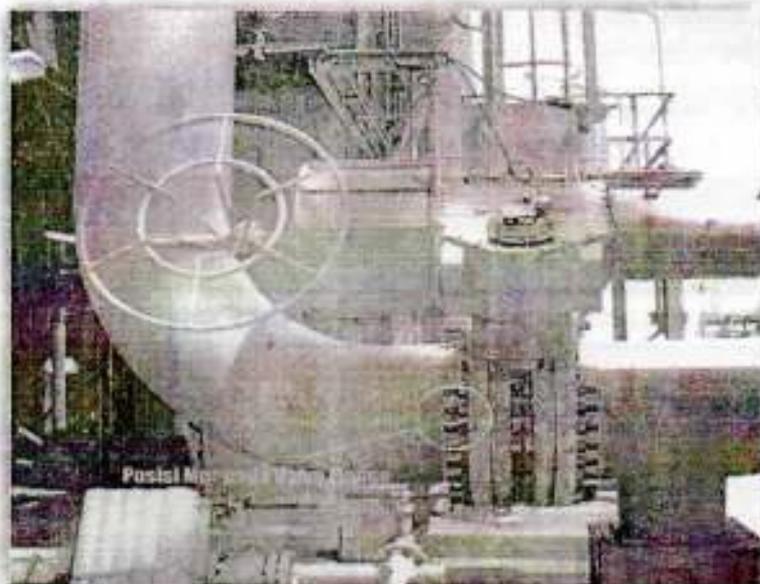
Gambar 1. Metode Penelitian

## 3 DATA DAN PEMBAHASAN

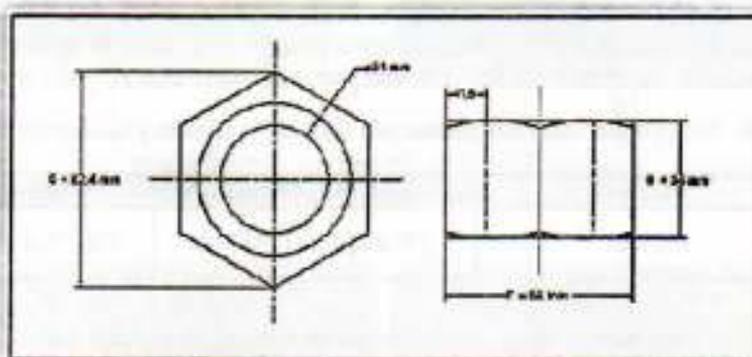
Data diperoleh dari data awal yang meliputi kondisi pemakaian mur, standar dan proses perlakuan kerja yang digunakan dan lingkungan kerja dari mur tersebut. Kemudian dilakukan serangkaian pengamatan, pengujian dan perhitungan tegangan yang digunakan sebagai bahan untuk menganalisa kerusakan mur yang terjadi.

### 3.1 Mur Heavy Hexagonal

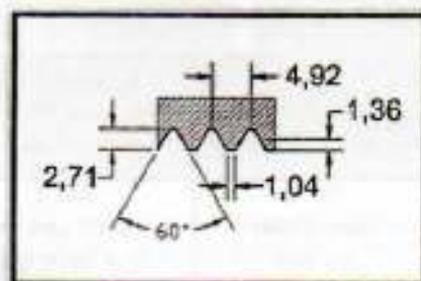
Mur *heavy hexagonal* digunakan pada *valve flange* sebagai pengencang pada sistem jalur pipa di industri MIGAS. Lokasi pemakaian dan gambar teknik dari mur *heavy hexagonal* ditunjukkan pada gambar 2 dan gambar 3.



**Gambar 2.** Posisi tempat pemasangan mur *heavy hexagonal* yang mengalami kegagalan pada *valve flange* dalam sistem jalur pipa di Industri MIGAS



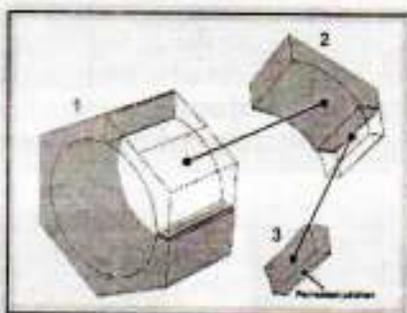
**Gambar 3.** Gambar teknik dimensi dan ukuran mur *heavy hexagonal* (satuan dalam mm).



**Gambar 4.** Gambar teknik dimensi dan ukuran ulir pada mur *heavy hexagonal*

### 3.3 Pemeriksaan Fraktografi

Permukaan patahan dari salah satu bagian dijadikan posisi pengambilan gambar untuk pengamatan fraktografi, dengan gambar untuk tiap bagian diperlihatkan pada gambar 7. Awal dan permukaan retakan ditunjukkan pada gambar 8.



**Gambar 7.** Posisi pengambilan dan pemotongan sampel pemeriksaan fraktografi dan struktur mikro.

- (1) Komponen mur
- (2) Hasil pemotongan komponen mur tersebut
- (3) Pengambilan permukaan patahan



a)



b)

**Gambar 8.** a) Awal retakan dari bagian dalam komponen mur heavy hexagonal dengan adanya cacat pada bagian ulir (tanda panah)  
 b) Arah perambatan retakan dipermukaan patahan dengan awal retakan pada bagian ulir

### 3.4 Pengujian Komposisi Kimia

**Tabel 5.** Komposisi kimia komponen mur *heavy hexagonal* dan standard ASTM A 453 Grade 660.

Unsur	Hasil Spektrometri % Berat	ASTM A 453 Grade 660 <sup>1)</sup> % Berat
Karbon	0,058	0,08 max
Mangan	1,51	2,00 max
Posfor	0,02	0,040 max
Sulfur	0,004	0,030 max
Silikon	0,70	1,00 max
Nikel	26,94	24,00 - 27,00
Krom	15,99	13,50 - 16,00
Molybdenum	1,149	1,00 - 1,50
Titanium	1,697	1,90 - 2,35
Aluminium	0,094	0,35 max
Vanadium	-	0,10 - 0,50
Kobalt	0,499	-
Tembaga	0,115	-
Besi	Sisa	Sisa

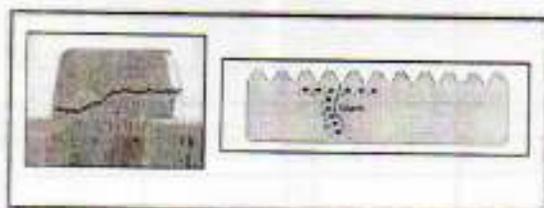
**Tabel 6.** Sifat mekanik<sup>(18)</sup>

Temperature	Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (0,02% offset) (MPa)	Elongation (%)	Reduction of Area (%)
205	1000	524	21,5	52,8
317	965	501	20,8	47,5
370	948	490	22,0	45,0

<sup>1)</sup>data diperoleh dari hasil perhitungan dengan metoda interpolasi

### 3.5 Pengujian Kekerasan

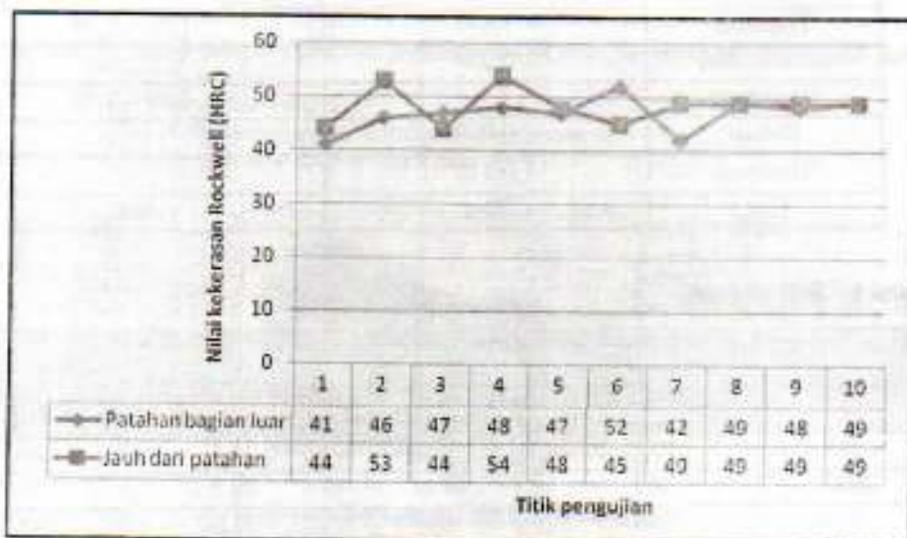
Lokasi pengujian kekerasan ditunjukkan pada gambar 9 sedangkan hasil pengujian kekerasan mur *heavy hexagonal* diperlihatkan pada data tabel 6 dan 7 dengan grafik distribusi kekerasan ditunjukkan pada gambar 10 dan 11.



Gambar 9. Daerah titik uji keras dengan metoda *Rockwell C* dan *Vickers*

Tabel 7. Hasil pengujian kekerasan makro dengan menggunakan metoda Rockwell C

Titik Pengujian	Daerah Pengujian HRC	
	Patahan bagian luar	Jauh dari patahan
1	41	44
2	46	53
3	47	44
4	48	54
5	47	48
6	52	45
7	42	49
8	49	49
9	48	49
10	49	49



Gambar 10. Grafik distribusi nilai kekerasan secara makro dengan metoda Rockwell C

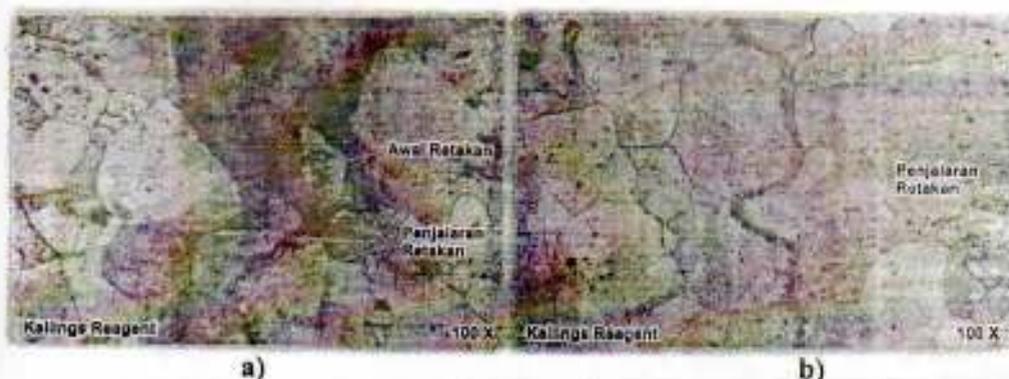
Tabel 8. Hasil pengujian kekerasan mikro dengan menggunakan metoda Vickers

Titik Pengujian	Daerah Pengujian Mikro Vickers	
	Sepanjang retakan	Penampang melintang
1	175	233
2	187	204
3	175	175
4	186	209
5	187	236
6	231	234

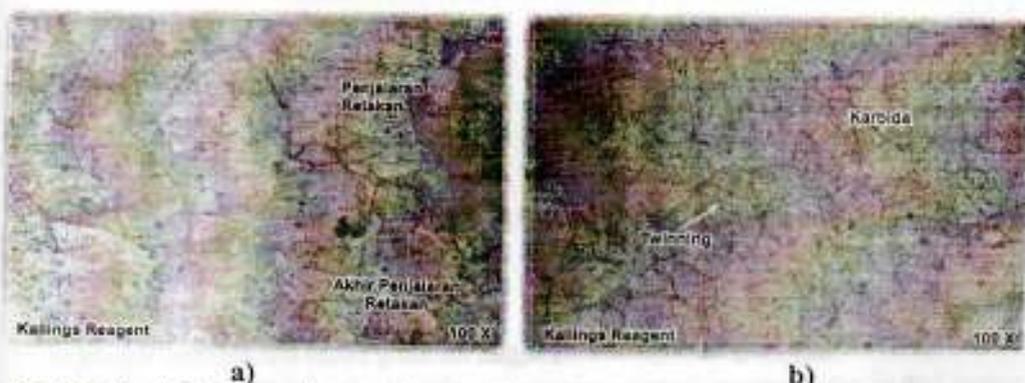


Gambar 11. Grafik distribusi nilai kekerasan secara mikro dengan metoda Vickers

### 3.6 Pemeriksaan Struktur Mikro



Gambar 12. a) Struktur mikro pada daerah awal retakan di kawah ulir, awal retakan akibat dari konsentrasi tegangan pada celah dipermukaan  
b) Struktur mikro pada daerah penjalaran retakan, dengan retakan pada daerah batas butir



Gambar 13. a) Struktur mikro permukaan patahan daerah ujung retakan  
b) Struktur mikro permukaan patahan pada daerah jauh dari retakan, karbida  $M_{23}C_6$  yang terbentuk pada struktur austenit dan terbentuknya *twinning*

### 3.7 Analisa Tegangan

Analisa tegangan dilakukan untuk mengetahui besar tegangan pada material dengan menghitung nilai *fracture toughness* ( $K_{IC}$ ).

Nilai faktor intensitas tegangan kritis  $K_{IC}$ :

$$K_{IC} \cong n (E\sigma_{ys} \epsilon_f)^{1/2}$$

Dimana:

$n$  = Pengerasan regangan

$E$  = Modulus elastisitas

$\sigma_{ys}$  = Kekuatan luluh

$\epsilon_f$  = Regangan patah

Dalam menentukan nilai eksponen pengerasan regangan  $n$  dilakukan metode *trial and error* (coba-coba). Dimana bagian kiri harus sama dengan/ mendekati bagian kanan.

$$\frac{S_{ii}}{S_y} = \left( \frac{n}{\text{offset}} \right)^n \exp(-n)$$

$$\frac{965}{501} = \left( \frac{n}{0,02} \right)^n \exp(-n)$$

$$1,93 = \left( \frac{0,354}{0,02} \right)^{0,354} \exp(-0,354)$$

$$1,93 = 1,93$$

Maka nilai  $n$  yang diperoleh dari hasil coba-coba adalah 0,354

Nilai elongasi ( $E$ ) dari material adalah 20,8%, nilai kekuatan luluh ( $\sigma_{ys}$ ) adalah 501MPa.

Untuk mencari nilai dari  $\epsilon_f$  maka digunakan rumus:

$$\epsilon_f = \ln \frac{1}{1 - q}$$

Diketahui nilai reduksi penampang ( $q$ ) adalah 47,5%

Maka:

$$\epsilon_f = \ln \frac{1}{1 - 47,5}$$

$$\epsilon_f = 3,83$$

Maka nilai  $K_{IC}$  bahan adalah:

$$K_{IC} \cong 0,354 (20,8 \times 501 \times 47,5)^{1/2}$$

$$K_{IC} \cong 219,06 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

Asumsi nilai  $K_{ISCC}$  yang merupakan tegangan ambang batas konsentrasi tegangan untuk korosi retak tegang (*stress corrosion cracking*) adalah 25% dari nilai KIC maka, nilai  $K_{ISCC} = 62,27 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$

Untuk mencari tegangan ambang batas dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$K_{ISCC} = \sigma \sqrt{\pi a}$$

Dimana:

$\sigma$  = Tegangan ambang batas

$a$  = Panjang retakan  $\rightarrow 3,52 \text{ mm} = 0,00352 \text{ m}$

$$\sigma = \sqrt{\frac{K_{ISCC}^2}{\pi a}}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{62,27^2}{3,14 \times 0,00352}}$$

$$\sigma = 593,72 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

Faktor intensitas tegangan  $K_I$ :

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a}$$

$$K_I = 34 \sqrt{(3,14) \times (0,00352)}$$

$$K_I = 3,57 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

$$K_I (3,57 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}) < K_{IC} (249,06 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}})$$

Area tegangan tarik pada ulir  $A_s$

$$A_s = \frac{\pi}{4} (d - 0,9382 \times P)^2$$

$$A_s = 0,785 (31 - 0,9382 \times 1,36)^2$$

$$A_s = 1228,18 \text{ mm}^2$$

Dimana:

$d$  = diameter dalam mur (mm)

$P$  = tinggi ulir (mm)

Tegangan pada ulir  $\sigma_{ulir}$ :

$$\sigma_{ulir} = \frac{W}{\pi d h z}$$

Dimana:

$W$  = tegangan yang diberikan (MPa)

$d$  = diameter dalam mur (m),  $31 \text{ mm} = 0,031$

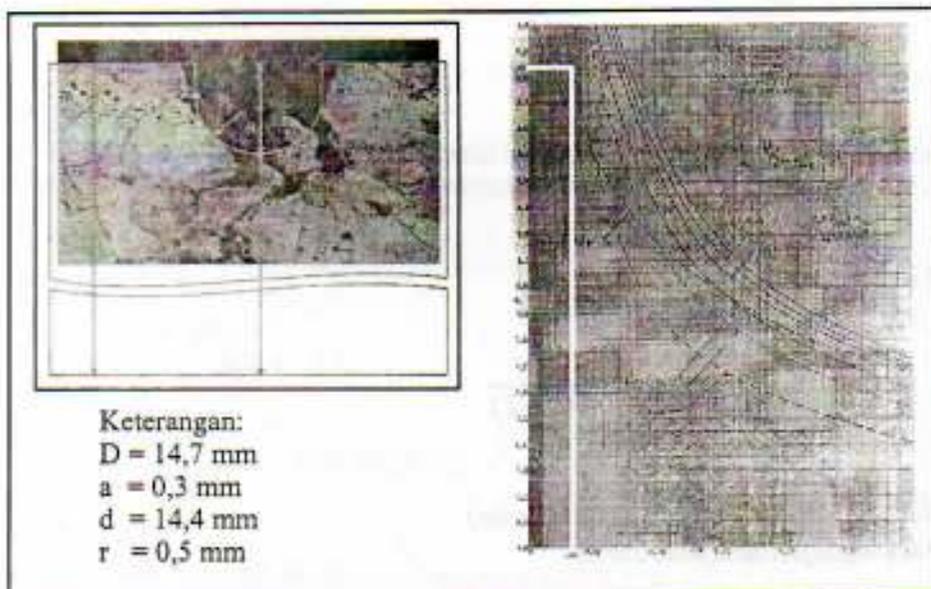
$h$  = tinggi ulir (m),  $1,36 \text{ mm} = 0,00136 \text{ m}$

$z$  = jumlah ulir (per meter) =  $1 \text{ in} = 8 \text{ ulir} \rightarrow 1 \text{ m} = 39,37 \text{ in} = 315 \text{ ulir}$

$$\sigma_{ulir} = \frac{34}{(3,14) \times 0,031 \times 0,00136 \times 315}$$

$$\sigma_{ulir} = \frac{34}{0,042}$$

$$\sigma_{ulir} = 809,52 \text{ MPa}$$



Keterangan:  
 D = 14,7 mm  
 a = 0,3 mm  
 d = 14,4 mm  
 r = 0,5 mm

**Gambar 14.** Geometri awal retak dari korosi sumuran (pitting corrosion) dan faktor konsentrasi tegangan teoritis untuk batang pelat dengan takik bentuk U pada satu sisi akibat beban lentur

Tegangan yang bekerja pada takikan:

$$\sigma_i = \frac{\sigma}{K_t}$$

$$\sigma_i = \frac{809,52}{2,84}$$

$$\sigma_i = 285,04 \text{ MPa}$$

Faktor intensitas tegangan pada komponen dengan takikan, dengan asumsi a = kedalaman takikan,  $0,3 \text{ mm} = 3 \times 10^{-4} \text{ m}$

$$K_t = \sigma_L \sqrt{\pi a}$$

$$K_t = 285,04 \sqrt{3,14 \times (3 \times 10^{-4})}$$

$$K_t = 8,77 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

$$K_t (8,74 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}) < K_{IC} (249,06 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}})$$

$$\sigma = K_t \cdot \sigma_{SCC}$$

$$\sigma = 2,84 \times 593,72$$

$$\sigma = 1686 \text{ MPa}$$

Tegangan yang menyebabkan momen:

$$\sigma_M = \sigma \cdot \sigma_{ult}$$

$$\sigma_M = 1686 \cdot 809,52$$

$$\sigma_M = 876,48 \text{ MPa}$$

Moment lentur pada mur

$$M = \frac{\sigma_M l_x}{y}$$

$$I_x = \frac{1}{12} bh^3$$

Dimana:

b = tebal mur : 11,5 mm

h = tinggi mur : 34 mm

$$I_x = \frac{1}{12} 11,5 \times 34^3$$

$$I_x = 4,98$$

$$y = \frac{1}{2} 34$$

$$y = 17$$

maka:

$$M = \frac{876,5 \times 37,7}{17}$$

$$M = 1943,76 \text{ N}\cdot\text{mm}$$

Gaya lentur pada mur

$$M = F \frac{1}{2} l$$

$$F = \frac{4 \times 1943,76}{42,5}$$

$$F = 182,94 \text{ N}$$

Untuk faktor intensitas tegangan yang bekerja pada komponen, adanya takikan sebesar  $8,74 \text{ Mpa}\sqrt{\text{m}}$  menghasilkan perbandingan faktor intensitas tegangan takikan  $K_t$  lebih kecil dari faktor intensitas tegangan kritis. Komponen mur mengalami momen lentur pada saat pengencangan sebesar  $1943,76 \text{ N.m}$ , akibat adanya tegangan sebesar  $876,48 \text{ MPa}$ . Gaya lentur yang terjadi pada mur sebesar  $182,94 \text{ N}$ .

Berdasarkan standard ANSI atau API 689 dapat dinyatakan bahwa kegagalan yang dialami mur *heavy hexagonal* ini dikategorikan sebagai berikut:

Jenis kerusakan/kegagalan ANSI/API 689 kode 2.2 dan 2.5

2.2 Merupakan kerusakan jenis korosi

o Jenis korosi yang terjadi pada komponen mur *heavy hexagonal* adalah korosi sumuran yang kemudian terjadi korosi retak tegang.

2.5 Terjadi retak dan patah

o Akibat dari terjadinya korosi retak tegang komponen mur *heavy hexagonal* mengalami patah pada salah satu bagian sisinya.

Penyebab kerusakan/kegagalan: ANSI/API 689 kode 2.2

2.2 Akibat dari instalasi dan pemasangan

o Pemasangan komponen mur *heavy hexagonal* pada *valve flange* dengan momen pengencangan cukup besar, sehingga menyebabkan komponen ini mengalami tegangan tarik sekeliling dipermukaannya.

#### 4. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan maka dapat ditarik kesimpulan-kesimpulan, bahwa:

1. Jenis kegagalan pada mur *heavy hexagonal* adalah patah getas, yang diawali pada bagian ulir.
2. Dari hasil pemeriksaan komposisi kimia material yang digunakan mur *heavy hexagonal* adalah *ASTM A453 Grade 660 Class A austenitic stainless steel AISI 660* atau sama dengan jenis *iron based superalloy A286*.
3. Struktur mikro mur *heavy hexagonal* memiliki matrik austenit dengan karbida  $M_{23}C_6$  di daerah matrik dan batas butir.
4. Pengurangan unsur krom pada daerah batas butir akibat krom berikatan dengan karbon membentuk *chrom carbide* menyebabkan pembentukan lapisan pasif *chrom oxide* dipermukaan material berkurang.
5. Retakan yang dialami mur *heavy hexagonal* diawali dengan terjadinya korosi sumuran (*pitting corrosion*) pada ulir bagian dalam mur yang disebabkan adanya unsur klorida dilingkungan kerja mur tersebut.
6. Dengan adanya lingkungan yang korosif dan tegangan tarik yang dialami material menyebabkan terjadinya korosi retak tegang (*stress corrosion cracking*).
7. Proses pengencangan pada mur menyebabkan terjadinya lenturan sehingga terjadi tegangan pada arah sekeliling mur.
8. Menurut standard ANSI/API 689 jenis kegagalan yang terjadi adalah kerusakan karena korosi (kode 2.2 dan 2.5), yang diakibatkan oleh adanya kesalahan dalam instalasi atau pemasangan (kode 2.2).

## 5. DAFTAR PUSTAKA

1. L. Nayyar Mohinder, " *Piping handbook* ", Seventh edition. MacGraw-Hill. 1973. (PART A Piping Fundamental-Bolted Join-A369)
2. Oberg Erick, D Jones Franklin, McCauley Chri, " *Machinery's Handbook* ", 26th Edition. Industrial Press Inc. New York, 2000. (Thread and Threading. Hal. 1727)
3. Perry H Robert, Green W Don. Perrys, " *Chemical Engineers Calculation Handbook* ", The McGraw-Hill Companies, Inc. 1999. (Hal. 124)
4. ASM Metals Handbook, " *Heat Treating* ", 8th Edition. Volume 4
5. ASM Metals Handbook, " *Failure Analysis* ", 8th Edition. Volume 11.
6. ASM Metals Handbook, " *Corrosion* ", 8th Edition. Volume 13.
7. Fontana G Mars, " *Corrosion Engineering* ", McGraw-Hill International Editions. Third Edition. 1986.
8. ASM Metals Handbook, " *Atlas of Microstructure of Industrial Alloys* ". 8th Edition. Volume 7
9. Roberge R Pierre, " *Handbook of Corrosion Engineerin* ",. MacGraw-Hill Companies. 2000
10. Dieter G. E., *Mechanical Metallurgy*, Mc Graw Hill inc, london 1998.
11. D. A. Jones & M. Macmillan, " *Principle and Prevention of Corrosion* ".
12. Vander Voort. George F, " *Metalography, Principles and Practice* ", McGraw - Hill Book Company, 1984
13. I Wayan Suweka, " *Failure Analysis* ", Kuliah Tamu di UNJANI, 2005



## Pengembangan Model Pengolahan air Baku dengan Metoda Elektrokoagulasi

Febrianto Adi Nugroho

Jurusan Teknik Kimia

Fakultas Teknik- Universitas Jenderal Achmad Yani

e-mail : adinugroho2@yahoo.com

**Abstrak** : Besi (Fe) dan mangan (Mn) merupakan komponen yang umum terdapat dalam air kulit bumi, dan sangat mudah terlarut dalam air tanah (ground water). Secara alamiah bentuk yang sangat umum ditemukan dalam air tanah adalah senyawa besi dan mangan bikarbonat. Air yang mengandung besi dan mangan bikarbonat bila berkontak dengan udara akan membentuk presipitat (endapan) dan berada dalam bentuk dispersi koloid, yang menyebabkan warna dan kekeruhan dalam air. Penelitian ini bertujuan untuk membuat model perangkat pengolahan air tanah sehingga memenuhi baku mutu air bersih. Tujuan khusus penelitian ini adalah untuk mengetahui efisiensi proses elektrokoagulasi untuk menurunkan penurunan kekeruhan, Fe dan Mn dalam air tanah. Penelitian dilakukan terhadap sampel yang berasal dari sumber air disekitar Cibeber kota Cimahi yang dialirkan kedalam bak elektrokoagulasi dengan menggunakan elektroda plat aluminium. Dalam penelitian ini, diamati pengaruh variasi waktu tinggal dan jumlah plat elektroda aluminium. Hasil penelitian menunjukkan terjadi peningkatan penurunan konsentrasi Fe dan Mn akibat variasi waktu tinggal dan jumlah plat elektroda. Penurunan konsentrasi Fe dan Mn terbaik dari sumber air I diperoleh pada waktu tinggal 11,266 menit, menggunakan 6 plat elektroda dan rapat arus 0,000996 A/cm<sup>2</sup> dengan penurunan konsentrasi Fe sebesar 78,92 % dan konsentrasi Mn 80,41 %, sedangkan untuk sumber air II hasil terbaik diperoleh pada waktu tinggal 13,289 menit, menggunakan 6 plat elektroda dan rapat arus 0,000712 A/cm<sup>2</sup> dengan penurunan konsentrasi Fe sebesar 86,85 % dan konsentrasi Mn 87,00 %.

**Kata kunci** : air, elektrokoagulasi, presipitat, konsentrasi dan rapat arus

### 1 PENDAHULUAN

Kebutuhan air yang memenuhi persyaratan kesehatan Depkes RI sudah semakin meningkat di berbagai daerah di Indonesia. Daerah-daerah kritis yang belum mendapat pelayanan air melalui PDAM perlu mendapat perhatian sehingga permasalahan dapat diselesaikan dengan cepat. Instalasi pengolahan air bersih yang dapat dipindah-pindahkan merupakan alternatif yang perlu dipertimbangkan untuk pemecahan sementara atau jangka pendek.

Berbagai instalasi seperti ini telah dikembangkan sejak lama tetapi sering mendapat kesulitan dalam pengoperasiannya karena ketergantungan yang cukup tinggi terhadap bahan kimia. Penerapan proses elektrolisa dalam teknologi pengolahan air bersih memberikan harapan untuk mengurangi kesulitan instalasi model terdahulu. Studi literatur mengenai pemanfaatan elektrokoagulasi dan beberapa penelitian lain memungkinkan pengolahan air tanpa menggunakan bahan kimia untuk koagulan terutama untuk instalasi berkapasitas kecil. Kemungkinan pemanfaatan teknologi ini perlu dikaji lebih lanjut untuk mengolah air permukaan ataupun air tanah di Indonesia.

Besi dan mangan merupakan komponen utama yang terdapat dalam kulit bumi, sangat mudah larut dalam air tanah (ground water). Secara alamiah, bentuk yang sangat umum ditemukan dalam air tanah adalah senyawa besi dan mangan bikarbonat. Air mengandung besi ( $Fe^{2+}$ ) bila berkontak dengan udara akan teroksidasi menjadi  $Fe(OH)_3$  yang menyebabkan warna dan kekeruhan dalam air. Pada mulanya air jernih dan tidak berwarna, tetapi bila didiamkan beberapa saat akan timbul warna kuning dan akhirnya membentuk endapan kecoklatan. Bila dalam air juga terdapat  $Mn^{2+}$ , maka  $Mn^{2+}$  juga akan ikut teroksidasi membentuk lapisan film  $MnO_2$ .  $Fe(OH)_3$  dan  $MnO_2$  ini sering terdapat dalam bentuk dispersi koloid yang stabil dalam waktu yang lama. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari efektivitas proses elektrokoagulasi terhadap penurunan konsentrasi Fe dan Mn dalam air tanah. Air yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari air tanah disekitar Cibeber kota Cimahi.

## 2 TINJAUAN PUSTAKA

Air dalam keadaan murni adalah suatu cairan yang tidak mempunyai rasa, tidak berbau dan tidak beracun. Menurut peraturan dari Menteri Negara Kelestarian dan Lingkungan Hidup No:Kep 02/MENKLH/I/1988, pengertian air adalah semua air yang terdapat didalam bumi atau berasal dari sumber air yang terdapat di laut. Sedangkan standar kualitas air didasarkan pada Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia nomor 416/Menkes/Per/IX/1990

### A. Proses Koagulasi dan Flokulasi

Air permukaan umumnya mengandung bermacam zat pengotor koloid yang dapat menimbulkan kekeruhan atau warna pada air. Koloid merupakan suatu suspensi partikel-partikel kecil yang berukuran 1 sampai 100 milimikron. Kekeruhan sering disebabkan oleh partikel lempung koloid yang dihasilkan dari penggerusan tanah. Warna dapat berasal dari koloid besi dan mangan atau senyawa-senyawa organik yang dihasilkan dari dekomposisi tumbuh-tumbuhan.

Partikel-partikel koloid sulit dipisahkan dari cairannya karena partikel-partikel tidak akan mengendap secara gravitasi untuk jangka waktu tertentu dan ukurannya yang sangat kecil dapat lolos melalui saringan media berpori. Agar partikel koloid dapat dipisahkan, koloid-koloid tersebut harus digabungkan sehingga terbentuk partikel dengan ukuran yang lebih besar. Penggabungan partikel koloid bukan merupakan proses yang sederhana, karena selain menyangkut proses yang sangat kecil, juga yang terpenting adalah sifat fisik dan gaya listrik yang menyebabkan partikel koloid berada dalam keadaan stabil.

Proses destabilisasi pada suatu sistem koloid berupa penggabungan dari partikel-partikel koloid akibat pembubuhan bahan kimia disebut sebagai proses koagulasi. Flokulasi adalah proses penggabungan partikel-partikel koloid yang terkoagulasi membentuk flok-flok yang lebih mudah mengendap.

Salah satu faktor yang sangat mempengaruhi proses koagulasi dan flokulasi adalah jenis koagulan. Dimana koagulan adalah substansi (bahan kimia) yang ditambahkan untuk membantu proses koagulasi. Koagulan yang umum digunakan adalah tawas (Alumunium Sulfat), PAC (Poly Alumunium Chlorida), Karbon aktif, dan lain-lain.

Faktor-faktor yang mempengaruhi proses tersebut adalah pH, kekeruhan, komposisi kimia air, jenis koagulan, temperatur, dan kondisi pencampuran.

Pada proses koagulasi kimia, faktor pencampuran dan pembubuhan koagulan, serta kontrol pH merupakan hal yang terpenting agar di dapat efisiensi proses koagulasi yang optimum.

## B. Sel Elektrokoagulasi

Prinsip dasar dari sel elektrokoagulasi mengikuti prinsip yang digunakan dalam sistem sel elektrolisis, dimana anoda merupakan tempat berlangsungnya reaksi oksidasi dan katoda sebagai tempat berlangsungnya reaksi reduksi.

Elektrolit berfungsi sebagai media transportasi ionik. Sekaligus mencegah terjadinya hubungan singkat antara anoda dan katoda. Elektron yang dilepaskan pada reaksi anodik berpindah melalui rangkaian listrik menuju pemasok arus yang dipasang di luar sel. Elektron dari pemasok arus mengalir menuju katoda sehingga pada katoda terjadi reaksi reduksi.

Reaksi elektrolisis merupakan suatu proses kimia heterogen yang mencakup perpindahan muatan dari atau ke sebuah elektroda. Untuk mencegah terjadinya akumulasi muatan positif dan negatif di suatu tempat dalam sel maka jumlah elektron yang digunakan untuk proses reduksi pada katoda dan jumlah elektron yang dilepas untuk proses oksidasi pada anoda harus sama. Keharusan untuk mempertahankan keseimbangan muatan dalam seluruh sistem sel pada dasarnya memiliki konsekuensi penting, antara lain :

1. Agar elektrolisis dapat berlangsung, untuk itu elektron-elektron harus bergerak dari anoda ke katoda melalui sebuah rangkaian listrik luar dan pemasok arus searah.
2. Harus ada mekanisme transportasi muatan listrik antara kedua elektroda di dalam sel.

Proses elektrokoagulasi telah dipelajari dalam skala laboratorium maupun dalam skala pilot (besar). Dalam sel elektrokimia, air baku melalui elektroda aluminium paralel yang dihubungkan ke sebuah battery. Aluminium akan dipisahkan dari anoda dan gas hidrogen terbentuk pada katoda.

Menurut Vik, prinsip dasar dalam proses elektrokoagulasi yaitu :

1. Koagulasi  
Pemisahan Aluminium dari anoda dan pengadukan dalam air diciptakan oleh aliran air dalam baffle channel menghasilkan proses koagulasi yang akan menghilangkan polutan dalam air.
2. Alkalisasi  
Pembentukan gas hidrogen pada katoda yang menyebabkan kenaikan pH dalam air.
3. Flotasi  
Pembentukan gas hidrogen pada katoda yang menyebabkan flotasi dari lumpur yang didapatkan dalam proses.

## C. Proses Elektrodik yang Berlangsung Dalam Sel Elektrokoagulasi

Untuk memahami pengaruh dari berbagai parameter percobaan terhadap performansi

dari sel elektrokoagulasi dan sifat-sifat dari dua reaksi elektrodiknya diperlukan pemahaman mengenai reaksi-reaksi elektrodik utama yang berlangsung di kedua elektroda. Reaksi elektrodik yang terjadi pada elektroda aluminium adalah :

#### Anoda



Proses anodik mengakibatkan terlarutnya logam aluminium menjadi ion  $\text{Al}^{3+}$ . Ion  $\text{Al}^{3+}$  yang terbentuk dalam larutan akan mengalami reduksi hidrolisis, menghasilkan padatan  $\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  yang tidak dapat larut lagi dalam air.



atau :



$\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  yang terbentuk dalam larutan dapat berfungsi sebagai koagulan untuk proses koagulasi-flokulasi yang terjadi pada proses selanjutnya di dalam reaktor elektrokoagulasi. Setelah proses koagulasi-flokulasi ini selesai maka kontaminan-kontaminannya yang berada dalam air buangan dapat terpresipitasi dengan sendirinya.

#### Katoda

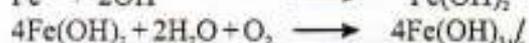


atau :



Pada reaksi katodik akan terbentuk gas hidrogen, sebagai hasil reaksi dari proses reduksi  $\text{H}_2\text{O}$ . Gelembung-gelembung halus gas hidrogen ini cenderung untuk melepaskan diri dari katoda. Gas-gas yang keluar dari dalam larutan ini kemudian mengikat partikel-partikel koloid tersuspensi yang berada di dalam air buangan dan kemudian mengambang ke permukaan larutan bersama-sama sebagai busa. Semakin banyak partikel koloid tersuspensi yang ada dalam larutan maka semakin banyak busa yang terbentuk pada permukaan larutan.

Reaksi katodik yang terjadi pada bahan anorganik seperti besi ( $\text{Fe}^{2+}$ ) dan mangan ( $\text{Mn}^{2+}$ ) yang terdapat dalam air tanah :



Ion  $\text{OH}^{-}$  pada proses reduksi akan bereaksi dengan ion  $\text{Fe}^{2+}$  dan ion  $\text{Mn}^{2+}$ , lalu senyawa yang terbentuk akan teroksidasi menjadi senyawa besi(III)hidroksida, dan senyawa

mangan dihidroksida yang akan mengendap.

### Reaksi Total Sel

Reaksi yang berlangsung selama proses elektrokoagulasi,



Reaksi sel merupakan hasil reaksi dari proses anodik dan katodik yang terjadi secara serentak dengan laju (mol equivalen) yang sama pada masing-masing elektroda.

Hal-hal yang dapat terjadi selama reaksi sel berlangsung adalah :

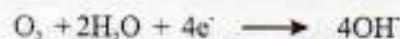
1. Proses anodik mengakibatkan terlarutnya logam aluminium menjadi keadaan tingkat oksidasi 3+.
2.  $\text{Al}^{3+}$  yang terlarut dalam larutan akan mengalami reaksi hidrolisis membentuk padatan  $\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ .
3. Proses anodik akan selalu disertai oleh salah satu atau lebih proses katodik berikut :



atau :



dan :



atau :



4. Hasil reaksi sel yang terjadi sangat bervariasi, dapat berupa bahan-bahan yang terlarut dan ion-ion terlarut seperti  $\text{Al}^{3+}$  dan  $\text{OH}^-$ , atau berupa bahan padatan yang tidak dapat larut seperti  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , serta pembentukan gas  $\text{H}_2$ .
5. Berlangsungnya proses reaksi elektrodik mengakibatkan terjadinya perubahan komposisi elektrolit, terutama kenaikan pH karena adanya pelepasan  $\text{OH}^-$  dan gas  $\text{H}_2$  pada reaksi katodik. Besar atau kecilnya pengaruh-pengaruh tersebut diatas tergantung pada rapat arus katoda dan jumlah  $\text{Al}^{3+}$  yang terhidrolisis.
6. Adanya kenaikan pH karena reaksi katodik pada permukaan katoda akan mengakibatkan logam aluminium terlapisi oleh suatu lapisan hidroksida yang mengendap karena terhidrolisis sehingga tahanan polarisasi bertambah.

### 3 PELAKSANAAN PENELITIAN

Penelitian elektrokoagulasi ini dilakukan dalam skala laboratorium dengan proses kontinyu, yang menggunakan bak elektrokoagulasi dengan kapasitas 30 liter. Air baku dialirkan ke dalam bak yang telah dipasang elektroda-elektroda aluminium secara parallel dan dihubungkan dengan arus listrik searah.

Pada pelaksanaan penelitian, air baku dialirkan ke dalam bak elektrokoagulasi dengan debit air yang besarnya ditetapkan dan dilakukan variasi waktu tinggal serta rapat arus dimana besarnya rapat arus ini tergantung pada arus listrik yang ditetapkan

mangan dihidroksida yang akan mengendap.

### Reaksi Total Sel

Reaksi yang berlangsung selama proses elektrokoagulasi,



Reaksi sel merupakan hasil reaksi dari proses anodik dan katodik yang terjadi secara serentak dengan laju (mol equivalen) yang sama pada masing-masing elektroda.

Hal-hal yang dapat terjadi selama reaksi sel berlangsung adalah :

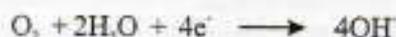
1. Proses anodik mengakibatkan terlarutnya logam aluminium menjadi keadaan tingkat oksidasi 3+.
2.  $\text{Al}^{3+}$  yang terlarut dalam larutan akan mengalami reaksi hidrolisis membentuk padatan  $\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ .
3. Proses anodik akan selalu disertai oleh salah satu atau lebih proses katodik berikut:



atau :



dan :



atau :



4. Hasil reaksi sel yang terjadi sangat bervariasi, dapat berupa bahan-bahan yang terlarut dan ion-ion terlarut seperti  $\text{Al}^{3+}$  dan  $\text{OH}^-$ , atau berupa bahan padatan yang tidak dapat larut seperti  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , serta pembentukan gas  $\text{H}_2$ .
5. Berlangsungnya proses reaksi elektrodik mengakibatkan terjadinya perubahan komposisi elektrolit, terutama kenaikan pH karena adanya pelepasan  $\text{OH}^-$  dan gas  $\text{H}_2$  pada reaksi katodik. Besar atau kecilnya pengaruh-pengaruh tersebut diatas tergantung pada rapat arus katoda dan jumlah  $\text{Al}^{3+}$  yang terhidrolisis.
6. Adanya kenaikan pH karena reaksi katodik pada permukaan katoda akan mengakibatkan logam aluminium terlapisi oleh suatu lapisan hidroksida yang mengendap karena terhidrolisis sehingga tahanan polarisasi bertambah.

### 3 PELAKSANAAN PENELITIAN

Penelitian elektrokoagulasi ini dilakukan dalam skala laboratorium dengan proses kontinyu, yang menggunakan bak elektrokoagulasi dengan kapasitas 30 liter. Air baku dialirkan ke dalam bak yang telah dipasang elektroda-elektroda aluminium secara parallel dan dihubungkan dengan arus listrik searah.

Pada pelaksanaan penelitian, air baku dialirkan ke dalam bak elektrokoagulasi dengan debit air yang besarnya ditetapkan dan dilakukan variasi waktu tinggal serta rapat arus dimana besarnya rapat arus ini tergantung pada arus listrik yang ditetapkan

mangan dihidroksida yang akan mengendap.

### Reaksi Total Sel

Reaksi yang berlangsung selama proses elektrokoagulasi,



Reaksi sel merupakan hasil reaksi dari proses anodik dan katodik yang terjadi secara serentak dengan laju (mol equivalen) yang sama pada masing-masing elektroda.

Hal-hal yang dapat terjadi selama reaksi sel berlangsung adalah :

1. Proses anodik mengakibatkan terlarutnya logam aluminium menjadi keadaan tingkat oksidasi 3+.
2.  $\text{Al}^{3+}$  yang terlarut dalam larutan akan mengalami reaksi hidrolisis membentuk padatan  $\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ .
3. Proses anodik akan selalu disertai oleh salah satu atau lebih proses katodik berikut:



atau :



dan :



atau :



4. Hasil reaksi sel yang terjadi sangat bervariasi, dapat berupa bahan-bahan yang terlarut dan ion-ion terlarut seperti  $\text{Al}^{3+}$  dan  $\text{OH}^-$ , atau berupa bahan padatan yang tidak dapat larut seperti  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , serta pembentukan gas  $\text{H}_2$ .
5. Berlangsungnya proses reaksi elektrodik mengakibatkan terjadinya perubahan komposisi elektrolit, terutama kenaikan pH karena adanya pelepasan  $\text{OH}^-$  dan gas  $\text{H}_2$  pada reaksi katodik. Besar atau kecilnya pengaruh-pengaruh tersebut diatas tergantung pada rapat arus katoda dan jumlah  $\text{Al}^{3+}$  yang terhidrolisis.
6. Adanya kenaikan pH karena reaksi katodik pada permukaan katoda akan mengakibatkan logam aluminium terlapisi oleh suatu lapisan hidroksida yang mengendap karena terhidrolisis sehingga tahanan polarisasi bertambah.

### 3 PELAKSANAAN PENELITIAN

Penelitian elektrokoagulasi ini dilakukan dalam skala laboratorium dengan proses kontinyu, yang menggunakan bak elektrokoagulasi dengan kapasitas 30 liter. Air baku dialirkan ke dalam bak yang telah dipasang elektroda-elektroda aluminium secara parallel dan dihubungkan dengan arus listrik searah.

Pada pelaksanaan penelitian, air baku dialirkan ke dalam bak elektrokoagulasi dengan debit air yang besarnya ditetapkan dan dilakukan variasi waktu tinggal serta rapat arus dimana besarnya rapat arus ini tergantung pada arus listrik yang ditetapkan

pada arus listrik yang ditetapkan besarnya dan luas elektroda yang besarnya divariasikan tergantung pada jumlah plat elektroda yang digunakan dalam proses.

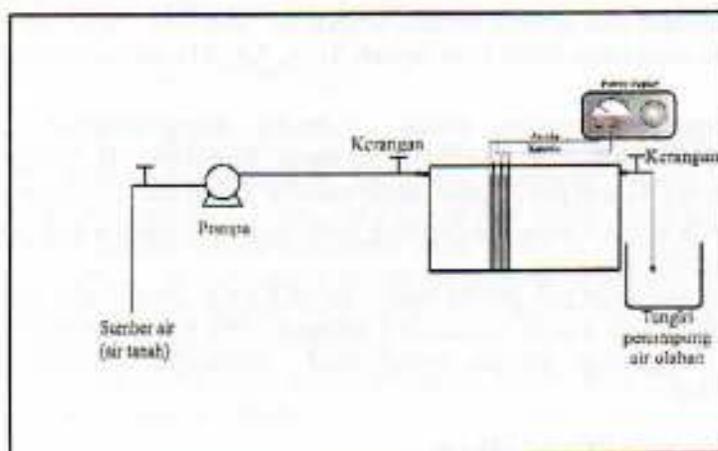
Selama proses percobaan berlangsung, diambil sejumlah sampel untuk selanjutnya dilakukan pengukuran terhadap parameter-parameter :

1. pH,
2. suhu,
3. jumlah Al yang larut
4. konsentrasi Fe
5. konsentrasi Mn

Data-data yang diperoleh dari hasil penelitian diolah dengan menggunakan metoda statistik deskriptif. Metoda statistik deskriptif merupakan metoda guna mengumpulkan, mengolah, menyajikan data kuantitatif secara deskriptif dalam bentuk tabel.

Air yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari air tanah. Untuk mendapatkan kekeruhan dari air ini, maka setelah air dipompakan kedalam bak air baku kemudian dilakukan proses aerasi dengan cara membiarkan air berkontak bebas dengan udara, sehingga terbentuk koloid dari besi dan mangan dalam air. Untuk menjaga agar tidak terjadi pengendapan dari koloid ini, maka dilakukan pengadukan pada air baku tersebut. Pengadukan ini juga akan membantu terjadinya aerasi dengan udara bebas.

Pada percobaan elektrokoagulasi digunakan plat aluminium. Selama pengoperasian dilakukan variasi waktu tinggal dalam bak serta variasi besarnya luas elektroda untuk 4, 5 dan 6 elektroda. Rangkaian percobaan laboratorium disajikan pada diagram dan gambar berikut :



Gambar 1. Rangkaian alat pengolahan air tanah dengan metoda elektrokoagulasi

## 4 DATA DAN PEMBAHASAN

### 4.1. Hasil Penelitian

Penelitian pengolahan air dengan metode elektrokoagulasi dilakukan di dua tempat sumber air di wilayah Cibeber Kota Cimahi (Sumber air I dan Sumber Air II)

**A. Sumber air I**

**A.1 Analisa Air Tanah Sebelum Proses Elektrokoagulasi**

**Tabel 1.** Data Pengolahan air Tanah yang diambil sebelum proses elektrokoagulasi

C Fe (mg/L)	C Mn (mg/L)	Suhu (°C)	pH	Luas plat (dm <sup>2</sup> )		
				4plat	5plat	6plat
1,02	0,883	23,5	7,1	4,665	5,856	7,027

**A.2 Analisa Air Tanah Setelah Proses Elektrokoagulasi**

Pada percobaan ini analisa dilakukan berdasarkan jumlah plat elektroda aluminium yang digunakan, yaitu 4 plat, 5 plat dan 6 plat elektroda Aluminium dan arus listrik yang digunakan 7 ampere.

**A.2.1. Analisa untuk Operasi 4 Plat Elektroda Aluminium**

**Tabel 2.** Data hasil elektrokoagulasi untuk 4 plat elektroda

$I_1$ (A/cm <sup>2</sup> )	T (menit)	Suhu (°C)	pH	C Fe (mg/L)	C Mn (mg/L)
0,001494	T <sub>1</sub> = 6,404	27	7,1	0,441	0,413
	T <sub>2</sub> = 4,983	27	7,1	0,471	0,424
	T <sub>3</sub> = 3,954	27	7,1	0,490	0,431

**A.2.2. Analisa untuk Operasi 5 Plat Elektroda Aluminium**

**Tabel 3.** Data hasil elektrokoagulasi untuk 5 plat elektroda

$I_2$ (A/cm <sup>2</sup> )	T (menit)	Suhu (°C)	pH	C Fe (mg/L)	C Mn (mg/L)
0,001195	T <sub>1</sub> = 8,686	27	7,1	0,366	0,213
	T <sub>2</sub> = 6,759	27	7,1	0,376	0,233
	T <sub>3</sub> = 5,364	27	7,1	0,424	0,239

**A.2.3. Analisa untuk Operasi 6 Plat Elektroda Aluminium**

**Tabel 4.** Data hasil elektrokoagulasi untuk 6 plat elektroda

$I_3$ (A/cm <sup>2</sup> )	T (menit)	Suhu (°C)	pH	C Fe (mg/L)	C Mn (mg/L)
0,000996	T <sub>1</sub> = 11,266	27	7,1	0,226	0,173
	T <sub>2</sub> = 8,766	27	7,1	0,286	0,193
	T <sub>3</sub> = 6,957	27	7,1	0,338	0,198

**B. Sumber Air II****B.1 Analisa Air Tanah Sebelum Proses Elektrokoagulasi****Tabel 5.** Data Pengolahan air Tanah yang diambil sebelum proses elektrokoagulasi I

C Fe (mg/L)	C Mn (mg/L)	Suhu (°C)	pH	Luas plat (dm <sup>2</sup> )		
				4plat	5plat	6plat
1,194	1,385	24	7,1	4,665	5,856	7,027

**B.2. Analisa Air Tanah Setelah Proses Elektrokoagulasi**

Pada percobaan ini analisa dilakukan berdasarkan jumlah plat elektroda aluminium yang digunakan, yaitu 4 plat, 5 plat dan 6 plat elektroda Aluminium dan arus listrik yang digunakan 5 ampere.

**B.2.1 Analisa untuk Operasi 4 Plat Elektroda Aluminium****Tabel 6.** Data hasil elektrokoagulasi untuk 4 plat elektroda

$I_1$ (A/cm <sup>2</sup> )	T (menit)	Suhu (°C)	pH	C Fe (mg/L)	C Mn (mg/L)
0,001057	$t_1 = 7,554$	26,5	7,1	0,528	0,329
	$t_2 = 5,322$	26,5	7,1	0,584	0,346
	$t_3 = 4,145$	26,5	7,1	0,646	0,369

**B.2.3. Analisa untuk Operasi 6 Plat Elektroda Aluminium****Tabel 7.** Data hasil elektrokoagulasi untuk 5 plat elektroda

$I_2$ (A/cm <sup>2</sup> )	T (menit)	Suhu (°C)	pH	C Fe (mg/L)	C Mn (mg/L)
0,000854	$t_1 = 10,247$	26,5	7,1	0,284	0,211
	$t_2 = 7,219$	26,5	7,1	0,335	0,216
	$t_3 = 5,622$	26,5	7,1	0,374	0,223

**B.2.2 Analisa untuk Operasi 5 Plat Elektroda Aluminium****Tabel 8.** Data hasil elektrokoagulasi untuk 6 plat elektroda

$I_3$ (A/cm <sup>2</sup> )	T (menit)	Suhu (°C)	pH	C Fe (mg/L)	C Mn (mg/L)
0,000712	$t_1 = 13,289$	26,5	7,1	0,157	0,180
	$t_2 = 9,362$	26,5	7,1	0,173	0,183
	$t_3 = 7,291$	26,5	7,1	0,202	0,193

#### 4.2 Pembahasan

Dalam hal ini akan dibahas hasil-hasil penelitian yang meliputi hasil percobaan elektrokoagulasi dengan menggunakan variasi banyaknya plat aluminium untuk 4 plat, 5 plat dan 6 plat serta variasi waktu tinggal. Hal ini ditunjukkan untuk mengetahui pengaruh adanya variasi tersebut terhadap efisiensi penurunan konsentrasi Fe dan Mn. Selain itu dibahas pula perubahan fisis yang terjadi yaitu, suhu dan pH selama proses elektrokoagulasi.

##### 4.2.1 Aluminium yang larut

Konsentrasi aluminium (mg/l) dalam proses elektrokoagulasi ini dipengaruhi oleh besarnya arus listrik dan lamanya waktu operasi dalam bak. Jumlah aluminium yang melarut dihitung berdasarkan hukum Faraday yaitu

$$W = \frac{M \cdot i \cdot t}{n \cdot F} \cdot 10^3 \text{ mg} = \frac{i \cdot t \cdot 27 \cdot 10^3}{3.96500} \text{ mg} = i \cdot t \cdot (0,093) \text{ mg}$$

Konsentrasi ion Al (mg/l):  $\frac{W}{t_{op} \cdot Q} = \frac{i \cdot t \cdot (0,093)}{T_{op} \cdot Q}$

Pada percobaan ini, jumlah berat dan konsentrasi aluminium yang melarut diuraikan sebagai berikut:

##### a. Sumber air tanah I

- lama operasi 15 menit = 900 detik
- arus listrik 7 ampere
- berat aluminium yang melarut =  $7 \cdot 900 \cdot 0.093 \text{ mg} = 585.9 \text{ mg}$

**Tabel 9.** Konsentrasi ion Al yang melarut untuk data hasil olahan dengan 6 plat elektroda aluminium (Sumber I)

T (menit)	C Fe (mg/L)	C Mn (mg/L)	C Al (mg/L)
T <sub>1</sub> = 11,266	0,157	0,180	48,249
T <sub>2</sub> = 8,766	0,173	0,183	37,544
T <sub>3</sub> = 6,957	0,202	0,193	29,794

##### b. Sumber air tanah II

- lama operasi 15 menit = 900 detik
- arus listrik 5 ampere
- berat aluminium yang melarut =  $5 \cdot 900 \cdot 0.093 \text{ mg} = 418.5 \text{ mg}$

**Tabel 10.** Konsentrasi ion Al yang melarut untuk data hasil olahan dengan 6 plat elektroda aluminium (Sumber II)

T (menit)	C Fe (mg/L)	C Mn (mg/L)	C Al (mg/L)
T <sub>1</sub> = 13,289	0,157	0,180	40,655
T <sub>2</sub> = 9,362	0,173	0,183	28,641
T <sub>3</sub> = 7,291	0,202	0,193	22,305

Dari hasil penelitian, ternyata konsentrasi ion dalam proses elektrokoagulasi ini tidak terlalu tinggi. Konsentrasi ion Al akan meningkat seiring dengan peningkatan rapat arus.

#### 4.2.1 Konsentrasi Fe dan Mn yang tersisa

Teroksidasinya  $Fe^{2+}$  dan  $Mn^{2+}$  oleh oksigen yang ada di udara menjadi  $Fe^{3+}$  dan  $Mn^{4+}$  yang berbentuk koloid akan menimbulkan kekeruhan pada air tanah. Partikel-partikel koloid tersebut selama proses elektrokoagulasi akan terdestabilisasi membentuk flok-flok yang lebih besar. Terbentuknya gas  $H_2$  di katoda menyebabkan flok yang terbentuk ini mengalami flotasi sehingga terjadi akumulasi flok yang mengandung gas di permukaan air dalam bentuk lapisan sludge. Dengan demikian, pada proses elektrokoagulasi ini kandungan Fe dan Mn dalam air akan mengalami penurunan. Sisa Fe dan Mn yang didapatkan dari air hasil olahan dengan variasi jumlah plat elektroda, dan waktu tinggal dapat dilihat pada tabel di atas.

Berdasarkan hasil penelitian dengan menggunakan sumber air I, kandungan Fe dari air tanah adalah 1.119 mg/l dan Mn 0.883 mg/l. Setelah melalui proses elektrokoagulasi hasil terbaik diperoleh pada variasi dengan menggunakan 6 plat elektroda aluminium, rapat arus (I) 0.000996 A/cm<sup>2</sup> dan waktu tinggal ( $\tau$ ) 11.266 menit dengan kandungan Fe menjadi 0.226 mg/l dan Mn menjadi 0.173 mg/l. Ini berarti terjadi penurunan kandungan Fe sebesar 78.92 % dan Mn sebesar 80.41 %. Sedangkan untuk hasil penelitian dengan menggunakan sumber air II hasil olahan terbaik diperoleh pada variasi dengan menggunakan 6 plat elektroda aluminium, nilai rapat arus (I) 0.000712 A/cm<sup>2</sup> dan waktu tinggal ( $\tau$ ) 13.289 menit dengan penurunan kandungan Fe sebesar 86.85 % dan Mn sebesar 87.00 %.

Sesuai dengan peraturan yang dikeluarkan menteri kesehatan Republik Indonesia nomor 416/Menkes/Per/IX/1990 mengenai standar kualitas air bersih, maka dengan demikian kandungan Fe dan Mn yang tersisa dari air hasil olahan dengan metoda elektrokoagulasi sudah memenuhi syarat kualitas air bersih. Akan tetapi air olahan ini belum memenuhi kualitas air minum dengan standar konsentrasi mangan kurang dari 0.1 mg/l.

#### 4.2.2 Perubahan Variabel Proses Selama Elektrokoagulasi

##### 4.2.2.1 Suhu

Pada percobaan elektrokoagulasi ini digunakan beberapa plat aluminium yang dipasang paralel. Potensial untuk tiap platnya adalah sama, sehingga jumlah total arus yang keluar sama dengan jumlah arus dari tiap unit plat. Hal ini dapat dilihat dari persamaan :

$$i = V = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}$$

Dimana :

i	= arus listrik (Ampere)
V	= potensial listrik (volt)
R	= hambatan (ohm)
n	= jumlah plat

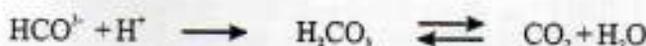
suhu air selama proses elektrokoagulasi akan semakin meningkat dengan arus yang semakin besar. Hal ini karena dengan penggunaan arus yang semakin besar, potensial listrik akan semakin besar. Pemakaian voltage yang semakin besar inilah yang dapat menyebabkan panas. Dalam penelitian ini arus listrik dan potensial listrik merupakan variabel yang ditetapkan sehingga suhu air selama proses elektrokoagulasi akan tetap.

#### 4.2.3.2. pH (derajat keasaman)

Bila  $Al^{3+}$  ditambahkan dalam air akan terjadi reaksi dengan ion hidroksida dari hidrolisa air yang menghasilkan  $Al(OH)_3$  dan ion hidrogen, reaksinya adalah :



Bikarbonat yang terdapat dalam air akan bereaksi dengan ion  $H^+$ , dengan reaksi sebagai berikut :



Terbentuknya  $CO_2$  tersebut akan menurunkan pH karena  $H_2CO_3$  bersifat asam lemah. Semakin besar arus yang digunakan, semakin banyak  $Al^{3+}$  yang larut sehingga ion  $H^+$  yang terbentuk juga semakin banyak.

Air tanah umumnya mengandung bikarbonat yang tinggi, jadi semakin banyak pula reaksi pembentukan  $CO_2$  yang menyebabkan pH turun selama reaksi berlangsung.

Dalam proses elektrokoagulasi ini, terjadi reaksi pembentukan gas hidrogen pada katoda, dengan reaksi :



Selain gas hidrogen, akan dihasilkan juga ion hidroksida ( $OH^-$ ). Semakin besar arus yang digunakan, maka semakin cepat juga reaksi tersebut terjadi dan  $OH^-$  yang dihasilkan juga semakin banyak sehingga akan menaikkan pH dalam air.

Dengan terjadinya reaksi-reaksi tersebut diatas selama proses elektrokoagulasi ini, maka pH air selama proses elektrokoagulasi tidak mengalami penurunan yang tajam bahkan cenderung konstan. Seperti terlihat pada tabel hasil penelitian di atas, dengan pemakaian arus listrik yang tetap yaitu 7 ampere dan 5 ampere maka derajat keasaman air olahan dari setiap variasi yang dilakukan cenderung sama.

#### 4.2.3.3. Mekanisme Destabilisasi Koloid yang Terjadi

Mekanisme destabilisasi koloid dapat terjadi dalam 4 cara yaitu

1. pemampatan lapisan ganda
2. penjaringan dalam presipitat
3. adsorpsi dan netralisasi muatan
4. adsorpsi dan pengikatan antar partikel (jembatan antar partikel)

Pada mekanisme pemampatan lapisan ganda, dibutuhkan dosis koagulan yang tinggi agar terjadi destabilisasi koloid sedangkan mekanisme pengikatan antar partikel dapat

terjadi bila terdapat senyawa polimer dengan berat molekul yang besar dan mempunyai rantai karbon yang panjang. Kedua mekanisme tersebut tidak mungkin terjadi dalam proses elektrokoagulasi karena dosis aluminium yang dibutuhkan dalam proses ini relatif masih rendah dan tidak ada penambahan senyawa polimer, dengan demikian ada 2 kemungkinan mekanisme destabilisasi yang terjadi dalam proses elektrokoagulasi yaitu penjaringan dalam presipitat serta adsorpsi dan netralisasi muatan.

Pada mekanisme penjaringan dalam presipitat terbentuk  $Al(OH)_3$  (s) melalui reaksi berikut:



Konstanta kelarutan ( $K_s$ )  $Al(OH)_3$  adalah  $10^{-31.8}$ , supaya terjadi presipitasi yang cepat rasio  $[Al^{3+}] \cdot [OH^-]^3 / K_s$  harus lebih besar dari 100. (O'Melia, 1972)

Untuk efisiensi penurunan konsentrasi Fe dan Mn lebih dari 75 % mekanisme tersebut, rasio  $[Al^{3+}] \cdot [OH^-]^3 / K_s$  dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

**Tabel 10.** Rasio  $[Al^{3+}] \cdot [OH^-]^3 / K_s$  pada data hasil olahan dengan 6 plat elektroda aluminium

Sumber air	C Fe (mg/L)	C Mn (mg/L)	C Al (mg/l)	pH
Himatek	0,157	0,180	48,249	7,1
	0,173	0,183	37,544	7,1
	0,202	0,193	29,794	7,1
Mipa	0,157	0,180	40,655	7,1
	0,173	0,183	28,641	7,1
	0,202	0,193	22,305	7,1

Sumber air	$[Al^{3+}]$ mol/liter	$[OH^-]$ mol/liter	Rasio $[Al^{3+}] \cdot [OH^-]^3 / K_s$
Himatek	0,001787	$1,503 \times 10^{-7}$	241615288,39
	0,001391	$1,503 \times 10^{-7}$	188010419,38
	0,001103	$1,503 \times 10^{-7}$	149200929,14
Mipa	0,001506	$1,445 \times 10^{-7}$	180864612,23
	0,001061	$1,445 \times 10^{-7}$	127417416,34
	0,000826	$1,445 \times 10^{-7}$	99231350,90

Berdasarkan perhitungan pada tabel diatas, ternyata rasio  $[Al^{3+}] \cdot [OH^-]^3 / K_s$  yang didapatkan lebih besar dari 100, jadi presipitasi akan terjadi dengan cepat.

#### 4.2.3. Perhitungan Biaya Olahan

Taksiran biaya pengolahan ini didasarkan kepada biaya pengoperasian instalasi dalam skala rumah tangga dalam bentuk biaya listrik. Perhitungan biaya ditunjukkan untuk unit elektrokoagulasi saja, dimana tidak termasuk:

- Biaya pemompaan dari sumber air baku ke instalasi,

- Biaya awal dari pembuatan unit elektrokoagulasi,
- Biaya beban dari penggunaan daya pada sambungan listrik rumah,
- Biaya pemeliharaan dari alat listrik.

Untuk mendapatkan hasil penelitian diatas, alat ini dioperasikan sebagai berikut :

- Jarak antar plat 2 cm
- Waktu operasi 15 menit
- Arus listrik yang dikeluarkan 7 ampere (Sumber air I) dan 5 ampere (Sumber air II)
- Potensial listrik yang dikeluarkan 18 volt (Sumber air I) dan 20 volt (Sumber air II)
- Jumlah plat aluminium yzitu 4, 5 dan 6 plat
- Volume air dari sumber air himatek dengan jumlah plat 6 buah adalah 12,15 liter dengan debit air 0,810 liter/menit atau 48,6 liter/jam dan volume air dari dari sumber air Mipa adalah 10,29 liter dengan debit air 0,686 liter/menit atau 41,16 liter/jam.
- Biaya listrik per kwh rp. 350,00

Daya listrik yang dibutuhkan dalam percobaan ini ditentukan oleh besarnya arus listrik dan potensial listrik. Besarnya daya listrik dalam satuan kwh (kilo watt hour) adalah :

$$P = V.i.top / 1000$$

Untuk waktu operasi 15 menit (0,25 jam), besarnya daya listrik yang digunakan adalah :

- Sumber air I  

$$P = 7 A * 18 \text{ volt} * 0,25 \text{ jam} / 1000$$

$$= 0,0315 \text{ kwh}$$
- Sumber air II  

$$P = 5 A * 20 \text{ volt} * 0,25 \text{ jam} / 1000$$

$$= 0,025 \text{ kwh}$$

Biaya pemakaian listrik adalah besarnya penggunaan daya listrik dikalikan dengan harga pemakaian listrik per kwh. Jadi biaya pemakaian daya listrik adalah :

- Sumber air I  

$$\text{Biaya} = 0,0315 \text{ kwh} * 350,00 \text{ rp/kwh}$$

$$= \text{Rp. } 11,025 / 15 \text{ menit}$$

$$= \text{Rp. } 44,1 / \text{jam}$$

Dengan banyaknya air yang dihasilkan 48,6 liter/jam sehingga diperlukan biaya operasi sebesar Rp. 905,35 /m<sup>3</sup>

- Sumber air II  

$$\text{Biaya} = 0,025 \text{ kwh} * 350,00 \text{ rp/kwh}$$

$$= \text{Rp. } 8,75 / 15 \text{ menit}$$

$$= \text{Rp. } 35,00 / \text{jam}$$

Dengan banyaknya air yang dihasilkan 41,16 liter/jam sehingga diperlukan biaya operasi sebesar Rp. 850,34 /m<sup>3</sup>

Perhitungan biaya operasi diatas menunjukkan bahwa elektrokoagulasi masih merupakan alternatif yang mahal. Namun alternatif ini masih dapat dimanfaatkan untuk daerah-daerah terpencil yang sulit memperoleh koagulan tetapi telah terjangkau oleh aliran listrik.

## V. KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian dan pembahasan, dapat disimpulkan bahwa:

1. Proses elektrokoagulasi dengan menggunakan plat aluminium ini dapat dipakai sebagai salah satu alternatif untuk meningkatkan kualitas air tanah karena dapat menurunkan kandungan Fe dan Mn.
2. Hasil analisis menunjukkan bahwa untuk air olahan dari sumber air I hasil terbaik diperoleh dengan penurunan kandungan Fe mencapai 78.92 % dan Mn sebesar 80.41 %. Sedangkan untuk air olahan dari Sumber air II penurunan kandungan Fe mencapai 86.85 % dan Mn sebesar 87.00 %.
3. Biaya operasi untuk menghasilkan 1 m<sup>3</sup> air olahan menggunakan sumber air I sebesar Rp. 905,35 /m<sup>3</sup> sedangkan untuk sumber air II diperlukan biaya operasi sebesar Rp.850,34 /m<sup>3</sup>.

### 5.2 Saran

1. Salah satu kerugian dari proses elektrokoagulasi ini adalah terbentuknya lapisan pada permukaan katoda karena terjadinya proses adsorpsi materi-materi yang terdapat dalam air. Untuk mengurangi kecepatan penebalan lapisan tersebut, sebaiknya dilakukan pencucian pada setiap kali selesai dioperasikan untuk menghilangkan materi-materi-materi teradsorpsi pada permukaan katoda.
2. Dalam pemilihan plat perlu diperhatikan kemungkinan adanya kandungan logam berat yang dapat merugikan kualitas air olahan.
3. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut terutama mengenai karakteristik flok yang terbentuk, karakteristik buih dan usaha-usaha untuk meningkatkan efisiensi dengan mengembangkan proses lebih lanjut.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Achmad, Hiskia Drs., "Kimia Larutan", Penerbit PT Citra Aditia bakti, Bandung, 1996.
2. American Water Works Association, "Water Quality and Treatment", 3rd edition, Mc Graw Hill Book Company, New York, 1971.
3. Bard, J.A and L.R. Faulkner, "Electrochemical Methods Fundamental and Application", John Willey and Sons, New York, 1980.
4. Benefield, L.D., Joseph, F. Judkins and Barron L. Weand, "Process chemistry for Water and Waste Water Treatment", Prentice Hall, Inc., New Jersey, 1982.
5. Degremont, "Water Treatment Handbook", Hal Sfed Press, New York, 1979.
6. Fair, G. M., J.C., and Okun, D. A., "Water and Wastewater Engineering", Volume-2, John Wiley and Sons Inc., New York, 1978.
7. Hammer, Mark J., "Water and Wastewater Technology", John Wiley and Sons Inc., New York, 1977.
8. Herbert E. Hudson, Jr., "Water Clarification Processes Practical Design and Evaluation", Van Nostrand Reinhold, 1981.
9. Nalco Water Handbook, "Coagulation and flocculation", Mc Graw Hill, 1980.
10. Reynolds, Tom D., "Unit Operation and Processes in Environment Engineering", Wadsworth Inc., USA., 1982.

## V. KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian dan pembahasan, dapat disimpulkan bahwa:

1. Proses elektrokoagulasi dengan menggunakan plat aluminium ini dapat dipakai sebagai salah satu alternatif untuk meningkatkan kualitas air tanah karena dapat menurunkan kandungan Fe dan Mn.
2. Hasil analisis menunjukkan bahwa untuk air olahan dari sumber air I hasil terbaik diperoleh dengan penurunan kandungan Fe mencapai 78.92 % dan Mn sebesar 80.41 %. Sedangkan untuk air olahan dari Sumber air II penurunan kandungan Fe mencapai 86.85 % dan Mn sebesar 87.00 %.
3. Biaya operasi untuk menghasilkan 1 m<sup>3</sup> air olahan menggunakan sumber air I sebesar Rp. 905,35 /m<sup>3</sup> sedangkan untuk sumber air II diperlukan biaya operasi sebesar Rp.850,34 /m<sup>3</sup>.

### 5.2 Saran

1. Salah satu kerugian dari proses elektrokoagulasi ini adalah terbentuknya lapisan pada permukaan katoda karena terjadinya proses adsorpsi materi-materi yang terdapat dalam air. Untuk mengurangi kecepatan penebalan lapisan tersebut, sebaiknya dilakukan pencucian pada setiap kali selesai dioperasikan untuk menghilangkan materi-materi-materi teradsorpsi pada permukaan katoda.
2. Dalam pemilihan plat perlu diperhatikan kemungkinan adanya kandungan logam berat yang dapat merugikan kualitas air olahan.
3. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut terutama mengenai karakteristik flok yang terbentuk, karakteristik buih dan usaha-usaha untuk meningkatkan efisiensi dengan mengembangkan proses lebih lanjut.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Achmad, Hiskia Drs., "Kimia Larutan", Penerbit PT Citra Aditia bakti, Bandung, 1996.
2. American Water Works Association, "Water Quality and Treatment", 3rd edition, Mc Graw Hill Book Company, New York, 1971.
3. Bard, J.A and L.R. Faulkner, "Electrochemical Methods Fundamental and Application", John Willey and Sons, New York, 1980.
4. Benefield, L.D., Joseph, F. Judkins and Barron L. Weand, "Process chemistry for Water and Waste Water Treatment", Prentice Hall, Inc., New Jersey, 1982.
5. Degremont, "Water Treatment Handbook", Hal Sfed Press, New York, 1979.
6. Fair, G. M., J.C., and Okun, D. A., "Water and Wastewater Engineering", Volume-2, John Wiley and Sons Inc., New York, 1978.
7. Hammer, Mark J., "Water and Wastewater Technology", John Wiley and Sons Inc., New York, 1977.
8. Herbert E. Hudson, Jr., "Water Clarification Processes Practical Design and Evaluation", Van Nostrand Reinhold, 1981.
9. Nalco Water Handbook, "Coagulation and flocculation", Mc Graw Hill, 1980.
10. Reynolds, Tom D., "Unit Operation and Processes in Environment Engineering", Wadsworth Inc., USA., 1982.

11. Rich, L. G, "Unit Operation of Sanitary Engineering", John Wiley an Sons, Inc., 1961.
12. Sanks, Robert L, "Water Treatment Plant Design", Ann Arbor Science, Michigan, 1982.
13. Sawyer and Mc Carty , "Chemistry for Environmental Engineering " , 3rd edition , Mc Graw Hill Book Company ,New York, 1978.
14. Vik , E. A., "Small Water Treatment Plants Using Electrocoagulation " , 4th . Asia Pasific Regional Water Supply Conference and Exhibition, Jakarta – Indonesia , 5-11 November 1983.
15. Walter J, Weber Jr., "Physicochemical Processes for Water Qualy Control" John Wilwy and Sons, Inc., New York, 1972.

## JURNAL TEKNIK PETUNJUK UNTUK PENULIS

**Umum.** Jurnal Teknik menerima artikel yang orisinal dari berbagai penelitian yang berhubungan dengan ilmu teknik metalurg dan material, teknik kimia, teknik mesin, teknik industri, teknik sipil, teknik elektro dan teknologi informasi.

Artikel yang diterima hanya yang belum dipublikasikan. Penggunaan ilustrasi atau table yang telah dipublikasikan, merupakan tanggung jawab penulis untuk perizinan dari penerbit.

Artikel dapat dikirimkan kepada redaksi:

**Drs. Danang K.  
Fakultas Teknik Bandung  
Jl. Gatot Subroto (Samping PT. PINDAD)  
Bandung 40280**

**Tiga eksemplar artikel** tercetak dikirim ke redaksi Jurnal teknik yang diketik pada satu sisi halaman kertas A<sub>4</sub> (21,0 cm x 29,7 cm).

**Format** penulisan artikel mengikuti aturan sebagai berikut:

Batas kiri = 4 cm, batas atas = 4 cm, dengan batas tinggi pengetikan 19 cm dan batas lebar pengetikan 12,5 cm.

Ukuran huruf untuk judul 14 pt (tebal), ukuran huruf penulis 10 pt (tebal) ukuran huruf untuk alamat institusi 10 pt.

Ukuran huruf untuk abstrak dan kata kunci 10 pt, ukuran huruf untuk sub dan isi/teks 11 pt

Tipe huruf dari Microsoft word = Times New Roman

Judul dan penulis diketik dengan bentuk sebagai berikut:

### **Analisa Kerusakan pada Turbin *Bucket* yang terbuat dari Material *Nickel Based Alloy MAR-M-246***

**Leni Juwita<sup>1</sup> & Mabe Siahaan<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Metalurgi  
Fakultas Teknik – Universitas Jenderal Achmad Yani  
<sup>2</sup>LAPAN - Bandung

Panjang maksimum artikel 20 halaman termasuk gambar dan table. Gambar dibuat dalam warna hitam putih dengan kualitas yang bagus.

**Abstrak** dari tulisan dibuat dalam bentuk bahasa Indonesia. Panjang maksimum dari abstrak adalah 200 kata. Kata kunci (5 – 10 kata) yang mengikuti abstrak ditulis berdasarkan urutan huruf

**Daftar Pustaka** di tulis dalam artikel mengikuti contoh dibawah ini:

*Jurnal*

1. Irawan N.M., *Judul tulisan*, Nama Jurnal 2, 10-24(1996)

*Buku*

2. Irawan, N. M., & Hendra T., *Judul buku*, ed. 3, Penerbit (2000)

*Website*

3. Nama penulis (jika ada), *Judul tulisan* (jika ada), Organisasi, alamat website, (2 Juni 1999)

Penulis yang artikelnya dimuat mendapat 2 cetak lepas, 1 eksemplar Jurnal Teknik



**DAFTAR ISI**

- Dissipative Approach in Analisis and Synthesis of Control System  
via Linier Matrix Inequalities**  
Asep Najmurrokhman 62 - 71
- Evaluasi Perbandingan Kinerja Bangunan Momen Frame dengan  
Eccentrically Brace Frame**  
Sumargo, Rheza Andhy K., Hermansa 72 - 89
- Analisis Struktur Mikro dan Sifat Mekanik Baja Mangan Austenitik  
Hasil Proses Perlakuan Panas**  
Abrianto A. 90 - 99
- Pengaruh Variasi Proses Peregangan Terhadap Sifat Mekanik dan  
Struktur Mikro Baja St. 37 pada Proses Roll Bending**  
Adi Ganda Putra 100 - 112
- Analisis Kegagalan Mur Heavy Hexagonal pada Valve Flange dalam  
Sistem Jalur Pipa di Industri Minyak dan Gas**  
Ahmad Gunawan, Pawawoi 113 - 129
- Pengembangan Model Pengolahan Air Baku dengan Metoda  
Elektrokoagulasi**  
Febrianto Adi Nugroha 130 - 144