



JURNAL TEKNIK SIPIL

**Predicting The Shear Strength of Reinforced Concrete Beams
Using Support Vector Machine**
(*Cindrawaty Lesmana*)

Peta Zonasi Tsunami Indonesia
(*Theodore F. Najoan, Ari Budiman*)

**Simulasi Numerik Berbasis Komputer Sebagai Solusi Pencegah
Bahaya Akibat Kegagalan Bangunan**
(*Wiryanto Dewobroto*)

**Mechanical Properties of Concrete With Various Water-Cement Ratio
After High Temperature Exposure**
(*M.I.R. Susilorini, B.E. Afrianto, A.S. Wibowo*)

**Mempelajari Tegangan pada Balok dengan bantuan Software
Berbasis Perhitungan Matematis dan Visualisasi 3 Dimensi**
(*Anang Kristianto, Yosafat Aji Pranata*)

**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS KRISTEN MARANATHA**

J. Tek.Sipil	Vol. 2	No. 2	Hlm. 74—147	Bandung, Oktober 2006	ISSN 1411-9331
--------------	--------	-------	-------------	-----------------------------	-------------------



JURNAL TEKNIK SIPIL

Jurnal Teknik Sipil adalah jurnal ilmiah jurusan teknik sipil Universitas Kristen Maranatha yang diterbitkan 2 kali setahun pada bulan April dan Oktober. Pertama kali terbit bulan Oktober 2003. Tujuan penerbitan adalah sebagai wadah komunikasi ilmiah dan juga penyebarluasan hasil penelitian, studi literatur dalam bidang teknik sipil atau ilmu terkait. Bila pernah dipresentasikan pada seminar agar diberi keterangan lengkap.

Pelindung	: Rektor Universitas Kristen Maranatha
Penanggung Jawab	: Dekan Fakultas Teknik Universitas Kristen Maranatha
Pemimpin Redaksi	: Yosafat Aji Pranata, ST., MT.
Ketua Dewan Penyunting	: Ir. Maksum Tanubrata, MT.
Penyunting Pelaksana	: Anang Kristianto, ST., MT. Andrias Suhendra Nugraha, ST., MT. Ir. Budi Hartanto Susilo, M.Sc. Ir. Herianto Wibowo, M.Sc. Robby Yussac Tallar, ST., MT.
Mitra Bestari	: Prof. Ir. Bambang I.S., M.Sc., Ph.D. (Institut Teknologi Bandung) Prof. Bambang Suryoatmono, Ph.D. (UNPAR) Ir. Yoyong Arfiadi, M.Eng., Ph.D. (Universitas Atma Jaya Yogyakarta) Dr. Ir. Agung Bagiawan, M.Eng (PUSAIR, Bandung) Olga Pattipawaej, Ph.D. (Universitas Kristen Maranatha)
Desain Visual dan Editor	: Aldrin Boy
Sekretariat dan Sirkulasi	: Dra. Dorliana, Kristianto
Alamat Redaksi	: Sekretariat Jurnal Teknik Sipil Jurusan Teknik Sipil, Universitas Kristen Maranatha Jl. Prof. drg. Suria Sumantri MPH. No. 65 Bandung 40164 Tel. 022 - 2012186 ext. 219, 212 Fax. 022 - 2017622
Email	: jurnal_ts@eng.maranatha.edu, atau jurnaltsukm@gmail.com



JURNAL TEKNIK SIPIL

DAFTAR ISI :

**Predicting of the Shear Strength of Reinforced Concrete Beams
Using Support Vector Machine**

(*Cindrawaty Lesmana*)

74 – 95

Peta Zonasi Tsunami Indonesia

(*Theodore F. Najoan, Ari Budiman*)

96 – 107

**Simulasi Numerik Berbasis Komputer Sebagai Solusi
Pencegah Bahaya Akibat Kegagalan Bangunan**

(*Wiryanto Dewobroto*)

108 – 125

**Mechanical Properties of Concrete With Various Water-Cement Ratio
After High Temperature Exposure**

(*M.I.R. Susilorini, B.E. Afrianto, A.S. Wibowo*)

126 – 136

**Mempelajari Tegangan pada Balok dengan bantuan *Software*
Berbasis Perhitungan Matematis dan Visualisasi 3 Dimensi**

(*Anang Kristianto, Yosafat Aji Pranata*)

137 – 146

PREDICTING THE SHEAR STRENGTH OF REINFORCED CONCRETE BEAMS USING SUPPORT VECTOR MACHINE

Cindrawaty Lesmana^[1]

ABSTRACT

A wide range of machine learning techniques have been successfully applied to model different civil engineering systems. The application of support vector machine (SVM) to predict the ultimate shear strengths of reinforced concrete (RC) beams with transverse reinforcements is investigated in this paper. An SVM model is built trained and tested using the available test data of 175 RC beams collected from the technical literature. The data used in the SVM model are arranged in a format of nine input parameters that cover the cylinder concrete compressive strength, yield strength of the longitudinal and transverse reinforcing bars, the shear-span-to-effective-depth ratio, the span-to-effective-depth ratio, beam's cross-sectional dimensions, and the longitudinal and transverse reinforcement ratios. The relative performance of the SVMs shear strength predicted results were also compared to ACI building code and artificial neural network (ANNs) on the same data sets. Furthermore, the SVM shows good performance and it is proved to be competitive with ANN model and empirical solution from ACI-05.

Keywords : Support vector machine, Shear strength, Reinforced concrete.

ABSTRAK

Secara global teknik *machine learning* telah sukses diterapkan dalam berbagai model dari teknik sipil. Dalam makalah ini dibahas mengenai aplikasi dari *support vector machine* (SVM) untuk memprediksi gaya geser batas pada balok beton bertulang dengan tulangan geser. Model SVM dibuat untuk melatih dan menguji dari 175 data balok beton bertulang dari berbagai sumber. Data digunakan untuk membentuk 9 buah parameter dalam model SVM yaitu jarak dari muka balok ke titik berat tulangan tekan, tegangan leleh tulangan utama dan tulangan geser, rasio panjang geser dan tinggi efektif balok, dimensi penampang balok, dan tulangan utama serta tulangan geser balok. Hasil dari prediksi SVM akan dibandingkan dengan metode lain yaitu *artificial neural network* (AANs) dan *ACI Building Code* pada dataset yang sama. Selanjutnya, SVM menunjukkan hasil yang baik dan terbukti dapat digunakan selain AANs dan rumus empiris ACI Building Codes.

Kata kunci : *Support vector machine*, Gaya geser, Beton bertulang.

1. INTRODUCTION

In designing a reinforced concrete (RC) beam, structural engineer must concern about the shear behavior of the RC beams. The shear failure of an RC beam is different from its flexural failure. In shear, the beam fails suddenly without warning and diagonal shear cracks are considerably wider than the flexural cracks. Shear failure is brittle and must be avoided in designing RC beams by providing the transverse reinforcement.

There are some parameters that affect the shear strength of RC beams including material strength, shear-span-to-effective-depth ratio, amount of reinforcement, etc. These

parameters are used to predict shear strength of beams with an assumed form of empirical or analytical equation and are followed by a regression analysis using experimental data to determine unknown coefficients. But these equations in design codes do not accurately predict the shear strength of RC beams with transverse reinforcement and are also not easy-to-use types of equations.

This paper presents the prediction of shear strength of RC beams with transverse reinforcement using support vector machine (SVM). The basic ideas underlying SVM are also reviewed in this paper, and its potential is demonstrated by applying the method on practical problems in civil engineering. In this study, the regression problems in SVM using support vector regression (SVR) will be used for modeling the experimental data. The results are then analyzed to determine the relative performance of SVM to that of artificial neural networks (ANNs) and the empirical shear design equations as given by American building code (ACI 318-05) on the same data sets.

2. ULTIMATE SHEAR STRENGTH OF RC BEAMS

The most shear design equations are derived from the equilibrium conditions of the simple 45° – truss theory proposed by Ritter and Morsch at the turn of the 20th century.

These equations are in turn modified using statistical analysis to account for the effects of the flexure and the longitudinal reinforcement ratio on the shear strength of the RC beams.

ACI building code (American Concrete Institute, 2005) is one of the building codes that adopted this concept. The equations simply estimate the shear strength of an RC beam as the superposition of shear strength due to concrete alone and shear reinforcement alone.

However, the shear strength of RC beams predicted using these simple equations was found to be very conservative when compared to experimental observations. This was mainly because the equations were based on the assumption that there is no interaction between shear resisting mechanism.

The experimental data for the shear strength are already collected from the literature (Mansour et. al., 2004). There are total 175 RC beams with shear reinforcement from different literatures are tested with one or two point loads acting symmetrically with respect to the centerline of the beam span.

The data is shown in Table A1 in Appendix A. The beams have different support conditions simulating simple span, continuous span and fixed support conditions. During the collection stages, specimens that did not fail in shear were excluded from the database.

The important parameters that affect the shear strength of RC beams in this study are:

1. Shear-span (a)
2. Effective span of beam (L) and effective depth (d) of beam
3. Width of web (b_w)
4. Material strength of concrete, flexural (longitudinal) reinforcement and shear (transverse) reinforcement (f'_c , f_{yl} , f_{yt})
5. Reinforcement ratios of longitudinal steel and shear steel (ρ_l , ρ_t).

3. SHEAR STRENGTH USING ACI BUILDING CODE

For beams with transverse reinforcement, the ACI building code (American Concrete Institute, 2005), ACI 318-05 states that the nominal shear strength v_n of RC beams is the amount of concrete shear strength v_c and the transverse reinforcement v_s

$$V_n = V_c + V_s \quad (1)$$

where v_c and v_s are expressed as:

$$v_c = V_c / b_w d = \left(0.16 \sqrt{f'_c} + 17.2 \rho_w \frac{V_u d}{M_u} \right) \quad (2)$$

$$v_s = A_v f_{yv} / b_w s = \rho_v f_{yv} \quad (3)$$

In the above equation b_w is the breadth of beam, d is the effective depth of beam f'_c is the cylinder concrete strength of concrete, ρ_w is the longitudinal tensile reinforcement ratio, V_u and M_u are the shear strength and moment at critical section respectively, A_v is the area of vertical shear reinforcement, f_{yv} is the yield stress of stirrups, s is the spacing of stirrups and ρ_v is the shear reinforcement ratio. The ACI 318-05 (American Concrete Institute, 2005) also states that the concrete shear contribution and the shear reinforcement contribution must not be taken greater than $0.3 \sqrt{f'_c}$ and $0.66 \sqrt{f'_c}$ respectively.

4. ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS (ANNs)

The first ANN was invented in 1958 by psychologist Frank Rosenblatt. Called Perceptron, it was intended to model how the human brain processed visual data and learned to recognize objects. Other researchers have since used similar ANNs to study human cognition. Eventually, someone realized that in addition to providing insights into the functionality of the human brain, ANNs could be useful tools in their own right. Their pattern-matching and learning capabilities allowed them to address many problems that were

difficult or impossible to solve by standard computational and statistical methods. By the late 1980s, many real-world institutes were using ANNs for a variety of purposes.

ANNs are composed of many interconnected processing units. Each processing unit keeps some information locally, is able to perform some simple computations, and can have many inputs but can send only one output. The ANNs have the capability to respond to input stimuli and produce the corresponding response, and to adapt to the changing environment by learning from experience. Therefore, in order for researchers to use ANNs as a predictive tool, data must be used to train and test the model to check its successfulness (Mansour et. al., 2004).

A key feature of neural networks is an iterative learning process in which data cases (rows) are presented to the network one at a time, and the weights associated with the input values are adjusted each time. After all cases are presented, the process often starts over again. During this learning phase, the network learns by adjusting the weights so as to be able to predict the correct class label of input samples. Neural network learning is also referred to as "connectionist learning," due to connections between the units. Advantages of neural networks include their high tolerance to noisy data, as well as their ability to classify patterns on which they have not been trained.

The most common neural network model is the multi-layer back-propagation neural networks (MBNNs) (Mansour et. al., 2004). Here the output values are compared with the correct answer to compute the value of some predefined error-function. By various techniques the error is then fed back through the network. Using this information, the algorithm adjusts the weights of each connection in order to reduce the value of the error function by some small amount. After repeating this process for a sufficiently large number of training cycles the network will usually converge to some state where the error of the calculations is small. In this case one says that the network has learned a certain target function. To adjust weights properly one applies a general method for non-linear optimization task that is called gradient descent. For this, the derivative of the error function with respect to the network weights is calculated and the weights are then changed such that the error decreases (thus going downhill on the surface of the error function). For this reason back-propagation can only be applied on networks with differentiable activation functions (Bishop, 1995).

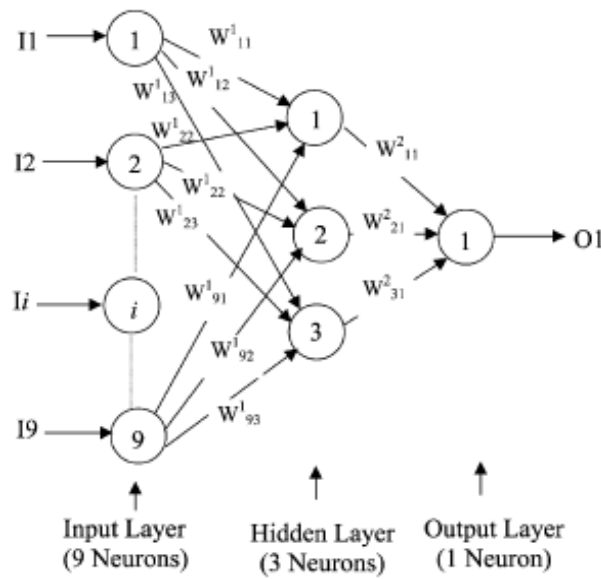


Fig. 1. A Typical MBNN (Mansour et. al., 2004)

The layout of the three-layer neural network used in this study is illustrated in Fig. 1. The network shown consists of an input layer with nine neurons, a hidden layer with three neurons, and an output layer with one neuron. The input layer neurons receive information from the outside environment and transmit them to the neurons of the hidden layer without performing any calculation. The hidden layer neurons then process the incoming information and extract useful features to reconstruct the mapping from the input space to the output space. Finally, the output layer neurons produce the network predictions to the outside world.

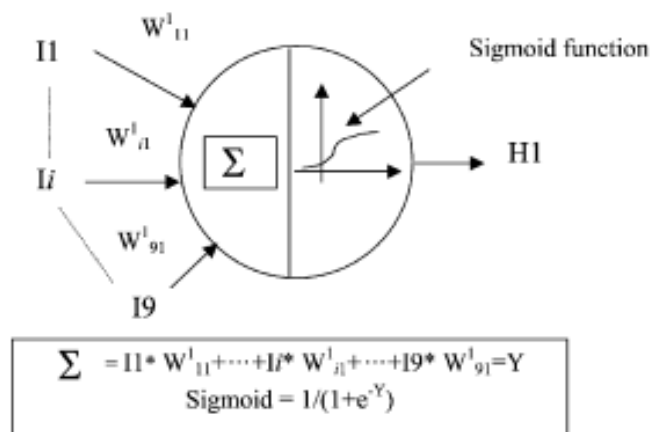


Fig. 2. Typical Neuron in a Hidden Layer (Mansour. et al., 2004)

To better explain the ANN procedure, the ANN network shown in Fig. 2 is taken as an example. The error “E” between the computed value (denoted by O_k) and the target output (denoted by T_k) of the output layer is defined as

$$E = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (O_k - T_k)^2 \quad (4)$$

where

$$O_k = F(I_i W_i^k) = F\left(\sum_{i=1}^3 I_i W_i^k\right) \quad (5)$$

In the equation above, $F(\cdot)$ is the sigmoid function defined in Fig. 2, I_i is the input to neuron “ k ” of the single output layer from neuron “ i ” of the hidden layer, and W_i^k is the weight associated between neuron “ i ” of the hidden layer and neuron “ k ” of the output layer. Note that in the ANN model shown in Fig.1, only one output is used and thus the subscript “ n ” in Eq. (4) (summation sign) is equal to 1. Therefore, from the hidden layer to the output layer, the modification of weights is represented respectively by the following expression:

$$\Delta W_i^k = \lambda \delta_k I_i \quad (6)$$

where λ is the learning rate and $\delta_k = (T_k - O_k) F'(I_i W_i^k)$. From the input layer to the hidden layer, similar equations can also be written

$$\Delta W_i^k = \lambda \delta_j I_i \quad (7)$$

where $\delta_j = W_{kj} \delta_k F'(I_i W_i^j)$.

The training algorithm can be improved by adding momentum terms into the weights equations as shown below:

$$W_i^k(t+1) = W_i^k(t) + \lambda \delta_k I_i + \gamma [W_i^k(t) - W_i^k(t-1)] \quad (8)$$

$$W_i^j(t+1) = W_i^j(t) + \lambda \delta_j I_i + \gamma [W_i^j(t) - W_i^j(t-1)] \quad (9)$$

where “ t ” denotes the learning cycle and “ γ ” is the momentum factor.

5. SUPPORT VECTOR MACHINE (SVM)

The SVM is relatively new, the foundation of the subject of support vector machines (SVMs) has been developed principally by Vapnik and his collaborators, and the corresponding support vector (SV) devices are gaining popularity due to their many attractive features and promising empirical performance. It has demonstrated its good performance in classification (Osuna et. al., 1997; Belousov et. al., 2002), regression (Smola

and Schölkopf, 1998; Dibike et. al., 2001), and time series forecasting and prediction (Mukherjee et. al., 1997; Muller et. al., 1997; Tay and Cao, 2001; Kim, 2003; Thissen et. al., 2003) in an efficient and stable way.

SVM formulation embodies the structural risk minimization (SRM) principle, which has been shown to be superior to the more traditional empirical risk minimization (ERM) principle employed by many of the other modeling techniques (Osuna et. al., 1997; Gunn, 1998). The SRM places an upper bound on the expected risk, as opposed to an ERM, which minimizes the error on the training data only. It is this difference that equips SVM with a greater ability to generalize compared to traditional neural network approaches. The SVM that will be used in this paper are ε - support vector regression (ε -SVR).

ε -SVR (Schölkopf and Smola, 1998) is an applied regression problem by the introduction of an alternative loss function that is modified to include a distance measure (Smola, 1996). Considering the problem of approximating the set of data, $\{(x_1, y_1), \dots (x_i, y_i), x \in \mathbb{R}^N, y \in \mathbb{R}\}$ with a linear function as expressed below:

$$f(x, \alpha) = \langle w, x \rangle + b \quad (10)$$

where w and b = parameters. With the most general loss function with an ε - insensitive zone described as:

$$\begin{aligned} |y_i - f(x, \alpha)|_{\varepsilon} &= \varepsilon \quad \text{if } |y_i - f(x, \alpha)| \leq \varepsilon ; \\ |y_i - f(x, \alpha)| &\quad \text{otherwise} \end{aligned} \quad (11)$$

The objective is now to find a function $f(x, \alpha)$ that has a most a derivation of ε from the actual observed targets y_i for all the training data at the same time as flat as possible. In performing nonlinear regression we map the input vector x into a high-dimensional feature space in which we then perform linear regression $f(z)$. The optimal regression function for primal problem is given by minimizing the functional of empirical risk.

$$\min_{w, b, \xi_i^{up}, \xi_i^{down}} \tau(w, \xi) = \frac{1}{2} \|w\|^2 + \frac{C}{m} \sum_{i=1}^m (\xi_i^{up} + \xi_i^{down}) \quad (12)$$

where C is a parameter chosen a priori and defining the cost of constraint violation; and ξ_i^{up} , ξ_i^{down} = slack variables representing upper and lower constraints on the outputs of the system (Fig. 3), as follows:

$$\begin{aligned}
y_i - \langle w, z_i \rangle - b &\leq \varepsilon + \xi_i^{up} & i = 1, 2, \dots, m \\
\langle w, z_i \rangle + b - y_i &\leq \varepsilon + \xi_i^{down} & i = 1, 2, \dots, m \\
\xi_i^{up} &\geq 0 \text{ and } \xi_i^{down} \geq 0
\end{aligned} \tag{13}$$

The optimization problem can then be reformulated into an equivalent nonconstrained optimization problem using Lagrangian multiplier, and its solution is given by identifying the saddle point of the functional (Minoux, 1986). Lagrange function is constructed from both the objective function and the corresponding constraint by introducing a dual set of variables, as follows:

$$\begin{aligned}
L(w, b, \xi^{up}, \xi^{down}, \alpha, \beta, \gamma, \delta) \\
= \frac{1}{2} \|w\|^2 + \frac{C}{m} \sum_{i=1}^m (\xi_i^{up} + \xi_i^{down}) + \sum_{i=1}^m \alpha_i [y_i - \langle w, z_i \rangle - b - \varepsilon - \xi_i^{up}] \\
+ \sum_{i=1}^m \beta_i [\langle w, z_i \rangle + b - y_i - \varepsilon - \xi_i^{down}] - \sum_{i=1}^m \gamma_i \xi_i^{up} - \sum_{i=1}^m \delta_i \xi_i^{down} \\
\alpha_i \geq 0, \beta_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, m
\end{aligned} \tag{14}$$

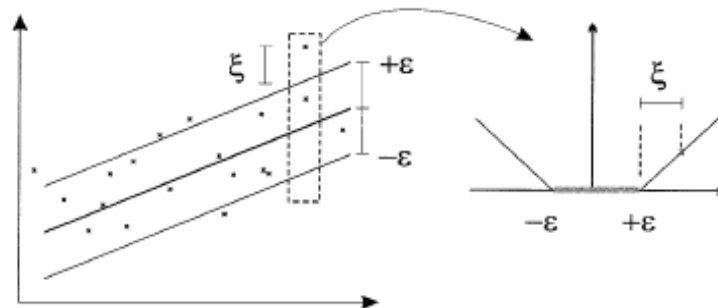
where the α_i and β_i are the Lagrange multiplier. From the saddle point condition that the partial derivatives of the Lagrangian has to be minimized with respect to w , b , ξ_i^{up} and ξ_i^{down} to vanish for optimality. Hence, we get the dual function as below:

$$\begin{aligned}
W(\alpha) = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m (\alpha_i - \beta_i)(\alpha_j - \beta_j) \langle z_i, z_j \rangle - \varepsilon \sum_{i=1}^m (\alpha_i + \beta_i) + \sum_{i=1}^m y_i (\alpha_i - \beta_i) \\
\alpha_i \geq 0, \beta_i \geq 0, \sum_{i=1}^m (\alpha_i - \beta_i) = 0, i = 1, 2, \dots, m
\end{aligned} \tag{15}$$

Therefore, the dual optimization problem will be:

$$\max_{\alpha, \beta} \left[-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m (\alpha_i - \beta_i)(\alpha_j - \beta_j) \langle z_i, z_j \rangle - \varepsilon \sum_{i=1}^m (\alpha_i + \beta_i) + \sum_{i=1}^m y_i (\alpha_i - \beta_i) \right] \tag{16}$$

with respect to the constraints $\sum_{i=1}^m (\alpha_i - \beta_i) = 0 \quad 0 \leq \alpha_i, \beta_i \leq \frac{C}{m} \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, m$



**Fig. 3. Prespecified Accuracy and Slack Variable j in SV Regression,
Adapted from Scholkopf (Scholkopf, 1997)**

Finding the solution of (Mansour, et. al., 2004) for real-world problem will usually require application of quadratic programming and numerical methods. Once solution of the coefficients α_i and β_i are determined, the decision function can be found as:

$$f(x_{new}) = \left[\sum_{i=1}^m (\alpha_i^* - \beta_i^*) k(x_{new}, x_i) \right] + b^* \quad (17)$$

$$b^* = y_m - \varepsilon - \sum_{i=1}^m (\alpha_i^* - \beta_i^*) k(x_m, x_i) \quad (18)$$

where α^* , β^* are the solution of the dual problem and y_m and x_m are corresponding to SVs data. By using a nonlinear mapping kernel K is used to map the data into higher dimensional feature space, where the linear regression is performed.

6. ANN MODELS USED FOR PREDICTION OF SHEAR STRENGTH

In this study, ANN model for prediction the ultimate shear strength of RC beams with stirrups is develop by using XLminer with a fully integrated add-in to Microsoft Excel. It provides a comprehensive set of analysis features based both on statistical and machine learning methods. A problem or a data set can be analyzed by several methods. It is usually a good idea to try different approaches, compare their results, and then choose a model that suits the problem well. XLMiner uses Excel primarily as an interface and platform. While Excel limits the user to 60,000 rows, XLMiner allows the user to sample from a much larger database, do the analysis on a statistically-valid sample, and, for supervised learning, score the results back out to the database.

Using artificial neural network prediction in XLminer requires the following input data:

1. The error tolerance, which is set to 3%
2. The maximum number of training cycles or epochs is 600.
3. The total number of data that is 175 RC beams. In this study, the first 20% of the total data (already randomized in Excel) is used for testing and the remaining 80% for training.
4. The number of input neurons is nine, the number of output neurons is one, and the number of hidden layer neurons is three.
5. A learning rate (step size in gradient descent in Xlminer) and a momentum factor are equal to 0.4 and 0.2. In most of the simulations, it is found that one hidden layer and values of 0.4 for the learning rate and 0.2 for the momentum factor would lead to a minimum error.
6. Nine variables are used as input parameters for the ANN model constructed: (1) f'_c , (2) f_{yl} , (3) f_{yt} , (4) a/d , (5) b_w , (6) d , (7) L/d , (8) ρ_l , (9) ρ_t . The output was selected as the ultimate shear strength ($V/b_w d$) of the RC beam.
7. Normalized the input data (subtracting the mean and dividing by the standard deviation) to ensure that the distance measure accords equal weight to each variable. Without normalization, the variable with the largest scale will dominate the measure.

7. SVR MODELS USED FOR PREDICTION OF SHEAR STRENGTH

In this study, a computer program a library for support vector machines (Libsvm) will be used to develop an SVM model for predicting the ultimate strength of RC beams with stirrups. SVMs task usually involves with training and testing data which consist of some data instances. Each instance in the training set contains one “target value” and several “attributes” (features). The goal of SVM is to produce a model which predicts target value of data instances in the testing set which are given only the attributes. The Libsvm program procedures:

1. Features
 - The total number of data that is presented (in this case, 175 RC beams were considered). The computer program uses 80% of total data for training (140 RC beams) and the remaining 20% for testing (35 RC beams).
 - The nine variables of inputs are used for constructing the SVM model in this investigation are (1) f'_c ; (2) f_{yl} ; (3) f_{yt} ; (4) a/d ; (5) b_w ; (6) d ; (7) L/d ; (8) ρ_l ; (9) ρ_t .

- The one output in this study was selected as the ultimate shear strength ($V/b_w d$) of the RC beam.
 - The input data are built using Ms. Excel (.xls) and imported to Matlab data (.mat). By using Matlab code, the data will be transferred to input format for Libsvm (.txt).
2. Scaling. Scaling the data before applying SVM is very important. (Sarle, 1997 ; Part 2 of Neural Networks FAQ) explains why we scale data while using Neural Networks, and most of considerations also apply to SVM. The main advantage is to avoid attributes in greater numeric ranges dominate those in smaller numeric ranges. Another advantage is to avoid numerical difficulties during the calculation. Because kernel values usually depend on the inner products of feature vectors large attribute values might cause numerical problems.

The linearly scaling for this study is to the range $[-1, +1]$ for each attribute.

3. Consider Kernel Function. There are four common kernels in Libsvm. For this investigation, radial basis function (RBF) kernel $k(x_i, x_n) = e^{-\gamma \|x_i - x_n\|^2}$ is used. The RBF kernel is used because nonlinearly maps samples into a higher dimensional space, the number of hyperparameters which influences the complexity of model selection (for example: The polynomial kernel has more hyperparameters than the RBF kernel), the RBF kernel has less numerical difficulties and can be used for every types of SVM and under every parameters.
4. Cross-validation and grid search. There are three parameter C , γ , ε to train the whole training set. It is not known beforehand which C and γ are the best for one problem; consequently some kind of model selection (parameter search) must be done. The goal is to identify good (C, γ) so that the regression can accurately predict unknown data (i.e., testing data).

In v-fold cross-validation, we first divide the training set into v subsets of equal size. Sequentially one subset is tested using the classifier trained on the remaining $v - 1$ subsets. Thus, each instance of the whole training set is predicted once so the cross-validation accuracy is the percentage of data which are correctly classified. The cross-validation procedure can prevent the overfitting problem.

For this study, the whole training data are divided into 10 set of equal size data. A “grid-search” on C , γ , ε using cross-validation is used also in this study.

5. Use the best parameter C , γ , ε to train the whole training set.
6. Test.

8. ANALYSIS RESULTS

The AANs model developed in this research is used to predict the shear strengths of the 35 RC specimens with the 140 RC specimens as training data. With that model, the predicted data have root mean square error (RMSE) = 1.1329 as can be seen in Table 1. The second generation (ϵ -SVR) of SVMs in regression are used to analyze the RC specimens. The SVM model developed in this research is used to predict the shear strengths of the 35 RC specimens with the 140 RC specimens as training data.

By using cross validation and grid search in Libsvm, the model can be able to learn the best value of C , γ , and ϵ . It is found that the best C value equal to 0.0625, the best γ value equal to 0.13149, and the best ϵ value equal to 0.2. By using those values, the cross validation and grid search minimize the training error, hence, the cross validation error mean square error reach 1.68.

The model is tested by predicting 35 RC specimens using svmpredict. The model use 87 numbers of data as SVs and 72 numbers of data as BSVs. With that model, the predicted data have root mean square error (RMSE) = 1.2265 as can be seen in Table 1. The ratio of SVM predicted shear strength to the experimental shear strength of each RC beam is given in Table 2. By using the ϵ -SVR, the average value of these ratios is 1.012.

**Table 1. Root Mean Squares Error Values of Experimental
to Predict Shear Strength**

Method used	RMSE
ANN	1.1329
SVM	1.2265

The verification performance statistics, root mean square error (RMSE), is used to compare the AAN with SVM like in Table 1. RMSE statistics provide a general illustration of the overall accuracy of the predictions as they show the global goodness of fit. From the RMSE value, model with ANN provide a better general illustration of the overall accuracy of the predictions than model using SVMs.

The average value or mean and standard deviation of the experimental to predicted shear strength ratios of the data are used to verify the performance of all three models. The results can be seen in Table 2. Standard deviation is used to measure how spreads out the values in a data set are. More precisely, it is a measure of the average distance of the data values from their mean. If the data points are all close to the mean, then the standard

deviation is low (closer to zero). In other hand, if many data points are very different from the mean, then the standard deviation is high (further from zero).

The SVM model developed in this study is used to predict the shear strength of the 35 RC beams. The ratio of SVM, ANN and ACI predicted shear strength to the experimental shear strength is given in Table A2 Appendix A. The mean value and standard deviation of the ratios predicted to experimental shear strength values for each method (only for testing data) also given in Table 2. From this table, we can see that the mean value of the ratios of predicted to experimental shear strength values of the testing data is 0.98 in ACI method, 1.083 in ANN method and 1.012 by using SVM. It means that SVMs method can predict the shear strength of the RC beams much better than the ACI building code method and the ANN method.

Table 2. Mean and COV Values of Experimental to Predict Shear Strength

Method used	Mean	Std Dev
ACI	0.829	0.367
ANN	1.083	0.314
SVM	1.012	0.310

The SVM shear strength results as well as those obtained from ACI method and ANN method are shown in Fig. 4(a)-(c). It shows the predicted shear strength versus the experimental shear strength of the RC beams (only for testing data) for each method. The predicted results using the ACI building code method is seems to underestimate the observed shear strength of the RC beams as shown in Fig. 4(a), while the ANN model tends to predict the shear strength better than the ACI building code. It is shown in Fig. 4(b) that the observed shear strength of RC beams has variations on both side of the regression line, overestimate side and underestimate side. The predicted results using SVM model exhibit approximately the same trend for RC beams as the ANN model, but perform a little bit better than ANN model. It is shown by the mean value of the ratios of predicted to experimental shear strength value of the testing data in SVM method is smaller than in ANN method (Fig. 4(c)).

The SVM has the lowest standard deviation value and ACI has the biggest standard deviation value from the other model. That means the range predicted data to experimental data in ACI have very spreads out values in a data set than the other model. The result is shown in Table 2. From Fig. 4(a)-(c), the variation of all model data are very big. This phenomena is not good, the variation of predicted value to experimental value should be

minimum. By using machine learning, the more training data, the more system can learn the performance of the data set. Therefore, to get the better prediction results, more data should be collected for training data.

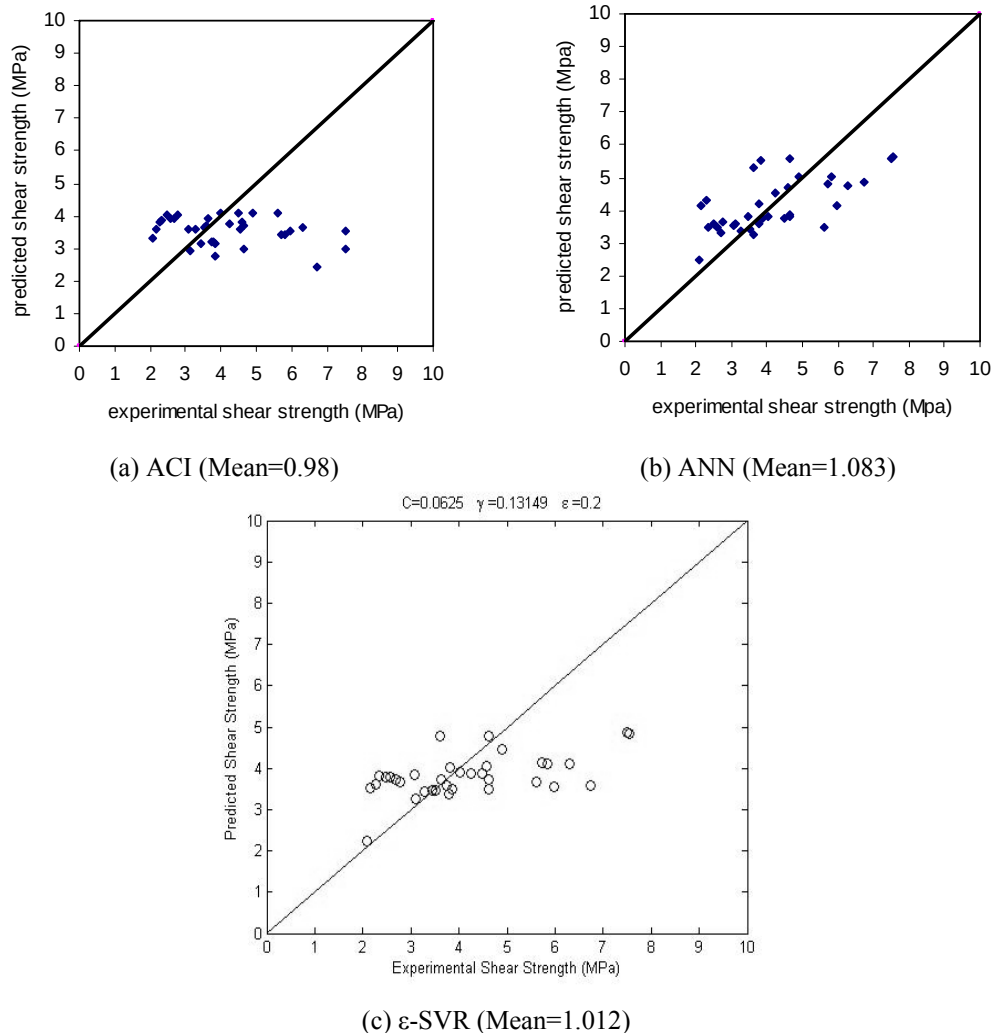


Fig. 4. Comparison of Predicted Shear Strengths versus Experimental Shear Strengths Using Various Methods

In overall, the performance of ANN and SVM is approximately the same and it predicted the shear strength value more accurately than ACI-05. Therefore, the SVMs can be used to predict the shear strength of RC beams with the transverse reinforcements.

By comparing the elapse time in both ANNs model and SVMs model, the performance of SVMs is much better than ANNs model. ANNs model needs 2 seconds to finish running the single input parameter of ANNs model (without cross validation error), while the SVMs model only need 0.77 seconds to finish the prediction without cross validation. The SVM exhibits inherent advantages due to its use of the structural risk

minimization principle in formulating cost functions and of quadratic programming during model optimization. These advantages lead to a unique optimal and global solution compared to conventional neural network models.

9. CONCLUSION

The study conducted in this paper shows the feasibility of using support vector regression to predict the ultimate shear strengths of RC beams with transverse reinforcements. After learning from a set of selected training data, involving the shear strengths of transversely reinforced RC beams collected from the technical literature, the SVM model is used to successfully predict the shear strengths of the test data within the range of input parameters being investigated. Applying the SVM model to predict the shear strengths of RC beams with input parameters outside the range over which the model was trained does not guarantee adequate strength predictions. In such a case, more data should be collected to increase the range of input parameters needed to cover the domain of interest.

In this paper, the shear strength prediction by using three methods empirical equations, building codes from ACI-05, and machine learning techniques, ANN and SVMs, have been reviewed. It is found that the strength values obtained from SVM are more accurate than those obtained from design codes' empirical equations. The success of the SVMs model in predicting the shear strength of RC beams, within the input parameters used to train the model, rather than costly experimental investigation.

SVM training consists of solving a—uniquely solvable—quadratic optimization problem, unlike ANN training, which requires a nonlinear optimization with the possibility of converging only on local minima. Since the SVM is largely characterized by the type of its kernel function, it is necessary to choose the appropriate kernel for each particular application problem in order to guarantee satisfactory results.

The machine learning regression approach for shear strength prediction of RC beams with transverse reinforcements has also been demonstrated to provide a good alternative to the traditional use of conceptual modes. In particular, SVMs were found to generalize better by giving a more accurate prediction of runoff on test data.

Despite SVM's encouraging performance in this and other similar studies, several aspects still remain to be addressed. For example, determining the proper parameters C and ϵ are still a heuristic process, and automation of this process could be beneficial. The other limitations are those of computational speed and the maximum possible size of the training set relative to the available computer memory resource. But in general, SVMs provide an

attractive approach to data modeling and have started to enjoy increasing popularity in the machine learning and computer-vision research communities.

This paper shows SVM potential as an alternative model induction technique for applications in civil engineering, especially in shear strength RC beams with transverse reinforcements.

REFERENCES

1. American Concrete Institute (2005), *ACI Building Code 2005*, American Concrete Institute.
2. Bishop, C.M. (1995), *Neural Networks for Pattern Recognition*, Oxford: Oxford University Press.
3. Bresler B., Scordelis A.C. (1961), *Shear strength of reinforced concrete beams, Series 100, Issue 13*. Berkeley: Structures and Materials Research, Department of Civil Engineering, University of California.
4. Chih-Wei Hsu, Chih-Chung Chang, et. al., *A practical guide to support vector classification*, Departement of Computer Science and Information Engineering National Taiwan University, Taiwan.
5. Elstner R,C,, Moody K,G,, Viest I,M,, Hognestad E. (1955), *Shear strength of reinforced concrete beams. Part 3—tests of restrained beams with web reinforcement*, ACI Journal, Proceedings, 51(6):525–39.
6. Clark AP. (1951), *Diagonal tension in reinforced concrete beams*, ACI Journal Proceedings, 48(2):145–56.
7. Fukuhara M, Kokusho S. (1982), *Effectiveness of high tension shear reinforcement in reinforced concrete members*, Journal of the Structural Construction Engineering, AIJ 320:12–20.
8. Guralnick SA. (1960), *High-strength deformed steel bars for concrete reinforcement*, ACI Journal Proceedings, 57(3):241–82.
9. Haddadin M.J., Hong S-T., Mattock A,H. (1971), *Stirrup effectiveness in reinforced concrete beams with axial force*, Proceedings, ASCE, 97(ST9):2277–97.
10. Lee J.Y., Kim S.W., Mansour M.Y. (2002), *Predicting the shear response of reinforced concrete beams using a new compatibility aided truss model*, ACI Structural Journal, submitted for publication.
11. Kokusho S., Kobayashe K., Mitsugi S., Kumagai H. (1987), *Ultimate shear strength of RC beams with high tension shear reinforcement and high strength concrete*, Journal of the Structural Construction Engineering, AIJ 373:83–91.

12. Matsuzaki Y., Nakano K., Iso M., Watanabe H. (1990), *Experimental study on the shear characteristic of RC beams with high tension shear reinforcement*, Proceedings JCI, 12(2):325–8.
13. Mattock A.H, Wang Z. (1984), *Shear strength of reinforced concrete members subject to high axial compressive stress*, ACI Structural Journal, 81(3):287–98.
14. Minoux, M. (1986), *Mathematical programming: theory and algorithms*, Wiley, New York.
15. Moretto O. (1945), *An investigation of the strength of welded stirrups in reinforced concrete beams*, ACI Journal Proceedings, 42(2):141–62.
16. M.Y. Mansour et. al. (2004), *Predicting the shear strength of reinforced concrete beams using artificial neural networks*, Journal of engineering structures, 26 (2004) 781-799.
17. Nishiura N., Makitani E., Shindou K. (1993), *Shear resistance of concrete beams with high strength web reinforcements*, Proceedings JCI, 15(2):461–6.
18. Placas A., Regan P.E. (1971), *Shear failure of reinforced concrete beams*, ACI Journal, Proceedings, 68(10):763–73.
19. Rodriguez J.J., Bianchini A.C., Viest I.M., Kesler C.E. (1959), *Shear strength of two-span continuous reinforced concrete beams*, ACI Journal Proceedings, 55(10):1089–130.
20. Scholkopf and Smola (1998), *Learning with Kernels: Support Vector Machines, Regularization, Optimization and Beyond*, MIT Press, Cambridge
21. Scholkopf, B. (1997), *Support vector learning*, R. Oldenbourg, Munich.
22. Smola, A. (1996), *Regression estimation with support vector learning machines*, Technische Universitat Munchen, Munchen, Germany.
23. Takagi H., Okude H., Nitta T. (1989), *Shear strength of beam depending the strength of web reinforcements*, Proceedings JCI, 11(2):75–80.
24. Yonas B.D., Slavco Velickov, et.al. (2001), *Model induction with support vector machines: introduction and applications*, Delft, The Netherlands.

[1] **Cindrawaty Lesmana**, Lecturer, Department of Civil Engineering, Maranatha Christian University

APPENDIX

Table A1. Data of Experimental Shear Strength

Beam	b (mm)	d (mm)	f _c (MPa)	f _{dy} (MPa)	f _{ty} (MPa)	a/d	ρ(long) (%)	ρ(tran) (%)	L/d	vu-exp (MPa)	Code *
A2	178	381	29	515	357	2.50	3.81	0.19	5.0	4.57	V
E2A2(3-2)	152	318	19	305	345	2.23	2.67	0.37	8.2	3.11	V
R16	152	254	31	618	279	3.60	4.16	0.41	7.2	3.61	V
T13	152	272	13	618	269	3.36	1.46	0.21	6.7	6.74	V
D5-2	152	315	29	321	331	2.43	3.42	0.37	9.7	3.28	V
B2-1	203	390	23	321	331	1.95	3.10	0.73	4.7	3.80	V
B-120-030	200	352	35	931	1062	2.27	3.09	0.30	4.5	3.63	V
B-30-121	200	352	32	931	285	2.27	3.09	1.21	4.5	4.24	V
D4-3	152	315	22	321	331	2.43	3.42	0.49	9.7	3.45	V
G3	178	381	26	515	454	2.50	3.81	0.42	5.0	5.73	V
C3H2(2-6)	152	315	20	410	316	2.06	2.69	0.89	8.2	4.63	V
2-V1/4(2)	140	464	33	329	378	1.75	3.99	0.27	5.3	4.62	V
C2	178	381	28	515	357	4.25	3.81	0.19	8.5	5.98	V
B-1	231	461	25	555	325	3.94	2.43	0.15	7.9	2.09	V
1a-V3/8(14)	140	495	23	329	357	1.64	3.99	0.27	4.9	3.75	V
IID-2(13)	178	306	38	602	526	2.99	2.47	0.24	6.0	5.62	V
R14	152	272	29	618	269	3.36	1.46	0.14	6.7	2.16	V
G5	178	381	26	515	454	2.50	3.81	1.05	5.0	5.83	V
S10-M-2.0-36-40-1	200	336	29	854	830	2.38	2.88	0.40	4.8	3.07	V
E5	178	381	17	515	343	2.50	3.81	1.26	5.0	3.82	V
C305DO(5)	150	315	33	361	355	3.00	2.61	0.24	6.0	2.28	V
B-360-7.4	180	340	38	798	1422	1.76	3.16	0.44	3.5	4.49	V
T32	152	254	28	618	269	3.60	4.16	0.83	7.2	7.55	V
IIC-2(12)	178	310	38	576	526	2.96	4.38	0.24	5.9	4.90	V
B-1.5-110	200	352	35	931	841	2.27	3.09	0.58	4.5	2.58	V
B-360-4.1	180	340	38	798	1392	1.76	3.16	0.15	3.5	4.01	V
360-1.18	200	336	37	947	728	1.79	2.88	1.18	3.6	2.78	V
D2-6	152	315	30	321	331	2.43	3.42	0.61	9.7	3.52	V
J3	178	381	30	515	343	2.50	3.81	0.42	5.0	6.30	V
T9	152	254	20	618	279	3.60	4.16	0.41	7.2	7.50	V
360-0.89	200	336	37	947	728	1.79	2.88	0.89	3.6	2.48	V
R28	152	254	31	618	269	3.60	4.16	0.83	7.2	4.63	V
B-80-058S	200	352	34	931	841	2.27	3.09	0.58	4.5	2.34	V
B-120-059	200	352	35	931	1061	2.27	3.09	0.59	4.5	2.69	V
C2H1(3-8)	152	311	22	404	352	2.27	2.72	0.82	8.3	3.86	V
C4S3.0	220	244	42	402	358	3.00	3.60	0.22	6.0	3.47	T
A5	178	381	26	515	343	2.50	3.81	1.26	5.0	4.94	T
B-80-046	200	352	34	931	901	2.27	3.09	0.46	4.5	4.73	T
IV-o(34)	178	305	24	312	327	2.00	4.76	1.47	4.0	3.43	T
E4	178	381	13	515	343	2.50	3.81	0.79	5.0	8.33	T
D5-3	152	315	27	321	331	2.43	3.42	0.37	9.7	3.28	T
(2)-5	180	340	32	368	1324	1.76	3.21	0.28	3.5	4.89	T
(4)-9	180	340	20	795	1353	1.76	3.21	0.37	3.5	2.17	T
(2)-4	180	340	32	368	250	1.76	3.21	0.28	3.5	4.52	T

Table A1.(continued)											
B-80-022S	200	352	34	931	824	2.27	3.09	0.22	4.5	4.01	T
E2A3(3-3)	152	316	20	325	349	2.24	2.68	0.37	8.2	4.70	T
(4)-3	180	340	20	795	1275	1.76	3.21	0.12	3.5	2.09	T
B-30-046	200	352	33	931	349	2.27	3.09	0.46	4.5	3.34	T
(3)-4	200	336	23	1028	723	1.79	2.88	1.18	3.6	3.99	T
J5	178	381	32	515	343	2.50	3.81	1.26	5.0	3.85	T
B-150.019	200	352	35	931	1235	2.27	3.09	0.19	4.5	2.67	T
T11	152	254	37	618	279	3.60	4.16	0.41	7.2	4.60	T
C-2	152	464	24	555	325	4.93	3.66	0.20	9.8	2.30	T
210-0.40	200	336	23	1028	683	1.79	2.88	0.40	3.6	4.28	T
B-360-6.0	180	340	38	798	1333	1.76	3.16	0.31	3.5	5.29	T
A-2	305	464	24	555	325	4.93	2.28	0.10	9.9	1.73	T
(2)-11	180	340	32	368	255	1.76	3.21	0.75	3.5	2.64	T
C3H1(2-5)	200	352	33	931	866	2.27	3.09	0.19	4.5	2.96	T
B-60-030	200	352	33	931	492	2.27	3.09	0.30	4.5	4.49	T
T36	152	254	24	618	279	3.60	4.16	0.41	7.2	5.51	T
T34	152	254	34	618	269	5.40	4.16	0.21	10.8	4.03	T
1a-V1/4(13)	140	495	24	329	316	1.64	3.99	0.27	4.9	3.39	T
(4)-18	180	360	20	815	1275	1.76	0.61	0.12	3.3	5.58	T
A1-1	203	390	25	321	331	2.35	3.10	0.38	4.7	2.80	T
A3	178	381	30	515	343	2.50	3.81	0.42	5.0	5.26	T
T10	152	272	28	618	269	3.36	1.46	0.14	6.7	7.21	T
R8	152	272	27	618	269	3.36	1.46	0.21	6.7	1.92	T
B-120-121	200	352	35	931	1066	2.27	3.09	1.21	4.5	2.46	T
A4	178	381	28	515	343	2.50	3.81	0.79	5.0	5.82	T
T15	152	254	33	618	269	7.20	4.16	0.21	14.4	4.43	T
(3)-4	180	340	28	343	329	2.35	3.21	0.26	4.7	3.99	T
E2H2(3-7)	152	309	20	412	361	2.29	2.74	0.52	8.4	3.31	T
D4-1	203	390	23	321	331	1.95	3.10	0.37	4.7	3.51	T
E3H2(2-4)	152	326	25	395	314	1.99	2.60	0.89	7.9	2.90	T
S10-M-2.0-39-59-1	200	336	33	854	830	2.38	2.88	0.59	4.8	4.09	T
(4)-12	180	340	20	795	274	1.76	3.21	0.59	3.5	2.70	T
(2)-7	180	340	32	368	250	1.76	3.21	0.56	3.5	6.29	T
T19	152	254	30	618	269	5.40	4.16	0.21	10.8	6.24	T
T12	152	254	31	618	269	3.60	4.16	0.21	7.2	5.49	T
C2A2(3-5)	152	311	21	309	347	2.27	2.72	0.37	8.3	2.06	T
D4-1	152	315	27	321	331	2.43	3.42	0.49	9.7	3.51	T
(4)-16	200	336	21	854	830	2.38	2.88	0.89	4.8	2.93	T
B-360-5.1	180	340	38	798	1422	1.76	3.16	0.23	3.5	4.41	T
B1-2	203	390	25	321	331	1.95	3.10	0.37	4.7	3.23	T
B-360-11.0	180	340	20	798	1333	1.76	3.16	0.31	3.5	3.04	T
S10-M-2.0-36-89-1	152	254	33	618	269	7.20	4.16	0.14	14.4	4.00	T
(4)-10	180	340	20	795	285	1.76	3.21	0.26	3.5	5.66	T
B-80-121	200	352	34	931	898	2.27	3.09	1.21	4.5	3.82	T
R14	152	272	26	618	269	3.36	1.95	0.21	6.7	2.16	T
(3)-2	180	340	28	343	329	2.35	3.21	0.19	4.7	3.22	T
210-0.89	200	336	23	1028	723	1.79	2.88	0.89	3.6	5.69	T
D5-3	152	315	28	321	331	2.43	3.42	0.61	9.7	3.28	T

Table A1.(continued)											
A1-4	203	390	25	321	331	2.35	3.10	0.38	4.7	3.08	T
D5-3	152	315	26	321	331	2.43	3.42	0.49	9.7	3.28	T
B-1.5-022	200	352	35	931	824	2.27	3.09	0.22	4.5	2.05	T
T7	152	264	27	618	269	3.46	3.00	0.21	6.9	5.94	T
B-360-11.0	203	390	25	321	331	1.95	3.10	0.37	4.7	3.04	T
A-1	307	466	24	555	325	3.94	1.80	0.10	7.8	1.63	T
210-0.59	200	336	23	1028	723	1.79	2.88	0.59	3.6	5.03	T
C4S3.5	220	244	42	402	358	3.50	3.60	0.22	7.0	3.05	T
B-120-019	200	352	35	931	1062	2.27	3.09	0.19	4.5	3.94	T
(2)-15	180	340	32	368	674	1.76	3.21	0.29	3.5	2.72	T
D1-8	152	315	28	321	331	1.94	3.42	0.46	7.8	3.88	T
T6	152	254	26	618	269	3.60	4.16	0.83	7.2	5.36	T
C4S3.5	152	315	28	321	331	2.43	3.42	0.37	9.7	3.05	T
B-360-11.0	180	340	38	798	1431	1.76	3.16	1.00	3.5	3.04	T
B-80-059	200	352	33	931	554	2.27	3.09	0.59	4.5	5.12	T
C3-1	203	390	14	321	331	1.56	2.07	0.34	4.7	2.82	T
(4)-12	152	254	31	618	269	3.60	4.10	0.21	7.2	2.70	T
C210DOA(3)	150	315	34	361	355	2.00	2.61	0.47	6.0	3.45	T
(2)-3	180	340	32	368	250	1.76	3.21	0.28	3.5	3.69	T
B-1.5-110	200	352	36	931	803	2.27	3.09	1.10	4.5	3.21	T
S10-M-2.0-36-89-1	200	336	29	854	830	2.38	2.88	0.89	4.8	4.00	T
S10-M-2.0-21-40-1	200	336	20	854	830	2.38	2.88	0.40	4.8	2.91	T
B-360-9.2	180	340	38	798	1402	1.76	3.16	0.71	3.5	2.40	T
(4)-7	180	340	20	795	1262	1.76	3.21	0.26	3.5	3.73	T
IA-2R(17)	178	306	18	602	526	2.99	2.47	0.24	6.0	4.64	T
(3)-4	140	464	24	329	378	1.75	3.99	0.27	5.3	3.99	T
G4	178	381	27	515	454	2.50	3.81	0.63	5.0	3.54	T
C4S2.0	220	264	42	402	358	2.00	2.67	0.32	4.0	3.75	T
IC-2R(19)	178	310	34	576	526	2.95	4.38	0.24	5.9	5.11	T
IIA-2(9)	178	306	18	602	526	2.99	2.47	0.24	6.0	3.78	T
B-120-019	178	381	28	515	343	2.50	3.81	0.42	5.0	3.94	T
D4-1	152	315	26	321	331	2.43	3.42	0.61	9.7	3.51	T
(4)-16	180	360	20	795	1275	1.76	1.20	0.12	3.3	2.93	T
B-2	229	466	23	555	325	4.91	2.43	0.15	9.8	1.88	T
T35	152	254	34	618	269	5.40	4.16	0.21	10.8	4.33	T
(4)-14	180	340	20	795	258	1.76	3.21	0.83	3.5	2.39	T
210-0.19	200	336	23	1028	683	1.79	2.88	0.19	3.6	2.85	T
C3-2	203	390	14	321	331	1.56	2.07	0.34	4.7	2.53	T
R24	152	254	31	618	269	5.05	4.16	0.21	10.1	2.38	T
D1-7	152	315	28	321	331	1.94	3.42	0.46	7.8	3.74	T
IV-n(333)	178	305	23	312	314	2.00	4.76	0.95	4.0	7.66	T
(2)-8	180	340	32	368	250	1.76	3.21	0.56	3.5	4.68	T
IC-2(5)	178	310	34	576	526	2.95	4.38	0.24	5.9	6.79	T
E3	178	381	14	515	343	2.50	3.81	0.42	5.0	7.52	T
E2A1(3-1)	152	318	25	313	345	2.23	2.67	0.37	8.2	5.41	T
2-V3/8(8)	140	464	28	329	329	1.75	3.99	0.27	5.3	4.91	T
T37	152	254	32	618	269	3.60	4.16	0.83	7.2	4.97	T
C2H2(3-9)	152	325	25	399	356	2.17	2.60	0.52	8.0	6.37	T

Table A1.(continued)											
B1-3	203	390	24	321	331	1.95	3.10	0.37	4.7	3.59	T
210-0.89	178	381	28	515	343	3.38	3.81	0.42	6.8	5.69	T
IA-2(2)	178	306	18	602	526	2.99	2.47	0.24	6.0	6.55	T
B-60-030	180	340	38	798	1422	1.76	3.16	0.44	3.5	4.49	T
C3H1(2-5)	152	316	20	412	316	2.05	2.68	1.11	8.2	2.96	T
D1-6	152	315	28	321	331	1.94	3.42	0.46	7.8	3.65	T
C205D10(2)	150	315	30	387	355	2.00	2.08	0.24	6.0	2.59	T
S10-M-2.0-21-40-1	150	315	29	361	355	2.00	2.61	0.24	6.0	2.91	T
(3)-2	200	352	34	931	803	2.27	3.09	1.10	4.5	3.22	T
(2)-11	203	390	24	321	331	2.35	3.10	0.38	4.7	2.64	T
(4)-9	155	464	30	555	325	3.94	1.80	0.20	7.9	2.17	T
B-120-019	178	306	34	602	526	2.99	2.47	0.24	6.0	3.94	T
C3-3	203	390	14	321	331	1.56	2.07	0.34	4.7	2.37	T
C4S4.0	220	244	42	436	358	4.00	3.60	0.22	8.0	2.65	T
E2H1(3-6)	152	324	21	400	347	2.18	2.61	0.82	8.0	3.30	T
T4	203	390	24	321	331	1.56	3.10	0.34	4.7	3.90	T
A1-3	203	390	23	321	331	2.35	3.10	0.38	4.7	2.81	T
360-0.19	200	336	37	947	679	1.79	2.88	0.19	3.6	2.55	T
B1-4	203	390	23	321	331	1.95	3.10	0.37	4.7	3.37	T
B-80-022S	180	340	20	798	1431	1.76	3.16	1.00	3.5	4.01	T
B-210-7.4	180	340	20	798	1422	1.76	3.16	0.44	3.5	4.81	T
S10-M-2.0-21-59-1	200	336	20	854	830	2.38	2.88	0.59	4.8	3.13	T
B-210-9.5	180	340	20	798	1402	1.76	3.16	0.71	3.5	5.35	T
C2A1(3-4)	152	318	23	304	353	2.23	2.67	0.37	8.2	2.52	T
R16	152	254	30	618	279	3.60	4.16	0.41	7.2	3.61	T
T4	152	272	32	618	269	3.36	1.95	0.21	6.7	3.90	T
(4)-5	180	340	20	795	1238	1.76	3.21	0.19	3.5	4.14	T
T8	152	254	31	618	269	3.60	4.16	0.21	7.2	6.57	T
R12	152	254	34	618	269	3.60	4.16	0.21	7.2	2.83	T
(2)-13	180	340	32	368	255	1.76	3.21	1.13	3.5	5.28	T
IIB-2(10)	178	308	17	581	526	2.97	1.41	0.24	5.9	4.77	T
C1-3	203	390	24	321	331	1.56	2.07	0.34	4.7	3.10	T
B-80-059	200	352	34	931	901	2.27	3.09	0.59	4.5	1.89	T
T14	152	254	33	618	269	3.60	4.16	0.83	7.2	7.68	T
C204-S0(30)	150	315	21	358	353	2.00	2.61	0.24	4.0	6.87	T

**Table A2. Input data and prediction shear strength
to experimental shear strength ratio**

Beam	b (mm)	d (mm)	f _c (MPa)	f _{dy} (MPa)	f _{ty} (MPa)	a/d	ρ(long) (%)	ρ(tran) (%)	L/d	Actual Value (v _{u-exp}) (MPa)	ACI / Actual	ANN / Actual	ε- SVR/ Actual	v- SVR/ Actual
A2	178	381	29	515	357	2.5	3.81	0.19	5.0	4.57	0.79	1.03	0.89	0.90
E2A2(3-2)	152	318	19	305	345	2.23	2.67	0.37	8.2	3.11	0.93	1.16	1.05	1.06
R16	152	254	31	618	279	3.6	4.16	0.41	7.2	3.61	1.03	1.47	1.33	1.37
T13	152	272	13	618	269	3.36	1.46	0.21	6.7	6.74	0.36	0.72	0.53	0.56
D5-2	152	315	29	321	331	2.43	3.42	0.37	9.7	3.28	1.10	1.02	1.05	1.04

Table A2.(continued)														
B2-1	203	390	23	321	331	1.95	3.1	0.73	4.7	3.8	0.84	0.95	0.89	0.90
B-120-030	200	352	35	931	1062	2.27	3.09	0.3	4.5	3.63	1.09	0.90	1.03	1.01
B-30-121	200	352	32	931	285	2.27	3.09	1.21	4.5	4.24	0.89	1.07	0.92	0.91
D4-3	152	315	22	321	331	2.43	3.42	0.49	9.7	3.45	0.91	1.11	1.01	1.02
G3	178	381	26	515	454	2.5	3.81	0.42	5.0	5.73	0.59	0.84	0.72	0.74
C3H2(2-6)	152	315	20	410	316	2.06	2.69	0.89	8.2	4.63	0.64	0.82	0.75	0.76
2-V1/4(2)	140	464	33	329	378	1.75	3.99	0.27	5.3	4.62	0.83	0.84	0.81	0.81
C2	178	381	28	515	357	4.25	3.81	0.19	8.5	5.98	0.59	0.70	0.60	0.61
B-1	231	461	25	555	325	3.94	2.43	0.15	7.9	2.09	1.60	1.19	1.07	1.09
1a-V3/8(14)	140	495	23	329	357	1.64	3.99	0.27	4.9	3.75	0.85	1.12	0.96	0.97
IID-2(13)	178	306	38	602	526	2.99	2.47	0.24	6.0	5.62	0.73	0.62	0.65	0.64
R14	152	272	29	618	269	3.36	1.46	0.14	6.7	2.16	1.66	1.91	1.63	1.63
G5	178	381	26	515	454	2.5	3.81	1.05	5.0	5.83	0.58	0.86	0.71	0.72
S10-M-2.0-36-40-1	200	336	29	854	830	2.38	2.88	0.4	4.8	3.07	1.17	1.16	1.25	1.24
E5	178	381	17	515	343	2.5	3.81	1.26	5.0	3.82	0.72	1.45	1.05	1.10
C305DO(5)	150	315	33	361	355	3	2.61	0.24	6.0	2.28	1.68	1.90	1.58	1.56
B-360-7.4	180	340	38	798	1422	1.76	3.16	0.44	3.5	4.49	0.92	0.84	0.87	0.86
T32	152	254	28	618	269	3.6	4.16	0.83	7.2	7.55	0.47	0.75	0.64	0.67
IIC-2(12)	178	310	38	576	526	2.96	4.38	0.24	5.9	4.9	0.84	1.02	0.91	0.92
B-1.5-110	200	352	35	931	841	2.27	3.09	0.58	4.5	2.58	1.53	1.34	1.47	1.44
B-360-4.1	180	340	38	798	1392	1.76	3.16	0.15	3.5	4.01	1.03	0.95	0.98	0.98
360-1.18	200	336	37	947	728	1.79	2.88	1.18	3.6	2.78	1.46	1.32	1.32	1.27
D2-6	152	315	30	321	331	2.43	3.42	0.61	9.7	3.52	1.04	0.98	0.99	0.98
J3	178	381	30	515	343	2.5	3.81	0.42	5.0	6.3	0.58	0.76	0.65	0.67
T9	152	254	20	618	279	3.6	4.16	0.41	7.2	7.5	0.40	0.74	0.65	0.69
360-0.89	200	336	37	947	728	1.79	2.88	0.89	3.6	2.48	1.64	1.46	1.53	1.48
R28	152	254	31	618	269	3.6	4.16	0.83	7.2	4.63	0.80	1.21	1.03	1.07
B-80-058S	200	352	34	931	841	2.27	3.09	0.58	4.5	2.34	1.66	1.49	1.63	1.59
B-120-059	200	352	35	931	1061	2.27	3.09	0.59	4.5	2.69	1.47	1.23	1.38	1.34
C2H1(3-8)	152	311	22	404	352	2.27	2.72	0.82	8.3	3.86	0.81	0.98	0.91	0.92
Mean											0.98	1.08	1.01	1.01
Std dev											0.39	0.31	0.31	0.30

PETA ZONASI TSUNAMI INDONESIA

Theodore F. Najosan^[1], Ari Budiman^[2]

ABSTRAK

Kepulauan Indonesia berada pada daerah rawan gempa, dengan resiko gempa yang dapat menyebabkan tsunami dapat terjadi pada berbagai tempat di setiap pulau. Gempa bumi yang menyebabkan gelombang tsunami dapat menghancurkan kota-kota pada daerah pesisir pantai. Oleh karena itu peta rawan tsunami terus dikembangkan, untuk memberikan informasi mengenai tinggi rayapan tsunami untuk keperluan desain bangunan maupun instansi pemerintah di seluruh kepulauan Indonesia. Peta rawan tsunami berdasarkan kejadian gempa yang menyebabkan tsunami pada suatu wilayah, dan menghitung tinggi rayapan tsunami dengan menggunakan rumus Katyusuki Abe (1995). Peta rawan tsunami dibagi menjadi 5 zona, yaitu zona 0 dengan $\alpha = 0,00 - 0,29$, zona 1 dengan $\alpha = 0,30 - 0,49$, zona 2 dengan $\alpha = 0,50 - 0,69$, zona 3 dengan $\alpha = 0,70 - 0,89$ dan zona 4 dengan $\alpha = 0,90 - 1,10$.

Kata Kunci : Tsunami, Tinggi rayapan, Tinggi rayapan maksimum, Tinggi rayapan dasar, Tinggi rayapan dasar maksimum, Peta, Kefisien zona.

ABSTRACT

Indonesian archipelago is located on a very active seismic zone, in which tsunami earthquake can happen in many location of the island. This tsunami earthquake can destroy city and town on the coast line. This tragedy will destroy and killed thousand peoples in the area. Because of this, a tsunami risk map have been developed, which will inform designers and goverment officials concerning tsunami runups in Indonesia. The tsunami risk map is based on the tsunami earthquake occurrence in the area, and the empirical formula by Katyusuki Abe (1995) for runups. Tsunami risk map was devided into 5 zone, that was zone 0 with $\alpha = 0,00 - 0,29$, zone 1 with $\alpha = 0,30 - 0,49$, zone 2 with $\alpha = 0,50 - 0,69$, zone 3 with $\alpha = 0,70 - 0,89$ and for zone 4, $\alpha = 0,90 - 1,10$.

Keywords : Tsunami, Runups, Maximum runrups, Base runups, Maximum base runups, Map, Zone coefficient.

1. PENDAHULUAN

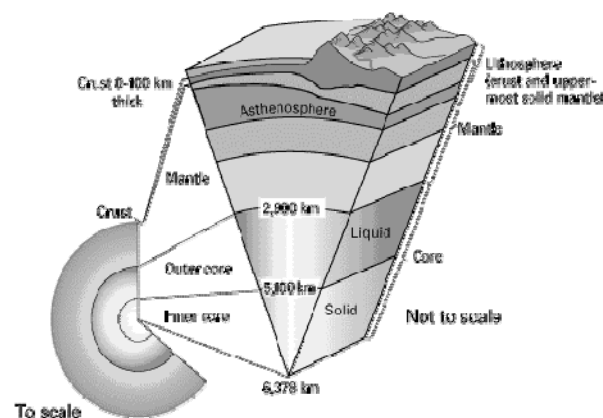
Indonesia sebagai negara kepulauan adalah kumpulan gugusan pulau yang secara geografis terletak antara 6° LU – 11° LS dan 95° BT – 140° BT. Indonesia merupakan daerah pertemuan antara tiga lempeng dunia yang aktif yaitu lempeng Eurasia, Pasifik dan Hindia-Australia yang menjadikan kepulauan Indonesia rawan terhadap terjadinya patahan yang dapat menyebabkan gempa bumi tektonik dan dapat diikuti bencana lainnya seperti longsor dan juga tsunami.

Dengan kondisi tersebut, kepulauan Indonesia sangat rawan terhadap terjadinya gempa bumi terutama daerah-daerah yang memiliki probabilitas gempa sangat tinggi baik itu gempa dangkal maupun gempa dalam. Salah satunya adalah gempa bumi dasar laut (*submarine*

earthquake) yang diikuti oleh terjadinya gelombang tsunami, yang dapat menyebabkan kehancuran pada kawasan pesisir pantai. Jumlah korban jiwa dan harta benda yang menjadi korban akibat gelombang tsunami adalah alasan bagi kita untuk mempersiapkan langkah-langkah dan antisipasi terhadap gelombang tsunami. Sistem peringatan tsunami dini (*tsunami warning system*) dan peta zonasi terhadap daerah rawan gempa laut dan tsunami (*tsunami zoning map*) adalah salah satu upaya untuk mengurangi jumlah korban.

2. ASPEK TEKTONISME DAN PENGETAHUAN TSUNAMI

Bumi memiliki jari-jari sekitar 6378 km. Secara umum, Bumi terdiri dari tiga lapisan utama yaitu *crust*, *mantle* dan *core*. *Crust* / Lithosfer adalah lapisan yang paling terluar dari bumi berbentuk padat dengan ketebalan lapisan mencapai 100 km. Lithosfer terdiri dari lapisan *sima* dan lapisan *sial*. Lapisan *sima* tersusun dari *silisium* dan *magnesium* dengan massa jenis 3.6 gr.cm^{-3} , sedangkan lapisan *sial* tersusun dari *silisium* dan *aluminium* dengan massa jenis 2.7 gr.cm^{-3} . Dibawah lapisan *Crust* / Lithosfer adalah lapisan *mantle*. Lapisan ini panas yang terdiri dari batuan semi padat yang memiliki ketebalan sekitar 2900 km. lapisan ini terdiri dari banyak besi, magnesium dan kalsium pada lapisan kerak. Lapisan ini memiliki temperatur panas sesuai dengan grafik hubungan antara panas dengan kedalaman yang digambarkan linear. Pada pusat Bumi kita ini terdapat lapisan *core* yang memiliki ketebalan dua kali lebih tebal dari lapisan *mantle*. Hal ini disebabkan karena komposisinya yang sangat padat dengan logam, seperti *iron*, *nickel* dan *alloy*. Lapisan ini terpisah menjadi dua bagian. Yang pertama adalah *liquid outhter core*, yang memiliki ketebalan sekitar 2200 km dan yang kedua adalah *solid inner core* yang memiliki ketebalan 1250 km. Bersamaan dengan berotasinya bumi, *liquid outhter core* melakukan perputaran juga yang membuat efek magnet Bumi.



Gambar 1. Struktur Lapisan Penyusun Bumi

2.1 Gempa Bumi

Menurut Aristoteles, gempa bumi mempunyai hubungan erat dengan empat unsur yang membangun bumi, yaitu api, hawa, air dan tanah. Ia menyatakan bahwa hawa yang terkurung di dalam tanah, jika mendapat jalan keluar akan menyebabkan gempa bumi.

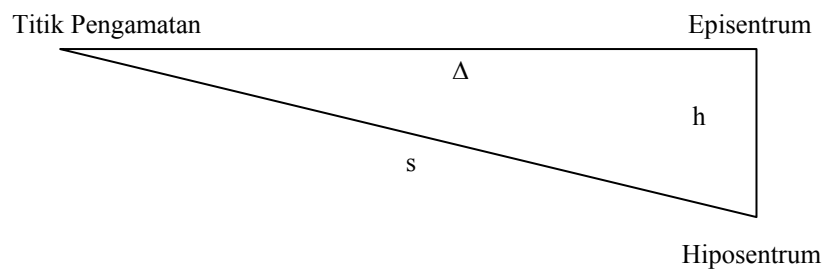
Gempa bumi menurut M.T. Zen didefinisikan sebagai gerakan tiba-tiba atau rentetan gerakan tiba-tiba dari tanah dan batuan yang bersifat *transient* atau sementara dan berasal dari suatu daerah terbatas yang kemudian menyebar ke segala arah karena dirambatkan oleh medium yang ada (lapisan bumi).

Katili (1966) mendefinisikan gempa sebagai suatu sentakan asli yang terjadi di bumi, bersumber dari dalam bumi yang kemudian merambat ke permukaan bumi.

Gelombang tersebut dapat dibedakan atas beberapa jenis :

1. Gelombang Badan (*body waves*).
2. Gelombang Permukaan (*surface waves*).

Parameter gempa adalah acuan nilai besaran dan letak kejadian suatu gempa. besaran gempa merupakan suatu ukuran kekuatan yang dihitung berdasarkan data dari alat perekam gempa atau seismograf. Selain itu, parameter gempa harus mampu mempresentasikan letak pusat gempa. Parameter gempa yang mempresentasikan lokasi pusat gempa (*hypocenter*) dan episentrum (*Epicenter*). Hiposentrum adalah “titik” dimana energi elastic dilepaskan dalam bentuk gelombang gempa sehingga menimbulkan getaran pada bola bumi. Dengan kata lain, hiposentrum adalah lokasi dari pusat terjadinya gempa.



Gambar 2. Ilustrasi lokasi Gempa

Model statistik yang paling sederhana untuk menguraikan rangkaian kejadian gempa adalah menggunakan model Gutenberg & Richter (Sudarmono, 1997) dengan penjelasan bahwa frekuensi kejadian gempa menurun secara eksponensial dengan meningkatnya besaran gempa dan dapat dinyatakan dalam Persamaan 1.

$$\text{Log}_{10}N_1(M_s) = a_1 - b.M_s \quad (1)$$

Dengan demikian maka frekuensi kejadian kumulatif tahunan $N_1(Ms)$ dan perioda ulang T dapat dinyatakan dengan Persamaan 2 dan Persamaan 3.

$$N_1(Ms) = 10^{a_1 - b \cdot Ms} \quad (2)$$

$$T = \frac{1}{N_1(Ms)} \quad (3)$$

dimana : $N_1(Ms)$ = Frekuensi kumulatif dengan besaran $\geq Ms$ per tahun
 a_1 = Konstanta tergantung lamanya pengamatan
 b = Konstanta tergantung sifat tektonik daerah
 T = Perioda ulang gempa (tahun)

Tabel 1. Skala Richter (Charles Richter, 1935)

MAGNITUDE	EXPLANATION
8	Great Earthquake
7 - 7.9	Major Earthquake
6 - 6.9	Destructive Earthquake
5 - 5.9	Damaging Earthquake
4 - 4.9	Minor Earthquake
3 - 3.9	Smallest Generally Felt
2 - 2.9	Some times felt

2.2 Tsunami

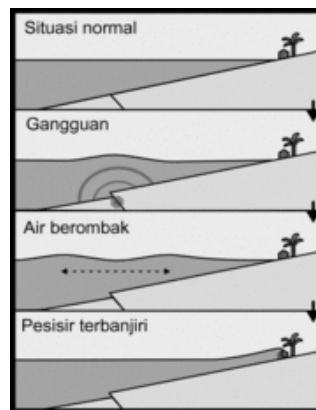
Fenomena tsunami pertama kali dilaporkan terjadi di Jepang. Bahkan istilah tsunami sendiri berasal dari bahasa Jepang. Tsunami berasal dari kata *tsu* yang berarti pelabuhan, dan *ami* yang artinya ombak (gelombang air).

Tsunami adalah suatu ombak yang terjadi setelah suatu gempa bumi, gempa laut, gunung berapi meletus, atau hantaman meteor di laut. Tenaga setiap tsunami adalah tetap, fungsi ketinggiannya dan kelajuannya. Dengan itu, apabila gelombang menghampiri pantai, ketinggiannya meningkat sementara kelajuannya menurun.

Tsunami dideskripsikan sebagai suatu gelombang laut dengan perioda panjang yang disebabkan oleh adanya gangguan impulsif yang terjadi di dasar laut. Gangguan impulsif pembangkit tsunami tersebut berasal dari terjadinya deformasi dasar laut secara tiba-tiba. Deformasi dasar laut tersebut diantaranya dapat diakibatkan oleh tiga sumber utama, yaitu :

1. Gempa dasar laut (*submarine earthquake*), seperti yang terjadi di Alaska tahun 1964.
2. Letusan gunung berapi di dasar laut (*submarine eruption*), seperti yang terjadi saat meletusnya gunung Krakatau tahun 1883.
3. Longsor di dasar laut (*submarine landslide*), seperti yang terjadi di Sagami Bay Jepang tahun 1933.

Tsunami memiliki karakteristik yang berbeda dengan gelombang pasang (*tide wave*) atau gelombang permukaan (*surface wave*) yang biasa dijumpai di pantai. Gelombang pasang disebabkan oleh gaya tarik bulan, sedangkan gelombang permukaan disebabkan oleh gaya seret angin di permukaan laut. Tsunami bersifat transient dan impulsif, artinya semakin melemah dengan bertambahnya waktu dan mempunyai umur sesaat. Hal ini berbeda dengan gelombang permukaan yang bersifat hampir kontinu dan berlangsung dalam waktu yang lama dengan periode gelombang pendek.



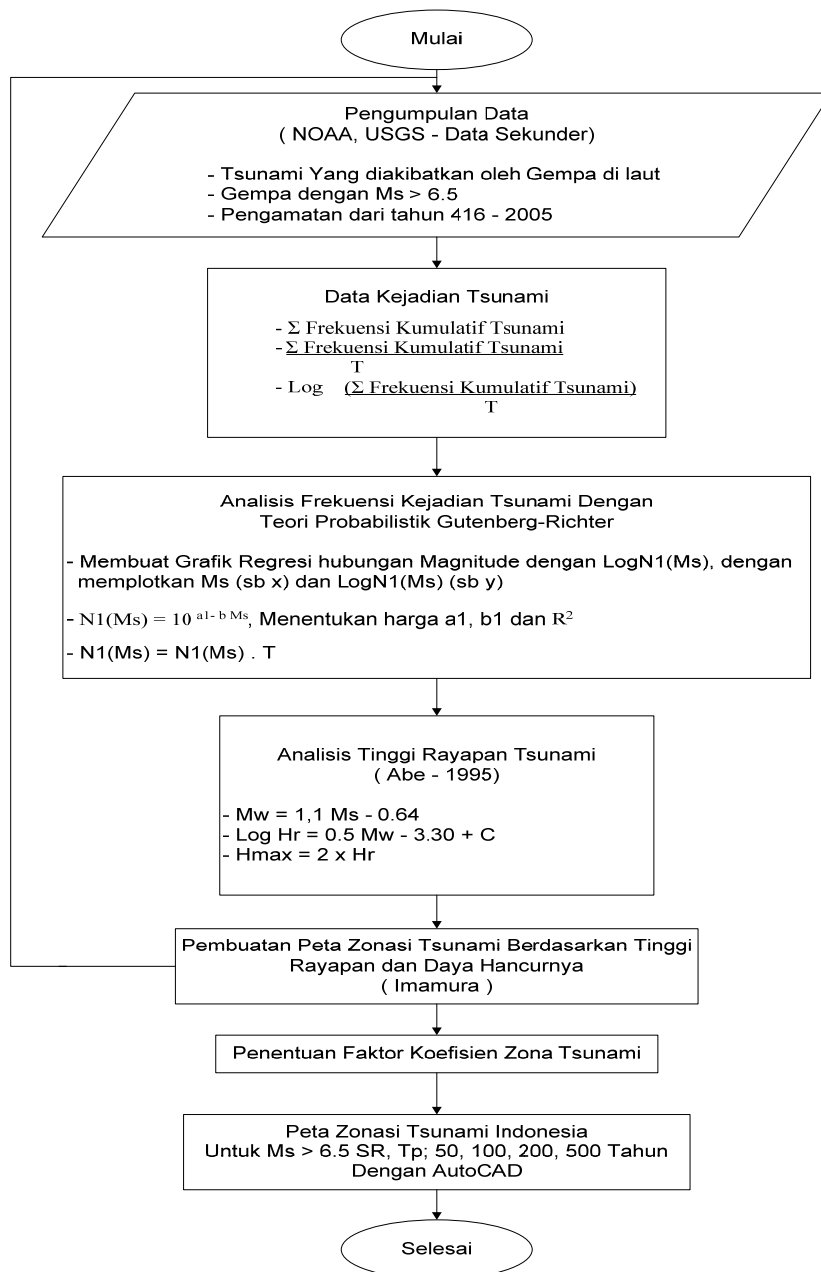
Gambar 3. Skema terjadinya tsunami akibat *submarine earthquake*

Tsunami tergolong sebagai jenis gelombang perairan dangkal (*shallow water wave*) karena mempunyai panjang gelombang 100 – 200 km yang sangat besar bila dibandingkan dengan kedalaman laut (maksimum 10 km). Oleh karena itu kecepatan rambat tsunami sangat bergantung pada kedalaman laut yang dilaluinya. Secara umum dapat dikatakan bahwa kecepatan rambat tsunami akan berkurang dengan berkurangnya kedalaman laut. Kecepatan rambat tsunami di pusatnya pada kedalaman dasar laut sekitar 7000 m dapat mencapai sekitar 900 km/jam. Kecepatan rambat tsunami ini akan jauh berkurang pada saat mencapai pantai, yakni menjadi sekitar 50 km/jam.

Karena terjadi penurunan kecepatan rambat pada saat tsunami merambat di tengah lautan ke pantai, maka akan terjadi penumpukan masa air pada saat tsunami mencapai pantai. Hal ini menyebabkan tinggi gelombang tsunami akan mengalami pembesaran pada saat mencapai pantai. Apabila di tengah lautan tinggi gelombang tsunami sekitar 1 – 2 m, maka saat mencapai pantai tinggi gelombang tsunami dapat mencapai puluhan meter, dan merayap sampai jauh dari garis pantai. Tinggi gelombang tsunami yang telah sampai ke darat disebut sebagai *run-up* atau rayapan.

3. LANGKAH PEMBUATAN PETA ZONASI TSUNAMI INDONESIA

Pada penyusunan dan pembuatan peta zonasi tsunami seharusnya memperhatikan beberapa hal lainnya. Antara lain tinggi rayapan dan daerah rendaman, topografi, morfologi pantai dan teknik kelautan. Namun, pada penyusunan peta zonasi tsunami ini, hanya berdasarkan besaran gempa saja. Selain itu peta zonasi ini hanya mewakili *local tsunami*.



Gambar 4. Bagan Alir Pembuatan Peta Zonasi Tsunami Indonesia

4. PENENTUAN TINGGI RAYAPAN TSUNAMI

Metoda menentukan tinggi rayapan tsunami dikembangkan oleh K.Abe (Abe, 1995) berdasarkan Persamaan 4.

$$\text{Log Hr} = 0.5M_w - 3.30 + C \quad (4)$$

dimana, Hr : Batas tinggi tsunami disekitar pusat gempa
 M_w : Magnitudo momen
 C : Konstanta

Dalam perhitungan tinggi rayapan tsunami dipakai data kejadian tsunami Indonesia yang diakibatkan oleh pergeseran lempeng tektonik yang diperoleh dari NOAA dan USGS. Data-data tersebut merupakan kejadian gempa yang menyebabkan tsunami yang terjadi diseluruh wilayah Indonesia dari tahun 416 hingga 2005.

Data kejadian gempa menginformasikan waktu (tanggal, bulan dan tahun), koordinat pusat gempa, besaran gempa dalam M_s (magnitude surface) serta hanya menggunakan data yang memiliki M_s ≥ 6,5.

Perhitungan tinggi rayapan menggunakan perioda ulang T = 50, 100, 200, 500 tahun sebagai asumsi perioda ulang untuk gempa tektonik yang menyebabkan gelombang tsunami.

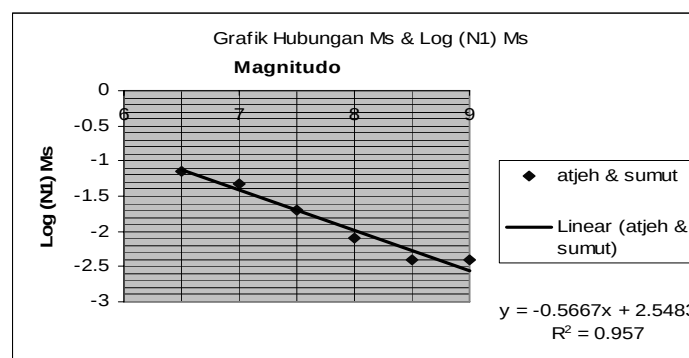
Proses analisis menggunakan teori kejadian kumulatif tahunan serta menggunakan metoda yang diciptakan K.Abe (1995). Sebagai contohnya, analisis telah dilakukan pada data gempa pantai barat Aceh dan Sumatra Utara

Tabel 2. Frekuensi Kumulatif Gempa daerah Aceh dan Sumatra Utara

Aceh-Sumatera	Thn	Kedalaman			Frekuensi Kumulatif Gempa Lebih Besar =					
		Min	Rata2	Maks	>6.5	>7.0	>7.5	>8.0	>8.5	>9
	1754				1.0					
	1837				1	1				
	1843				1	1				
	1852				1					
	1861				2	2				
	1885				1					
	1907				1	1	1			
	1935				1	1	1			
	1936				1	1				
	1941				1	1	1			
	1948				1					
	1949				1					
	1955				1	1				
	1964				1	1		1		
	1967				1	1	1			
	2002				1					

Tabel 2. (Sambungan).					
	2004			1	1
Σ				18.0	12
Σ/T				0.072	0.048
$\text{Log } (\Sigma/T) = \text{Log } (N_1) \text{ Ms}$				-1.144	-1.320
$T = 250\text{tahun}$				-1.701	-2.099
$M_{s\text{maks}} = 9,0$				-2.400	-2.400

Dari hasil analisis yang dilakukan pada Tabel 2, didapat nilai-nilai Log (N₁) Ms untuk setiap frekuensi kumulatif kejadian gempa yang menyebabkan tsunami. Kemudian dibuat grafik regresi hubungan antara Ms vs Log (N₁) Ms untuk mengetahui koefisien a₁, b dan R².



Gambar 5. Grafik Regresi Hubungan Antara Ms Dan Log (N₁) Ms

Dari Gambar 5 diatas diperoleh persamaan yaitu :

$$y = 2.5483 - 0.5667 x$$

Dimana a₁ = 2.5483, b = 0.5667, dan R² = 0.957

Analisis tinggi rayapan tsunami dihitung untuk perioda ulang T = 50, 100, 200 dan 500 tahun, dengan menggunakan persamaan (Abe) Log Hr = 0.5 Mw – 3.30.

Tabel 3. Hr dan Hm

T	Ms	Mw	Hr	Hm
50	7.49	7.60	3.18	6.36
100	8.03	8.19	6.23	12.45
200	8.56	8.77	12.20	24.40
500	9.26	9.00	15.85	31.70

Dari Tabel 3 kita dapat mengetahui Hr dan Hm. Hr merupakan *tsunami run-up heights*, sedangkan Hm adalah *limiting tsunami run-up heights* diperoleh dari nilai Mw = 9, yang merupakan batasan tertinggi pada proses analisis ini. Dengan menggunakan metoda ini,

analisis dilanjutkan untuk menghitung tinggi rayapan tsunami di seluruh wilayah Indonesia yang kemudian diplot pada Peta Zona Tsunami Indonesia sesuai dengan tinggi rayapan.

4.1 Analisis Koefisien Zona Tsunami (α)

Koefisien zona tsunami (α) yang ditampilkan pada peta yaitu faktor pengali untuk menentukan tinggi rayapan pada suatu zona, dengan mengalikan tinggi rayapan dasar dan koefisien zona tsunami. Tinggi rayapan dasar merupakan asumsi yang ditentukan sebagai nilai pembagi untuk menentukan nilai koefisien α , yaitu tinggi rayapan pada suatu daerah dibagi tinggi rayapan dasar sesuai perioda ulang. Pada pembuatan peta ini, tinggi rayapan daerah Aceh dan Sumatera Utara digunakan sebagai nilai pembagi.

Tabel 4. Tinggi Rayapan Dasar & Tinggi Rayapan Dasar Maksimum untuk setiap perioda ulang

Hbr	Hbm
3.2	6.4
6.3	12.6
12.3	24.6
16	32

Sebagai contohnya, diambil daerah DKI Jakarta dan Lampung untuk mengetahui koefisien tinggi rayapan dasar dan koefisien rayapan dasar maksimum. Untuk Daerah DKI Jakarta dan Lampung dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Daerah DKI Jakarta dan Lampung

T	Ms	Mw	Hr	Zr	Hm	Zm
50	6.83	6.87	1.36	0.42	2.72	0.42
100	7.49	7.60	3.17	0.50	6.34	0.50
200	8.16	8.34	7.38	0.60	14.77	0.60
500	9.04	9	15.85	0.99	31.70	0.99
				$\Sigma/4 =$ 0.63		$\Sigma/4 =$ 0.63

Dimana T adalah asumsi perioda ulang gempa (*tsunamigenic earthquake return period*), M dan Mw adalah besaran gempa, Hr adalah tinggi rayapan tsunami, Hm adalah tinggi rayapan maksimum tsunami, (Z_r dan Z_m) = α adalah koefisien pengali untuk masing – masing zona dan perioda ulang.

Untuk Wilayah Kepulauan Indonesia, zonasi yang dilakukan terdiri dari 4 zona yang merupakan daerah rawan terjadinya gelombang tsunami dan zona 0 dianggap mengalami *distance tsunami*.

Tabel 6. Koefisien Zona Tsunami (α) Untuk Wilayah Kepulauan Indonesia

Zona 0	0.00-0.29
Zona 1	0.30-0.49
Zona 2	0.50-0.69
Zona 3	0.70-0.89
Zona 4	0.90-1,10

Mengacu pada pembagian zona tsunami (Tabel 3), DKI Jakarta dan Lampung memiliki nilai $\Sigma Z_r / 4 = 0.63$ termasuk ke dalam zona 2.

Hasil perhitungan tinggi rayapan tsunami untuk setiap daerah diklasifikasikan berdasarkan tinggi rayapan yang kemudian tinggi rayapan tersebut akan digunakan untuk membuat zonasi tsunami.

4.2 Penggunaan Peta Zona Tsunami Indonesia

Cara menggunakan Peta Zona Tsunami Indonesia yaitu dengan menentukan zona/wilayah yang akan kita amati. Sebagai contohnya diambil daerah Pantai Selatan Pulau Jawa. Untuk wilayah ini, pada peta termasuk kedalam zona 1. Untuk perioda ulang 50 tahun, proses analisisnya sebagai berikut :

$$\begin{aligned} H_r &= H_{br} \times \alpha, \\ &= 3.2 \times 0.4 \\ &= 1.28 \text{ m.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H_m &= H_{bm} \times \alpha, \\ &= 6.4 \times 0.4 \\ &= 2.56 \text{ m.} \end{aligned}$$

5. KESIMPULAN

1. Kepulauan Indonesia dibagi kedalam 5 zona, yaitu :
 - a. Zona 0, dengan koefisien $\alpha = 0.00 - 0.029$
 - b. Zona 1, dengan koefisien $\alpha = 0.30 - 0.049$
 - c. Zona 2, dengan koefisien $\alpha = 0.50 - 0.069$
 - d. Zona 3, dengan koefisien $\alpha = 0.70 - 0.089$
 - e. Zona 4, dengan koefisien $\alpha = 0.90 - 1.10$
2. Jarak episentrum gempa sangat menentukan *Magnitud Surface* (M_s), dimana mempengaruhi tinggi rayapan tsunami (*tsunami runup heights*).

3. Daerah – daerah rawan tsunami di Indonesia, mayoritas terdapat di wilayah pantai barat Sumatera, Selatan Jawa dan Sulawesi bagian Utara Serta Barat Laut Irian Jaya, yang merupakan pengaruh dari pergerakan lempeng Eurasia, Pasifik dan Hindia Australia.

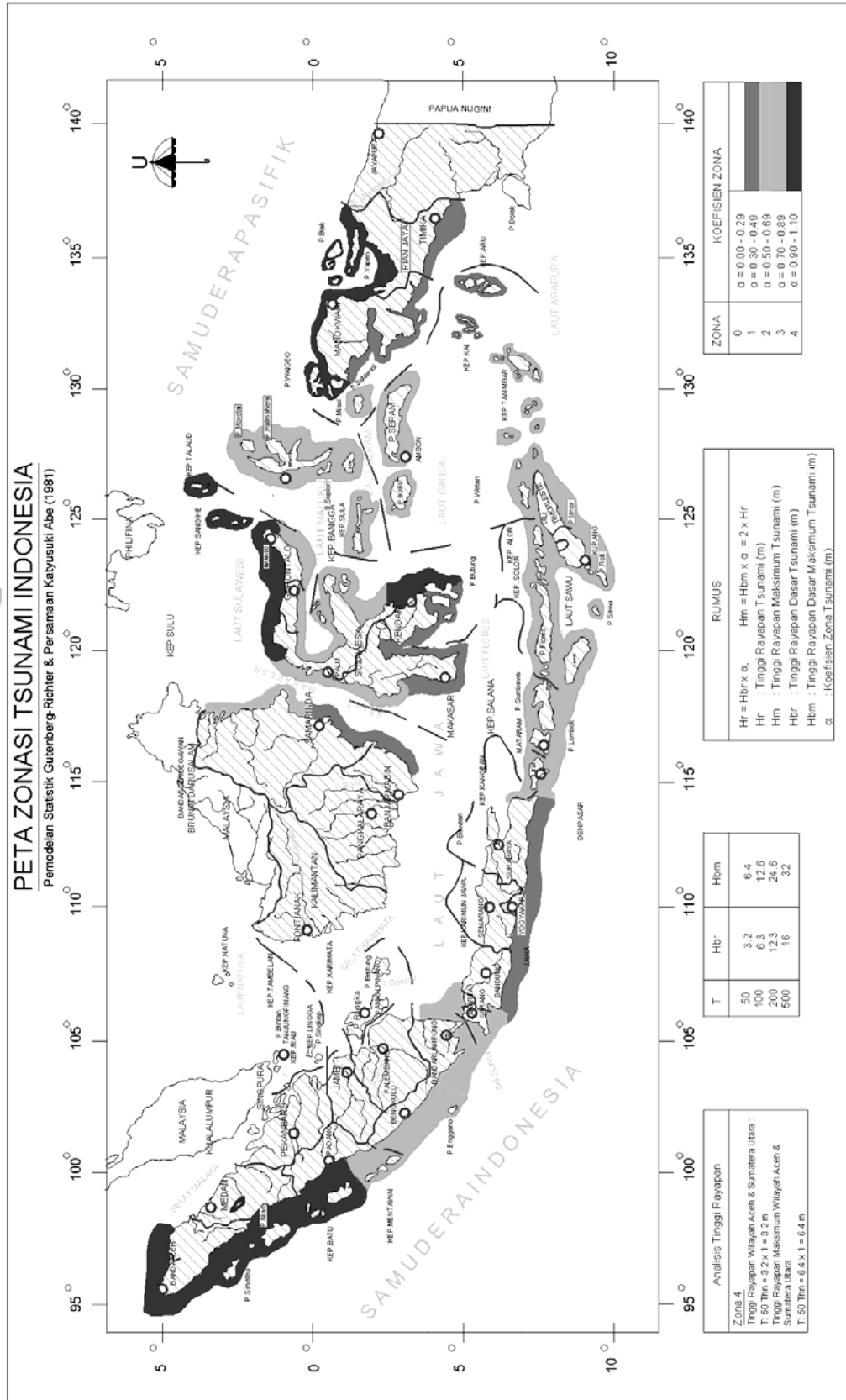
DAFTAR PUSTAKA

1. Young, K. (1975), *Geology the Paradox Earth and Man*, Houghton Mifflin Company, Boston.
2. Kramer, (1996), *Geotechnical Earthquake Engineering*.
3. Najoan, T.F. (2005), *Peta Zonasi Gempa dan Tsunami Untuk Sebagai Acuan Dasar Perencanaan Pembangunan*, Diskusi Mitigasi Pasca Bencana Gempa Bumi & Tsunami Aceh, UNPAR.
4. url : <http://www.NewSCIENTIST.com>.
5. url : <http://www.USGS.com>.
6. url : <http://www.WIKIPEDIA.com>.

^[1] **Theodore F. Najoan**, PUSLITBANG Sumber Daya Air

^[2] **Ari Budiman**, Alumni Teknik Sipil Universitas Kristen Maranatha

LAMPIRAN



SIMULASI NUMERIK BERBASIS KOMPUTER SEBAGAI SOLUSI PENCEGAH BAHAYA AKIBAT KEGAGALAN BANGUNAN^[1]

Wiryanto Dewobroto^[2], Sahari Besari^[3]

ABSTRAK

Kegagalan bangunan karena strukturnya gagal berfungsi dapat menimbulkan kerugian harta benda, bahkan korban jiwa. Oleh karena itu perlu diantisipasi secara cermat. Bangunan yang didesain terhadap beban-beban rencana dari *code-code* yang ada, belum dapat menjamin sepenuhnya bebas dari segala risiko kegagalan bangunan, karena penyebabnya kompleks. Salah satu strategi mengantisipasi risiko dapat dimulai dari tahap perencanaan. Langkah pertama yang penting adalah memperkirakan penyebab kegagalan sehingga dapat dibuat simulasi kejadiannya. Selain simulasi fisik (eksperimen) maka simulasi numerik berbasis komputer menjadi alternatif lain yang canggih dan relatif murah. Makalah ini akan membahas seberapa jauh teknologi komputer dapat dipakai sebagai simulasi terjadinya kegagalan bangunan sehingga solusi efektif pencegahannya dapat diupayakan.

Kata Kunci : kegagalan bangunan, *structural failure*, simulasi numerik berbasis komputer.

ABSTRACT

Building failure due to a malfunction of the structure will impact to the lost of property and even a life. So it is important to make anticipation. Even though buildings have been designed properly according to the design code, but it can not guarantee that building will be free of risk of the failure, because the sources of failure are complex. A strategy to anticipate the failure can be started from the design time. The first important step is a making prediction to the source of failure so that a proper simulation can be done. Beside the physical simulation (experimental), computer base numerical simulation can be used as a sophisticated and an inexpensive alternative. This paper will deal with the computer technology that can be used as simulation of failure in order to predict the weakness part of the structure and make a good solution in preventing the failure.

Keywords : building failure, structural failure, computer base numerical simulation.

1. PENDAHULUAN

Meskipun sarjana-sarjana di bidang rekayasa teknik sipil sudah banyak di Indonesia, tetapi masih saja dijumpai kegagalan bangunan yang menyebabkan kerugian harta benda atau maupun korban jiwa (KOMPAS Cyber Media). Dengan demikian pembahasan tentang kegagalan bangunan, mengapa, apa dan bagaimana cara mengatasinya masih relevan untuk dibahas.

2. DEFINISI KEGAGALAN BANGUNAN

Menyamakan persepsi tentang ‘kegagalan bangunan’ sangat penting, istilah tersebut dapat berbeda antara satu profesi dengan yang lainnya. Menurut UU No.18/1999 tentang

JASA KONSTRUKSI, Pasal 1: “Kegagalan bangunan adalah keadaan bangunan, yang setelah diserahkan oleh penyedia jasa kepada pengguna jasa, menjadi tidak berfungsi baik sebagian atau secara keseluruhan dan/atau tidak sesuai dengan ketentuan yang tercantum dalam kontrak kerja konstruksi atau pemanfaatannya yang menyimpang sebagai akibat kesalahan penyedia jasa dan/atau pengguna jasa;”. Sedangkan menurut Pasal 6: “Bidang usaha jasa konstruksi mencakup pekerjaan arsitektural dan/atau sipil dan/atau mekanikal dan/atau elektrik dan/atau tata lingkungan, masing-masing beserta kelengkapannya”.

Dari definisi di atas tentunya menarik untuk dipertanyakan, bagaimana dengan kasus kegagalan yang terjadi selama pelaksanaan konstruksi, karena hal tersebut sering terjadi dan diberitakan (KOMPAS Cyber Media), misalnya:

1. Ambruknya Ruko di Sunter Akibat Salah Metode Pelaksanaan.
2. Menara Masjid Al Bahar, Kojak, Jakarta Utara Ambruk, Empat Tewas.
3. Menara TV 7 di Kebon Jeruk Tumbang, 3 Tewas 15 Rumah Hancur.

Apakah kejadian-kejadian tersebut diluar pembahasan UU No.18 /1999 tentang kegagalan bangunan ?

Selanjutnya dalam konteks permasalahan ini akan diulas ‘kegagalan bangunan’ dari sudut pandang pekerjaan sipil. Dalam kaca mata profesi teknik sipil, fungsi utama bangunan adalah memikul beban-beban dan pengaruh lingkungan luar. Jadi bangunan yang gagal adalah jika tidak mampu memikul beban atau rusak akibat pengaruh lingkungan luar. Adapun tolok ukurnya adalah **kekuatan** dan **kekakuan** struktur, dan tidak terbatas setelah waktu penyerahan saja tetapi telah dimulai sejak pelaksanaan. Selanjutnya istilah lain yang sepadan adalah ‘kegagalan struktur’ atau *structural failure*. Meskipun hanya dipandang dari satu sudut saja tetapi memegang peran yang utama, jika bangunan dari segi kekuatan dan kekakuan tidak berfungsi maka fungsi lainnya pasti juga terganggu. Hanya kegagalan struktur yang berdampak besar terhadap keselamatan jiwa (dan juga kerugian harta benda).

Menurut Ensiklopedia Wikimedia (<http://en.wikipedia.org>), kegagalan struktur adalah kondisi dimana ada satu atau dua komponen struktur, atau bahkan struktur tersebut secara keseluruhan kehilangan kemampuan menahan beban yang dipikulnya. Umumnya dipicu oleh adanya beban berlebih yang menyebabkan kekuatan (*strength*) struktur mencapai kondisi batas sehingga menimbulkan fraktur atau lendutan yang besar. Para profesional menyebutnya sebagai keruntuhan struktur.

3. PENYEBAB dan MEKANISME KERUNTUHAN yang MUNGKIN TERJADI

Mengetahui penyebab keruntuhan struktur merupakan langkah awal yang efektif untuk mencegah kejadian tersebut. Dengan mengetahui penyebab keruntuhan struktur, maka dapat dilakukan persiapan yang lebih baik bagi bangunan lain yang sedang direncanakan agar tidak mengalami kejadian yang serupa. Para engineer dapat melakukan evaluasi sejauh mana risiko bahaya yang mungkin terjadi. Bilamana terlalu besar risikonya maka dapat saja bangunan tersebut tidak jadi dibangun.

Menurut Feld dan Carper (1997), struktur bangunan dapat mengalami kerusakan dini (kegagalan) akibat hal-hal berikut :

1. **Pemilihan lokasi yang berisiko:** daerah yang rawan gempa, banjir atau lereng perbukitan yang tidak stabil terhadap perubahan lingkungan, atau kondisi tanah yang labil atau ekspansif. Meskipun demikian selama risiko tersebut dapat diidentifikasi secara tepat, misalnya dengan dilakukan penyelidikan-penyelidikan khusus (tambah biaya) dan selanjutnya diperhitungkan secara baik pula maka tentunya hal tersebut tidak menjadi masalah.
2. **Ketentuan proyek yang tidak jelas:** akibat tidak terjadinya komunikasi yang baik antara pemilik dan pelaksana proyek maka dapat terjadi bahwa ekspektasi pemilik ternyata berbeda dengan yang dia harapkan pada awal mulanya, misal ruang terbuka bebas kolom, ternyata akibat kebutuhan struktur harus diberi kolom tambahan dan dalam hal ini pihak arsitek tidak keberatan, tetapi ternyata pihak pemilik selaku penyandang dana berkeberatan dan baru tahu setelah proyek selesai.
3. **Kesalahan perencanaan:** akibat gambar dan spesifikasi yang tidak lengkap, pemilihan sistem struktur yang rentan kerusakan atau detail yang rawan terhadap kerusakan jangka panjang (misal detail baja yang menangkap air hujan sehingga mudah terjadi korosi), atau karena perencanaannya sendiri tidak mempunyai kompetensi yang cukup (asal dapat menjalankan program komputer rekayasa dan langsung mengadopsi hasil, meskipun sebenarnya mengandung kesalahan) dsb.
4. **Kesalahan pelaksanaan:** misal pada penggalian tanah, kecelakaan alat, urutan pelaksanaan atau metode pelaksanaan yang tidak disesuaikan dengan perencanaannya, atau mengganti spesifikasi dengan sengaja untuk mendapatkan keuntungan yang tidak halal.
5. **Material yang tidak bermutu:** meskipun ada sampel material yang diuji dan telah memenuhi spesifikasi teknis yang ada tetapi dapat saja terjadi cacat yang tidak terdeteksi

dan baru ketahuan setelah ada kegagalan sehingga tidak bisa dikategorikan kesalahan perencanaan atau pelaksana.

6. **Kesalahan pemakaian:** Beban hidup yang tidak sesuai rencana dan fungsinya, misalnya dari hunian menjadi gudang sehingga beban hidupnya berlebihan. Bisa juga akibat kelalaian dalam perawatan, misal lapisan pelindung (cat) pada struktur baja rusak sehingga korosi.

Kecuali hal-hal di atas, akibat perkembangan situasi dunia yang begitu cepat maka perlu ditambahkan juga penyebab baru yang harus diperhitungkan, yaitu **beban tak terduga**: bencana alam yang sangat jarang terjadi (misal tsunami di Aceh), sabotase, serangan teroris (misal bom Bali, keruntuhan gedung WTC di New York), dsb. Meskipun secara ekonomis tidak layak merencanakan bangunan yang tahan terhadap beban tak terduga tersebut tetapi harus dapat dipastikan bahwa korban akibat kerusakan yang timbul seminimum mungkin.

Mekanisme keruntuhan struktur,

1. Tekuk atau *buckling* (lokal dan global)
2. *Creep* (rangkak)
3. Fatig
4. Fraktur , retak
5. *Yielding* (leleh, deformasi bertambah tanpa ada penambahan beban)
6. *Melting* (leleh, perubahan dari padat menjadi cair akibat suhu)
7. Korosi

Tiap mekanisme mempunyai perilaku yang berbeda, dan untuk terjadi keruntuhan tidak perlu semua mekanisme tersebut terjadi, jadi cukup satu saja dan terjadilah keruntuhan tersebut. Dari kesemua mekanisme runtuh tersebut, *yielding* merupakan kondisi dimulainya mekanisme keruntuhan yang sifatnya daktail sehingga diusahakan terjadi terlebih dahulu (jika terpaksa akan terjadi keruntuhan).

4. SIMULASI NUMERIK BERBASIS KOMPUTER

4.1 Pendahuluan

Dengan mengetahui penyebab dan mekanisme keruntuhan maka selanjutnya dapat dilakukan simulasi pada struktur rencana untuk mengetahui respons yang ditimbulkan, khususnya pada tegangan maupun lendutan yang terjadi. Dari situ dapat dipelajari apakah strukturnya masih mampu berfungsi baik atau telah mengalami keruntuhan, termasuk pula

bagian mana dari struktur yang paling lemah (komponen struktur yang rusak terlebih dahulu dan yang menjadi sebab keruntuhan secara keseluruhan).

Simulasi dapat dilakukan melalui model fisik maupun model numerik. Model fisik umumnya terbatas pada sampel uji yang relatif kecil sesuai dengan kapasitas alat uji, selain itu biayanya relatif mahal dibanding model numerik. Kalaupun akan dilaksanakan, biasanya dilakukan terlebih dahulu simulasi numerik, sedangkan simulasi fisik adalah terakhir sebagai verifikasi saja.

Akibat perkembangan teknologi komputer yang semakin canggih, baik dari segi hardware maupun software dan harganya pun relatif terjangkau, serta banyak bukti bahwa hasilnya mendekati model fisik (Noor dan McComb 1981) maka simulasi numerik berbasis komputer menjadi pilihan yang banyak dipakai (Willam dan Tanabe 2001, John et.al. 2005, Karim dan Hoo Fatt 2005, Yokihiro et.al. 2005, Wiryanto Dewobroto 2005a/b).

4.2 Program Komputer untuk Simulasi Keruntuhan

Analisa struktur dengan metode matriks kekakuan merupakan versi awal metode elemen hingga yang menjadi andalan untuk digunakan bersama dengan komputer. Dasar teori penyelesaian statik yang digunakan metode matriks kekakuan adalah persamaan keseimbangan struktur yang dapat ditulis dalam bentuk matriks sebagai berikut $[K]\{\delta\} = \{F\}$.

Formulasi persamaan keseimbangan memperlihatkan bahwa besarnya deformasi $\{\delta\}$ berbanding lurus dengan gaya $\{F\}$ yang diberikan, di mana matriks $[K]$ adalah sesuatu yang menghubungkan perpindahan (deformasi) dan beban. Lebih tepatnya lagi, matriks $[K]$ adalah besarnya gaya yang diperlukan untuk menghasilkan perpindahan (deformasi) satu satuan.

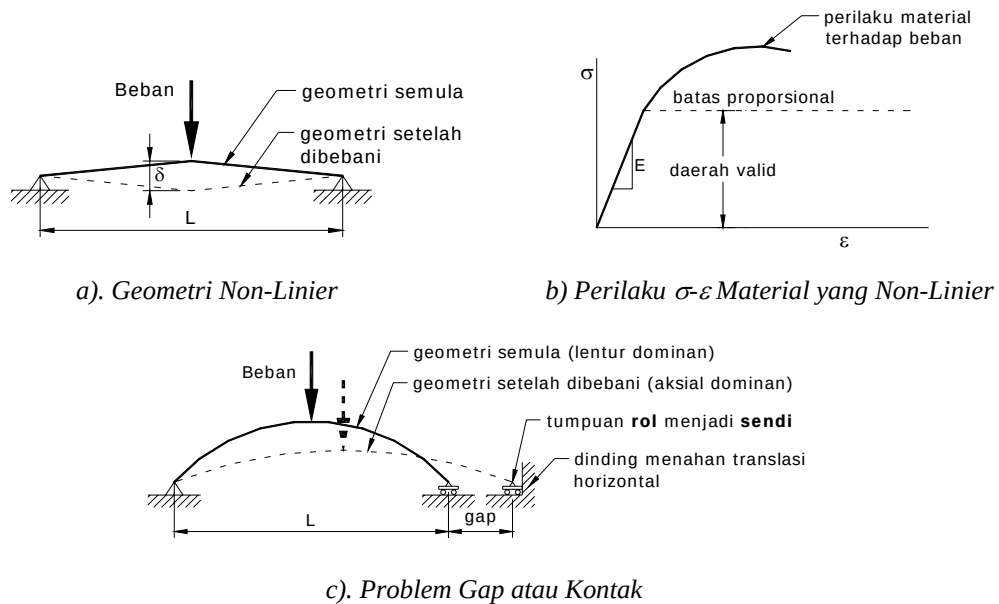
Kondisi di atas menunjukkan bahwa jenis analisa struktur yang digunakan adalah elastik linier hingga perlu diingat batasan-batasannya sebagai berikut :

1. Lendutan struktur relatif kecil sehingga dapat dianggap kondisi geometri struktur sebelum dan sesudah pembebanan tidak ada perubahan.
2. Material yang digunakan pada struktur masih berperilaku elastis-linier

Kedua kondisi tersebut merupakan prinsip yang dipakai juga untuk analisa struktur klasik untuk mengevaluasi gaya-gaya yang bekerja pada struktur sebagai dasar dalam perencanaan struktur pada umumnya, dan hanya valid jika digunakan untuk mengetahui perilaku struktur pada beban layan.

Sedangkan jika diperlukan simulasi keruntuhan bangunan maka diperlukan analisis yang mampu mencakup daerah in-elastis non-linier, yang sumber penyebabnya pada rekayasa mekanik ada tiga, yaitu :

- Geometri non-linier.
- Material non-linier.
- Problem kontak, sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Non-linier pada Rekayasa Mekanik (Cook et. al. 2002)

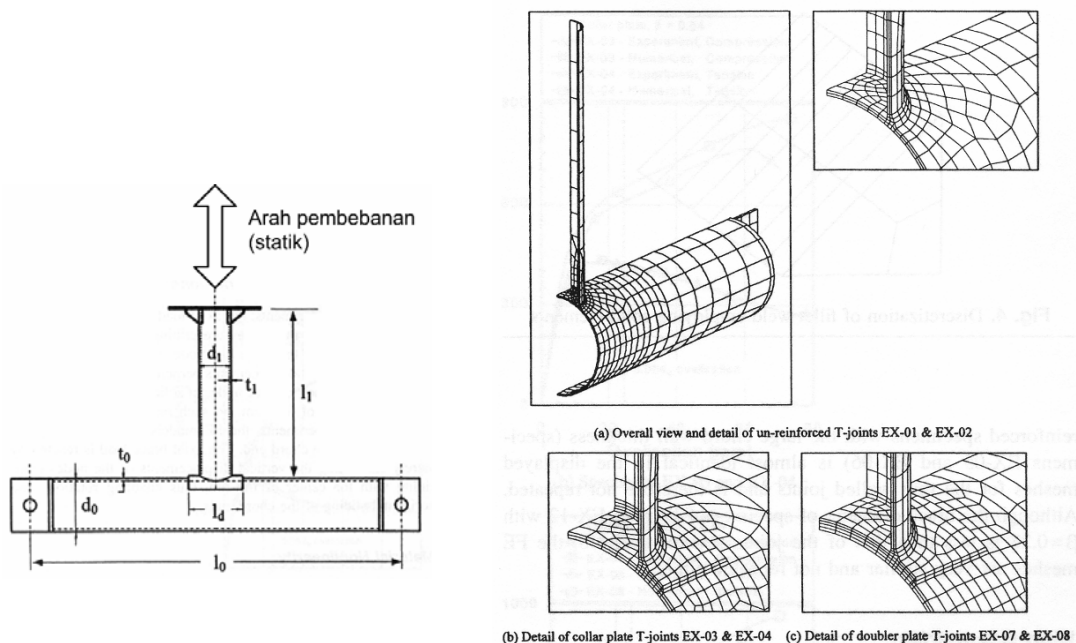
Masalah menjadi non-linier karena kekakuan $[K]$ dan atau beban $\{F\}$ merupakan fungsi dari lendutan $\{\delta\}$ atau deformasi. Jika persamaan $[K]\{\delta\} = \{F\}$ bersifat non-linier maka prinsip super-posisi tidak bisa diterapkan. Jadi hasilnya tidak bisa dilakukan proporsional terhadap beban atau super-posisi dengan kasus beban yang lain. Setiap kasus beban yang berbeda memerlukan analisis yang tersendiri, urutan pembebanan juga berpengaruh karena hasilnya bisa berbeda. Solusi persamaan non-linier memerlukan strategi-strategi penyelesaian khusus, karena tiap-tiap strategi penyelesaian hanya cocok untuk kasus-kasus non-linier tertentu, dengan kata lain tidak ada satu strategi ampuh yang dapat menyelesaikan semua persoalan non-linier (*general closed form solution*).

Kondisi di atas menyebabkan penyelesaian kasus non-linier memerlukan pemahaman yang mendalam dan hati-hati. Adapun hasilnya biasanya bukan merupakan satu angka tunggal tetapi bisa berupa kurva perilaku struktur (kurva gaya-lendutan) terhadap suatu tahapan beban yang diberikan.

4.3 Akurasi Simulasi Numerik dengan Realitas (Uji Fisik Laboratorium)

Simulasi numerik berbasis komputer memakai metode elemen hingga hasilnya semakin lama semakin mendekati hasil real di laboratorium, sehingga biaya yang diperlukan relatif lebih rendah apalagi dapat dengan mudah dilakukan uji parametrik.

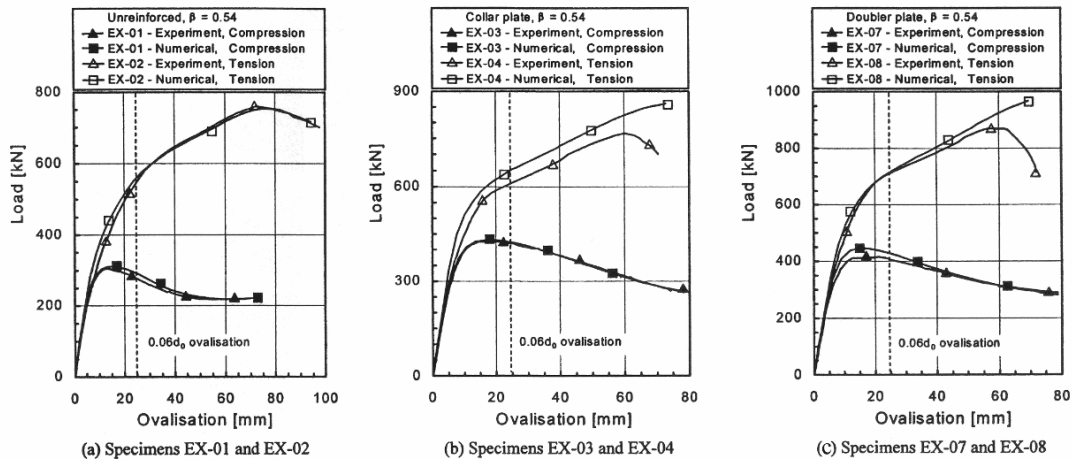
Adapun contoh terbaru yang berhasil didapatkan adalah percobaan uji sambungan baja pipa bentuk T di Laboratorium Rekayasa Struktur, NUS (Choo et. al. 2005) dan hasilnya kemudian dibandingkan dengan simulasi numerik berbasis komputer (van der Vegte et. al. 2005) memakai software ABAQUS (<http://www.hks.com>). Bentuk sambungan baja pipa bentuk T yang diuji ada beberapa macam dimana masing-masing ada yang diberi perkuatan dan ada yang apa adanya. Gambar 2 memperlihatkan bentuk sampel uji sambungan T dan model numeriknya.



Gambar 2. Bentuk Sambungan Pipa dan Model M.E.H (van der Vegte et. al. 2005)

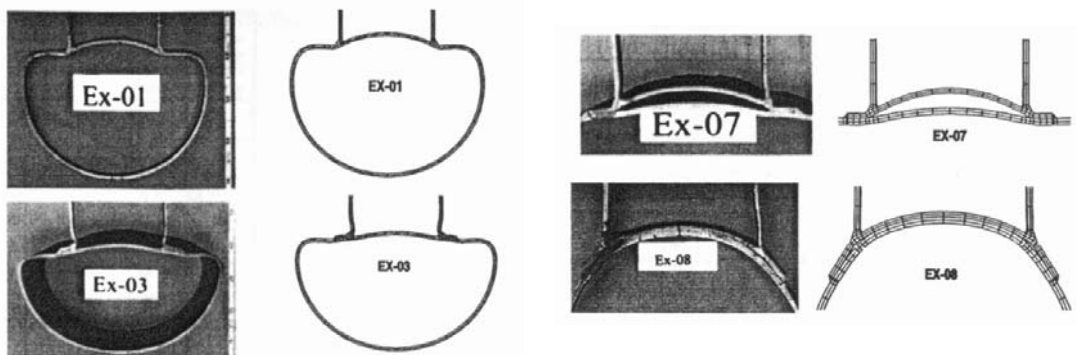
Perilaku keruntuhan sambungan digambarkan sebagai kurva hubungan beban-deformasi untuk masing-masing tipe sambungan diberikan dalam Gambar 3, dan terlihat bahwa hasil uji real dapat didekati dengan simulasi numerik. Walaupun ada perbedaan adalah pada daerah putus yang memang sifatnya tiba-tiba. Informasi yang diperoleh tersebut tentunya sudah mencukupi untuk dipakai sebagai data untuk analisis lanjutan untuk struktur yang memakai sambungan tipe tersebut, misalnya untuk analisa *push-over* (akan dijelaskan lebih lanjut).

Jika kurva beban-deformasi Gambar 3 menunjukkan perilaku sambungan secara global (menyeluruh) dan umumnya telah mencukupi digunakan sebagai data untuk memprediksi perilaku struktur secara keseluruhan, selain itu dapat juga diperoleh perkiraan deformasi lokal yang terjadi pada sambungan akibat pembebanan tersebut secara detail.



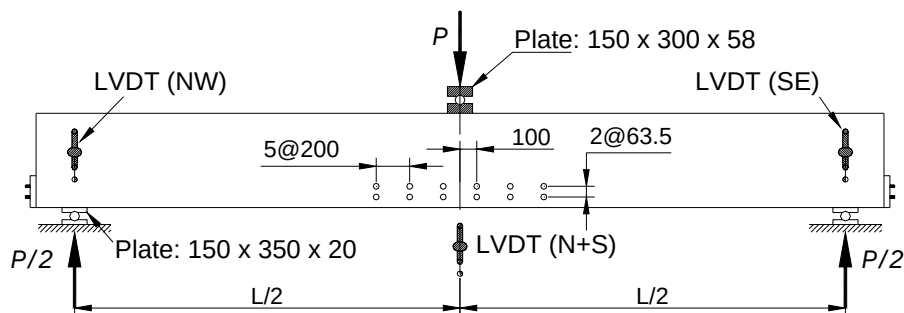
Gambar 3. Perbandingan Hasil Simulasi Numerik dan Real
(van der Vegte et. al. 2005)

Deformasi lokal pada sambungan tersebut ketika dibandingkan dengan hasil uji fisik ternyata memberi prediksi yang sangat mirip. Informasi visual seperti itu tentu saja sangat membantu memahami perilaku sambungan secara lebih mudah. Selain lebih murah (relatif) jika memakai simulasi numerik maka sampel uji yang diselidiki dapat dengan mudah dimodifikasi (parametrik) dan dibandingkan satu sama lain, dengan demikian dapat diperoleh hasil yang paling optimum, bahkan dapat diketahui detail-detail yang mungkin dapat membahayakan tanpa harus memakainya terlebih dahulu.



Gambar 4. Perbandingan Deformasi Sambungan Fisik dan Numerik
(van der Vegte et. al. 2005)

Untuk struktur beton, simulasi numerik dengan ‘metode elemen hingga’ berhasil dilakukan untuk menyelidiki perilaku keruntuhan balok beton bertulang yang berkategori balok tinggi / *deep-beam* (Wiryanto Dewobroto 2005b). Seperti diketahui bahwa balok tinggi, yaitu balok dengan $L/h < 5$ mempunyai perilaku yang berbeda dengan balok biasa sehingga memerlukan perencanaan khusus. Simulasi dilakukan terhadap data balok yang di uji di laboratorium Universitas Toronto (Vecchio-Shim 2004) yang konfigurasi dapat dilihat pada Gambar 5.

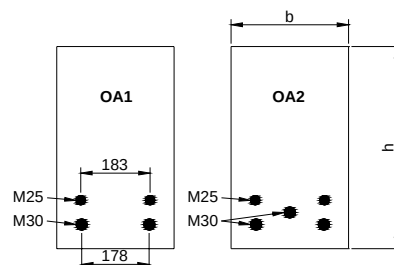


Gambar 5. Setup Balok Uji Universitas Toronto (Vecchio-Shim 2004)

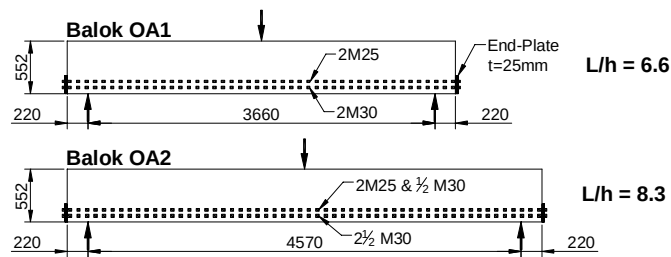
Ada dua balok yang diuji dalam seri OAi dibedakan dalam hal bentangnya dan juga jumlah tulangan yang digunakan, sebagaimana terlihat pada Tabel 1 dan Gambar 6 dan Gambar 7 untuk detailnya.

Tabel 1. Data Dimensi dan Penulangan Balok Bench-mark (Vecchio-Shim 2004)

Kode Balok	b (mm)	h (mm)	d (mm)	L (mm)	Span (mm)	Tulangan Bawah	Tulangan Atas	Sengkang
OA1	305	552	457	4100	3660	2M30, 2M25	-	-
OA2	305	552	457	5010	4570	3M30, 2M25	-	-

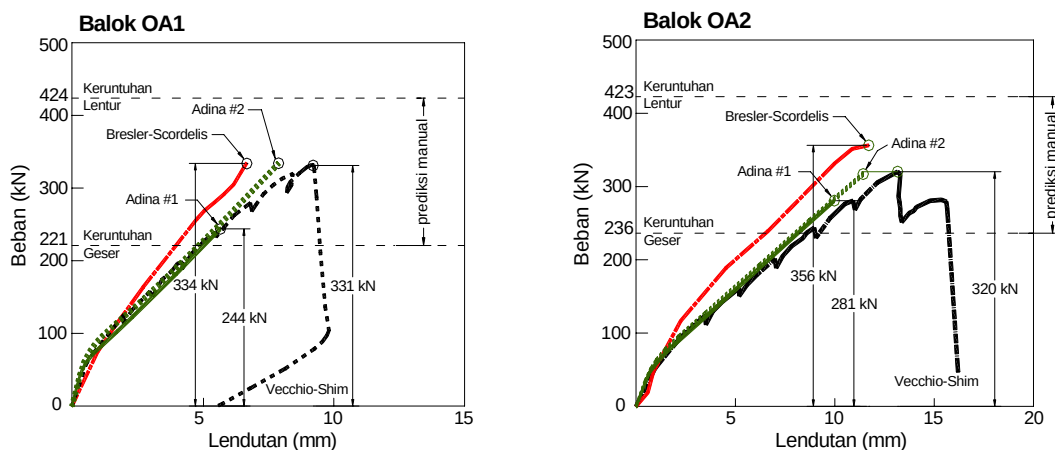


Gambar 6. Detail Balok Bench-mark (Vecchio-Shim 2004)



Gambar 7. Elevasi Samping Seri Balok OAi (Vecchio-Shim 2004)

Konfigurasi balok di atas sebenarnya mensimulasi konfigurasi balok yang pernah diuji oleh Bresler-Scordelis (1963) yang merupakan uji eksperimen balok beton bertulang yang hasilnya sering digunakan sebagai rujukan karena cukup lengkap untuk dapat dibandingkan. Simulasi memanfaatkan software ADINA (<http://www.adina.com>) memakai elemen khusus beton bertulang dalam model 2D, dan hasilnya dibandingkan dengan dua hasil eksperimen tersebut, lihat kurva pada Gambar 8.



Gambar 8. Perilaku Keruntuhan Balok OA1 dan OA2

(Wiryanto Dewobroto 2005b)

Simulasi numerik dengan ADINA menghasilkan perilaku keruntuhan balok (kurva beban-lendutan) yang terletak diantara kurva-kurva hasil eksperimen (Bresler-Scordelis 1963, Vecchio-Shim 2005), artinya simulasi numerik mendekati kondisi real (eksperimen di laboratorium). Jika dibandingkan dengan beban ultimate berdasarkan Code (garis horizontal putus-putus) maka terlihat penyimpangan yang cukup besar. Baik ditinjau sebagai keruntuhan lentur atau akibat keruntuhan geser.

4.4 Simulasi Gempa terhadap Bangunan Rencana

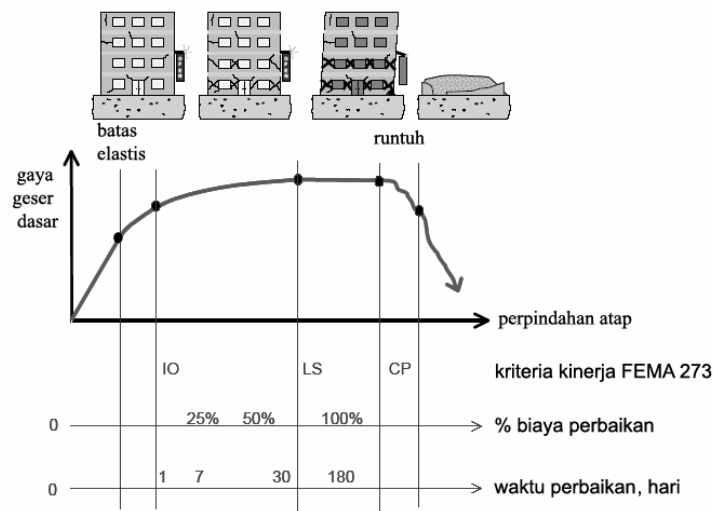
Bangunan pada daerah rawan gempa harus direncanakan mampu bertahan terhadap gempa. Trend perencanaan yang terkini yaitu *performance based seismic design*, yaitu dilakukan simulasi bangunan terhadap gempa dengan memanfaatkan teknik analisa non-linier berbasis komputer sehingga dapat dianalisis perilaku inelastis struktur dari berbagai macam intensitas gerakan tanah (gempa), dan dapat diketahui kinerjanya pada kondisi kritis. Dengan demikian dapat dilakukan tindakan bilamana tidak memenuhi persyaratan yang diperlukan. Metode tersebut mulai populer sejak diterbitkannya dokumen Vision 2000 (SEAOC 1995) dan NEHRP (BSSC 1995), yang didefinisikan sebagai strategi dalam perencanaan, pelaksanaan dan perawatan/perkuatan sedemikian agar bangunan mampu berkinerja pada suatu kondisi gempa yang ditetapkan, yang diukur dari besarnya kerusakan dan dampak perbaikan yang diperlukan.

Kriteria kinerja yang ditetapkan Vision 2000 dan NEHRP diperlihatkan pada Tabel 2 berikut :

Tabel 2. Kriteria Kinerja

Level Kinerja		Penjelasan
NEHRP	Vision 2000	
<i>Operational</i>	<i>Fully Functional</i>	Tak 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 dilakukan perbaikan.
<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.

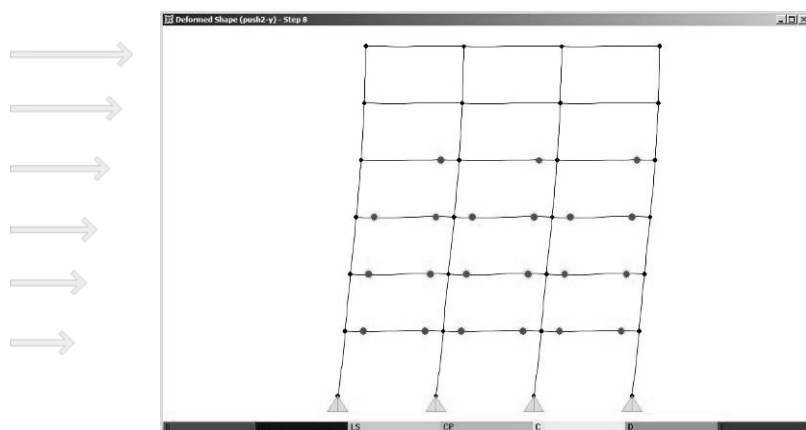
Gambaran mengenai *performance based seismic design* diperlihatkan pada ilustrasi pada Gambar 9.



Gambar 9. Ilustrasi Rekayasa Gempa Berbasis Kinerja (ATC 58)

Kurva pada Gambar 9 menunjukkan perilaku inelastis bangunan yang diperoleh dari analisa *push-over*, garis vertikal menunjukkan level-level yang dikalibrasikan dengan tingkat kerusakan yang terjadi (prediksi kerusakan fisik bangunan). Selanjutnya ditentukan target perpindahan δ_t yang ditentukan oleh macam gempa yang disimulasikan sehingga diketahui tingkat kerusakan yang terjadi (lihat Tabel 4.1).

Untuk melihat contoh implementasi perencanaan berbasis kinerja pada bangunan baja 6 lantai dengan konfigurasi lantai yang regular dan tipikal maka diperlihatkan hasil analisa *push-over* memakai SAP2000 (Wiryanto Dewobroto 2004) dan diperlihatkan kondisi bangunan setelah tahapan ke-5 dalam pemberian beban dorong lateral, maupun kondisi inelastis yang terjadi (Wiryanto Dewobroto 2005a).



Gambar 10. Kinerja Struktur Arah Sisi Pendek pada Step – 5 (Wiryanto Dewobroto 2005a)

Pushover Case push2-y : Pola Beban sesuai dengan Ragam Pertama arah X

Step	Displacement	Base Force	A-B	B-IO	IO-LS	LS-CP	CP-C	C-D	D-E	>E	TOTAL
0	0.0000	0.0000	552	0	0	0	0	0	0	0	552
1	0.1000	97916.2500	552	0	0	0	0	0	0	0	552
2	0.1676	164076.5313	551	1	0	0	0	0	0	0	552
3	0.2425	218407.0313	516	36	0	0	0	0	0	0	552
4	0.3227	244090.1719	478	69	5	0	0	0	0	0	552
5	0.4412	260768.8125	456	56	40	0	0	0	0	0	552
6	0.5482	273037.2188	435	57	57	3	0	0	0	0	552
7	0.6521	283156.9688	428	39	77	8	0	0	0	0	552
8	0.6653	284392.1875	427	38	77	7	0	3	0	0	552
9	0.6653	225480.8750	427	38	77	6	0	0	0	4	552
10	0.6773	230094.7031	427	38	77	4	0	2	0	4	552

Note: **step** adalah tahapan pemberian **beban lateral** dan tahap terbentuknya sendi plastik pada portal.

Simulasi gempa dengan analisa *push-over* pun tidak serta merta mampu memprediksi semua keruntuhan yang mungkin terjadi, keruntuhan yang dimaksud hanya tipe keruntuhan tertentu yang telah diprediksi terlebih dahulu seperti misalnya terjadinya sendi plastis pada elemen struktur. Tentu saja itu dapat terjadi jika elemen struktur yang digunakan telah memenuhi persyaratan-persyaratan tertentu. Bahkan untuk mendapatkan akurasi dari analisis, diperlukan verifikasi model bagian elemen yang diharapkan terjadi sendi plastis dengan hasil eksperimen di laboratorium.

Meskipun prediksi dengan analisa *push-over* dapat saja tidak tepat, tetapi ini merupakan suatu cara yang paling mendekati dalam memperkirakan besarnya kerusakan yang timbul terhadap gempa tertentu dan telah menjadi trend perencanaan bangunan tinggi pada saat ini (Budiono et. al. 2004).

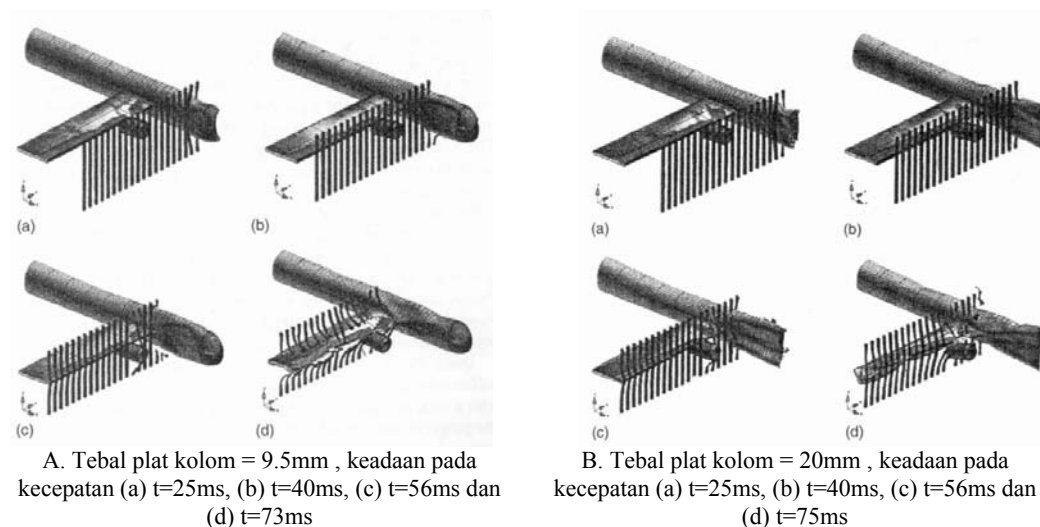
4.5 Simulasi terhadap Beban Tak Terduga – Kasus Tabrakan BOEING ke gedung WTC.

Sesuai dengan namanya yaitu *beban tak terduga* maka keberadaannya baru diketahui jika telah terjadi. Kalaupun dapat diperkirakan sebelumnya, umumnya hanya berupa wacana dan biasanya tidak diaplikasikan dalam perencanaan sebenarnya karena mengandung konsekuensi pada biaya. Kalau sudah terjadi maka perencanaan tentu mau tidak mau perlu untuk mempertimbangkan keberadaannya.

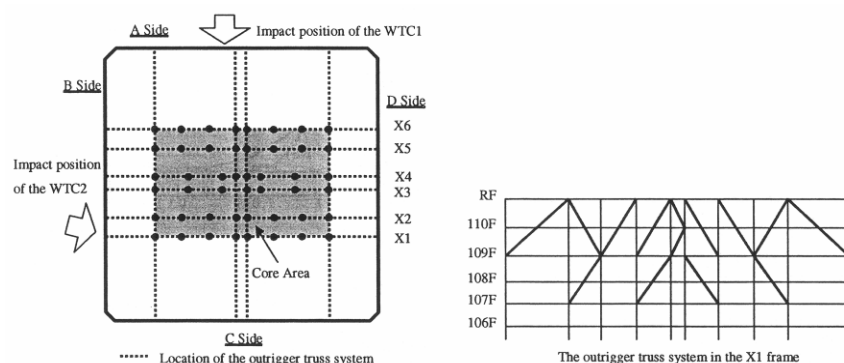
Pada prinsipnya selama dapat diketahui secara detail *beban tak terduga* tersebut maka dapat dilakukan simulasi untuk melihat pengaruhnya pada bangunan yang direncanakan untuk mengetahui dampak yang ditimbulkannya. Sebagai gambaran diperlihatkan dua hasil simulasi pada beban tak terduga berupa tabrakan pesawat BOEING pada gedung WTC New York. Siapa yang akan mengira bahwa ke dua gedung tinggi

tersebut akan ditabrak oleh dua pesawat besar sekaligus, sehingga tidak bisa disalahkan bila bangunan tersebut roboh karena tidak kuat menghadapi peristiwa tak terduga tersebut.

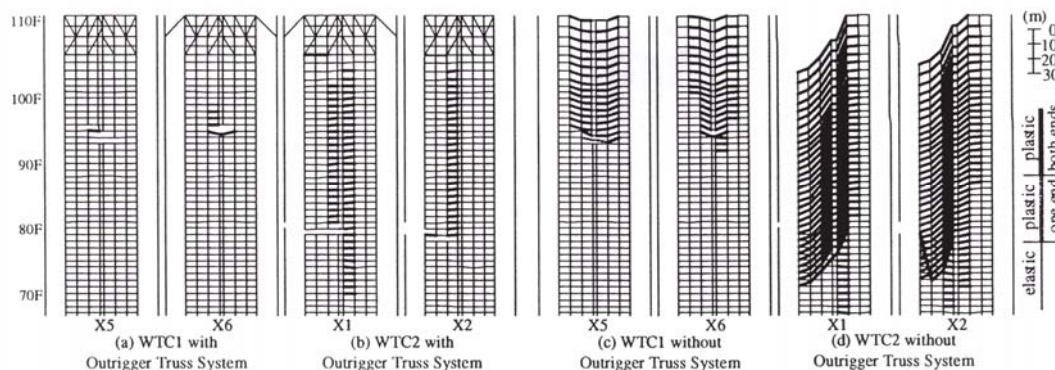
Simulasi Karim dan Hoo Fatt (2005) memakai *metoda elemen hingga* dengan *software* LS-DYNA3D menunjukkan bahwa bilamana kolom pada gedung WTC tersebut mempunyai ketebalan baja > 20 mm maka sayap pesawat tidak akan mampu mengoyak kolom luar bangunan (Gambar 11). Adapun ketebalan baja 9.5 mm pada kolom yang ada, berdasarkan simulasi yang dilakukan, terlihat bahwa sayap pesawat dapat memotong kolom luar sehingga badan pesawat dan tangki bahan bakar dapat masuk dan terbakar didalam gedung. Dari penyelidikan yang dilakukan dinyatakan bahwa kerusakan parah adalah akibat adanya kebakaran pada gedung WTC yang mengakibatkan baja strukturnya melemah, dan terjadilah keruntuhan fatal yang menewaskan ribuan orang tersebut.



Gambar 11. Simulasi Penetrasi Kolom Perimeter WTC dengan Pesawat BOEING (Karim dan Hoo Fatt 2005)



Gambar 12. Sistem Outrigger dan penempatannya (Yokihiro et. al. 2005)



Gambar 13. Pengaruh Sistem Struktur pada Keruntuhan WTC
(Yokihiro et. al. 2005)

Simulasi pada Gambar 11 sifatnya lokal/setempat untuk mengetahui kekuatan kolom perimeter terhadap efek penetrasi badan pesawat yang menabrak. Peneliti lain (Yokihiro et. al. 2005) juga melakukan simulasi memakai program LS-DYNA juga untuk melihat pengaruh tabrakan terhadap struktur keseluruhan. Dari simulasi yang dilakukan diperoleh informasi bahwa jika gedung WTC memakai suatu sabuk struktur yang disebut **sistem Outrigger** yang ditempatkan pada bagian puncak maka gedung tersebut tidak mengalami keruntuhan yang fatal seperti yang telah terjadi.

Dari simulasi yang dilakukan diyakini bila gedung WTC memakai sistem Outrigger maka tabrakan pada bagian tengah yang menyebabkan kerusakan lokal tidak menyebabkan kolom di atasnya jatuh kebawah karena dapat ditahan oleh sistem tersebut dan selanjutnya mendistribusikan ke bagian struktur yang lain seperti yang terlihat pada Gambar 13.

Pada saat perencanaan gedung WTC memang tidak didesain untuk mendapat beban tumbuk dari suatu pesawat sebesar BOEING karena umumnya hanya didesain terhadap beban horizontal akibat angin atau gempa yang memang umum terjadi. Jika dari semula sudah diperkirakan ada beban sebesar tersebut maka kiranya dapat dirancang suatu bangunan yang mampu bertahan terhadap kondisi tersebut. Jadi masalahnya adalah ketidak-tahuan bahwa beban sebesar itu memang akan terjadi.

5. PEMBAHASAN

Contoh yang disajikan dalam makalah ini hanya sebagian kecil dari makalah-makalah yang ada tentang simulasi keruntuhan struktur cara numerik berbasis komputer. Karena dipilih dari jurnal struktur yang kompeten dan terbaru maka merupakan *state of the art* tentang masalah tersebut .

Program komputer yang dapat digunakan untuk simulasi sudah cukup banyak tersedia. Adapun software yang dibahas adalah ABAQUS, ADINA, LS-DYNA dan SAP2000, sedangkan yang lainnya dapat dengan mudah di cari di internet, misalnya DIANA, ANSYS, NASTRAN, dan sebagainya.

Meskipun tool analisis sudah ada tetapi simulasi keruntuhan cara numerik berbasis komputer tidak serta merta menjadi sesuatu yang mudah. Hal-hal yang menjadi kendala sehingga membutuhkan s.d.m yang berkompeten untuk melakukannya adalah:

1. Skenario keruntuhan yang dianalisis harus diidentifikasi terlebih dahulu, meskipun demikian tidak ada jaminan bahwa skenario tersebut memang benar yang menjadi penyebab keruntuhan. Untuk itulah fungsi *forensik engineer* diperlukan, sampai akhirnya dapat ditentukan skenario sebenarnya sehingga dapat dilanjutkan siapa yang harus bertanggung jawab dengan kejadian tersebut.
2. Perlu disusun model matematik terlebih dahulu, dan agar berguna model harus mewakili kondisi real. Tahapan tersebut belum dapat secara otomatis dikerjakan komputer tetapi hanya dapat dibuat oleh engineer yang berkompeten. Selain itu model harus disesuaikan dengan kemampuan software komputer yang digunakan. Karena masalah non-linier relatif cukup kompleks sehingga tidak tiap program mempunyai option yang sama dalam menyelesaikannya.
3. Output simulasi numerik umumnya berupa kurva-kurva beban-lendutan dan sebagainya, dan berbeda dengan analisa struktur cara eleastik linier yang menyajikan suatu nilai tertentu.

6. KESIMPULAN

Telah tersedia tool-tool canggih untuk mempelajari perilaku struktur terhadap beban dari awal sampai keruntuhannya, sehingga dengan mempelajari mekanisme keruntuhan dapat dipilih langkah-langkah yang dapat mencegah bahaya yang timbul bilamana keruntuhan terjadi.

Masalah mengenai hal-hal (beban) tak terduga yang mengakibatkan kegagalan bangunan masih di luar kemampuan perencanaan. Dalam hal ini, peran serta media massa dalam menyebarluaskan info adanya kegagalan bangunan dan faktor-faktor penyebabnya menjadi acuan yang cukup penting.

DAFTAR PUSTAKA

1. Budiono, B., Rosalina, A., Sukamta, D. dan Mettawana, S. (2004), *Analisa PUSH-OVER pada Gedung 48 Lantai THE PEAK*, Seminar dan Pameran HAKI 2004: Excellence in Construction, Hotel Borobudur, 24-25 Agustus 2004.
2. BSSC. (1995), *FEMA 222 - NEHRP Recommended Provision for Seismic Regulations for New Building*, Washington, D.C.
3. Bresler, B. dan Scordelis A.C. (1963), *Shear strength of reinforced concrete beam*, J. Am. Concr. Inst., 60(1), 51-72.
4. Choo, Y.S., van der Vegte, G.J., Zettlemoyer, N., Li, B.H. dan Liew, J.Y.R. (2005), *Static Strength of T-Joints Reinforced with Doubler or Collar Plates. I: Experimental Investigations*, J. Struct. Eng., 131(1), 119 – 128
5. Cook, R.D., Malkus, D.S., Plesha, M.E. dan Witt, R.J. (2002), *Concept and Applications of Finite Element Analysis 4th Ed.*, John Wiley & Sons, Inc.
6. Feld, J. dan Carper K. (1997), *Construction Failure 2nd Ed.*, John Wiley & Sons, Inc., New York, dikutip dari Construction & Equipment Spotlight : Why do some structures fall down?, < <http://www.djc.com/special/const97/10023875.html> >, akses 2/3/2006
7. KOMPAS Cyber Media :
 - a. “Gempa di Iran Tewaskan Sedikitnya 2000 Orang - 26/12/2003”,
< <http://kompas.com/utama/news/0312/26/193709.htm> >
 - b. “Ambruknya Ruko di Sunter Akibat Salah Metode Pelaksanaan - 03/06/2004”,
< <http://kompas.com/metro/news/0406/03/111909.htm> >
 - c. “Kelebihan Beban, Jembatan Cipunagara Ambruk - 24/07/2004”,
< <http://kompas.com/utama/news/0407/24/232500.htm> >
 - d. “Korban Hotel Ambruk, Dua Tewas dan 15 Luka - 04/08/2004”,
< <http://kompas.com/utama/news/0408/04/222251.htm> >
 - e. “Masjid Ambruk, Empat Tewas - 22/12/2005”,
< <http://kompas.com/metro/news/0512/22/090734.htm> >
 - f. “Menara TV 7 Tumbang, Tiga Orang Tewas 15 Rumah Hancur - 23/01/2006”,
< <http://kompas.com/metro/news/0601/23/234312.htm> >
 - g. “Papan Reklame Tumbang, Jalan Gelora Macet - 23/01/2006”,
< <http://kompas.com/metro/news/0601/23/172719.htm> >
 - h. “Atap Balai Pameran Runtuh - Senin, 30 Januari 2006”,
< <http://kompas.com/kompas-cetak/0601/30/ln/2402274.htm> >

8. Karim, M.R. dan Hoo Fatt, M.S. (2005), *Impact of the Boeing 767 Aircraft into the World Trade Center*, J. Eng. Mech, 131(10), 1066-1072.
9. Noor, A.K. and H.G.McComb, Jr. (1981), *Computational methods in NONLINEAR STRUCTURAL and SOLID MECHANICS*, Papers presented at the Symposium on Computational Methods in Nonlinear Structural and Solid Mechanics – Held 6-8 October 1980, Washington DC, Pergamon Press Ltd.
10. SEAOC. (1995), *Vision 2000 - A Framework for Performance Based Earthquake Engineering*, Vol. 1, January, 1995.
11. Yukihiro Omika; Eiji Fukuzawa; Norihide Koshika; Hiroshi Morikawa dan Ryusuke Fukuda. (2005), *Structural Responses of World Trade Center under Aircraft Attacks*, J. Struct. Eng., 131(1), 6-15
12. Van der Vegte, G.J., Choo, Y.S., Liang, J.X, Zettlemoyer, N. dan Liew, J.Y.R. (2005), *Static Strength of T-Joints Reinforced with Doubler or Collar Plates. II: Numerical Simulations*, J. Struct. Eng., 131(1) , 129 – 138
13. Vecchio, F.J. dan Shim, W. (2004), *Experimental and Analytical Re-examination of Classic Concrete Beam Tests*, J. Struct. Eng., 130(3), 460 - 469
14. Dewobroto, W. (2004), *Aplikasi Rekayasa Konstruksi dengan SAP2000*, PT. Elex Media Komputindo, Jakarta
15. Dewobroto, W. (2005a), *Evaluasi Kinerja Struktur Baja Tahan Gempa dengan Analisa Pushover*, Presentasi dan Prosiding: Civil Engineering National Conference “Sustainability Construction & Structural Engineering Based on Professionalism”, Unika Soegijapranata, Semarang, 17-18 Juni 05.
16. Dewobroto, W. (2005b), *Simulasi Keruntuhan Balok Beton Bertulang Tanpa Sengkang dengan ADINA*, Prosiding Seminar Nasional “Rekayasa Material dan Konstruksi Beton 2005”, Jurusan Teknik Sipil ITENAS, 4 Juni 05 , Hotel Grand Aquilla, Bandung.

- [1] Disampaikan dalam Seminar “Kegagalan Bangunan, Solusi dan Pencegahan”, Universitas Pelita Harapan, 3 Mei 2006.
- [2] **Wiryanto Dewobroto**, Dosen Tetap Jurusan Teknik Sipil Universitas Pelita Harapan, Kandidat Doktor UNPAR.
- [3] **Sahari Besari**, Profesor Emeritus, ITB, Promotor pada Program Doktor Teknik Sipil UNPAR.

MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE WITH VARIOUS WATER-CEMENT RATIO AFTER HIGH TEMPERATURE EXPOSURE

M.I. Retno Susilorini^[1], Budi Eko Afrianto^[2], Ary Suryo Wibowo^[2]

ABSTRACT

Concrete building safety of fire is better than other building materials such as wood, plastic, and steel, because it is incombustible and emitting no toxic fumes during high temperature exposure. However, the deterioration of concrete because of high temperature exposure will reduce the concrete strength. Mechanical properties such as compressive strength and modulus of elasticity are absolutely corrupted during and after the heating process. This paper aims to investigate mechanical properties of concrete (especially compressive strength and modulus of elasticity) with various water-cement ratio after concrete suffered by high temperature exposure of 500°C.

This research conducted experimental method and analytical method. The experimental method produced concrete specimens with specifications: (1) specimen's dimension is 150 mm x 300 mm concrete cylinder; (2) compressive strength design, $f'_c = 22.5$ MPa; (3) water-cement ratio variation = 0.4, 0.5, and 0.6. All specimens are cured in water for 28 days. Some specimens were heated for 1 hour with high temperature of 500°C in huge furnace, and the others that become specimen-control were unheated. All specimens, heated and unheated, were evaluated by compressive test. Experimental data was analyzed to get compressive strength and modulus of elasticity values. The analytical method aims to calculate modulus of elasticity of concrete from some codes and to verify the experimental results. The modulus elasticity of concrete is calculated by 3 expressions: (1) SNI 03-2847-1992 (which is the same as ACI 318-99 section 8.5.1), (2) ACI 318-95 section 8.5.1, and (3) CEB-FIP Model Code 1990 Section 2.1.4.2.

The experimental and analytical results found that: (1) The unheated specimens with water-cement ratio of 0.4 have the greatest value of compressive strength, while the unheated specimens with water-cement ratio of 0.5 gets the greatest value of modulus of elasticity. The greatest value of compressive strength of heated specimens provided by specimens with water-cement ratio of 0.5, while the heated specimens with water-cement ratio of 0.4 gets the greatest value of modulus of elasticity, (2) All heated specimens lose their strength at high temperature of 500°C, (3) The analytical result shows that modulus of elasticity calculated by expression III has greater values compares to expression I and II, but there is only little difference value among those expressions, and (4) The variation of water-cement ratio of 0.5 becomes the optimum value.

Keywords : Concrete, Compressive strength, Modulus of elasticity, Water-cement ratio, High temperature.

ABSTRAK

Keamanan bangunan yang terbuat dari beton lebih baik dibandingkan bangunan yang terbuat dari material lain misalnya kayu, plastik, baja, karena beton merupakan bahan yang tidak mudah terbakar dan tidak mengandung racun selama terkena suhu tinggi. Meskipun demikian, kerusakan beton akibat mengalami suhu tinggi tersebut dapat mengurangi kekuatan beton. Sifat-sifat mekanis beton seperti kuat tekan dan modulus elastisitas dipastikan akan mengalami penurunan selama dan setelah proses pemanasan. Tulisan ini bertujuan untuk meneliti sifat-sifat mekanis beton setelah mengalami pemanasan suhu tinggi sebesar 500°C.

Penelitian ini mengimplementasikan metode eksperimental dan analitis. Metode eksperimental menggunakan benda uji dengan spesifikasi: (1) benda uji adalah silinder beton berdimensi 150 mm x 300 mm; (2) kuat tekan rencana, $f'_c = 22.5$ MPa; (3) variasi faktor air-semen = 0.4, 0.5, and 0.6.

Semua spesimen dirawat selama 28 hari. Sebagian spesimen dipanaskan selama 1 jam dengan suhu 500°C dalam tungku pembakaran yang besar, sementara sebagian yang lain berlaku sebagai spesimen kontrol yang tidak dipanaskan. Seluruh spesimen, dengan maupun tanpa pemanasan, dievaluasi melalui uji tekan. Data eksperimental dianalisis guna mendapatkan nilai kuat tekan dan modulus elastisitas. Metode analitis bertujuan untuk menghitung besarnya modulus elastisitas menurut beberapa peraturan serta melakukan verifikasi dengan hasil uji eksperimental. Modulus elastisitas beton dihitung berdasarkan beberapa persamaan yaitu: (1) SNI 03-2847-1992 (sama dengan ACI 318-99 sub-bab 8.5.1), (2) ACI 318-95 sub-bab 8.5.1, dan (3) CEB-FIP Model Code 1990 sub-bab 2.1.4.2.

Hasil uji eksperimental dan perhitungan analitis menunjukkan bahwa: (1) Spesimen tanpa pemanasan dengan faktor air-semen 0.4 memiliki nilai kuat tekan terbesar, sedangkan spesimen tanpa pemanasan dengan faktor air-semen 0.5 memiliki nilai modulus elastisitas terbesar. Nilai kuat tekan spesimen dengan pemanasan ditunjukkan oleh spesimen dengan faktor air-semen 0.5, sedangkan spesimen dengan pemanasan dengan faktor air-semen 0.4 menunjukkan nilai modulus elastisitas terbesar, (2) Semua spesimen yang mengalami pemanasan dengan suhu 500°C kehilangan kekuatannya, (3) Hasil perhitungan analitis menunjukkan bahwa nilai modulus elastisitas yang dihitung dengan persamaan III memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan persamaan I dan II, namun hanya terdapat sedikit saja selisih antara nilai-nilai tersebut, serta (4) Variasi faktor air-semen 0.5 merupakan nilai optimal.

Kata kunci : Beton, Kuat tekan, Modulus elastisitas, Faktor air-semen, Suhu tinggi.

1. INTRODUCTION

Concrete is used widely as an engineering material around the world. The wide application of concrete basically supported by 3 reasons (Mehta and Monteiro, 1993): (1) concrete is water-resistant material, (2) concrete is easy to be shaped and formed, and (3) concrete is cheap and readily available material on the job. According to the advantage and widely used of concrete, it can be understood that safety and durability of concrete becomes a great consideration until nowadays. Concrete building safety of fire is better than other building materials such as wood, plastic, and steel, because it is incombustible and emitting no toxic fumes during high temperature exposure (Mehta and Monteiro, 1993; Neville, 1999). However, the deterioration of concrete because of high temperature exposure will reduce the concrete strength. Therefore, degradation of concrete's mechanical properties after high temperature exposure were reviewed by some researchers (Shetty, 1982; Neville, 1999).

The strength of concrete decreasing in high temperature exposure becomes an important consideration in designing concrete structures. Mechanical properties such as compressive strength and modulus of elasticity are absolutely corrupted during and after the heating process. It should be noted that concrete consists of multi phases: cement paste phase and aggregate phase, and also transition zone phase (Mehta and Monteiro, 1993). Those multi phases are very much influenced by heating process and getting fragile, even failure or collapse after high temperature exposure.

Mechanical properties of concrete performance should become a fundamental factor in concrete structures design. Therefore, this paper aims to investigate the mechanical properties of concrete (especially compressive strength and modulus of elasticity) with various water-cement ratio after concrete suffered by high temperature exposure of 500°C.

2. METHODOLOGY OF RESEARCH

This research conducted by 2 methods of research which are experimental method and analytical methods. The experimental method were producing of concrete specimens with specifications: (1) specimen's dimension is 150 mm x 300 mm concrete cylinder; (2) compressive strength design, $f'_c = 22.5$ MPa; (3) water-cement ratio variations were 0.4, 0.5, and 0.6. All specimens were cured in the water both for 28 days. Some specimens were heated for 1 hour with high temperature of 500°C in huge furnace, and the others for specimen-control were unheated. All specimens, heated and unheated, were evaluated using compressive test. Experimental data was analyzed to obtain compressive strength and modulus of elasticity values.

The analytical method aims to calculate the modulus of elasticity of concrete from some codes and to verify the experimental results. There are some expressions for modulus of elasticity of concrete established by some codes, for examples SNI code, ACI code, and CEB-FIP code. In this paper, modulus elasticity of concrete is calculated by 3 expressions. The expressions are SNI 03-2847-1992 (which is the same as ACI 318-99 section 8.5.1) as defined by equation (1), ACI 318-95 section 8.5.1 as defined by equation (2), and CEB-FIP Model Code 1990 Section 2.1.4.2 as defined by equation (3).

According to SNI 03-2847-1992 (ACI 318-99 section 8.5.1), modulus elasticity of concrete is expressed by:

$$E_c = W_c^{1.5} 0.043 \sqrt{f'_c} \quad (1)$$

According to ACI 318-95 section 8.5.1, modulus elasticity of concrete is expressed by:

$$E_c = 33 W_c^{1.5} \sqrt{f'_c} \quad (2)$$

According to CEB-FIP Model Code 1990 Section 2.1.4.2, modulus elasticity of concrete is expressed by:

$$E_c = 2.15 \times 10^4 \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{1/3} \quad (3)$$

where: f'_c = compressive strength of concrete (MPa)
 P = maximum load (N)
 A = specimen section area (mm²)

E_c	= modulus of elasticity of concrete at 28 days (MPa)
W_c	= content weight (kg/m^3)
f_{cm}	= average compressive strength at 28 days (MPa)

3. LITERATURE'S REVIEW

3.1 Compressive Strength and Modulus Elasticity of Concrete

Compressive strength is the most important property of concrete that is widely used to determine whether qualitative or quantitative of other hardened concrete properties (Shetty, 1982; Neville, 1999). The failure of concrete under compressive load is complicated because of it suffers a mixture of crushing and shear failure (Shetty, 1982). Resisting the failure phenomenon, concrete generates cohesion and internal friction. Those cohesion and internal friction is engaged to one or more parameters such as water-cement ratio, air entrainment, cement type, mixing water, curing condition, and testing parameters (Mehta and Monteiro, 1993).

Among those parameters mentioned above, water-cement ratio may take an important role because it affects the porosity between concrete phases (Mehta and Monteiro, 1993). The weakening of matrix caused by increasing porosity and water-cement ratio will decrease the strength of concrete. It should be noticed that the strength of concrete depends upon the strength of cement paste. Shetty (1982) emphasized that the strength of paste increases with cement content and decreases with air and water content.

Another concrete property that it must be taken into account is modulus of elasticity. Modulus of elasticity is a measure of concrete stiffness (Carino, et. al, 1994). It is also noted by Tomosawa and Noguchi (2006) that modulus of elasticity of concrete is a fundamental factor in determining the deformation of building and its members, especially the design of member that is subjected to flexure. The modulus elasticity is static modulus elasticity that is generally used to distinct the dynamic modulus elasticity. Dynamic modulus of elasticity is characterized by a very small instantaneous strain given by initial tangent modulus (Mehta and Monteiro, 1993). Static modulus elasticity of concrete is defined by the slope of stress-strain curve for concrete under uniaxial loading. According to Mehta and Monteiro (1993), there are 3 methods for computing the modulus elasticity: (1) tangent modulus, (2) secant modulus, and (3) chord modulus. The tangent modulus is given by a line drawn tangent to stress-strain curve at any point on the curve, while the secant modulus is drawn from the origin to a point corresponding to a 40% stress of failure load, and the chord modulus is drawn between two points on the stress-strain curve. A standard test method for

measurement of the modulus elasticity of concrete and Poisson's ratio is given by ASTM C 469.

3.2 Concrete Performance Due to High Temperature Exposure

The advantage of concrete application compares to steel as building material is its fire resistance (Kützing, 2006). Concrete is generally used for encasing steel as fire protection (Shetty, 1982). Obviously, the structural capacity of concrete will decrease under high temperature exposure but resists the collapse until 3 hours (Kützing, 2006).

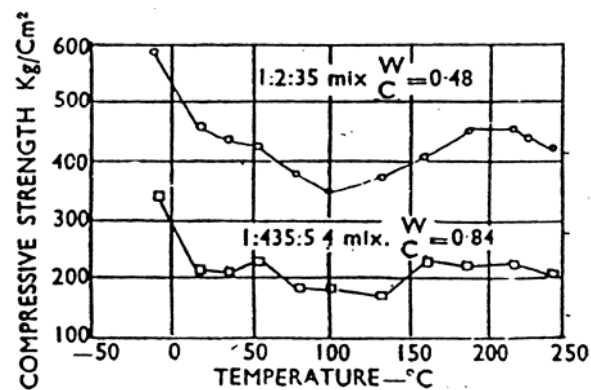
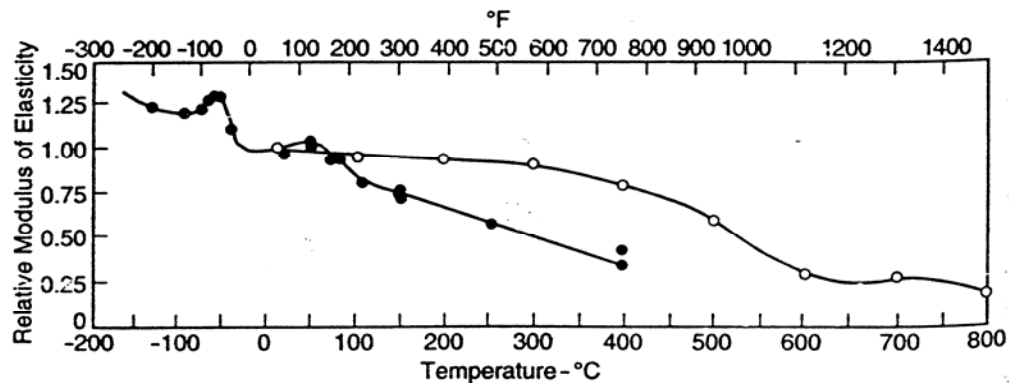


Figure 1. Compressive strength of concrete after various temperatures heating (Shetty, 1982)

Mechanical concrete properties are affected significantly by thermal exposure (Pan and Carino, 2006). Abrams (1971, cited in Neville, 1999) investigated that siliceous aggregate concrete will lose its strength at temperature above 430°C (810°F) greater than concrete with limestone or lightweight aggregate. This difference will be vanished when the temperature reaches about 800°C (1470°F). Figure 1 describes the effect of various temperatures on the compressive strength of concrete with 2 series of water-cement ratio variation (Shetty, 1982). It is shown by Figure 1 that the bigger value of water-cement ratio, the bigger decrease of compressive strength will be. Pan and Carino (2006) found that concrete lose its compressive strength 10-20% when heated by 300°C and 60-75% when heated by 600°C, and so does the modulus of elasticity.

High temperature exposure will also give strong influence to modulus of elasticity of concrete (Neville, 1999). While temperature ranged by 50°C - 800°C (120°F - 1470°F), water can be expelled from concrete, emerges a progressive decrease of modulus of elasticity of concrete. It is also emphasized by Jumppanen (1989) that temperature of 800°C is the starting point for modulus of elasticity of concrete decrease. The influence of temperature on

modulus of elasticity of concrete is described by Figure 2 below. This Figure 2 is based on Marechal (1972, cited in Neville) and also Castillo and Durani (1990, cited in Neville, 1999).



Note:

- = reference from Castillo-Durani (1990)
- = reference from Marechal (1972)

Figure 2. The influence of temperature on modulus of elasticity of concrete based on Marechal and Castillo-Durani (Neville, 1999)

Sumardi (2000) noted that chemical reaction will be introduced when concrete is under high temperature exposure. When temperature ranged by 100°C - 500°C, water evaporates from the concrete pores. Dehydration of Portlandite, Ca(OH)_2 change to CaO occurs when temperature reaches 400°C - 600°C. Decomposition of C-S-H (cement hydrate compound) to become its oxides emerges in temperature range of 600°C - 900°C. Finally, when the temperature exceeds 900°C, decomposition of cement hydrate compound and minerals occurs and forms a new ceramic chain.

The color change of concrete made with siliceous or limestone aggregate after high temperature performance has been reviewed by Zoldners (1960, cited in Neville, 1999) few decades ago. While the temperature ranged by 300°C - 600°C, the concrete color is pink or red, then goes into grey up to 900°C, and buff above 900°C.

4. RESULT AND DISCUSSION

Experimental results described in Table 1 and Table 2, and also Figure 3.a and Figure 3.b. Table 1 and Figure 3.a show that unheated specimens with water-cement ratio of 0.4 have the greatest value of compressive strength compared to water-cement ratio of 0.5 and 0.6. The unheated specimens with water-cement ratio of 0.5 have the greatest value of modulus of elasticity as shown in Table 2 and Figure 3.b. The greatest value of compressive strength of heated specimens provided by specimens with water-cement ratio of 0.5 compared to water-cement ratio of 0.4 and 0.6 as shown by Table 1 and Figure 3.a. The

heated specimens with water-cement ratio of 0.4 have the greatest value of modulus of elasticity as shown in Table 2 and Figure 3.b.

The compressive strength of heated specimens decrease from unheated specimens, 19.09% for specimens with water-cement ratio of 0.4, 3.02% for specimens with water-cement ratio of 0.5, and 24.15% for specimens with water-cement ratio of 0.6. The modulus of elasticity of heated specimens decrease from unheated specimens, 20.79% for specimens with water-cement ratio of 0.4, 45.18% for specimens with water-cement ratio of 0.5, and 11.79% for specimens with water-cement ratio of 0.6.

The analytical result of modulus of elasticity is shown in Table 3 which verifies the experimental result successfully. The experimental results of compressive strength and content weight become input data for the calculation. Modulus of elasticity calculated by expression III has greater values compares to expression I and II, but there is only little difference value among those expressions.

It is clearly shown by the experimental results that all heated specimens lose their strength at high temperature of 500°C. There are micro cracks along the specimen's surface caused by water evaporating from the concrete pores (Sumardi, 2000). The concrete porosity will increase and dehydration of Portlandite, Ca(OH)_2 change to CaO was occurred.

The variation of water-cement ratio of 0.5 becomes the optimum value because of some reasons. It has the greatest value of compressive strength, before and after heated. It also has greater value of modulus of elasticity before high temperature exposure and reducing its value in small value after heated. Analytical result confirmed that variation of water-cement ratio of 0.5 has the closest value to experimental result.

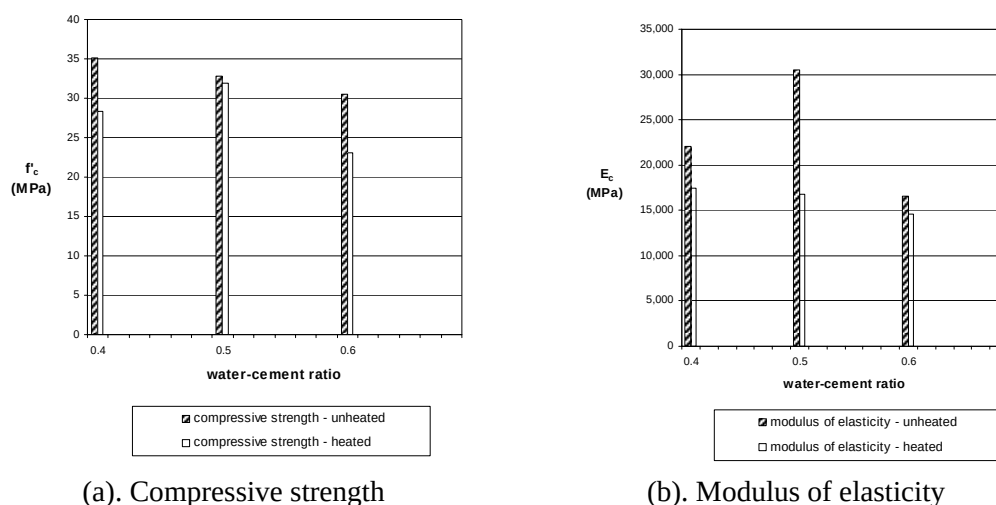


Figure 3. Experimental Results of unheated and heated specimen
(Primary data of Afrianto and Wibowo, 2002)

Table 1. Experimental result of compressive strength of unheated and heated specimen
(Primary data of Afrianto and Wibowo, 2002)

WATER CEMENT RATIO	UNHEATED			HEATED		
	SPECIMEN CODE	COMPRESSIVE STRENGTH f_c (MPa)	AVERAGE COMPRESSIVE STRENGTH f_c (MPa)	SPESEMEN CODE	COMPRESSIVE STRENGTH f_c (MPa)	AVERAGE COMPRESSIVE STRENGTH f_c (MPa)
0.4	A1-1	28.860	35.085	A2-1	31.689	28.389
	A1-2	38.480		A2-2	22.069	
	A1-3	38.480		A2-3	29.426	
	A1-4	33.387		A2-4	28.86	
	A1-5	35.651		A2-5	28.294	
	A1-6	35.651		A2-6	29.992	
0.5	B1-1	31.690	32.869	B2-1	32.821	31.878
	B1-2	31.972		B2-2	31.255	
	B1-3	34.519		B2-3	30.558	
	B1-4	32.538		B2-4	28.294	
	B1-5	35.368		B2-5	33.953	
	B1-6	31.124		B2-6	33.387	
0.6	C1-1	32.255	30.463	C2-1	20.372	23.107
	C1-2	32.255		C2-2	18.108	
	C1-3	32.821		C2-3	22.635	
	C1-4	31.125		C2-4	29.426	
	C1-5	26.031		C2-5	23.201	
	C1-6	28.294		C2-6	24.899	

Table 2. Experimental result of modulus of elasticity of unheated and heated specimen
(Primary data of Afrianto and Wibowo, 2002)

WATER CEMENT RATIO	UNHEATED			HEATED		
	SPECIMEN CODE	MODULUS OF ELASTICITY E_c (MPa)	AVERAGE MODULUS OF ELASTICITY E_c (MPa)	SPESEMEN CODE	MODULUS OF ELASTICITY E_c (MPa)	AVERAGE MODULUS OF ELASTICITY E_c (MPa)
0.4	A1-1	25,625.131	22,085.722	A2-1	16,074.426	17,494.928
	A1-2	21,063.934		A2-2	24,599.088	
	A1-3	17,030.209		A2-3	18,748.468	
	A1-4	17,670.979		A2-4	11,363.514	
	A1-5	22,336.743		A2-5	19,169.543	
	A1-6	28,787.338		A2-6	15,014.531	
0.5	B1-1	31,667.348	30,531.267	B2-1	15,461.835	16,737.451
	B1-2	27,368.830		B2-2	18,298.155	
	B1-3	48,593.398		B2-3	9,158.661	
	B1-4	21,010.309		B2-4	22,061.640	
	B1-5	32,525.190		B2-5	14,214.827	
	B1-6	22,022.524		B2-6	21,229.585	
0.6	C1-1	24,950.558	16,602.333	C2-1	13,992.421	14,644.652
	C1-2	17,162.501		C2-2	14,192.233	
	C1-3	16,571.895		C2-3	11,147.662	
	C1-4	16,868.290		C2-4	18,732.003	
	C1-5	7,841.218		C2-5	9,944.134	
	C1-6	16,219.535		C2-6	19,859.461	

Table 3. Analytical result of modulus of elasticity calculation from 3 expressions
(Primary data of Afrianto and Wibowo, 2002)

SPECIMEN CODE	MODULUS OF ELASTICITY				
	E_c (MPa)				
	UNHEATED EXPERIMENTAL RESULT	HEATED EXPERIMENTAL RESULT	EXPRESSION I	EXPRESSION II	EXPRESSION III
A1	22,085.722		30,229.22	30,102.90	32,669.68
B1	30,531.267		29,036.31	28,914.98	31,966.75
C1	16,602.333		27,270.80	27,156.85	31,167.19
A2		17,494.928	25,630.24	25,523.15	30,442.89
B2		16,737.451	26,675.82	26,564.36	31,642.36
C2		14,644.652	22,543.46	22,449.26	28,424.00

Note:

Expression I = SNI 03-2847-1992 (= ACI 318-99 section 8.5.1)

Expression II = ACI 318-95 section 8.5.1

Expression III = CEB-FIP Model Code 1990 Section 2.1.4.2

5. CONCLUSIONS

The experimental and analytical results meet conclusions as follows:

1. The unheated specimens with water-cement ratio of 0.4 have the greatest value of compressive strength, while the unheated specimens with water-cement ratio of 0.5 gets the greatest value of modulus of elasticity. The greatest value of compressive strength of heated specimens provided by specimens with water-cement ratio of 0.5, while the heated specimens with water-cement ratio of 0.4 gets the greatest value of modulus of elasticity.
2. All heated specimens lose their strength at high temperature of 500°C. The compressive strength of heated specimens decrease from unheated specimens, 19.09% for specimens with water-cement ratio of 0.4, 3.02% for specimens with water-cement ratio of 0.5, and 24.15% for specimens with water-cement ratio of 0.6. The modulus of elasticity of heated specimens decrease from unheated specimens, 20.79% for specimens with water-cement ratio of 0.4, 45.18% for specimens with water-cement ratio of 0.5, and 11.79% for specimens with water-cement ratio of 0.6.
3. The analytical result shows that modulus of elasticity calculated by expression III has greater values compared to expression I and II, but there is only small difference value among those expressions.
4. The variation of water-cement ratio of 0.5 becomes the optimum value because of some reasons. It has the greatest value of compressive strength, before and after heated. It also has greater value of modulus of elasticity before high temperature exposure and reducing

its value in small value after heated. Analytical result confirmed that variation of water-cement ratio of 0.5 has the closest value to experimental result.

REFERENCES

1. Afrianto, Budi Eko., and Wibowo, Ary Suryo., (2002), *Pengaruh Suhu Tinggi terhadap f.a.s dengan Kuat Tekan dan Modulus Elastisitas Beton*, Tugas Akhir, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Soegijapranata.
2. Carino, Nicholas J., Guthrie, William F., and Lagergren, Eric S., (1994), *Effect of Testing Variables on the Measured of Compressive Strength of High-Strength (90 MPa) Concrete*, NISTIR 5405, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, USA.
3. Castillo, C., and Duranni, A.J., (1990), *Effect of Transient High Temperature on High-Strength Concrete*, ACI Materials Journal, Vol. 87, No.1, pp. 47-53.
4. Jumppanen, U.M., (1989), *Effect of Strength on Fire Behaviour of Concrete*, Nordic Concrete Research, Publication No. 8, pp. 116-127.
5. Kützing, Lars., *Fire Resistant of High Performance Concrete with Fibre Cocktail*, Lazer No. 4, 1999, (www.uni-leipzig.de/massivb/institut/lacer/lacer04/104_19.pdf), 11 July 2006.
6. Lawson, J.R., Phan, L.T., and Davis, F., (2000), *Mechanical Properties of High Performance Concrete After Exposure to Elevated Temperatures*, NISTIR 6475, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, USA.
7. Mehta, P.K., and Monteiro, P.J.M., (1993), *Concrete - Structure, Properties, and Materials*, Second Edition, Prentice Hall, New Jersey.
8. Neville, A.M., (1999), *Properties of Concrete, Fourth and Final Edition*, Longman, Pearson Education Limited, Essex, England.
9. Pan, L.T., and Carino, N.J., *Fire Performance of High Strength Concrete: Research Needs*, Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, USA, (fire.nist.gov/bfrlpubs/build00/PDF/b00014.pdf), 11 July 2006.
10. Shetty, M.S., (1982), *Concrete Technology – Theory and Practice*, S. Chand & Company, Ltd, New Delhi.
11. Sumardi, P.C., (2000), *Aspek Kimia Beton Pasca Bakar*, Proceeding, Short Course, Teknologi Bahan local dan Aplikasinya di Bidang Teknik Sipil, Pusat Antar Universitas Ilmu Teknik Universitas Gajah Mada, Yogyakarta.

12. Tomosawa, Fuminori., and Naguchi, Takafumi., *Relationship Between Compressive Strength and Modulus of Elasticity of High-Strength Concrete*, Department of Architecture, faculty of Engineering, University of Tokyo, (bme.t.u-tokyo.ac.jp/researches/detail/concreteDB/concrete.pdf), 11 July 2006.
- [1] **M.I. Retno Susilorini**, Lecturer, Study Program of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Soegijapranata Catholic University, Jl. Pawiyatan Luhur IV/1, Bendan Dhuwur, Semarang 50234, susilorini@unika.ac.id
- [2] **Budi Eko Afrianto, Ary Suryo Wibowo**, Alumnus, Study Program of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Soegijapranata Catholic University, Jl. Pawiyatan Luhur IV/1, Bendan Dhuwur, Semarang 50234.

MEMPELAJARI TEGANGAN PADA BALOK DENGAN BANTUAN SOFTWARE BERBASIS PERHITUNGAN MATEMATIS DAN VISUALISASI 3 DIMENSI^[1]

Anang Kristianto^[2], Yosafat Aji Pranata^[2]

ABSTRAK

Penelitian pada mahasiswa Jurusan Teknik Sipil U.K.Maranatha menunjukkan sebagian besar kecenderungan gaya belajar mahasiswa adalah *active-sensing* (41,38%) serta *visual* (68,97%), kondisi ini rupanya sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Richard Felder sebagai pengembang ILS (Index Learning Style) terhadap mahasiswa teknik Iowa State University yang menyatakan bahwa 63% mahasiswa adalah *active learners*, 67 % *sensing learner* dan 85% *visual learners*, kemudian penelitian terhadap mahasiswa Michigan Tech. menunjukkan bahwa 56% *active learners*, 63% *sensing learners*, dan 74% *visual learners*. Secara umum hasil penelitian Felder menunjukkan bahwa 64% *active learners*, 63% *sensing learners*, dan 82% *visual learners*. Penemuan ini setidaknya bisa memberi gambaran yang cukup umum bahwa mahasiswa teknik memiliki kecenderungan gaya belajar yang hampir sama di beberapa perguruan tinggi.

Mahasiswa dengan gaya belajar *active-sensing-visual learners* memiliki kecenderungan belajar melalui metode praktis *problem-solving*, penggunaan banyak gambar, grafik, sketsa sederhana serta aktivitas kelompok dimana mereka diberi kesempatan untuk bertukar pikiran dan bereksperimen. Hambatan pemahaman akan materi yang disampaikan terjadi ketika para mahasiswa dengan kecenderungan gaya belajar seperti ini menghadapi materi mekanika rekayasa yang sulit untuk dibayangkan perilakunya, bahkan untuk materi yang didalamnya terdapat persamaan-persamaan matematis yang sederhana.

Salah satu materi dasar yang diberikan pada matakuliah mekanika bahan adalah tegangan pada balok atau kolom (lentur, aksial, geser, dsb) akibat beban merata, terpusat sentris, terpusat eksentris yang mengakibatkan lentur biaksial, dsb. Penggunaan suatu software komputer berbasis perhitungan matematis dan mampu memvisualisasikan persamaan-persamaan matematik dalam bentuk grafik baik 2D atau 3D seperti MatCad atau MatLab akan sangat membantu mahasiswa memahami konsep dan perilaku tegangan pada balok/kolom.

Beberapa keuntungan penggunaan alat bantu ini adalah secara umum mahasiswa dapat memahami dasar teori, penurunan rumus, perilaku tegangan pada balok dengan lebih baik. Kedua, mahasiswa dapat melihat suatu eksperimen sederhana mengenai perilaku tegangan pada balok dengan visualisasi yang menarik karena kemampuan software ini untuk mengupdate hasil serta tampilan grafiknya secara 3 dimensi secara langsung. Ketiga, seluruh proses mulai dari dasar teori, penurunan rumus serta latihan soal serta visualisasi grafik dapat terdokumentasi dengan baik. Keuntungan-keuntungan diatas sangat membantu mahasiswa dengan gaya belajar *active-sensing-visual learners* yang mayoritas dimiliki oleh mahasiswa teknik sipil untuk memahami pelajaran mekanika bahan.

Kata Kunci : *tegangan , active learners, sensing learners, visual learners.*

ABSTRACT

A Study of Maranatha Christian University Civil Engineering Students show that majority of the students are active sensing learner (41.38%) and visual learner (68.97 %), this is inline with the research done by Richard Felder as the developer Index Learning Style, for Iowa State University Engineering students show that 63% of the students are active learners, 67 % are sensing learners and 85 % are visual learners. In another research of Michigan Tech. Students show that 56% are active learners, 63% are sensing learners, and 74% are visual learners. The overall result of Felder research

shows that 64% of students are active learners, 63% are sensing learners and 82% are visual learners. This study can at least give a general picture that Engineering Students have a same style of learning in some university.

Student that are active-sensing-visual learners prefer to study using practical practice problem solving method, using more pictures, graphs, simple sketch, and group activities were they given the opportunity to discuss and experiments. An obstacle to understand the material that is presented occurs when the students who have this style of learning face difficult topic in engineering mechanics that are difficult to visualize its behavior, even more for material, which contain simple mathematic equations.

One of the basic topics that are given in mechanic of material class is stress on beam or column (bending, axial, shear, etc) due to uniformly distributed load, centric load, eccentric load that cause biaxial bending. The use of computer software based on mathematic counting and able to display mathematic equations in the 2D or 3D graph, software like MatCad or MatLab will greatly help the students to understand the concept and behavior of stress on beam/column.

A few benefit of the use this tool is that generally students are better able to understand basic theory, derivation formula, and the behavior of stress on beam. Secondly, the students are able to see a simple experiment of the behavior of stress on beam with interesting visualization because this software ability to update the result and appearance of the graph to 3D. Thirdly, the whole process from basic theory, derivation formula, exercise and displaying graph could be well documented. The benefit mention above greatly help the students that are active sensing visual learners who are the majority of Civil Engineering to understand mechanic of material.

Keywords : *Stress , Active learners, Sensing learners, Visual learners.*

1. PENDAHULUAN

Salah satu kendala yang dihadapi didalam mengajar mekanika rekayasa adalah keterbatasan dosen memahami gaya belajar mahasiswa, kondisi ini dapat mengakibatkan materi yang disampaikan tidak dapat diterima dengan baik oleh mahasiswa dan pada akhirnya akan mempengaruhi minat belajar serta hasil akhirnya. Pemahaman gaya belajar mahasiswa sudah seharusnya merupakan bagian penting yang perlu mendapat perhatian, beberapa penelitian mengklasifikasikan gaya belajar sudah banyak digunakan seperti *Myers-Brigs Type Indicator* (MBTI) yang mengacu dari teori psikologi Carl Jung model pembelajaran Kolb, *The Index of Learning Styles* (ILS) yang dikembangkan berdasarkan model pembelajaran Felder-Silverman [Felder, 2005].

Jurusan Teknik Sipil Universitas Kristen Maranatha menggunakan *Meyers-Brigs Type Indicator* (MBTI) untuk mendapatkan profil gaya belajar mahasiswa, dari hasil kuesioner yang disebarakan [Kristianto, 2004] didapatkan hasil 41.38 % *Extroversion (Active)- Sensing*, 34.48% *Extroversion – Intuitive*, 17.24 % *Reflective – Intuitive* dan 6.9% adalah *Reflective – Sensing*. Sedangkan cara yang paling dominan didalam menangkap pelajaran adalah 68.97 % *Visual*, 20.69 % *Auditory* dan 10.34 % adalah Kinestetik. Penelitian ini memberikan gambaran umum bahwa mayoritas mahasiswa Teknik Sipil adalah *active – sensing* (41.38%) serta *visual learners* (68.97%). Richard Felder sebagai pengembang *The Index of Learning Styles* (ILS) yang telah melakukan penelitian pada beberapa mahasiswa teknik perguruan tinggi mendapatkan data yang hampir sama. Hasil

penelitian untuk mahasiswa Iowa State adalah 63% *active learners*, 67% *sensing learners* dan 85% adalah *visual learners*, sementara mahasiswa Michigan Tech. menunjukkan data berturut-turut 56% (A) , 63% (S) dan 74 % (Vs). Rata-rata gaya belajar untuk beberapa perguruan tinggi menurut penelitian yang telah dilakukan Felder [Felder, 2005] adalah 64% (A), 63% (S) dan 82% (Vs). Berdasarkan data-data beberapa penelitian ini dapat dikatakan bahwa gaya belajar yang dominan mahasiswa teknik pada umumnya adalah *active*, *sensing* serta *visual*. Pemahaman gaya belajar ini setidaknya memudahkan pengajar untuk menyampaikan materi mekanika rekayasa dengan lebih baik sehingga diharapkan proses belajar menjadi lebih efektif karena informasi diserap dengan baik.

Mekanika merupakan bagian dari sains fisika yang mempelajari gerakan serta fenomena dari kinerja gaya (*forces*) pada benda (*bodies*) [Besari, 2004]. Konsep gaya adalah abstrak sekalipun tidak seabstrak matematik tetapi mahasiswa seringkali mengalami kesulitan untuk membayangkan fenomena yang terjadi. Konsep serta penurunan rumus-rumus secara matematis didalam mekanika rekayasa perlu dipahami dengan baik tetapi bagi mahasiswa dengan gaya belajar *active*, *sensing* dan *visual* akan mengalami kesulitan memahaminya apabila penyampaian jauh dari gaya belajar mereka.

Tulisan pada makalah ini mencoba memberikan beberapa gambaran bagaimana mahasiswa teknik yang pada umumnya memiliki gaya belajar *active*, *sensing* dan *visual* dapat memahami informasi yang diterima pada saat proses pembelajaran berlangsung, sehingga diharapkan memberikan inspirasi bagi pengajar mekanika rekayasa sehingga dapat mempersiapkan materi yang sesuai dengan gaya belajar dominan mereka.

Selain itu akan disajikan contoh penggunaan software berbasis perhitungan matematis dan visualisasi 3 dimensi untuk mempelajari fenomena tegangan pada balok dengan penampang segi empat. Beberapa keuntungan dari penggunaan software ini diharapkan dapat menjawab permasalahan kesulitan memahami pelajaran mekanika rekayasa bagi mahasiswa.

2. MEMAHAMI GAYA BELAJAR *ACTIVE-SENSING-VISUAL*

Klasifikasi model gaya belajar mahasiswa didasarkan pada bagaimana cara seseorang menerima dan memproses suatu informasi yang masuk. Suatu proses mental dimana informasi yang dipahami dapat dikonversikan menjadi suatu pengetahuan dapat dikategorikan menjadi dua yaitu *active experimentation* dan *reflective observation*. *Active experimentation* mencakup melakukan sesuatu dengan informasi yang diterima, mendiskusikan, menjelaskan, atau melakukan percobaan dengan suatu cara. Seorang *active*

learners bekerja dengan baik dalam suatu kelompok, senang melakukan eksperimen secara aktif dalam menerima informasi. Diskusi singkat dalam kelompok serta aktivitas *problem-solving* merupakan kegiatan yang sangat diminati oleh tipe ini dan dapat memberikan hasil yang optimal didalam menyerap materi kuliah yang diberikan.

Didalam teori psikologinya Carl Jung memperkenalkan gaya belajar *sensing* dan *intuition* sebagai cara seseorang untuk memahami informasi yang diberikan. *Sensing* mencakup observasi, pengumpulan data-data dengan indera sementara *intuition* mencakup persepsi tak langsung dengan imajinasi diluar indera. Setiap orang memiliki dua kemampuan ini tetapi didalam penggunaannya sebagian besar cenderung lebih ke *sensing* atau *intuition*. Seorang dengan gaya belajar *sensing* cenderung menyukai fakta-fakta, data, eksperimen, memecahkan masalah dengan metode standar dan baku, tidak menyukai komplikasi, bagus dalam mengingat fakta-fakta, cenderung hati-hati dan tidak bosan dengan detail. Mahasiswa dengan kecenderungan gaya belajar *sensing* ini akan menemui kesulitan karena didalam penyampaian materi kuliah mekanika rekayasa biasanya lebih menekankan konsep daripada fakta-fakta dan penggunaan simbol dalam mentransfer informasi dimana hal ini adalah merupakan kecenderungan dari gaya belajar *intuitive*. Agar tercapai tujuan materi kuliah maka dalam penyampaian selain harus menjelaskan mengenai konsep dan teori perlu juga mempresentasikan informasi-informasi konkret seperti data, fakta, fenomena yang dapat diamati oleh indera.

Cara seseorang menangkap informasi juga dapat dikategorikan menjadi 3 yaitu *visual* (penglihatan, gambar, diagram, simbol), *auditory* (suara, kata-kata) dan *kinestetik* (rasa, sentuhan).

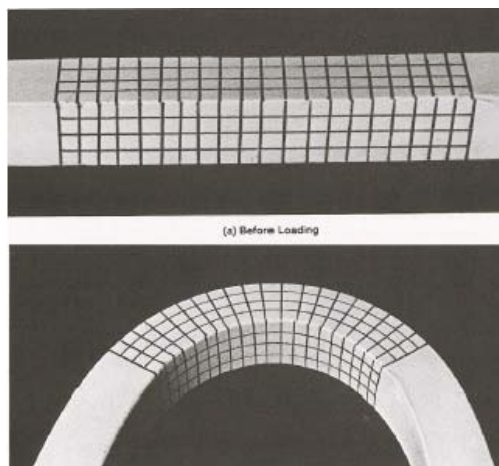
Visual learners mengingat dengan lebih baik informasi yang mereka lihat seperti gambar, foto-foto, diagram, flowchart, film, peragaan. Untuk mengakomodasi gaya belajar *visual* ini pelajaran mekanika rekayasa dapat disampaikan dengan gambar, diagram, sketsa, untuk menggambarkan proses atau prosedur pengerjaan yang kompleks dapat digunakan flowchart, fungsi matematik dapat digambarkan dalam grafik-grafik yang menarik, alat peraga merupakan sarana yang baik untuk membantu memahami materi.

Pada dasarnya didalam penyampaian materi kuliah mekanika rekayasa tidak harus cenderung mengikuti salah satu gaya belajar, tetapi yang perlu mendapat perhatian adalah bahwa pemahaman gaya belajar yang dimiliki oleh mayoritas mahasiswa teknik yaitu *active-sensing-visual* akan membuat penyampaian materi lebih efektif dan seharusnya dapat memberikan hasil akhir yang lebih baik.

3. VISUALISASI TEGANGAN PADA BALOK DENGAN MATHCAD

Tegangan pada balok merupakan salah satu materi mekanika rekayasa yang harus dipahami dengan baik oleh mahasiswa, materi ini memberikan dasar bagi mahasiswa untuk materi selanjutnya yaitu desain struktur bangunan beton, baja maupun kayu. Untuk mengakomodasi gaya belajar *active-sensing-visual* maka dalam makalah ini digunakan software Mathcad yang merupakan salah satu software berbasis perhitungan matematis yang dapat menampilkan visualisasi tegangan secara 2D maupun 3D.

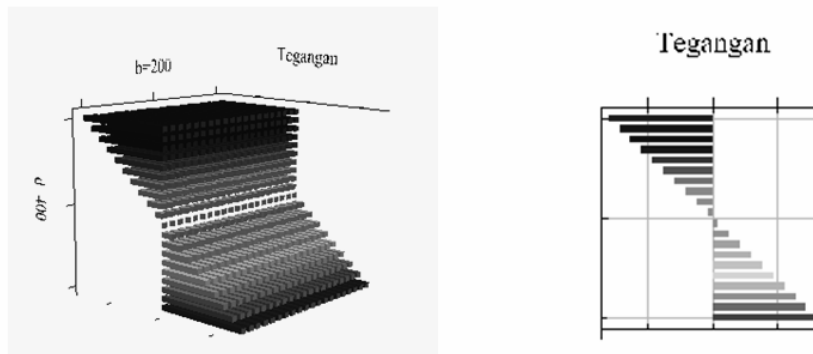
Penjelasan mengenai konsep tegangan dapat dimulai dengan memberikan gambar-gambar atau alat peraga yang berhubungan dengan fenomena tegangan dan regangan yang terjadi pada balok yang mengalami lentur atau geser (Gambar 1).



Gambar 1. Contoh Visualisasi Regangan pada Balok

Strategi Aplikasi – Teori – Aplikasi (*The A-T-A Method*) merupakan salah satu metode yang dapat digunakan bagi mahasiswa *sensing* yang lebih berorientasi pada detail, fakta daripada konsep yang kompleks dan abstrak. Sebelum penjelasan teori dan penurunan rumus tegangan lentur diberikan, kita dapat memberikan visualisasi aplikasi kasus tegangan lentur yang terjadi pada suatu irisan balok baik secara 2D maupun 3D (Gambar 2) dengan menggunakan Mathcad. Dengan menggunakan software ini kita dapat mengubah-ubah besarnya beban yang mengakibatkan perubahan gaya dalam momen pada balok sehingga perubahan besarnya tegangan yang terjadi dapat diamati oleh mahasiswa secara langsung melalui grafik 3D yang ditampilkan. Eksperimen seperti ini merupakan bagian yang menarik bagi mahasiswa *active* maupun *visual* karena mereka dapat melihat fakta-fakta yang terjadi dari eksperimen efek perubahan besarnya beban terhadap tegangan pada penampang. Sekalipun belum mengetahui mengapa persamaan tegangannya seperti itu (karena kita belum menjelaskan konsep serta penurunan rumusnya) tetapi dari visualisasi ini diharapkan mereka mengerti bagaimana hubungan antara variabel-variabel yang mempengaruhi besarnya

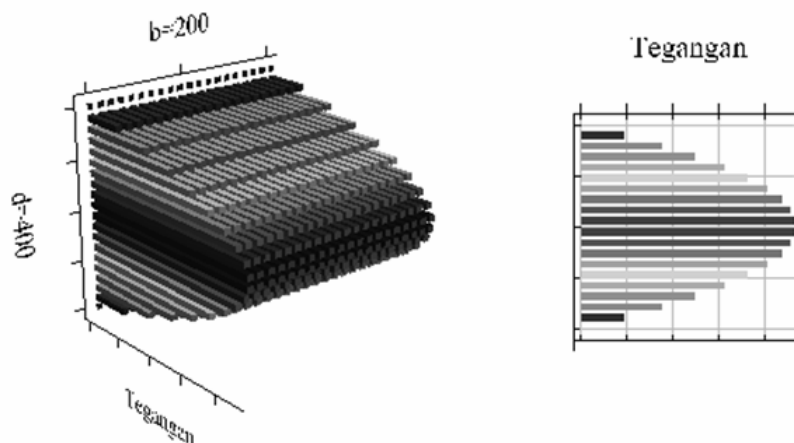
tegangan lentur yaitu momen (M), momen inersia (I) dan jarak titik dari sumbu netral (y). Begitu juga dengan tegangan geser pada suatu penampang, dengan menggunakan grafik 3D mahasiswa dapat melihat bentuk tegangan geser pada suatu penampang dan melakukan eksperimen dengan mengubah-ubah besarnya gaya geser yang diberikan (Gambar 3).



(a). Visualisasi 3D

(b). Visualisasi 2D

Gambar 2. Visualisasi tegangan lentur pada suatu penampang balok

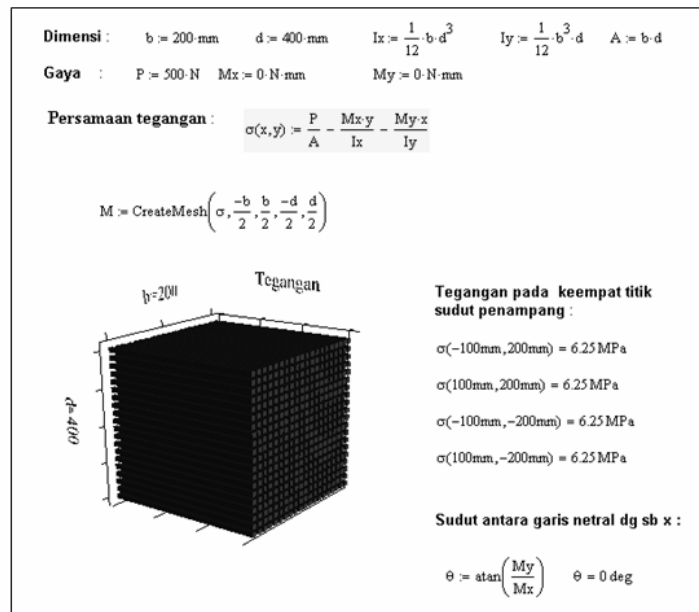


(a). Visualisasi 3D

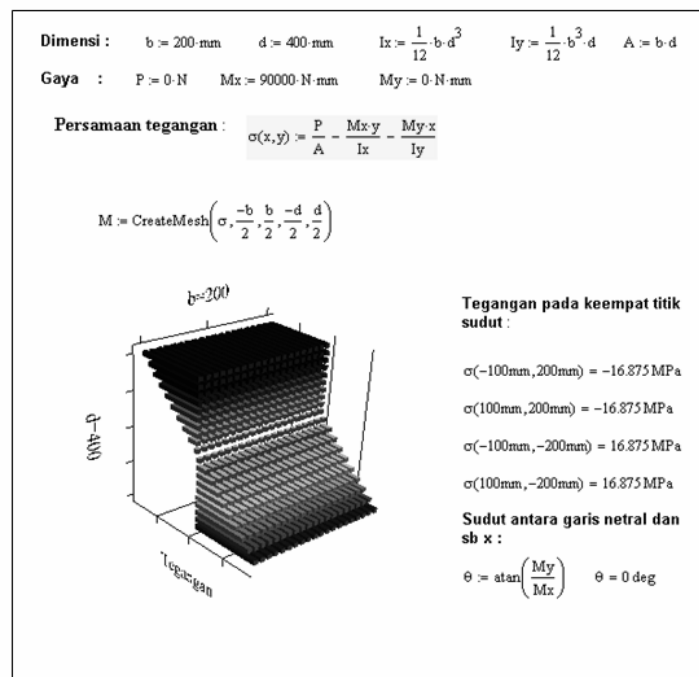
(b). Visualisasi 2D

Gambar 3. Visualisasi tegangan geser pada suatu penampang balok

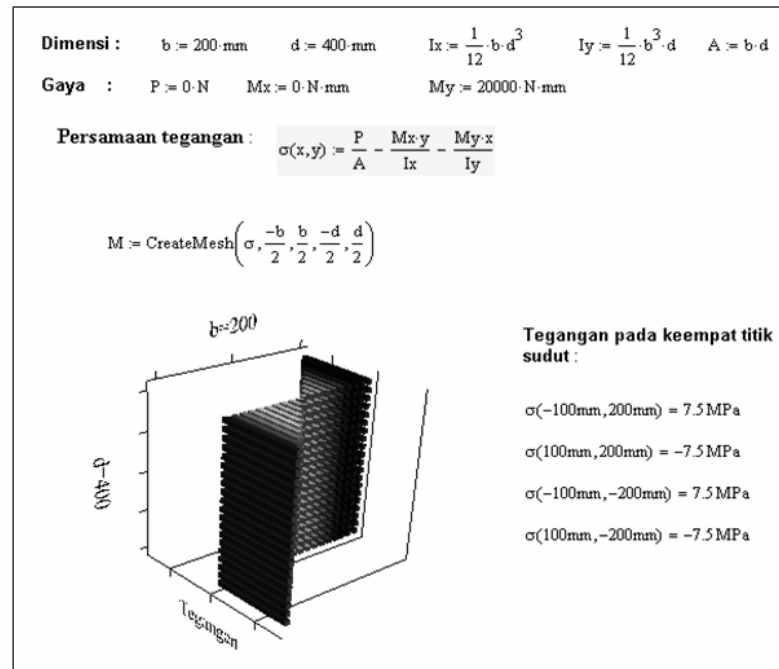
Visualisasi lainnya yang dapat diberikan adalah kombinasi tegangan aksial dan lentur dua arah. Tanpa menggunakan grafik 3D mahasiswa akan mengalami kesulitan dalam membayangkan resultan tegangan yang terjadi bila ada gaya aksial dan lentur dua arah yang terjadi secara bersamaan. Untuk itu perlu dilakukan bertahap dengan mulai dari visualisasi tegangan akibat beban aksial saja (Gambar 4), akibat momen lentur M_x saja (Gambar 5), akibat momen lentur M_y (Gambar 6) saja, dan dilanjutkan dengan visualisasi kombinasi pembebanan aksial dan lentur (Gambar 7).



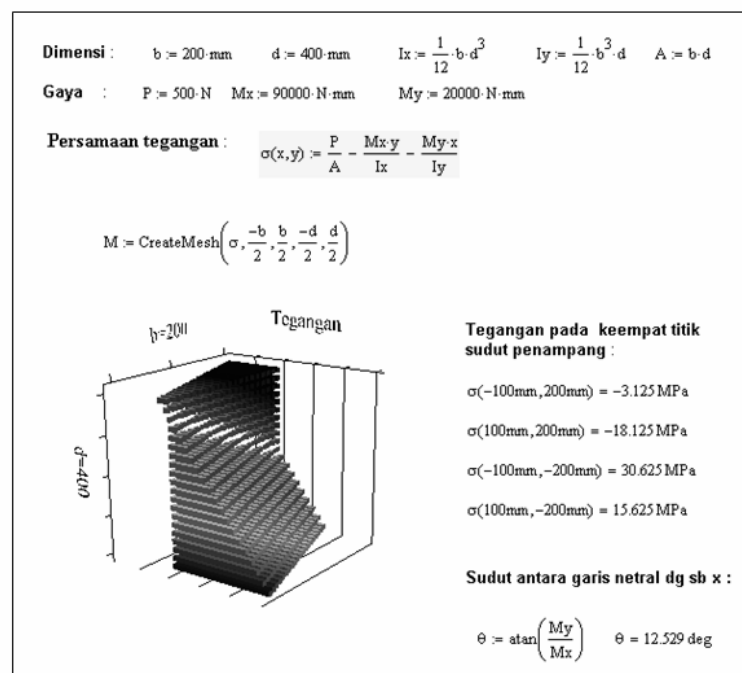
Gambar 4. Visualisasi tegangan pada penampang akibat beban aksial murni



Gambar 5. Visualisasi tegangan pada penampang akibat lentur Mx



Gambar 6. Visualisasi tegangan pada penampang akibat M_y



Gambar 7. Visualisasi tegangan pada balok akibat gaya aksial dan momen lentur dua arah

Langkah selanjutnya adalah menjelaskan kepada mahasiswa konsep tegangan dan penurunan rumusnya sehingga didapatkan persamaan tegangan lentur maupun geser. Penurunan rumus dan penjelasan konsep tegangan akan lebih mudah dipahami karena

mahasiswa sudah melakukan eksperimen terlebih dulu. Setelah itu dilanjutkan dengan suatu contoh kasus beserta solusinya. Seluruh proses mulai dari visualisasi kasus – penurunan rumus – contoh kasus serta solusinya dapat dituliskan dalam format software Mathcad sehingga mahasiswa dapat membaca ulang materi yang telah diberikan, selain itu dengan menggunakan software ini seluruh persamaan matematik yang ada dapat langsung dibuat grafiknya (2D maupun 3D) untuk memudahkan mahasiswa melihat perilakunya.

4. PENUTUP

Sebagai penutup berikut beberapa hal yang menjadi pokok penting dari tulisan ini adalah :

1. Perlunya memahami gaya belajar mahasiswa teknik pada umumnya yaitu active-sensing-visual, sehingga materi mekanika rekayasa dapat dipahami dengan lebih baik.
2. Pemahaman teori tegangan pada balok bagi mahasiswa dengan gaya belajar active-sensing-visual untuk matakuliah mekanika bahan dapat dilakukan dengan bantuan software berbasis perhitungan matematis dan visualisasi grafik 3D (dalam tulisan ini digunakan software MathCAD).
3. Beberapa keuntungan penggunaan alat bantu ini adalah secara umum mahasiswa dapat memahami dasar teori, penurunan rumus, perilaku tegangan pada balok dengan lebih baik. Kedua, mahasiswa dapat melihat suatu eksperimen sederhana mengenai perilaku tegangan pada balok dengan visualisasi yang menarik karena kemampuan software ini untuk mengupdate hasil serta tampilan grafiknya secara 3 dimensi secara langsung. Ketiga, seluruh proses mulai dari dasar teori, penurunan rumus serta latihan soal serta visualisasi grafik dapat terdokumentasi dengan baik.

Tulisan ini diharapkan memberikan inspirasi dalam pengembangan pembelajaran ilmu teknik sipil secara khusus mekanika rekayasa.

DAFTAR PUSTAKA

1. Besari, M.S. (2004), *Pembelajaran Ilmu Mekanika Rekayasa*, Prosiding Seminar dan Workshop Nasional Mekanika Rekayasa Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya, Yogyakarta, 7-8 Oktober 2004.
2. Kristianto, A. (2004), *Mengajar Mekanika Rekayasa dengan Memahami Gaya dan Cara Belajar Mahasiswa*, Prosiding Seminar dan Workshop Nasional Mekanika Rekayasa Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya, Yogyakarta, 7-8 Oktober 2004.

3. Felder, R.M., Brent, R. (2005), *Understanding Student Differences*, Journal of Engineering Education, Vol. 94, Januari 2005.
4. Felder, R.M., Silverman, (1988), *Learning and Teaching Styles in Engineering Education*, Engineering Education, 78 (7), 674-681, 1988.
5. Green, P.S., Veltri, P., Sputo, T.A., *Visualization Tool for Teaching Structural Steel Connection Design*, ASEE Southeast Section Conference.

[1] Disampaikan dalam *Lokakarya Pembelajaran Mekanika Teknik, Konstruksi Beton dan Konstruksi Baja*, Universitas Udayana, Bukit Jimbaran, Bali, 26-27 Juli 2006.

[2] **Anang Kristianto, ST., MT.**, adalah dosen tetap Jurusan Teknik Sipil Universitas Kristen Maranatha, Bandung.

[2] **Yosafat Aji Pranata, ST., MT.**, adalah dosen tetap Jurusan Teknik Sipil Universitas Kristen Maranatha, Bandung.

INDEKS PENGARANG JURNAL TEKNIK SIPIL VOLUME 2

Anang Kristianto, Yosafat Aji Pranata. *Mempelajari Tegangan pada Balok dengan Bantuan Software Berbasis Perhitungan Matematis dan Visualisasi 3 Dimensi*. Vol 2. No. 2 Oktober 2006: 137-146

Budijanto W., Anastasia S.L., Agusman. *Negative Skin Friction Tiang Pancang pada Tanah Lempung Studi Kasus Pabrik Tekstil, Bale Heñida*. Vol 2. No. 1 April 2006: 45-49

Cindrawaty Lesmana. *Predicting of the Shear Strength of Reinforced Concrete Beams Using Support Vector Machine*. Vol.2 No.2 Oktober 2006: 74-95

Maksum Tanubrata. *Evaluasi Penawaran pada Proses Pengadaan Jasa Konstruksi*. Vol 2. No. 1 April 2006: 1-23

M.I.R. Susilorini, B.E. Afrianto, A.S. Wibowo. *Mechanical Properties of Concrete With Various Water-Cement Ratio After High Temperature Exposure*. Vol. 2 No. 2 Oktober 2006: 126-136

Olga Pattipawaej. *Modeling Uncertainty in Wave Loading on A Jacket Offshore Structure*. Vol 2. No. 1 April 2006: 61-73

Theodore F. Najoan, Ari Budiman. *Peta Zonasi Tsunami Indonesia*. Vol. 2 No. 2 Oktober 2006: 96-107

Wiryanto Dewobroto. *Simulasi Numerik Berbasis Komputer Sebagai Solusi Pencegah Bahaya Akibat Kegagalan Bangunan*. Vol. 2 No. 2 Oktober 2006: 108-125

Yosafat Aji Pranata, Djoni Simanta. *Studi Analisis Beban Dorong untuk Gedung Beton Bertulang*. Vol 2. No. 1 April 2006: 25-44

PEDOMAN PENULISAN JURNAL TEKNIK SIPIL UNIVERSITAS KRISTEN MARANATHA

1. Jurnal Teknik Sipil UKM merupakan jurnal ilmiah, hasil penelitian, atau studi literatur disertai analisis ilmiah dalam bidang teknik sipil.
2. Tulisan harus asli dan belum pernah dipublikasikan sebelumnya, dikirim dengan mencantumkan kelompok bidang keahlian dalam teknik sipil.
3. Apabila pernah dipresentasikan dalam seminar, agar diberi keterangan lengkap.
4. Naskah ditulis dalam bahasa Indonesia atau bahasa Inggris yang benar, singkat, jelas dilengkapi dengan abstrak dan kata kunci dalam bahasa Indonesia dan bahasa Inggris.
5. Naskah ditulis pada kertas A4, menggunakan Microsoft® Word dengan ketentuan sebagai berikut :
 - a. Judul ditulis dengan huruf kapital, **TIMES NEW ROMAN**, ukuran 13, huruf tebal.
 - b. Abstrak ditulis dengan huruf biasa, Times New Roman, ukuran 10, spasi 1, demikian juga dengan kata kunci.
 - c. Isi naskah ditulis dengan huruf biasa, Times New Roman, ukuran 11, spasi. 1.5.
 - d. Jumlah halaman beserta lampiran minimal 10 halaman, maksimal 20 halaman.
 - e. Jumlah halaman untuk lampiran maksimal 20% dari jumlah halaman total.
 - f. Nama penulis ditulis tanpa pencantuman gelar akademik.
 - g. Penulisan sub bab disertai nomor, contoh :
 - 1. HURUF KAPITAL**
 - 1.1 Huruf Biasa**
 - h. Gambar diberi nomor dan keterangan gambar ditulis dibawah gambar.
 - i. Tabel diberi nomor dan keterangan tabel ditulis diatas tabel.
 - j. Daftar pustaka ditulis dengan format sebagai berikut :
 1. Timoshenko, S.P, Young, D.H. (1995), *Theory of Structures*, McGraw Hill Book Co, New York.
 - k. Kata-kata asing (jika naskah ditulis dalam bahasa Indonesia) dicetak *miring*.
6. Menggunakan sistematika penulisan sebagai berikut :
 - a. Judul Naskah.
 - b. Nama penulis utama, penulis pembantu.
 - c. Abstrak dalam bahasa Indonesia dan bahasa Inggris.
 - d. Kata kunci.
 - e. Pendahuluan (berisi latar belakang, tujuan, ruang lingkup, dan metodologi).
 - f. Isi (Tinjauan pustaka, data, pembahasan).
 - g. Penutup (Kesimpulan, saran dan daftar pustaka).
7. Naskah dikirim dalam bentuk cetakan di kertas A4 beserta *file* dalam CD-ROM, atau dapat dikirim dalam bentuk *file* via E-mail.
8. Naskah yang masuk redaksi akan ditinjau oleh penelaah ahli dalam bidangnya sebelum diterbitkan.
9. Jurnal direncanakan terbit 2x dalam setahun pada bulan April dan Oktober.