

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

Dunia saat ini diterpa isu pemanasan global yang diakibatkan oleh emisi gas karbondioksida. Industri konstruksi adalah penyumbang emisi gas karbondioksida terbesar kedua setelah elektrikal (listrik). Dalam mengatasi isu tersebut maka riset tentang konstruksi hijau (*green construction*) dan material hijau (*green material*) mulai digalakkan sebagai upaya dalam penurunan emisi gas karbondioksida.

Pemakaian semen merupakan bagian dari dunia konstruksi yang paling banyak menyumbangkan emisi tersebut. Oleh karenanya, reduksi pemakaian semen dalam material konstruksi sangat penting dalam mendukung pembangunan berkelanjutan. Material konstruksi bangunan dalam perkembangannya mempertimbangkan dua hal penting baik ekonomi maupun lingkungan. Dalam hal ekonomi, material hijau harus mempertimbangkan penghematan biaya konstruksi yang dapat dicapai. Sedangkan pertimbangan lingkungan dalam material hijau cenderung tertuju pada upaya pemanfaatan limbah yang tidak hanya memiliki nilai ekonomis namun juga memiliki upaya pelestarian lingkungan.

1.2 PERMASALAHAN

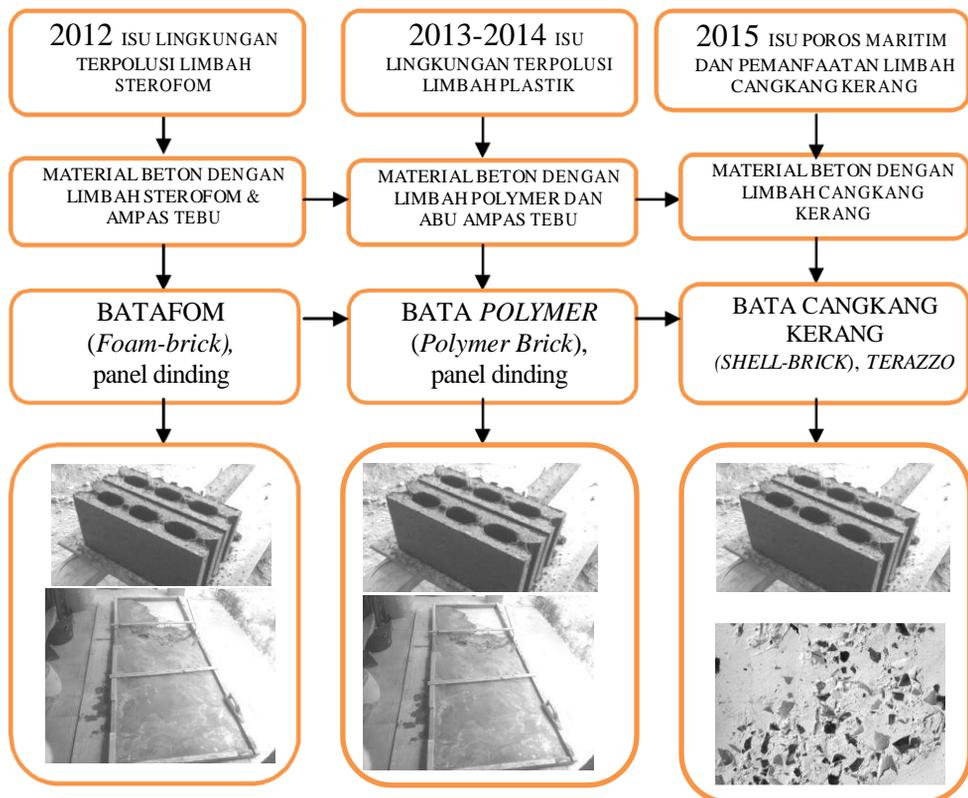
Isu pemanasan global selalu dipersepsikan sebagai emisi gas karbondioksida dunia. Salah satu pemicu terjadinya emisi gas karbondioksida adalah industri konstruksi. Sedangkan bagian dari dunia konstruksi yang mengakibatkan emisi gas karbondioksida adalah penggunaan semen pada material konstruksi. Oleh karena itu pembahasan tentang material hijau akan difokuskan pada reduksi semen dalam material konstruksi dan bangunan.

Sementara itu, timbunan limbah sterofom (*styrofoam*) dari kemasan elektronik ataupun makanan sangat mengancam lingkungan. Hal ini disebabkan karena limbah sterofom tidak dapat diurai lingkungan dengan mudah, dan akhirnya menyebabkan lingkungan terpolusi oleh sampah tersebut. Serupa dengan limbah sterofom, limbah *polymer* ataupun plastik bertebaran di muka bumi. Gagasan muncul dari fenomena praktis bahwa limbah mie instant dapat dipergunakan kembali sebagai agregat beton. Lain halnya dengan limbah

cangkang kerang, Indonesia adalah negara maritim dengan kekayaan hasil laut yang berlimpah. Cangkang kerang belum dimanfaatkan dengan baik saat ini, oleh karena itu, performa cangkang kerang sebagai bahan baku bangunan hijau dan material konstruksi sangat bermanfaat dalam industri konstruksi yang berkelanjutan. Pembahasan buku ini akan terfokus pada: penggunaan sterofom, plastik/ *polymer*, cangkang kerang dan limbah abu ampas tebu dari pabrik gula sebagai pengganti sebagian semen dan agregat kasar dalam material beton yang menjadi bahan utama dalam industri bangunan berkelanjutan di Indonesia.

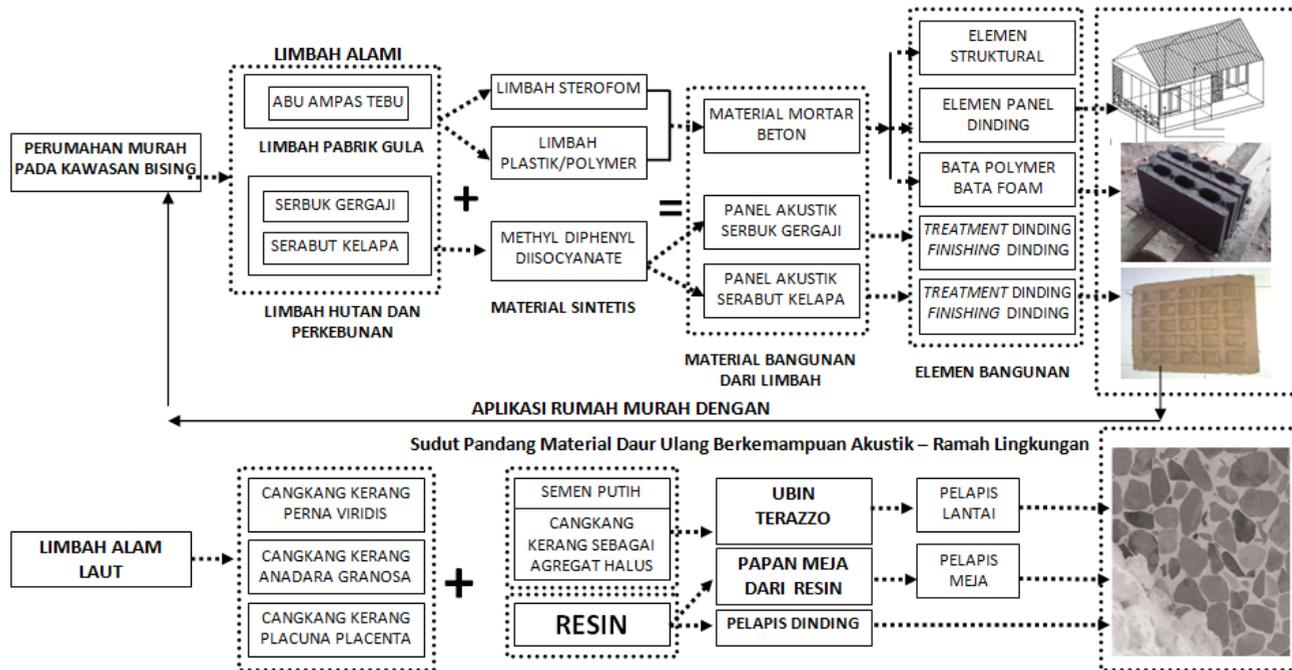
1.3 ALUR KEGIATAN REKAYASA MATERIAL BETON

Rekayasa material beton berbahan limbah telah dilakukan dalam tiga tahun terakhir. Berikut adalah alur kegiatan pembuatan material beton [1,2,3]:



Gambar 1.01. Alur Rekayasa Material Beton [1,2,3]

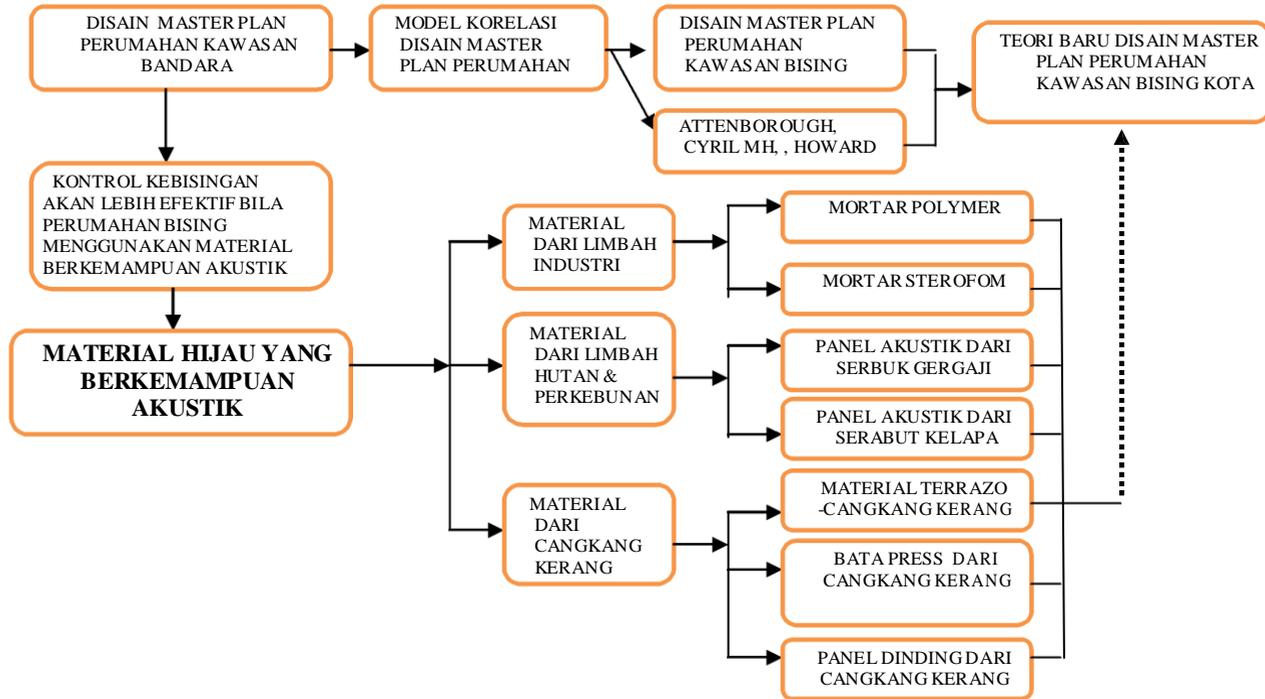
Road map rekayasa material bangunan yang berbahan dasar limbah:



Gambar 1.02. Road map rekayasa material berbahan limbah [4]

Selain melakukan konservasi sumber daya alam, gerakan hijau juga berkaitan dengan upaya menghemat energi dan meminimalkan dampak kerusakan lingkungan akibat limbah berbahaya. Penggunaan material ramah lingkungan sangat bermanfaat bagi kepentingan pembangunan berkelanjutan. Menurut E. Setyowati, et.al (2015) *State of the art*

rekayasa material beton ini terletak pada pemanfaatan material ramah lingkungan dan rendah emisi dalam industri bangunan untuk golongan ekonomi lemah. Berikut adalah mapping *State of the Art* rekayasa material [3]:



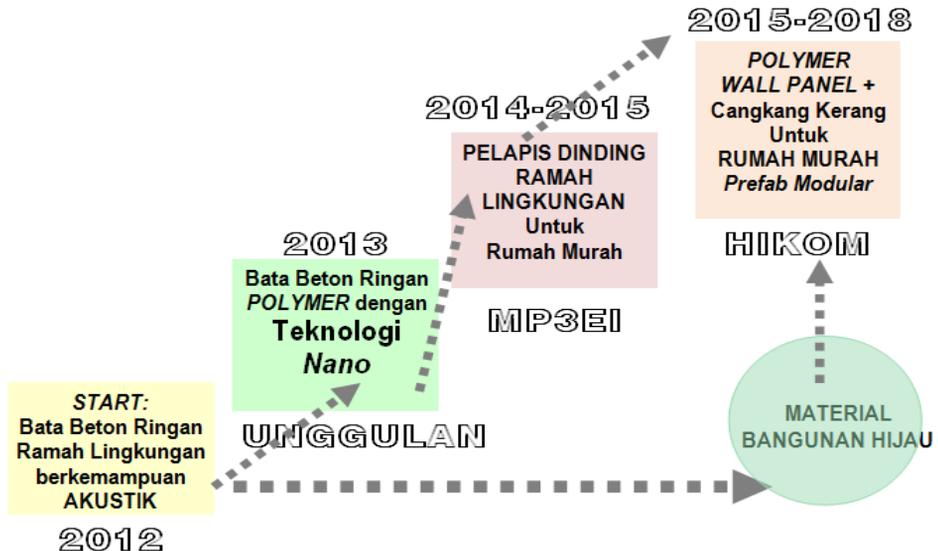
Gambar 1.03. *State of the Art* Material Beton [3]

BAB II

KAJIAN PUSTAKA

Rekayasa material beton dikembangkan dari penelitian dasar Adithya et.al (2013)[5]. Karena sifatnya adalah penyempurnaan dari rekayasa dasar yang sudah dilakukan sebelumnya maka *road map* rekayasa material ini dapat dikategorikan sebagai peningkatan kapasitas teknologi, khususnya pada kegiatan pembuatan material beton *polymer*. Teknologi *nano* menjadi pilihan untuk menyempurnakan kapasitas dan mutu produk bata-*foam* agar memiliki kualitas yang memenuhi standar SNI 03-0349-1989, baik dari segi kuat tekan, kerapatan maupun insulasi suara [6].

Rekam jejak diawali oleh tim melalui observasi tentang *eco-material* (E. Setyowati,et.al,2014)[7] dengan judul: “*Green Concept melalui OTTV dan Kenyamanan Thermal pada Gedung Wijaya Kusuma RS Orthopedi Prof. Dr. R. Soeharso Surakarta*” [7]. Kemudian dilanjutkan dengan riset MP3EI – Ditlitabmas Dikti yang berkaitan dengan topik: Material Akustik berbahan limbah hutan dan perkebunan yang berbentuk Panel wafel dari serbuk gergaji dan serabut kelapa [8].



Gambar 2.01. Road Map Material Hijau [3,4]

Rekam jejak berikutnya adalah penelitian oleh E. Setyowati dan Purwanto, 2014 [2] dengan judul: “**Produk *Eco-Material Bata polymer* dari Limbah Plastik dan Abu Ampas Tebu Berbasis *Nano Technology* untuk Pencapaian Hak Kekayaan Intelektual (HKI)**”. Dilanjutkan dengan kegiatan Riset Publikasi Internasional (RPI, E. Setyowati, et.al, 2015) dengan judul: “*Green Building Materials Made of Maritime Waste Oyster Shell Waste Having Acoustic Performance And Aesthetic Value For Low Cost Housing*”[3].

Road map di atas akan menjadi dasar dalam menginventarisir kegiatan-kegiatan yang terdiri dari:

- Explorasi limbah industri/ limbah alam
- Analisa Bahan
- *Mix Design* dengan metode DOE (*Design of Experiment*)
- *Curing*
- Uji *Nano Technology* (untuk penelitian material beton *polymer*)
- Uji Material yang meliputi: uji kuat tekan, Berat Jenis dan Uji Akustik yang terdiri dari uji Koefisien Absorpsi dan Uji *Sound Transmission Loss*
- Analisa
- Pelaporan
- Pendaftaran Hak Kekayaan Intelektual (HKI)
- Publikasi International (terindeks SCOPUS)

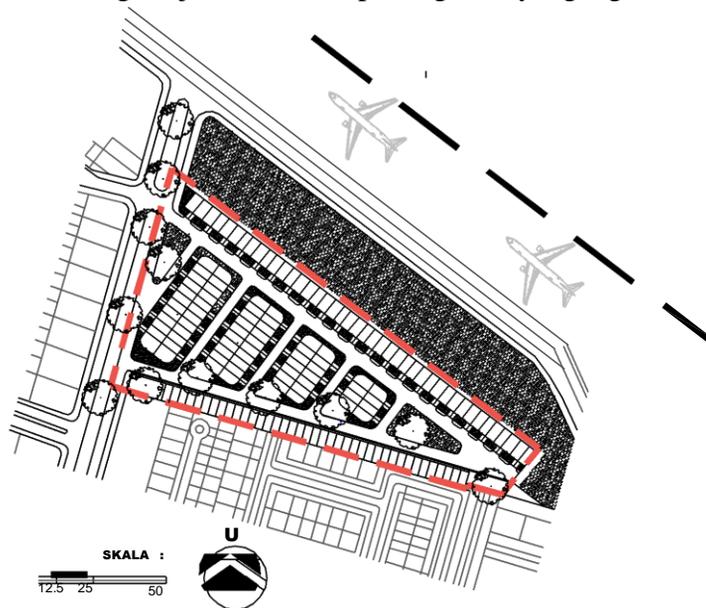
2.1. Beton ringan (*Lightweight Concrete*)

Sesuai dengan ketentuan persyaratan ASTM-C.330, maka material beton dengan agregat yang memiliki berat massa ringan akan disebut sebagai beton ringan [9]. Beton ringan ini mempunyai unit massa kering udara $< 1.900 \text{ kg/cm}^3$ seperti yang ditentukan oleh ASTM-C.567[10]. Dalam pembuatannya, beton ringan dapat dibuat dengan dua metode. Metode pertama adalah dengan membentuk beton ringan menggunakan agregat ringan yang berpori dan berat jenis yang kecil, beton yang terbentuk dinamakan beton agregat ringan. Metode kedua adalah dengan membuat pori yang tinggi pada beton salah satunya dengan menambah udara pada beton. Beton yang terbentuk dinamakan beton hampa udara. Saat ini, negara-negara maju membangun konstruksi jemabatan dan gedung dengan menggunakan beton ringan. Beton ringan merupakan bahan bangunan yang telah digunakan oleh masyarakat di wilayah Asia dan Eropa puluhan tahun lalu. Struktur utama bangunan pada prinsipnya dibentuk oleh struktur beton bertulang yang kekuatannya relatif besar, bukan pada dinding yang hanya berfungsi sebagai pengisi. Bangunan dengan beton ringan sebagai pengisi akan mengurangi resiko kerusakan atau rubuh akibat gempa karena

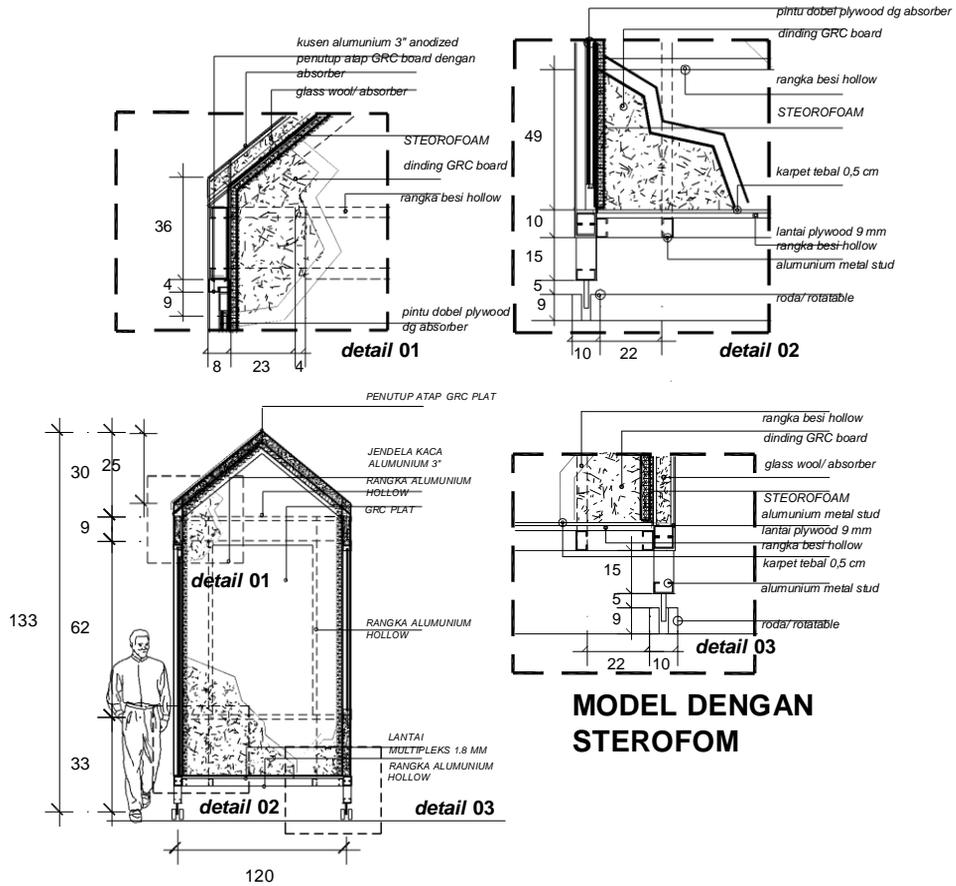
massanya yang ringan. Dengan menggunakan beton ringan, maka berat massa bangunan dapat menjadi ringan, sehingga dimensi kolom, balok dan plat bisa diperkecil, pada akhirnya anggaran dapat dihemat. Ringannya beban ini juga memenuhi persyaratan struktur bangunan di daerah rawan gempa. Jika terjadi gempa material pendukung bangunan yang ringan tidak akan membahayakan penghuninya (sistem beton ringan).

2.2. Material ramah lingkungan pada Perumahan Bising

Rekayasa material beton ini diilhami oleh penelitian E. Setyowati, (2011) tentang strategi kontrol kebisingan melalui disain master plan pada perumahan bising perkotaan [11]. Dalam kegiatan tersebut dipaparkan bahwa populasi penduduk Indonesia terus bertambah dari tahun ke tahun. Oleh karenanya jumlah perumahan pada kawasan kota juga semakin bertambah. Perumahan pada daerah bising perkotaan menemui tantangan baru dalam rangka mengantisipasi kebisingan lingkungan. Perumahan menengah ke bawah di seputar bandara ataupun perumahan di sekitar daerah industri akan selalu terimbas oleh kebisingan, jika tidak ada penanganan yang signifikan.



Gambar 2.02. Master plan yang antisipatif terhadap bising [11,12,13]



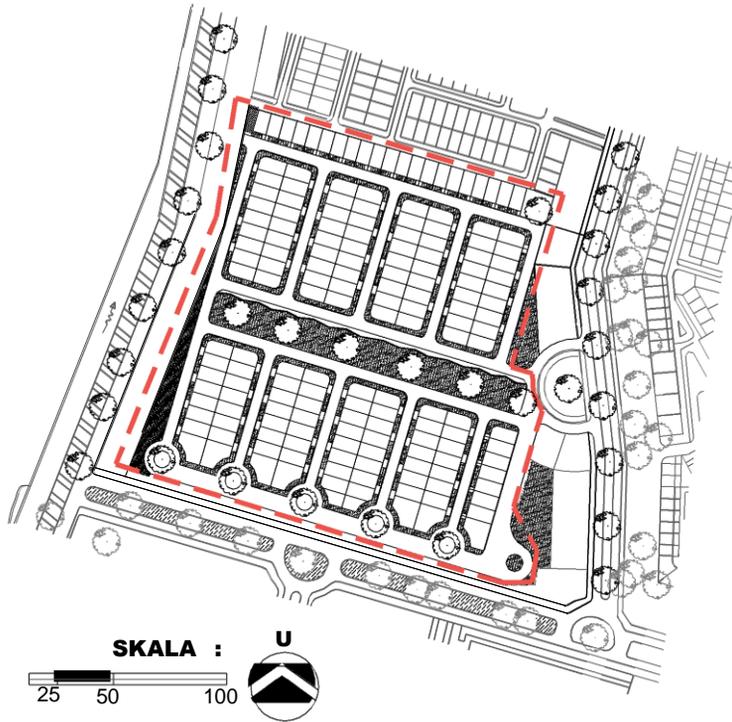
Gambar 2.03. Model rumah dengan sterofom [11,12,13]



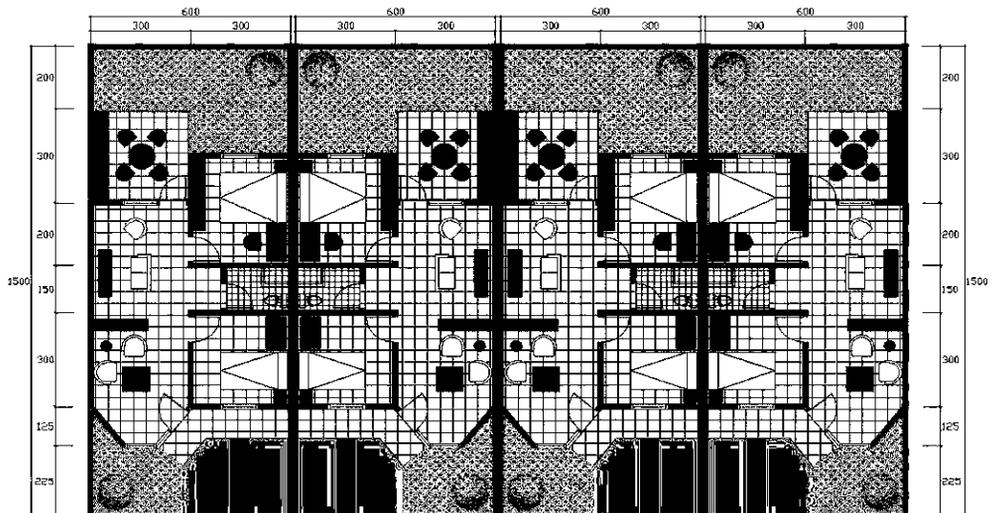
(a)

(b)

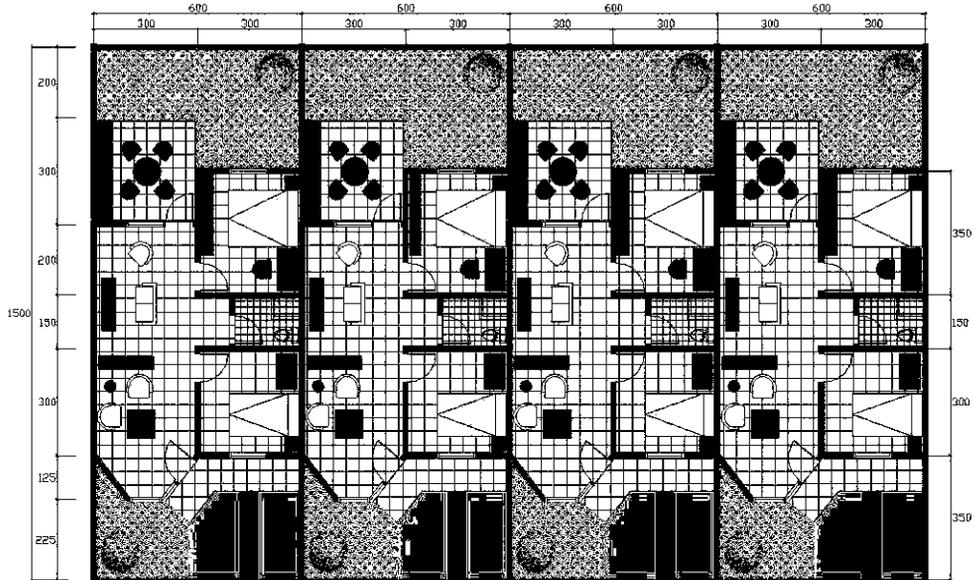
Gambar 2.04. (a,b) Model rumah di bawa ke lokasi observasi bisung [11,12,13]



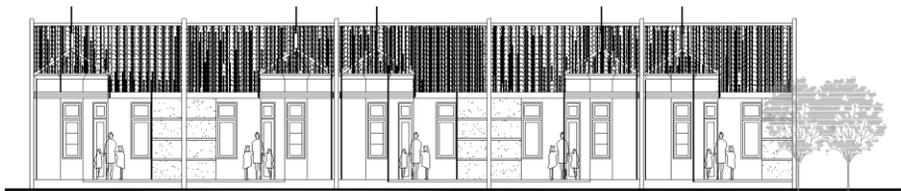
Gambar 2.05. Master plan Perumahan Kawasan Bandara [11,12,13]



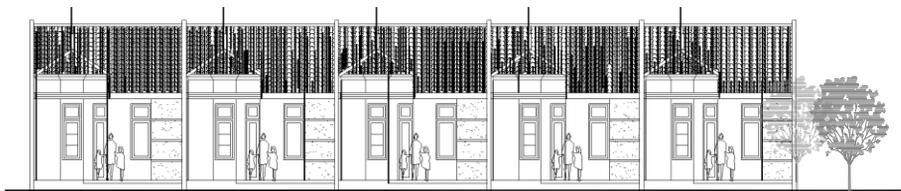
Gambar 2.06. Disain unit rumah dengan pola deret cermin [11,12,13]



Gambar 2.07. Disain unit rumah dengan pola deret berulang [11,12,13]



TAMPAK RUMAH DERET CERMIN



TAMPAK RUMAH DERET BERULANG

Gambar 2.08. Desain Tampak depan unit Rumah [11,12,13]

Perlu adanya inovasi material baru yang tidak hanya berkonsep "green" namun juga memiliki kemampuan dalam menunjang kenyamanan penghuni walaupun harus tinggal di daerah bising perkotaan. Pada gambar 2.02 – 2.08, E. Setyowati (2012), menyebutkan bahwa upaya kontekstual kontrol kebisingan perumahan seputar bandara adalah dengan strategi disain master plan [11,12]. Namun upaya tersebut akan lebih efektif, apabila perumahan dibangun dengan menggunakan material yang berkemampuan akustik. Oleh karena itu, riset berikutnya mengambil tema rekayasa material bangunan yang ramah lingkungan dan memiliki kemampuan akustik yang baik, sehingga dapat melengkapi rekam jejak secara berkesinambungan, terarah dan tepat sasaran [3].

2.3. Material beton berbahan limbah

Salah satu solusi untuk mengurangi emisi karbon dioksida yang dihasilkan oleh industri semen adalah dengan mengurangi prosentase semen yang digunakan dalam campuran beton. Sejumlah penelitian dan standarisasi telah dilakukan berkaitan dengan material substitusi semen [14,15,16,17], *Sugarcane bagasse ash* (abu ampas tebu) dapat digunakan sebagai pengganti semen karena komposisi silika oksida (SiO_2) mencapai lebih dari 62.43% [14]. Penelitian Purwanto et.al menggunakan *fly ash* yang berbeda yaitu sisa pembakaran batubara [15]. Dari penelitian P.O. Modania P.O. dan M.R. Vyawahareb, 2013 [14], didapat kesimpulan bahwa penggunaan abu ampas tebu dengan prosentase 10-20% sebagai bahan substitusi semen mampu meningkatkan kuat tekan beton secara optimal. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kuat tekan beton dapat ditingkatkan dengan penambahan nano-ampas tebu. Lebih lanjut pada penelitiannya, P.O Modania dan M.R. Vyawahareb menemukan bahwa kandungan Silika (SiO_2) pada ampas tebu memenuhi standar yang ditetapkan oleh ASTM C-618 [17]. Sebagaimana disebutkan dalam ASTM C-618, bahwa kandungan $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ harus berada pada rentang 50-70% [17]. Pada penelitian itu, kandungan ketiga unsur tersebut adalah 70.69%. Pada penelitian K.C.P. Faria et.al (2012) [18], komposisi kimia yang terdapat dalam abu ampas tebu diobservasi dengan X-ray *Spectrometer* (XRD). Berbeda dengan penelitian Modania dan Vyawahareb, K.C.P. Faria et.al menemukan bahwa $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ pada ampas tebu mencapai 67.51%. Nilai kandungan silika sebesar itu masih memenuhi persyaratan yang disebutkan di dalam ASTM C-618.

Limbah *polymer* adalah salah satu dari sekian banyak *Recycled Concrete Aggregates* (RCA). Penelitian oleh V. Spaeth dan A.D. Tegguer (2013) menemukan bahwa agregat *polymer* dapat meningkatkan

resistansi terhadap air dan ketahanan terhadap pembusukan [19]. Sementara itu, teknologi nano yang diterapkan dalam kegiatan ini tidak hanya meningkatkan kualitas material tapi juga meningkatkan kuat tekan.

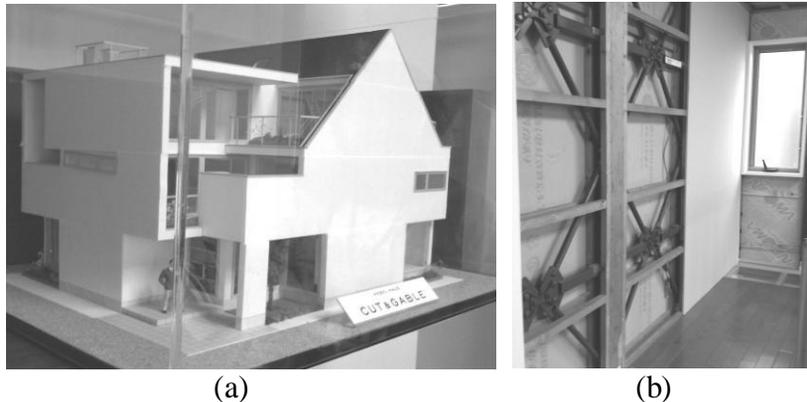
2.4. Desain Rumah Prefabrikasi Modular

Indonesia adalah negara berkembang yang mayoritas penduduknya berada pada rentang ekonomi menengah ke bawah. Perumahan murah sudah menjadi isu yang sangat didambakan oleh masyarakat. Sementara para pengembang perumahan mulai sibuk melakukan inovasi-inovasi material ramah lingkungan yang ekonomis, hemat biaya, mudah pengerjaan dan dapat dibangun dalam waktu yang singkat, sehingga berpotensi memangkas biaya produksi, pada akhirnya harga jual juga dapat ditekan serendah mungkin.

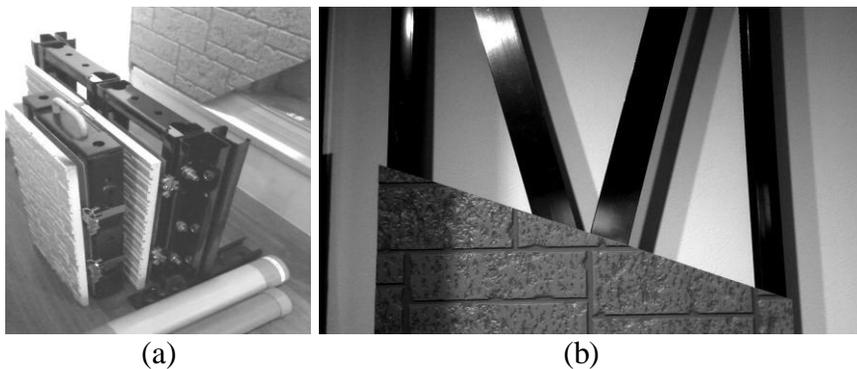
Beberapa referensi tentang rumah modular sudah sering didiskusikan [20]. Merujuk pada penelitian Konstantin, S, et.al [21], silicon dioxide *nano*-partikel (*nano*-silica, *nano*-SiO₂) terbukti sangat efektif dalam meningkatkan kuat tekan, fleksibilitas dan keawetan umur beton. Disebutkan juga dalam penelitian Kang, S.,et.al[22], *Nano*-SiO₂ dapat digunakan sebagai zat tambahan untuk meningkatkan kinerja dan kekuatan serta tampilan dan *self-compacting concrete* (*pemadatan beton*) [21]. Namun pada penelitian E. Setyowati, et.al(2015) teknologi nano tidak diterapkan karena tujuan dan manfaat penelitian adalah untuk inovasi rumah murah golongan masyarakat menengah ke bawah [21]. Penelitian tersebut terfokus pada material beton non struktural. Di Indonesia, semen *Portland* seringkali digantikan oleh semen putih yang mengandung CaO (*Calcium Oxide*) yang dapat digunakan sebagai perekat pada campuran beton. Sehingga, penggunaan semen putih ditujukan tidak untuk menambah kekuatan tekan namun cenderung untuk meningkatkan performa dan nilai estetika serta memberikan kesan arsitektural terkait dengan material *finishing* bangunan, seperti: *terazzo*, panel dinding, bata cetak, plin lengkung dan lain sebagainya.

Menurut G. Staib, et.al (2008) [20], bahwa rumah dengan disain tunggal dan rumah modular prefabrikasi adalah dua hal yang saling melengkapi. Dari sejarah kaum nomaden yang berpindah-pindah dengan rumah modular kayu mereka merupakan inspirasi yang sangat bermanfaat bagi perkembangan industri rumah prefab modular pada jaman modern. Profesor Gerald dan tim mengembangkan sistem prefabrikasi bangunan mulai dari rangka (*frame system*), sistem panel dan sistem facade. Berbeda dengan di Jerman, Jepang sebagai negara rawan bencana

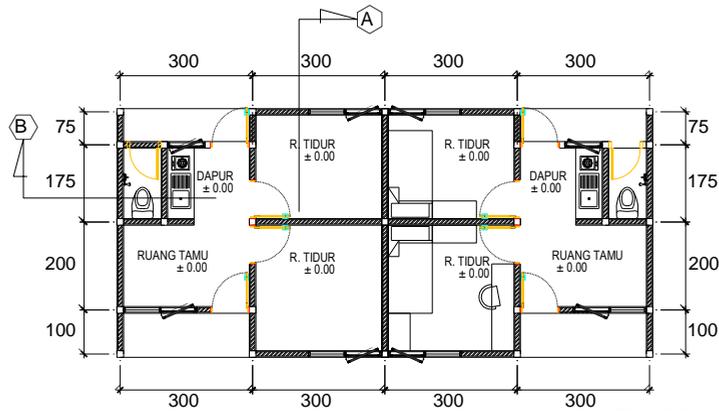
mengembangkan Sistem Rumah Modular yang dapat mengantisipasi bencana baik sebelum maupun sesudah bencana terjadi. Sistem rangka yang fleksibel terhadap getaran menjadi motor penggerak perkembangan rumah modular di Jepang. Berikut adalah deskripsi visual rumah *ABC housing* yang dibangun secara *modular system* di Kobe, Jepang: Gambar 2.09 mendeskripsikan sistem panel dinding dengan rangka fleksibel yang responsif terhadap vibrasi gempa bumi. Adapun detail sistem lapisan panel dinding dapat dilihat pada gambar 2.10.



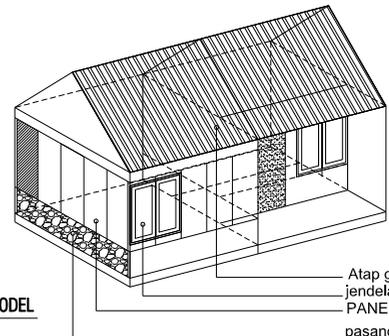
Gambar 2.09. Rumah Prefab Modular (a) Contoh maket rumah prefab modular pada *ABC housing*, Kobe, Jepang; (b) Sistem rangka yang fleksibel terhadap bencana di Jepang (data penulis).



Gambar 2.10. (a) Sistem rangka panel dinding rumah di Kobe, Jepang; (b) Detil material *finishing* yang menempel pada rangka panel dinding (data penulis)

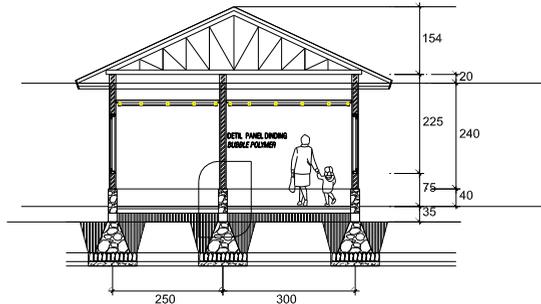


DENAH TYPICAL MODEL
SKALA 1 : 100

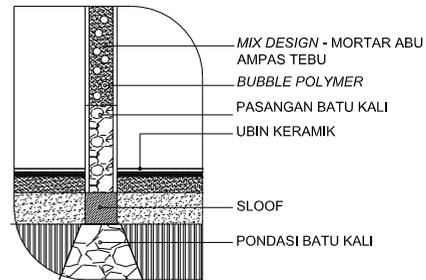


Atap genteng plenthong
jendela fabricated
PANEL DINDING BUBBLE POLYMER
pasangan batu kali

ISOMETRI MODEL
SKALA 1 : 100

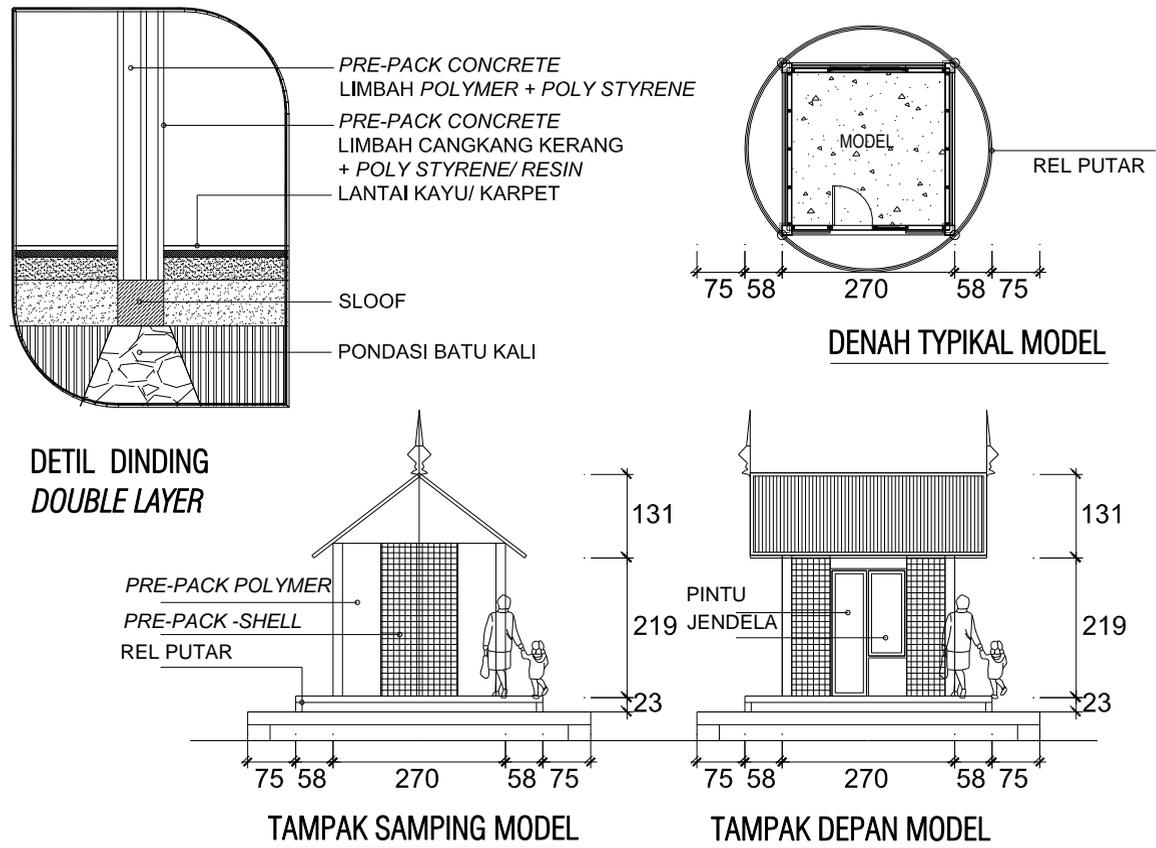


POTONGAN A-A
SKALA 1 : 100



DETIL PANEL DINDING BUBBLE POLYMER

Gambar 2.11. Disain sistem panel dinding dengan rekayasa material beton



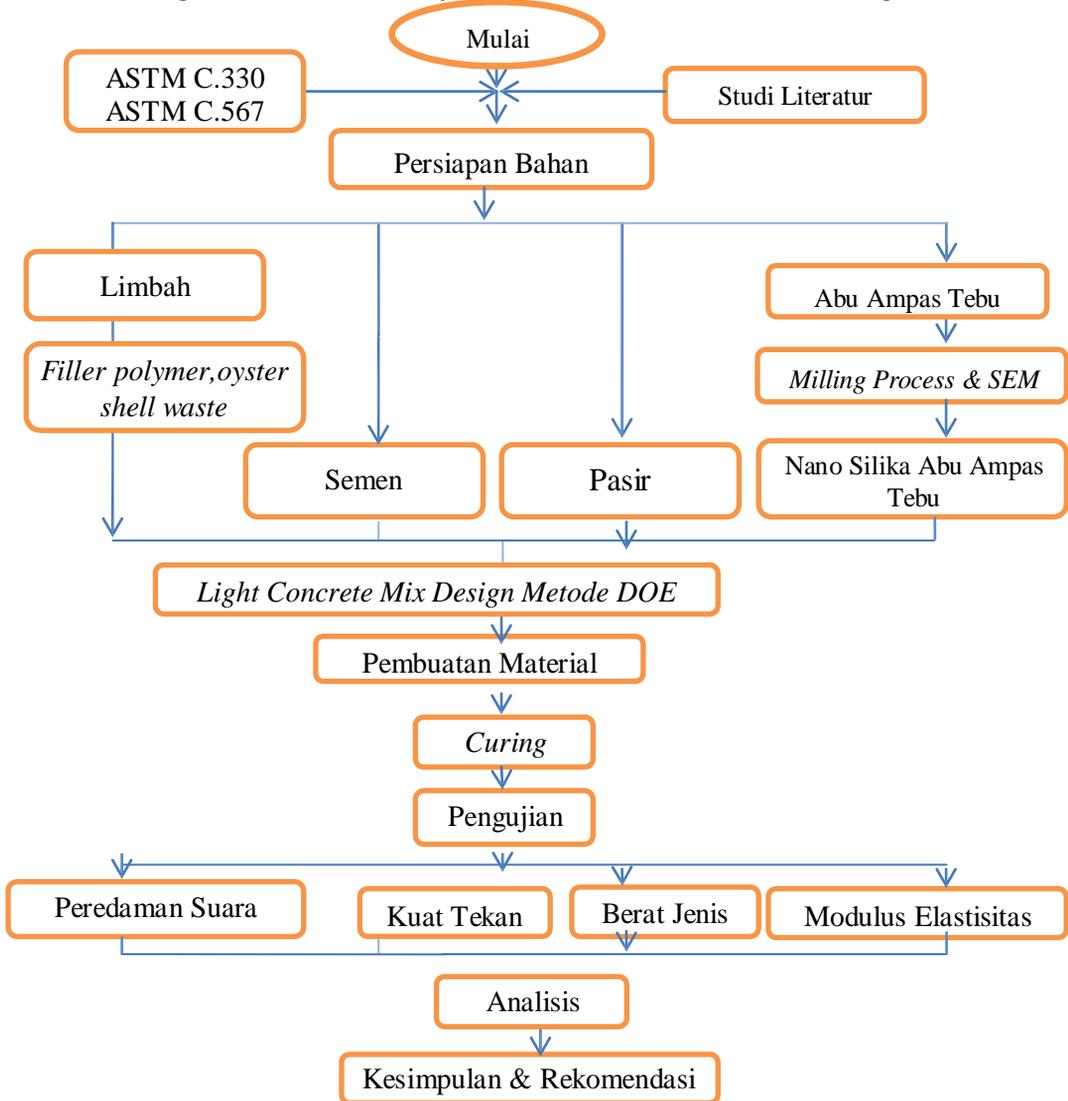
Gambar 2.12. Model Rumah prefab modular sebagai *output* rekayasa material beton

BAB III

METODE REKAYASA MATERIAL BETON

3.1. Diagram Alir Rekayasa Material

Skema bagan alir metode rekayasa material beton ini adalah sebagai berikut:



Gambar 3.1. Skema *Fish Bone* Rekayasa Material [23]

3.2. Proses Pembuatan Beton Ringan

Pengambilan abu ampas tebu dilakukan di Pabrik Gula Trangkil, Pati, Jawa Tengah. Abu ampas tebu yang diambil merupakan hasil pembakaran dari ampas tebu sendiri, yang merupakan limbah sampingan yang sangat banyak dari pabrik gula.

Pasir yang digunakan adalah pasir yang merupakan material vulkanik Gunung Merapi yang berada di Magelang atau yang dikenal dengan pasir muntilan. Pemilihan pasir muntilan didasarkan atas kualitasnya yang sangat baik untuk material konstruksi. Selain itu pasir muntilan juga sangat melimpah di daerah Magelang pasca erupsi Merapi 2010. *Limbah plastik, polymer ataupun cangkang kerang* yang digunakan dalam rekayasa material ini diolah terlebih dahulu menjadi agregat semen baik halus maupun kasar. Abu ampas tebu dihaluskan menggunakan *High Energy Milling* agar menjadi partikel nano *silica (nano technology method)* atau partikel mikro.

Light Concrete Mix Design (Disain Composit Beton Ringan)

Mix design merupakan metode dalam perancangan beton ringan. Metode ini didasarkan pada material penyusun beton, yaitu agregat kasar, agregat halus, dan semen sebagai pengikatnya. Metode *mix design* yang digunakan dalam rekayasa material ini adalah metode DOE (*Design of Experiment*).

Mix Design ini bertujuan untuk menentukan komposisi perbandingan dari material, yaitu perbandingan agregat kasar, agregat halus serta semen. Dalam rekayasa material ini agregat kasar yang berupa kerikil dalam pembuatan beton digantikan dengan *crystal plastik* untuk menghasilkan beton ringan. Selain itu semen sebagai pengikat juga akan disubstitusikan dengan abu ampas tebu.

Kuat tekan beton serta berat jenis pada tiap komposisi abu ampas tebu yang berbeda-beda diperbandingkan dengan tujuan mencari komposisi optimal. Selain itu pengujian dilakukan dalam beberapa rentan umur beton. Benda uji berbentuk silinder $\phi=15\text{cm}$ dan $t=30\text{cm}$ dibuat untuk Uji Kuat Tekan. Setiap jenis komposisi material dibuat sebanyak 9 benda uji yaitu masing-masing 3 benda uji untuk 7 hari, 3 benda uji untuk 14 hari dan 3 benda uji untuk 28 hari.

Tabel III.01. Jumlah Benda Uji Silinder untuk Setiap Variasi Komposisi Ampas Tebu (sebagai contoh) [23]:

	Komposisi Abu Ampas Tebu	Umur 7 hari	Umur 14 hari	Umur 28 hari	Keterangan
Tipe I	0%	3 buah	3 buah	3 buah	Mutu beton f_c' 40
Tipe II	10%	3 buah	3 buah	3 buah	MPa. Semen tipe I.
Tipe III	15%	3 buah	3 buah	3 buah	Pasir Muntilan.
Tipe IV	20%	3 buah	3 buah	3 buah	Abu Ampas Tebu dan limbah sebagai
Tipe V	25%	3 buah	3 buah	3 buah	agregat kasar

Prosedur Pembuatan agregat polymer [23]

- a. Kumpulkan limbah *polymer*, dan kelompokkan limbah polymer menjadi 3 bagian material untuk agregat polymer dengan ukuran: ϕ 1-2 cm, ϕ 1cm, ϕ 0,5 cm
- b. Sangrai *polymer* dengan 3 kelompok tersebut dengan penggoreng yang memiliki ketebalan 0,5 cm dengan material besi baja..
- c. Biarkan *polymer* meleleh saat dalam penggorengan, kemudian bentuk *polymer* menjadi bola-bola agregate (*bubble agregat*).
- d. Kelompokkan *polymer* sesuai dengan golongan ukuran agregat *polymer*.
- e. Agregat *polymer* siap dicampurkan dalam mix beton bersama material agregat lain.

Prosedur Pembuatan Benda Uji [24,25]

- a. Ambil semen, pasir, *filler-polymer* dan abu ampas tebu dengan perbandingan tertentu (ditentukan oleh hasil perancangan dengan *Mix Design* beton ringan).
- b. Timbanglah berat masing-masing material. Tentukan nilai faktor air semen (FAS) berdasarkan *Mix Design* beton ringan.
- c. Masukkan bahan-bahan tersebut ke dalam loyang dengan urutan: air, semen yang kemudian disusul dengan abu ampas tebu, kemudian disusul dengan pasir sebagian dan sterofom sebagian secara berselang seling (bergantian) hingga habis.
- d. Siapkan cetakan beton silinder dan kubus yang bagian dalamnya sudah diolesi *vaselin*/oli.
- e. Masukkan adonan beton ke dalam cetakan dengan pengisian dilakukan dalam tiga lapis, tiap lapis kurang lebih 1/3 volume.

- f. Tusuk setiap lapisan sebanyak 25 kali (menurut ASTM).
- g. Ratakan bagian atas cetakan dengan adukan beton dan kemudian beri kode beton serta tanggal pembuatan.
- h. Biarkan selama 24 jam, setelah itu rendam beton di dalam air sampai umur beton yang dikehendaki untuk diuji.
- i. Pengujian dilaksanakan pada umur beton 7, 14 dan 28 hari.

3.3. Modulus Elastisitas (*Modulus of Elasticity*)

Modulus elastisitas merupakan ukuran kekakuan suatu bahan elastis isotropik dan merupakan nilai yang digunakan untuk mengkarakterisasi suatu bahan. Modulus elastisitas (E) juga merupakan ukuran yang digunakan untuk menggambarkan kekakuan bahan. Dalam persamaan, MOE merupakan sebuah bagian dari gradien linear pada *Curve Stres Strain*. Persamaan Modulus Elastisitas berasal dari Hukum *Hook*, di mana kuat tekan beton merupakan hasil perkalian antara modulus elastisitas dan konstanta tegangan (M.Mahesh, 2012) [26]:

$$\sigma = E \times \varepsilon \dots\dots\dots(3-01)$$

$$\frac{P}{A} = E \times \frac{\Delta L}{L} \dots\dots\dots(3-02)$$

di mana σ merupakan kuat tekan dalam MPa atau N/mm², sementara E merupakan Modulus Elastisitas dalam MPa atau N/mm². ε merupakan konstanta tegangan, P merupakan kekuatan dalam Ton atau kg, dan A adalah luas permukaan material dalam m², cm² atau mm².

3.4. Metode Uji Koefisien Absorpsi

Koefisien penyerapan bahan dapat secara teliti dan seksama dihitung dengan menggunakan tabung impedansi. Koefisien penyerapan suara (α_0) dihitung dengan membandingkan tekanan bunyi yang jatuh pada permukaan bahan dan yang dipantulkannya . Pengujian terhadap koefisien penyerapan (absorpsi) pada suatu bahan/ material mengacu pada standar JIS a 1405 1963 [27]. Koefisien ini dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut [27,28]:

$$\alpha_0 = \frac{4}{n + \left(\frac{1}{n}\right) + 2} \dots\dots\dots(3-03)$$

dengan α_0 adalah *Sound absorption coefficient* (dB) dan n adalah rasio gelombang berdiri. Rasio gelombang berdiri (n) dihitung dengan mensubstitusikan nilai tahanan/ peredaman bunyi, sementara untuk menentukan rasio gelombang berdiri digunakan persamaan berikut ini [27]:

$$n = 10^{\left(\frac{L}{20}\right)} \dots\dots\dots(3-04)$$

Dimana n merupakan rasio gelombang berdiri dan L merupakan perbedaan tingkat intensitas bunyi. Pada proses Uji Koefisien Absorpsi (α), laboratorium ini menggunakan perangkat tabung Impedansi yang dilengkapi dengan 1 unit *microphone* untuk menyalurkan frekuensi suara dalam rentang frekuensi rendah sampai dengan tinggi [27].

3.5. Metode Uji *Sound Transmission Loss* (STL)

Berbeda dengan Uji koefisien absorpsi, uji rerugi transmisi suara/ *Sound Transmission Loss* (STL) menggunakan tabung impedansi yang dilengkapi dengan empat mikrofon yang memiliki kepekaan terhadap suara dengan frekuensi tinggi. Nilai rerugi transmisi suara /STL partisi didefinisikan sebagai rasio logaritma antara tekanan bunyi yang ditransmisikan (W_t) dan tekanan suara yang datang pada permukaan bahan/material partisi (W_i). Secara umum definisi STL tersebut di atas dapat dirumuskan sebagai [29,30]:

$$TL = 10 \log \frac{W_t}{W_i} \dots\dots\dots(3-05)$$

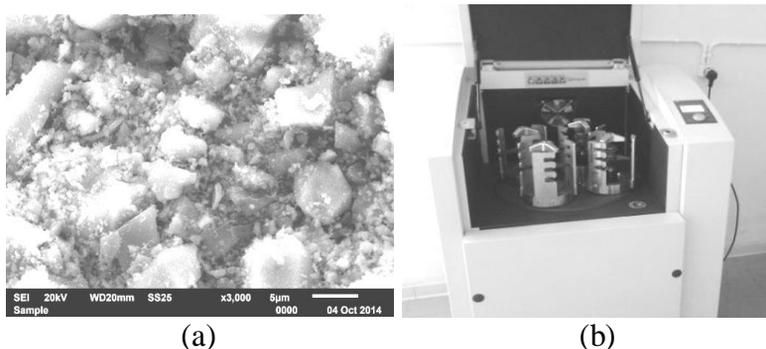
$$TL = 10 \log \frac{1}{r} \dots\dots\dots(3-06)$$

Nilai r adalah koefisien transmisi suara bahan yang dimaksud, yaitu nilai rasio antara kuat suara yang ditransfer/ditransmisi melalui material partisi dengan suara yang jatuh pada permukaan bahan. Berdasarkan ASTM E 413-2004 [29],

pengukuran nilai rerugi transmisi suara dalam tabung impedansi dilakukan dengan menggunakan rentang frekuensi 125 Hz hingga 4000 Hz dan filter 1/3 oktaf [30].

3.6. Teknologi Nano

Secara garis besar ada dua pendekatan untuk mendapatkan nanomaterial. Pertama dengan *Bottom Up* dan yang kedua adalah *Top Down*. *Bottom up* adalah metode mendapatkan material nano dengan melalui proses kimiawi. Sedangkan *Top down* adalah metode mendapatkan material nano dengan proses mekanik dengan penggerusan menggunakan alat *High Energy Milling* (S.A. Yousaf dan S. Ali,2007) [31]. Pada kegiatan pembuatan material beton berbahan limbah *polymer*, prinsip penerapan *top-down nanotechnology* menggunakan mesin *High Energy Milling* untuk menggerus abu ampas tebu yang berukuran mikro agar menjadi nano silika abu ampas tebu. Prinsip kerja alat ini adalah dengan melakukan tumbukan dan gerusan pada material yang awalnya berukuran mikro partikel menjadi berukuran nano partikel selama 2 jam, dengan kecepatan putaran 1.200 rpm, dengan menggunakan bola-bola penghancur/penghalus pada suatu wadah dalam mesin *Planetary Ball Mills (PBM)*. Untuk melakukan karakterisasi senyawa digunakan *Scanning Electron Microscopy (SEM)* sebagai mikroskop elektron dengan sinar elektron energi tinggi untuk mengobservasi material. Hal ini karena ukuran partikel nano yang sangat kecil (10^{-9} meter) sehingga tidak dapat dilihat oleh mikroskop cahaya yang hanya memiliki panjang gelombang cahaya tampak sekitar 400-700 nm. Berikut adalah deskripsi visual mesin *Planetary Ball Mills (PBM)* yang digunakan pada Laboratorium Terpadu Universitas Diponegoro, beserta sampel hasil *Scanning Electron Microscope (SEM)* material nano yang didapatkan:



Gambar 3.02: (a) Sampel hasil *Scanning Electron Microscope* (SEM); (b) *Planetary Ball Mills* (PBM) di Laboratorium Terpadu UNDIP [2].

3.7. *X-ray Diffractometry*

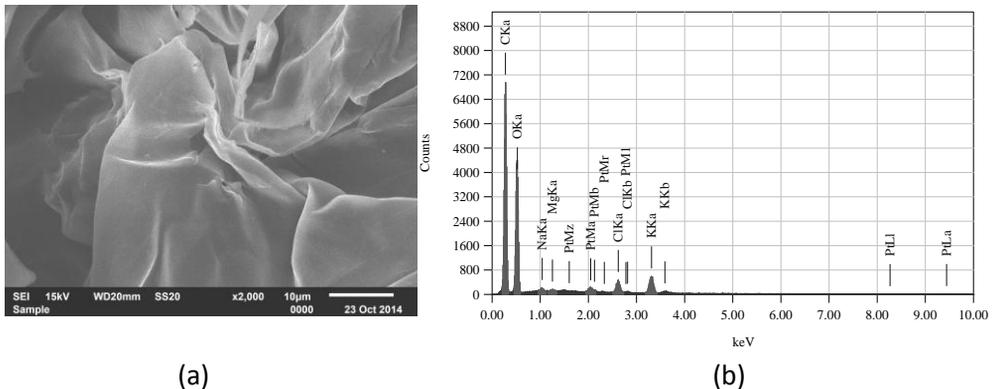
Analisis XRD (*X-Ray Diffraction*) abu ampas tebu dilakukan untuk mengetahui struktur dan ukuran kristal. Informasi tentang jenis kristal yang terdapat pada ampas tebu adalah untuk mengetahui target ukuran yang akan dihasilkan dari proses penggilingan/penggerusan (*milling process*) berdasarkan persamaan *Debye Scherrer*. Alat XRD merupakan suatu alat yang digunakan untuk mengkarakterisasi material padat berdasarkan fase yang terbentuk, struktur kristal, serta ukuran kristal (S.K. Syal, dan K.Vikas, 2013) [32]. Prinsip kerjanya yaitu ketika sinar-X jatuh pada sebuah kristal maka sinar-X tersebut akan dihamburkan ke segala arah, tetapi karena ada keteraturan letak atom-atom dalam kristal maka pada arah tertentu saja gelombang hambur akan berdifraksi. Ukuran kristalin ditentukan berdasarkan pelebaran puncak difraksi sinar-X yang muncul. Metode ini sebenarnya memprediksi ukuran kristalin dalam material, bukan ukuran partikel. Biasanya pada material nano [33], satu partikel hanya mengandung satu kristalin. Sehingga ukuran kristalin yang diprediksi dengan metode *Scherrer* disubstitusikan sebagai ukuran partikel. Ukuran kristal dapat dihitung dengan menggunakan persamaan *Scherrer* (3-07) [32] dengan nilai panjang gelombang, intensitas, 2θ , dan FWHM yang telah dihasilkan dari uji XRD. Berdasarkan penelitian A.S. Hanafi dan A.R. Nandang (2010) [34], bahwa penambahan silika berbentuk amorf memberikan kekuatan material yang lebih baik dari pada silika kristal. Berdasarkan penelitian A. Bahurudeen *et al.* (2014) [35], analisis *X-ray Diffractometry* akan dapat menunjukkan komposisi ampas tebu yang dikandung pada suatu material. Menurut penelitian A.Monshi, *et.al* (2012), pengamatan dengan menggunakan *X-ray Diffractometry* menggunakan persamaan Debye Scherrer [36]:

$$D = \frac{57,3 \times K \times \lambda}{\beta \times \cos \theta} \dots\dots\dots(3-07)$$

Dengan D adalah ukuran bulir kristal (nanometer), K merupakan suatu konstanta (dimana untuk semua bahan oksida adalah 0,94); λ merupakan panjang gelombang sinar-x yang digunakan ($\lambda=1,54060$ A), β adalah nilai FWHM (*Full Width at Half Maximum*, yang diperoleh dari data *X-Ray Diffraction*). Sementara, θ merupakan sudut puncak difraksi kristal, sedangkan nilai 57,3 adalah faktor koreksi dari derajat ke radian.

3.8. Scanning Electron Microscope (SEM)

Observasi dengan menggunakan SEM dilakukan di Laboratorium terpadu Universitas Diponegoro. Tujuan dari SEM adalah memastikan unsur apa saja yang terdapat dalam sampel material berukuran nano. Dalam buku ini, beberapa material seperti mortar *polymer* dan mortar cangkang kerang diobservasi kandungan unsurnya dengan menggunakan *Scanning Electron Microscope (SEM)*. Sebagai contoh, pada material abu ampas tebu, prosentase kandungan Silica (SiO_2) yang sangat penting dapat dipastikan dengan SEM tentang apakah material ini memenuhi standar yang ditetapkan dalam ASTM C-618. Demikian juga pada penelitian tentang mortar cangkang kerang, penulis meyakini bahwa cangkang kerang memiliki kandungan kalsium oksida (CaO) yang mencukupi sebagai material bangunan. Berikut adalah sampel hasil *Scanning Electron Microscope (SEM)* yang didapatkan dari Laboratorium Terpadu, Universitas Diponegoro:



Gambar 3.03: (a) Perbesaran 2000 x serbuk serabut kelapa; (b) Unsur yang terkandung dalam serbuk serabut kelapa [8].

BAB IV

MATERIAL BETON DARI LIMBAH STEROFOM

4.1 LATAR BELAKANG

Kesadaran global mengenai lingkungan hidup dan perubahan iklim beberapa tahun belakangan ini mulai meningkat tajam. Di bidang konstruksi hal ini ditunjukkan dengan mulai dikembangkannya konsep bangunan hijau (*green building*) atau bangunan ramah lingkungan. Berkembangnya gerakan hijau saat ini tidak hanya bertujuan untuk melindungi sumber daya alam, tetapi juga diimplementasikan sebagai upaya efisiensi penggunaan energi serta meminimalisir kerusakan lingkungan sekitar[37]. Hal ini sangat bermanfaat bagi negara berkembang, khususnya Indonesia, yang sedang melakukan pembangunan secara merata dan berkelanjutan. Limbah sterofom merupakan salah satu bahan yang sulit untuk diuraikan. Dalam kegiatan ini dilakukan peningkatan nilai limbah sterofom sebagai bahan pengganti buatan untuk agregat kasar sehingga diharapkan dapat membantu mengurangi masalah lingkungan yang terkait dengan limbah sterofom. Penggunaan material beton sterofom diharapkan akan menghasilkan beton dengan berat ringan (beton ringan) karena bahan ini memiliki kepadatan yang sangat kecil yaitu berkisar antara 13-16 kg/m³[5] dan sterofom dianggap sebagai bahan yang memiliki rongga udara. Pada penelitian Adithya et.al (2013)[5] dapat disimpulkan bahwa berat satuan beton tanpa penambahan bahan sterofom (0%) adalah 2.148,32 kg/m³ dan komposisi beton dengan sterofom, berat satuan beton akan berkurang sekitar 81,08 kg/m³ atau berkurang 4, 01%.

4.2 LIMBAH STEROFOM DAN ABU AMPAS TEBU

Beton ringan merupakan beton yang mengandung agregat ringan yang memenuhi persyaratan sesuai dengan ketentuan ASTM C.330 [9] dan beton tersebut memiliki satuan massa udara kering yang ditentukan oleh ASTM C.567[10] dan memiliki kepadatan tidak lebih dari 1.900 kg/cm³. Pada bidang manufaktur, beton ringan dapat dibuat melalui dua metode. Metode pertama adalah dengan membentuk beton ringan dengan menggunakan agregat ringan yang berpori dan memperhatikan tingkat kepadatan cahaya. Materi yang dihasilkan tersebut disebut sebagai agregat beton ringan. Metode kedua yang

dapat dilakukan yaitu dengan menciptakan pori-pori tinggi beton baik dengan menambahkan air ke beton atau *vacuuming* (pemberian ruang udara) beton. Beton ringan telah menjadi salah satu bahan pilihan bagi negara maju yang digunakan sebagai material dalam membangun bangunan, jembatan dan bangunan lepas pantai karena memiliki kepadatan yang sangat rendah. Pada beberapa dekade lalu, beton ringan merupakan bahan bangunan yang telah digunakan oleh orang-orang dari Asia dan Eropa. Bangunan yang dibangun menggunakan material beton ringan dapat mengurangi risiko kerusakan atau runtuh yang diakibatkan gempa karena massa yang ringan dari material tersebut. Sterofom (*Styrofoam*) sebenarnya merupakan bentuk lain dari plastik yang terbuat dari *co-polymer* atau dengan nama lain *poly-styrene*. Sterofom biasanya digunakan sebagai pembungkus elektronik, makanan cepat saji, dan kemasan buah segar. Namun, penggunaan sterofom dapat menyebabkan permasalahan baik untuk kesehatan dan lingkungan. Selain itu, unsur berbahaya dalam sterofom seperti *formaldehida* dan *benzana* dapat menyebabkan gangguan kesehatan. Rongga pada sterofom dapat menjadi tempat tinggal bakteri dan kuman. Sterofom adalah bahan yang sulit untuk dihancurkan oleh lingkungan sehingga bahan ini lebih berbahaya daripada limbah plastik. Penumpukan limbah sterofom pada isu lingkungan harus segera diatasi. Proses pembuatan sterofom juga menyebabkan bau yang tidak menyenangkan dan mencemari udara dengan 57 zat yang merusak lapisan ozon. Jadi sterofom berkontribusi negatif terhadap pemanasan global. Disisi lain, penambahan sterofom pada beton berbanding lurus dengan penurunan berat beton [5].



Gambar 4.01. Limbah sterofom

Abu ampas tebu merupakan produk sampingan (residu) dari pengolahan tebu (*saccharum officinarum*). Tebu diproses guna diambil getahnya yang kemudian dijadikan bahan dalam pembuatan gula. Tebu segar digiling beberapa kali menggunakan penggilingan besar hingga kandungan getah yang terkandung

dapat dikeluarkan. Proses penggilingan tebu tersebut dilakukan sampai gula benar-benar kering dari getah.

Tabel IV.01. Unsur yang terkandung dalam abu ampas tebu (*baggase ash*)

ZAF Method Standardless Quantitative Analysis (Oxide)
 Fitting Coefficient : 0.0438
 Total Oxide : 24.0

Element	(keV)	Mass%	Sigma	Mol%	Compound	Mass%	Cation	K
C K	0.277	76.01	0.31	94.23	C	76.01	0.00	71.7173
O		11.89						
Mg K	1.253	0.42	0.03	0.26	MgO	0.70	0.56	0.7474
Al K	1.486	0.47	0.04	0.13	Al ₂ O ₃	0.89	0.56	0.9602
Si K	1.739	8.88	0.15	4.71	SiO ₂	18.99	10.20	20.9292
P K	2.013	0.35	0.04	0.08	P ₂ O ₅	0.81	0.37	0.7564
K K	3.312	0.62	0.03	0.12	K ₂ O	0.75	0.51	1.5322
Ca K	3.690	1.02	0.04	0.38	CaO	1.42	0.82	2.5737
Fe K	6.398	0.35	0.04	0.09	FeO	0.45	0.20	0.7835
Total		100.00		100.00		100.00	13.22	

Ketika tebu masih dalam keadaan basah maka dilakukan penggilingan lagi dengan menambahkan bahan yang mampu menyerap sari tebu, serta meskipun volume yang dihasilkan tidak sebanyak penggilingan sebelumnya. Di pabrik gula, ampas tebu yang dihasilkan digunakan sebagai bahan bakar pemanas (*boiler*) untuk memproduksi energi uap. Proses pemanasan pada *boiler* mencapai 500°C-600°C dengan lama pemanasan selama 4-8 jam.

4.3 METODE PEMBUATAN

Sterofom digunakan sebagai bahan pengganti untuk agregat kasar sementara pasir Muntilan digunakan sebagai agregat halus yang merupakan bagian dari pemanfaatan sumber daya alam hasil letusan Gunung Merapi di Yogyakarta, Indonesia. Berdasarkan hasil yang diperoleh selama 7 hari, dengan persentase penambahan abu ampas tebu 15%, maka kekuatan tekan optimal beton adalah 3,16 MPa dan kekuatan tekan selama 28 hari mencapai 4,86 MPa. Kepadatan beton yang diperoleh mencapai 1.165 kg/m³.

Batafom juga memiliki suhu yang relatif lebih stabil dan lebih rendah dari suhu bata padat, suhu maksimum batafom (*foam brick*) mencapai 39,5° C sedangkan suhu maksimum bata-beton padat mencapai 42,5° C. Adapun prosedur pembuatan benda uji adalah sebagai berikut [24,25]:

- a. Persiapkan semen, pasir, sterofom dan abu ampas tebu dengan perbandingan tertentu (ditentukan oleh hasil desain berdasarkan prosedur pembuatan beton ringan).
- b. Ukur berat masing-masing bahan. Menentukan nilai dari rasio air-semen (FAS) berdasarkan *mix design* beton ringan.
- c. Masukkan bahan ke dalam panci dengan urutan: air secara keseluruhan, semen yang diikuti dengan abu ampas tebu, kemudian masukan pasir parsial dan sterofom kemudian diaduk hingga merata.
- d. Persiapkan cetakan beton berbentuk silinder dan kubus yang telah dioleskan *vaseline*/minyak.
- e. Masukkan adonan dengan mengisi beton ke dalam tiga lapisan, setiap lapisan terisi sekitar $1/3$ dari volume cetakan tersebut.
- f. Tusuk-tusuk setiap lapisan sebanyak 25 kali (berdasarkan ASTM).
- g. Ratakan bagian atas cetakan dengan beton, dan kemudian memberikan kode pada beton dan tanggal pembuatan.
- h. Diamkan selama 24 Jam, setelah itu rendam beton dalam air selama waktu yang diinginkan hingga beton siap untuk diuji.

Berikut adalah rekaman visual kegiatan *mix design* di laboratorium bahan dan Konstruksi Teknik Sipil Universitas Diponegoro [2].



Gambar 4.02.
Persiapan material [2]



Gambar 4.03.
Pencampuran material [2]



Gambar 4.04.
Penimbangan bahan[2]



Gambar 4.05.
Persiapan pengadukan[2]



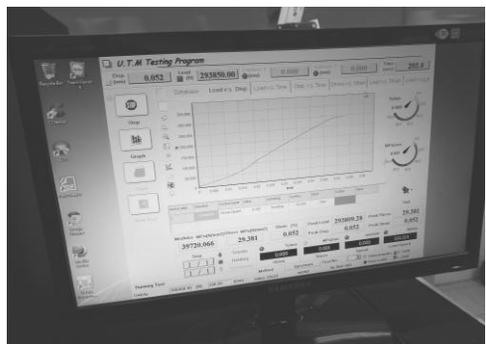
Gambar 4.06. Benda uji kuat tekan[2]



Gambar 4.07. Pencetakan material uji[2]



Gambar 4.08. Uji kuat tekan [2]



Gambar 4.09. Output data kuat tekan [2]

Tes tersebut dilakukan pada usia 7 hari, 14 hari, dan 28 hari [2,4,5,23,25]. Dalam menentukan kualitas beton yang terbuat dari limbah styrofoam, maka dilakukan tes sebagai berikut:

1. Kekuatan Tekanan

Dengan penambahan sterofom dan substitusi *fly-ash* diharapkan akan menghasilkan beton ringan dengan kekuatan tekanan yang lebih tinggi.

$$\sigma = \frac{P}{A} \dots\dots\dots(4-01)$$

Dimana σ adalah kuat tekan (kg/cm^2), P adalah beban (kg) dan A adalah luas permukaan material (cm^2)

2. Berat Jenis Bahan

Memperoleh tingkat gravitasi spesifik pada sterofom dan beton dengan *fly ash*.

$$D = \frac{A}{V} \dots\dots\dots(4-02)$$

dengan D adalah Berat Jenis, A adalah luas permukaan material (cm^2) dan V adalah volume dalam cm^3 .

Rekayasa ini berkaitan dengan bahan ramah lingkungan yang bertujuan untuk memanfaatkan limbah sterofom dan abu ampas tebu sebagai bahan bangunan yang ramah lingkungan. Pada kegiatan pembuatan material beton ini, kronologi diagram „*fish-bone*” akan mengikuti skema pada halaman sebelumnya.

4.4. UJI MATERIAL

Pengambilan abu ampas tebu berasal dari pabrik yang terletak di desa Trangkil, Pati, Jawa Tengah, Indonesia. Abu yang sangat banyak tersebut diambil dari hasil proses pembakaran yang dihasilkan dalam proses produksi pabrik gula. Pasir yang digunakan adalah pasir Muntilan. Pemilihan pasir Muntilan didasarkan pada kualitas bahan konstruksi tersebut. Bahwa materi tersebut juga sangat berlimpah dan memberi manfaat di daerah sekitarnya setelah letusan Gunung Merapi pada tahun 2010, dimana gunung Merapi tersebut termasuk dalam salah satu gunung berapi aktif di Provinsi Jawa Tengah, Indonesia. Sterofom yang digunakan dalam kajian ini diproses dengan menggunakan alat pencacah sterofom (*styrofoam-crusher*).

Abu yang telah dihasilkan tersebut digiling dengan menggunakan penggilingan dengan energi tinggi untuk menghasilkan partikel silika berukuran nano.

Disain campuran beton (*concrete mix-design*) merupakan salah satu metode dalam desain beton ringan. Metode ini didasarkan pada bahan pembentuk beton, agregat kasar, agregat halus dan semen sebagai senyawa. Metode desain campuran beton yang digunakan adalah metode DOE. Hal ini bertujuan untuk mengetahui perbandingan komposisi bahan, rasio agregat kasar, agregat halus dan agregat kasar di semen. Kerikil atau kericak dalam pembuatan beton diganti dengan sterofom untuk membuat beton menjadi ringan. Selain itu, semen sebagai pengikat diganti dengan abu ampas tebu.

Tabel IV.02. Jumlah Obyek Uji Silinder untuk Setiap Komposisi Variasi Ampas Tebu

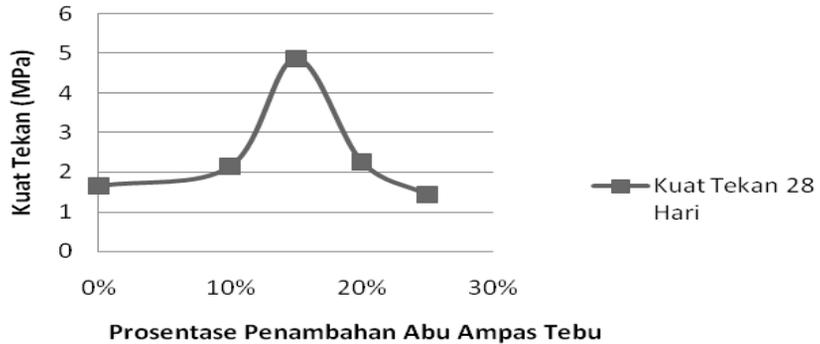
Jenis	Komposisi Ampas Tebu	Usia 7 hari	Usia 14 hari	Usia 28 hari	Keterangan
I	5%	3 unit	3 unit	3 unit	Kekuatan beton f_c '40 MPa.
II	10%	3 unit	3 unit	3 unit	Pasir vulkanik.
III	15%	3 unit	3 unit	3 unit	Ampas abu pabrik tebu,
IV	20%	3 unit	3 unit	3 unit	Pati. Limbah sterofom
V	25%	3 unit	3 unit	3 unit	

Kekuatan tekan beton dan kepadatan komposisi abu ampas tebu diperbandingkan dengan tujuan mencari kekuatan tekan yang optimal. Selain itu, pengujian komposisi dilakukan pada beton dalam usia tertentu. Untuk benda uji kuat tekan harus memiliki nilai silinder $\phi = 15$ cm dan $t = 30$ cm. Setiap jenis benda uji sebanyak 9 masing-masing 3 spesimen selama 7 hari, 3 spesimen selama 14 hari dan 3 spesimen selama 28 hari (lihat tabel IV.02).

Berdasarkan rekayasa material beton sebelumnya, diperoleh persentase optimal batafom (*foam brick*) dengan penambahan 15% abu ampas tebu sebagai berikut:

Tabel IV.03: Persentase penambahan optimal abu ampas tebu adalah 15% [5]

	semen	pasir	split	air
1		2,08	2,36	0,45



Gambar 4.10. Penambahan abu ampas tebu terhadap kuat tekan pada umur 28 hari [5]

Sterofom digunakan sebagai pengganti agregat pada beton dari 100% split pada rasio volume. Adapun keuntungan dalam menggunakan bahan sterofom dan abu sebagai aerasi bahan beton ringan adalah bertujuan untuk menemukan bahan bangunan ramah lingkungan yang memiliki beberapa keuntungan, antara lain:

1. Penggunaan bahan limbah akan mengurangi biaya pembuatan dan meningkatkan nilai limbah industri.
2. Meminimalisir dampak gempa yang timbul yang diakibatkan karena berkurangnya berat struktur bangunan, sehingga struktur akan aman dan cocok untuk bahan bangunan perumahan di daerah rawan gempa.
3. Pori-pori yang terdapat pada sterofom memungkinkan digunakan sebagai peredam getaran dan kebisingan.



(a)



(b)

Gambar 4.11. (a) Batafom yang dihasilkan
(b) Proses uji *Sound Insulation* [5]

BAB V

MATERIAL BETON BERBAHAN LIMBAH *POLYMER*

5.1 LATAR BELAKANG

Lingkungan hijau (*green environment*) tidak hanya diartikan sebagai lingkungan yang dikonservasikan. Lingkungan hijau memiliki kondisi yang bebas dari limbah berbahaya yang merusak lingkungan. Di sisi lain, dunia konstruksi baik secara langsung maupun tidak langsung berkontribusi pada degradasi lingkungan yang mengakibatkan pemanasan global dan perubahan iklim [2,25,36]. Salah satu contoh adalah penggunaan semen pada konstruksi bangunan yang menyumbang emisi CO₂ terbesar kedua setelah penggunaan bidang elektrikal [37]. Isu lain yang berkembang adalah meningkatnya harga minyak yang menyebabkan naiknya harga produk bahan konstruksi termasuk bahan bangunan seperti batu bata merah, bata pracetak dan sejumlah bahan konstruksi lainnya. Oleh karena itu, rekayasa material pada produk-produk hijau wajib memenuhi tantangan dari aspek ekonomis dan lingkungan. Penggunaan abu ampas tebu (*bagasse ash*) dari pabrik gula Trangkil-Pati, Jawa Tengah, Indonesia telah terbukti mampu meningkatkan kekuatan tekan beton ringan karena sifatnya yang menyerupai *fly ash* [5].

Plastik merupakan limbah yang sulit diurai, biasanya plastik ini sering dijumpai sebagai pembungkus yang *fleksibel* digunakan untuk segala macam barang. Peningkatan nilai guna *filler-Polymer* sebagai material buatan pengganti agregat kasar dalam percobaan ini akan turut mengurangi permasalahan lingkungan berkaitan dengan limbah plastik. Limbah plastik yang diolah menjadi *filler polymer* ini akan menggantikan kedudukan sterofoam yang sifatnya masih berupa percobaan dasar serta sulit eksplorasi limbahnya. Penggunaan *polymer* pada beton akan menghasilkan beton ringan (*light-weight concrete*) karena memiliki berat jenis yang sangat kecil yaitu berkisar antara 13-16 kg/m³(ASTM C 567) [10].

Penggunaan semen sebagai material konstruksi telah mendapat sorotan dari para pemerhati lingkungan. Hal ini disebabkan karena proses kalsinasi kapur dan pembakaran batu bara oleh industri semen menghasilkan emisi karbon dioksida (CO₂) yang memainkan peran penting sebagai komponen terbesar gas rumah kaca. Emisi karbon dioksida yang disumbang dari industri semen sekitar 930 juta ton/tahun, menempati urutan kedua setelah pembangkit tenaga listrik

atau dengan kata lain berkontribusi sekitar 7% dari total emisi gas CO₂ yang berkisar 13.470 juta ton/tahun (*data Inter-Governmental Panel on climate Change/IPCC*) [38].

5.2 LIMBAH POLYMER

Bab terdahulu telah membicarakan material beton dengan substitusi agregat sterofom. Kandungan berbahaya pada sterofom seperti *formalin* dan *benzana* dapat menimbulkan gangguan pada kesehatan. Rongga pada sterofom dapat dijadikan tempat bersemayamnya bakteri dan kuman penyakit. Selain itu limbah sterofom sangat sulit didapat, walaupun ada maka eksplorasi limbahnya sudah semakin sulit saat ini. Limbah *polymer* (plastik) lebih mudah didapat dibandingkan dengan sterofom. Oleh karena itu pada bab ini akan dibahas rekayasa material beton yang mensubstitusikan sterofom dengan limbah plastik. Namun limbah plastik ini harus dieleh terlebih dahulu menjadi *Filler-Polymer*.



(a)

(b)

Gambar 5.01. (a) Limbah Sterofom dan (b) limbah plastik

Plastik merupakan bahan yang sulit dihancurkan dan diurai oleh lingkungan sehingga bahan ini berbahaya bagi lingkungan. Hal ini mengakibatkan limbah *plastik* menumpuk dan menjadi masalah lingkungan yang harus segera diatasi. Kuliner mie *instant* yang berada disekeliling kampus dan limbahnya menjadi gagasan tim untuk mengolah kembali limbah plastik mie *instant* atau kemasan plastik sejenis menjadi agregat beton (*filler-polymer*). Polymer bungkus mie instant atau sejenisnya termasuk kategori *Low Density Poly-Ethylene (LDPE)* yang dapat didaur ulang. Proses pembuatan *filler-polymer* dilakukan di workshop dengan dipandu oleh tim dari teknik kimia.

5.3 METODE PEMBUATAN

Pengambilan abu ampas tebu dilakukan di Pabrik Gula Trangkil, Pati Jawa Tengah. Abu ampas tebu yang diambil merupakan hasil pembakaran dari ampas tebu sendiri, yang merupakan limbah sampingan yang sangat banyak dari pabrik gula. Pasir yang digunakan adalah pasir yang merupakan material vulkanik Gunung Merapi yang berada di Magelang atau yang dikenal dengan pasir muntilan. *Limbah plastik* yang digunakan diolah terlebih dahulu menjadi *Filler- Polymer*. Abu ampas tebu digerus menggunakan *High Energy Milling* agar menjadi partikel nano silika.

Concrete mix design merupakan metode dalam perancangan beton ringan. Metode ini didasarkan pada material penyusun beton, yaitu agregat kasar, agregat halus, dan semen sebagai pengikatnya. Metode *mix design* yang digunakan adalah metode DOE (*Design of Experiment*). *Mix Design* ini bertujuan untuk menentukan komposisi perbandingan dari material, yaitu perbandingan agregat kasar, agregat halus serta semen. Agregat kasar yang berupa kerikil dalam pembuatan beton digantikan dengan *agregat polimer/plastik* untuk menghasilkan beton ringan. Selain itu semen sebagai pengikat disubstitusikan dengan abu ampas tebu. Kegiatan ini membandingkan kuat tekan beton serta berat jenis pada tiap komposisi abu ampas tebu yang berbeda-beda dengan tujuan mencari komposisi optimal. Selain itu pengujian dilakukan dalam beberapa rentan umur beton. Untuk pengujian kuat tekan akan dibuat benda uji berbentuk silinder $\phi=15\text{cm}$ dan $t=30\text{cm}$. Setiap jenis sebanyak 9 benda uji untuk 7, 14, dan 28 hari umur beton.

Prosedur Pembuatan agregat polymer

- a. Kumpulkan limbah *polymer*, dan kelompokkan limbah *polymer* menjadi 3 bagian material untuk agregat polymer dengan ukuran: $\phi 1-2\text{ cm}$, $\phi 1\text{ cm}$, $\phi 0,5\text{ cm}$
- b. Sangrai *polymer* dengan 3 kelompok tersebut dengan penggoreng yang memiliki ketebalan 0,5 cm dengan material besi baja..
- c. Biarkan *polymer* meleleh saat dalam penggorengan, kemudian bentuk polymer menjadi bola-bola agregate (*bubble agregat*).
- d. Kelompokkan *polymer* sesuai dengan golongan ukuran agregat *polymer*.
- e. Agregat *polymer* siap dicampurkan dalam mix beton bersama material agregat lain.

Prosedur Pembuatan Benda Uji [24,25]

- a. Ambil semen, pasir, *filler-polymer* dan abu ampas tebu dengan perbandingan tertentu (ditentukan oleh hasil perancangan dengan *Light Concrete Mix Design*).
- b. Timbanglah berat masing-masing material. Tentukan nilai faktor air semen (FAS) berdasarkan *Light Concrete Mix Design*.
- c. Masukkan bahan-bahan tersebut ke dalam loyang dengan urutan: air, semen yang kemudian disusul dengan abu ampas tebu, kemudian disusul dengan pasir sebagian dan *styrofoam* sebagian secara selang seling hingga habis.
- d. Siapkan cetakan beton silinder dan kubus yang bagian dalamnya sudah diolesi vaselin/oli.
- e. Masukkan adonan beton ke dalam cetakan dengan pengisian dilakukan dalam tiga lapis, tiap lapis kurang lebih $\frac{1}{3}$ volume.
- f. Tusuk setiap lapisan sebanyak 25 kali (menurut ASTM).
- g. Ratakan bagian atas cetakan dengan adukan beton dan kemudian beri kode beton serta tanggal pembuatan.
- h. Biarkan selama 24 jam, setelah itu rendam beton di dalam air sampai umur beton yang dikehendaki untuk diuji.
- i. Pengujian dilakukan pada umur 7 hari, 14 hari, dan 28 hari.

Berikut deskripsi visual kegiatan pengambilan limbah dan *mix design* pada Laboratorium Bahan dan Konstruksi Teknik Sipil Universitas Diponegoro [2]:



Gambar 5.02.

Pengambilan limbah abu ampas tebu di pabrik gula Trangkil [2]



Gambar 5.03.

Penimbangan limbah abu ampas tebu [2]



Gambar 5.04.
Persiapan alat proses *mix design* [2]



Gambar 5.05. Pencampuran agregat
dengan pasir [2]



Gambar 5.06.
Pengadukan bahan pada laboratorium [2]



Gambar 5.07.
Penuangan campuran *mix design* ke dalam
cetakan benda uji [2]



Gambar 5.08. Pencetakan
campuran beton [2]



Gambar 5.09. Pencetakan
campuran beton [2]



Gambar 5.10. Persiapan *mix design* [2]



Gambar 5.11. Persiapan pengadukan material[2]



Gambar 5.12. *Planetary ball mills* pada laboratorium Terpadu Universitas Diponegoro[2]

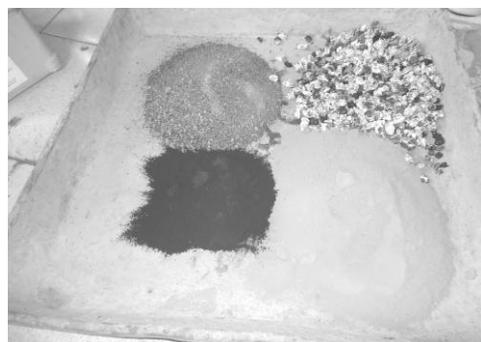


Gambar 5.13. Agregat polymer dalam rekayasa material [2]

Sementara proses pengadukan (*mix design*) dan uji material adalah sebagai berikut:



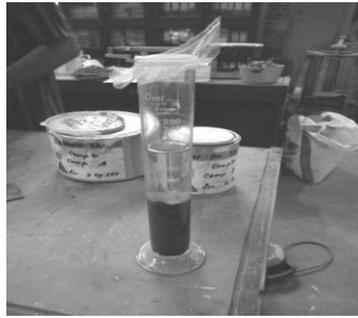
Gambar 5.14. Persiapan penimbangan material[2]



Gambar 5.15. Persiapan *mix design*[2]



Gambar 5.16. Pengadukan agregat material beton (mortar)[2]



Gambar 5.17. Penimbangan vaselin [2]



Gambar 5.18. Proses pencetakan [2]



Gambar 5.19. Cetakan benda uji [2]



Gambar 5.20. Material uji Kuat tekan (*Compressive Strength*)[2]



Gambar 5.21. Uji Kuat Tekan (*Compressive Strength Test*)[2]

5.4. UJI MATERIAL

5.4.1. Pengujian Beton Ringan

Untuk mengetahui mutu dari beton dengan polimer dan abu ampas tebu maka dilakukan pengujian-pengujian sebagai berikut :

- a. Kuat Tekan
- b. Berat Jenis
- c. Modulus Elastisitas

5.4.2. Pengujian Intensitas Kebisingan dan Suhu Ruang

Untuk mengetahui kemampuan batafoam dalam menginsulasi bising dan panas termal dilakukan pengujian Koefisien Absorpsi dan *Sound Transmission Loss (STL)* pada Laboratorium Akustik Jurusan Fisika Fakultas MIPA Universitas Negeri Surakarta Sebelas Maret. Uji kemampuan akustik mortar *polymer* terdiri dari:

- a. Uji Koefisien Absorpsi
- b. Uji *Sound Transmission Loss (STL)*

5.5. HASIL KEGIATAN

5.5.1. Kerapatan (*Density*)

Kubus dengan rusuk 10 cm ditimbang dan tercatat sebagai berat awal (m). Panjang (p), lebar (l) dan ketebalan (t). Sampel kemudian diukur menggunakan caliper. Volume benda uji dihitung sebagai volume x lebar x ketebalan (cm³). Setelah volume ditentukan, kemudian kepadatan bisa dihitung dengan rumus (1)

$$\rho = \frac{m}{V} \dots\dots\dots(5-01)$$

dengan ρ adalah Kerapatan (g/cm³), m adalah berat material (g) dan V adalah Volume dalam cm³.

Dari sampel material diketahui kerapatan (*density*) sebagai berikut:

Tabel V.01: Kerapatan sampel material mortar *polymer* [2]

Test sampel	Umu r	Bera t	Kerapat an	Kerapatan rata2
Agregat kasar- normal 100%	2	2,45	2,45	2,44
	2	2,47	2,47	
	2	2,39	2,39	
Agregat <i>polymer</i> 100% + Nano 0%	2	1,73	1,73	1,73
	2	1,77	1,77	
	2	1,70	1,70	
Agregat <i>polymer</i> 100% + Nano 10%	2	1,76	1,76	1,76
	2	1,75	1,75	
	2	1,76	1,76	
Agregat <i>polymer</i> 100% + Nano 20%	2	1,76	1,76	1,76
	2	1,74	1,74	
	2	1,77	1,77	

Penggantian agregat kasar dengan *polymer* menyebabkan material beton menjadi lebih ringan 28,89%. Material dengan agregat kasar memiliki berat 2,437 gram, sedangkan berat material dengan *polymer* sebagai agregat adalah 1,733 gram (lihat tabel V.01). Penurunan kerapatan sebanding dengan penurunan berat material.

5.5.2. Kuat Tekan (*Compressive Strength*)

Dalam rekayasa material ini, abu ampas tebu mensubstitusi 15% dari semen. Sementara *polymer* ditambahkan untuk menggantikan agregat kasar campuran beton. Komposisi material diharapkan membentuk material beton yang ringan dan memiliki kuat tekan yang optimal. Formulasi kuat tekan yang dipergunakan adalah sebagai berikut:

$$\sigma = \frac{P}{A} \dots\dots\dots(5-02)$$

Dengan σ adalah kuat tekan (kg/cm²), P adalah beban dalam (kg) dan A adalah luas penampang/ permukaan material (cm²).

Sedangkan untuk merubah Kuat tekan dari satuan kg/cm² menjadi Mpa, digunakan persamaan:

$$1\text{kg} / \text{cm}^2 = 0,083\text{Mpa}$$

.....(5-03)

Hasil uji kuat tekan dari sample material bata polymer adalah sebagai berikut:

Table V.02: Kuat tekan Sampel material mortar *polimer* [2]

Uji Sampel Kubus (10 x 10 x 10) cm ³	Umur (hari)	Berat (gram)	Beban	Kuat tekan	Kuat tekan rata2 (kg/cm ²)
Agregat kasar- normal 100% (NM)	23	2.450	35,0	350,0	400,00
	28	2.470	43,0	430,0	
	28	2.390	42,0	420,0	
Agregat <i>polymer</i> 100% + Nano 0% (PM)	23	1.730	12,0	120,0	133,33
	28	1.770	15,0	150,0	
	28	1.700	13,0	130,0	
Agregat <i>polymer</i> 100% + Nano 10% (NBPM)	23	1.760	14,0	140,0	146,67
	28	1.750	15,0	150,0	
	28	1.760	15,0	150,0	
Agregat <i>polymer</i> 100% + Nano 20% (NBPM)	20	1.760	15,0	150,0	166,0
	28	1.740	16,0	160,0	
	28	1.770	17,0	170,0	

Tabel V.02 mendeskripsikan bahwa Kuat Tekan Normal Mortar (NM) adalah 400,00 kg/cm². Jika agregat kasar diganti dengan *polymer* (*polymer-mortar*/PM), maka kekuatan tekan menjadi hanya 133,33 kg/cm². Oleh karena itu, material ini diperuntukkan bagi komponen pengisi dinding, bukan komponen struktur karena memiliki kekuatan tekan yang rendah. Kekuatan tekan menjadi bertambah ketika tim mensubstitusi sebagian semen dengan *nano* ampas tebu (abu ampas tebu berukuran nano). Pada komposisi *nano* ampas tebu (NBPM) 10%, kekuatan tekan naik 10,00% menjadi 146,67 kg/cm². Sementara pada komposisi 20% nano ampas tebu (NBPM), maka kekuatan tekan naik 24,50% menjadi 166,00 kg/cm²[2].

Kesimpulannya adalah bahwa teknologi nano pada abu ampas tebu akan meningkatkan kekuatan tekan material. Peningkatan kekuatan disebabkan oleh ukuran partikel nano dari ampas tebu yang masuk ke rongga kecil pada beton sehingga membuat material lebih padat dan memiliki kekuatan tekan yang besar [39]. Namun kenyataannya bahwa penggantian agregat kasar dengan *polymer* menyebabkan material tidak dapat dipergunakan sebagai komponen struktur pada industri konstruksi.

5.5.3. X-ray Diffractometry

Analisis XRD (*X-Ray Diffractometry*) ampas tebu dilakukan untuk mengetahui struktur dan ukuran kristal. Informasi tentang jenis kristal diperlukan untuk mengetahui jenis kristal yang terdapat pada ampas tebu yang berdampak pada kekuatan material dan ukuran kristal untuk mengetahui ukuran yang dihasilkan dari proses penggerusan (*milling*) berdasarkan persamaan *Debye Scherrer*. Berdasarkan penelitian yang pernah dilakukan oleh A.S. Hanafi dan A.R. Nandang (2010) [33], bahwa penambahan silika berbentuk *amorf* memberikan kekuatan material yang lebih baik dari pada bentuk silika kristalin. Berdasarkan penelitian yang pernah dilakukan oleh A. Bahurudeen *et al* (2014) [34] menunjukkan komposisi ampas tebu yang ditunjukkan pada tabel V.03.

Tabel V.03: Komposisi Oksida pada Nano abu ampas tebu tanpa pengabuan (Bahurudeen et. all, 2004) [34].

Komposisi oksida	Persentase
Si	57,
Ca	6,
Al ₂	1,
Fe ₂	1,
Mg	1,
K ₂	7,
Na ₂	0,
S	3,
Loss on ignition	2

Pengamatan dengan menggunakan *X-ray Diffractometry* menggunakan persamaan *Debye Scherrer* dalam rumus (5-04)[35]:

$$D = \frac{57,3 \times K \times \lambda}{\beta \times \cos \theta} \dots\dots\dots(5-04)$$

Dengan D adalah ukuran bulir kristal (nanometer), K merupakan suatu konstanta (dimana untuk semua bahan oksida adalah 0,94); λ merupakan panjang gelombang sinar-x yang digunakan ($\lambda=1,54060$ A), β adalah nilai FWHM (*Full Width at Half Maximum*, yang diperoleh dari data *X-Ray Diffraction*). Sementara, θ merupakan sudut puncak difraksi kristal, sedangkan nilai 57,3 adalah faktor koreksi dari derajat ke radian.

Tabel V.04. Perbandingan ukuran unsur kimia dalam NSCBA (nano abu ampas tebu) sebelum dan sesudah pengabuan (*calcination*):

Unsur	<i>Sebelum Pengabuan</i>				<i>Setelah Pengabuan</i>			
	2θ	β	D	D	2θ	β	D (nm)	D
SiO ₂	26,646	0,1664	49,047	50,8111	26,73	0,14580	55,9870	52,3494
	20,880	0,1565	51,600		20,95	0,21250	38,0069	
	50,128	0,1693	51,786		50,22	0,13910	63,0544	
Fe ₂ O ₃ kubik	35,445	0,1850	45,067	49,0819				
	56,862	0,1703	53,030					
	73,751	0,2020	49,148					
Fe ₂ O ₃ Rhombohedral	33,174	0,1714	48,346	56,4011				
	40,293	0,1258	6,244					
	49,779	0,1633	53,612					
Al ₂ O ₃	21,816	0,3633	22,262	41,5551	40,38	0,15340	55,1618	57,8644
	23,674	0,1675	48,443		23,67	0,12860	66,0542	
	28,040	0,1517	53,959		28,04	0,17510	52,3771	
CaO	16,660	0,1214	66,110	62,3008	16,48	0,15000	53,4978	57,6521
	24,052	0,1428	56,862		29,50	0,19450	42,2238	
	34,283	0,1300	63,930		58,75	0,11800	77,2347	
K ₂ O	39,504	0,1510	55,880	76,7277	27,58	0,15000	54,5167	59,0518
	57,073	0,0967	93,484		39,54	0,13600	62,0533	
	64,201	0,1160	80,819		48,55	0,14380	60,5855	
MgO	38,370	0,1100	76,443	70,4510	39,35	0,08000	105,428	86,0972
	44,913	0,1050	81,841	44,49	0,11770	72,9025		
	73,443	0,1867	53,069	59,32	0,11430	79,9611		
Na ₂ O	27,771	0,2100	38,956	66,8443				
	32,335	0,0834	99,146					
	54,827	0,1433	62,431					
P ₂ O ₅					34,16	0,13430	61,8640	79,3049
					36,86	0,09030	92,0081	
					42,23	0,10130	84,0426	
CuO	32,335	0,0834	38,956	54,3993	27,77	0,21000	38,9560	66,8443
	53,424	0,1240	71,698		32,33	0,08340	99,1460	
	68,170	0,1825	52,543		54,82	0,14330	62,4310	

Tabel V.04 mendeskripsikan tentang kandungan unsur yang terdapat dalam nano abu ampas tebu. Delapan unsur yang terdapat dalam nano abu ampas tebu adalah: SiO₂, Fe₂O₃ (*cubic*), Fe₂O₃ (rhombohedral), Al₂O₃, CaO, K₂O, MgO, Na₂O. Dari delapan unsur tersebut, ukuran terbesar dimiliki oleh K₂O dengan ukuran 76,7277 nm, sedangkan Al₂O₃ memiliki ukuran terkecil sebesar 41,5551 nm. Unsur dominan lain dalam nano abu ampas tebu, Silika (SiO₂), memiliki ukuran sebesar 50,8111 nm.

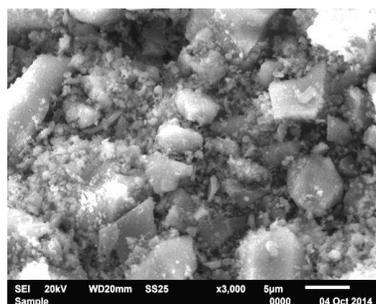
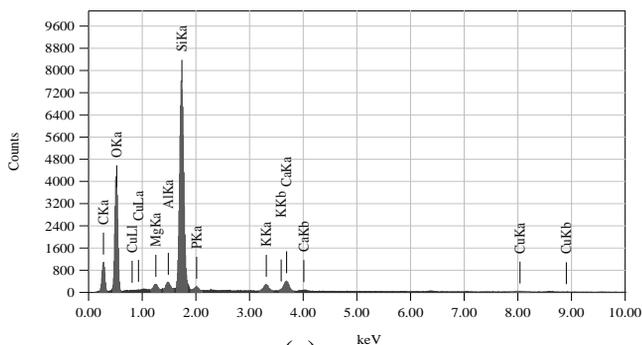
5.5.4. SEM (Scanning Electron Microscope)

Observasi dengan menggunakan SEM dilakukan di Laboratorium terpadu Universitas Diponegoro. Tujuan dari SEM adalah memastikan unsur apa saja yang terdapat dalam sampel material nano abu ampas tebu setelah pengabuan yang menjadi obyek dari rekayasa material ini. Berikut hasil SEM:

Tabel V.05: Unsur dalam nano abu ampas tebu setelah pengabuan

ZAF Method Standardless Quantitative Analysis(Oxide)
 Fitting Coefficient : 0.0570
 Total Oxide : 24.0

Element	(keV)	Mass%	Sigma	Mol%	Compound	Mass%	Cation	K
C K	0.277	50.30	0.40	83.84	C	50.30	0.00	30.6030
O		24.99						
Mg K	1.253	0.60	0.04	0.49	MgO	0.99	0.38	1.2430
Al K	1.486	0.63	0.05	0.23	Al ₂ O ₃	1.19	0.36	1.5387
Si K	1.739	19.57	0.26	13.95	SiO ₂	41.86	10.70	55.4459
P K	2.013	0.54	0.06	0.17	P ₂ O ₅	1.24	0.27	1.2414
K K	3.312	1.03	0.04	0.26	K ₂ O	1.25	0.41	3.0423
Ca K	3.690	1.68	0.06	0.84	CaO	2.35	0.64	5.1161
Cu K	8.040	0.66	0.07	0.21	CuO	0.83	0.16	1.7696
Total		100.00		100.00		100.00	12.92	



(a)

(b)

Gambar 5.22. (a) Grafik *Scanning Electron Nano* abu ampas tebu setelah pengabuan;(b) SEM 3000 X Nano abu ampas tebu setelah pengabuan [2].

Tabel V.05 memperlihatkan bahwa unsur dominan dalam nano abu ampas tebu setelah pengabuan adalah Carbon (C) dengan proporsi prosentase 50,30%. Unsur dominan berikutnya adalah SiO₂ dengan prosentase sebesar 41,86% turun sebesar 15,77% dibandingkan dengan kondisi sebelum pengabuan (lihat tabel V.06).

Tabel V.06. Perbandingan kandungan unsur nano abu ampas tebu sebelum dan sesudah pengabuan [2]

Komposisi oksida	Persentase (%)	Komposisi oksida	Persentase (%)
SiO ₂	57,63	SiO ₂	41,86
CaO	6,14	CaO	2,35
Al ₂ O ₃	1,33	Al ₂ O ₃	1,19
Fe ₂ O ₃	1,50	P ₂ O ₅	1,24
MgO	1,56	MgO	0,99
K ₂ O	7,33	K ₂ O	1,25
Na ₂ O	0,22	CuO	2,35
SO ₃	3,52	C	50,30
Loss on ignition	21		

Kesimpulannya adalah bahwa proses pengabuan akan mereduksi kandungan silika. Berkurangnya silika akan mempengaruhi kuat tekan yang dimiliki oleh material beton. Gambar 5.22(a) memperlihatkan bahwa Silika tetap sebagai unsur dominan dalam nano abu ampas tebu setelah proses pengabuan, walaupun terjadi pengurangan prosentase.

Sedangkan gambar 5.22(b) memperlihatkan nano abu ampas tebu setelah pengabuan hasil *Scanning Electron Microscope* dengan skala 3000x. Sebagaimana terlihat dalam gambar bahwa struktur nano yang *amorf* pada nano material sebelum sebagian berubah menjadi struktur kristalin. Kondisi struktur yang kristalin membuat kekuatan material lebih lemah dibandingkan struktur amorf.

5.5.5. Uji Akustik Material

Uji koefisien absorpsi membutuhkan beberapa alat diantaranya adalah tabung impedansi. Beberapa laboratorium yang memiliki alat tersebut adalah: Laboratorium Akustik Jurusan Fisika Fakultas Teknik Industri ITB, Laboratorium Komposit Departemen Hasil Hutan Fakultas Kehutanan IPB dan Laboratorium Akustik Jurusan Fisika Fakultas MIPA – UNS Sebelas Maret Surakarta. Dari pertimbangan kemudahan dan kontrol proses uji Akustik, maka peneliti menentukan pilihan uji material Akustik pada Laboratorium Akustik Fakultas MIPA-UNS Sebelas Maret Surakarta. Koefisien absorpsi suara yang diukur dengan tabung impedansi adalah koefisien absorpsi suara normal.

Koefisien absorpsi suara (α_0) ini dihitung dengan cara memperbandingkan tekanan suara yang jatuh dan yang direfleksikan oleh material. Koefisien tersebut dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

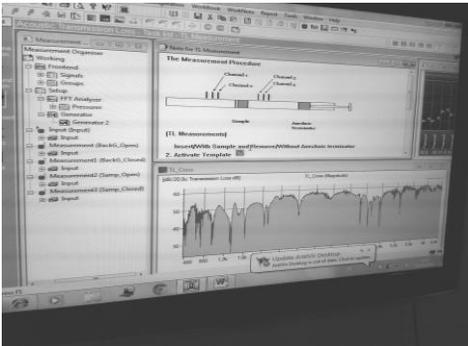
$$\alpha_0 = \frac{4}{n + \left(\frac{1}{n}\right) + 2} \dots\dots\dots(5-05)$$

Nilai α_0 adalah koefisien absorpsi suara dan n adalah rasio gelombang berdiri. Dimana rasio gelombang berdiri (n) diukur dengan mensubstitusikan tahanan/peredaman bunyi. Penentuan rasio gelombang berdiri dari suara (L) db menggunakan persamaan:

$$n = 10^{\left(\frac{L}{20}\right)} \dots\dots\dots(5-06)$$

Notasi n adalah rasio gelombang beridiri sedangkan L adalah perbedaan tekanan suara. Pada proses Uji Koefisien Absorpsi (α) laboratorium ini menggunakan perangkat tabung Impedansi yang dilengkapi dengan 1 unit mikrofon untuk menyalurkan frekuensi suara dalam rentang rendah sampai dengan tinggi.

Berikut adalah aktivitas uji koefisien absorpsi sampel material yang dilakukan pada laboratorium Akustik tersebut.



Gambar 5.23. Komputerisasi Output Uji Akustik[8]



Gambar 5.24. Setting sampel ke dalam tabung impedansi [8]

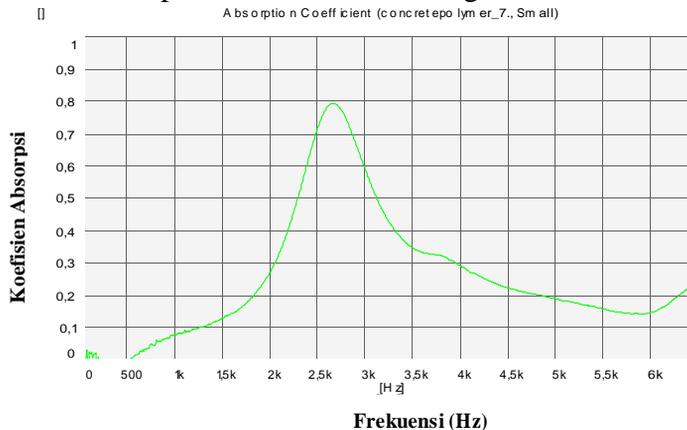


Gambar 5.25
Proses pemasangan sampel pada
Tabung impedansi [8]



Gambar 5.26.
Uji Koefisien Absorpsi
dengan tabung Impedansi [8]

Hasil uji koefisien absorpsi material adalah sebagai berikut:



Gambar 5.27. Koefisien Absorpsi mortar *Polymer* [2]

Terlihat pada gambar 5.27, bahwa material diuji dpada rentang frekuensi suara 0-6k. Kurva koefisien absorpsi menunjukkan bahwa mortar polymer memiliki kemampuan absorpsi suara yang baik pada rentang bunyi 2k-3,5k dengan nilai koefisien absorpsi 0,3-0,8. Sementara absorpsi terbaik tercatat pada frekuensi sekitar 2.625 Hz. Dengan hasil ini, maka dapat disimpulkan bahwa mortar polymer memiliki performa akustik paling baik pada frekuensi suara tengah (2,5k – 3k). Dengan demikian material bangunan berupa panel dinding dapat dibuat dari mortar polymer, khususnya bagi perumahan rawan bising perkotaan.

Kemampuan rata-rata nilai rerugi transmisi suara suatu bahan dari berbagai frekuensi disebut *Sound Transmission Class* (STC). Kemampuan suatu bahan dalam mereduksi bunyi dikatakan baik, jika nilai STC nya cukup tinggi. Nilai STC ditetapkan berdasarkan baku mutu ASTM E 413 yang dikeluarkan oleh *American Society for Testing and Materials* (ASTM) [29].

Nilai perbandingan logaritmis antara daya suara (W_t) yang diteruskan oleh suatu material dengan daya suara yang jatuh pada permukaannya (W_i) disebut nilai rerugi transmisi (*Sound Transmission Loss*) dalam satuan deci Bell (dB). Secara matematis STL dapat dirumuskan sebagai:

$$STL = 10 \log \frac{W_t}{W_i} \dots\dots\dots(5-07)$$

$$STL = 10 \log \frac{1}{r} \dots\dots\dots(5-08)$$

Nilai τ adalah koefisien transmisi suara dari bahan tersebut, yaitu rasio antara daya suara yang ditransmisikan bahan partisi terhadap daya suara yang datang [29]. Dalam cara yang konvensional, nilai rerugi transmisi membutuhkan dua ruang yang identik sama dengan sampel material diletakkan pada dinding antara. Ruang pertama berfungsi sebagai ruang sumber, sedangkan ruang yang lain berfungsi sebagai ruang penerima. Besarnya nilai rerugi transmisi (STL) dipengaruhi oleh absorpsi suara di ruang penerima. Nilai STL bukanlah selisih antara tingkat bunyi yang diperoleh dari kedua ruang tersebut, sehingga persamaan yang digunakan adalah [30]:

$$TL = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S}{A_{rec}} \quad \text{atau} \quad TL = NR + 10 \log \frac{S}{A_{rec}} \dots\dots\dots(5-09)$$

$$NR = L_1 - L_2 \dots\dots\dots(5-10)$$

$$A_{rec} = 0,161 \frac{V}{T_{60}} \dots\dots\dots(5-11)$$

dengan NR adalah *noise reduction*, L_1 adalah tingkat tekanan bunyi dalam ruang sumber, L_2 adalah tingkat tekanan bunyi dalam ruang penerima, S adalah luas sampel bahan partisi [m^2], $A_{rec} = S\alpha_{sab}$ = total penyerapan suara pada ruang penerima [m^3 Sabine], V volume ruang penerima [m^3], serta T_{60} waktu dengung ruang penerima. Pengukuran *Sound Transmission Loss* berdasarkan ASTM E 413-2004 [29] dilakukan dalam rentang frekuensi 125 Hz s.d. 4000 Hz dengan filter 1/3 oktaf. Kategori nilai STC/STL adalah sebagai berikut (Properti. Biz, B-panel.com, 2008) [39,40]:

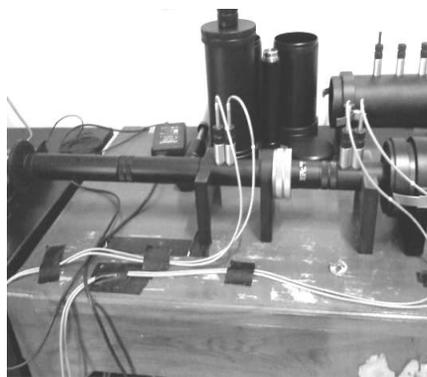
Tabel V.07. Kategori Nilai STC/STL bahan

Nilai STC/STL	Kriteria
50-60	Sangat baik sekali, suara keras terdengar lemah/tidak terdengar
40-50	Sangat baik, suara keras menjadi lemah
35-40	Baik, suara keras menjadi lemah dan sulit terdengar
30-35	Cukup, suara keras cukup terdengar
25-30	Buruk, suara normal mudah terdengar
20-25	Sangat buruk, suara lemah, mudah terdengar

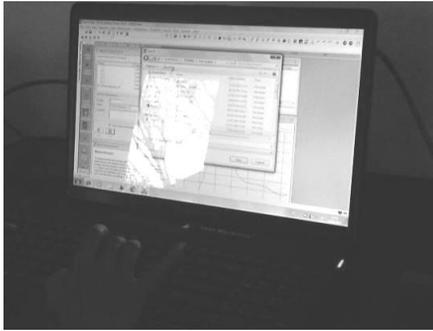
Uji *Sound Transmission Loss* (STL) menggunakan tabung impedansi yang dilengkapi dengan 4 unit mikrofon yang memiliki sensitivitas suara yang tinggi pada frekuensi rendah sampai dengan tinggi. Berikut adalah dokumentasi aktivitas pada saat dilakukan Uji STL pada Laboratorium akustik:



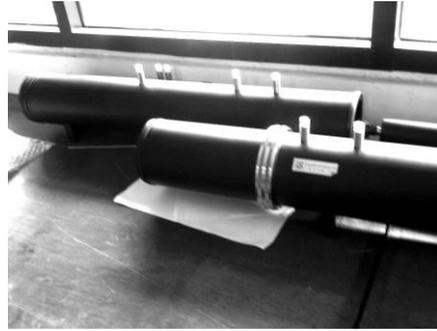
Gambar 5.28.
Proses analisis Uji STL[2,8]



Gambar 5.29.
Setting alat uji akustik [2,8]

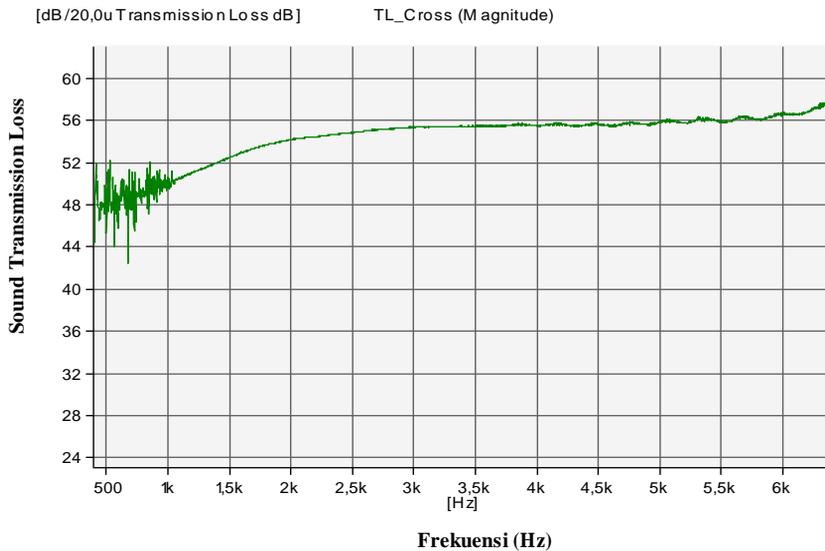


Gambar 5.30
Nilai STL tersistem secara
komputerisasi[2,8]



Gambar 5.31.
Tabung Impedansi

Untuk melakukan pengukuran *Sound Transmission Loss* (STL) maka sampel dimasukkan ke dalam tabung impedansi yang dilengkapi dengan 4 mikrofon. Hasil STL didapat setelah dengan memberikan rentang suara frekuensi rendah sampai dengan tinggi. Berikut adalah hasil nilai STL pada sample material:



Gambar 5.32: *Sound Transmission Loss (STL)* mortar Polymer[2]

Dari gambar 5.32, dapat dilihat bahwa mortar *polymer* memiliki nilai *Sound Transmission Loss (STL)* di atas 49 dB pada frekuensi 1.000 Hz ke atas. Hal ini membuktikan bahwa performa akustik material ini cukup baik sebagai material bangunan. Di atas frekuensi 6.000 Hz, material ini memiliki kemampuan rerugi transmisi hingga 57 dB.

Limbah *Polymer* yang digunakan dalam rekayasa material beton



Gambar 5.33.
Limbah sedotan plastik [2]



Gambar 5.34.
Limbah sedotan plastik [2]



Gambar 5.35.
Limbah plastik mie instant [2]



Gambar 5.36.
Butiran agregat plastik [2]



Gambar 5.37.
Pemanasan limbah plastik [2]

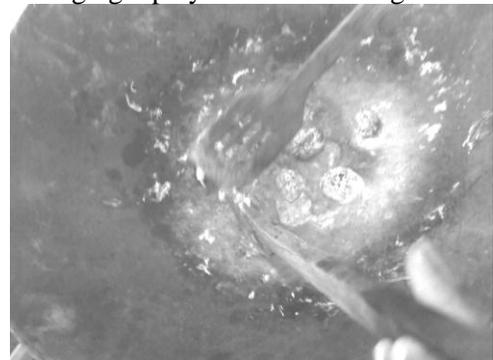


Gambar 5.38.
Butiran agregat plastik [2]

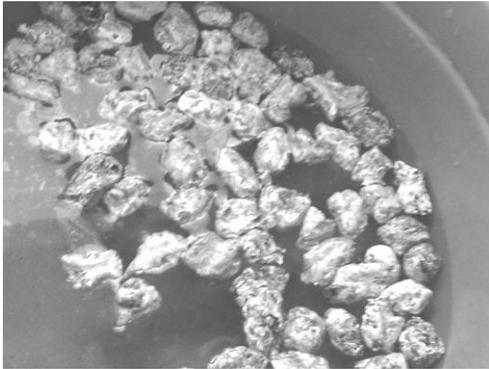
Sementara itu, deskripsi visual proses pembuatan agregat polymer adalah sebagai berikut:



Gambar 5.39.
Pemanasan limbah [2]



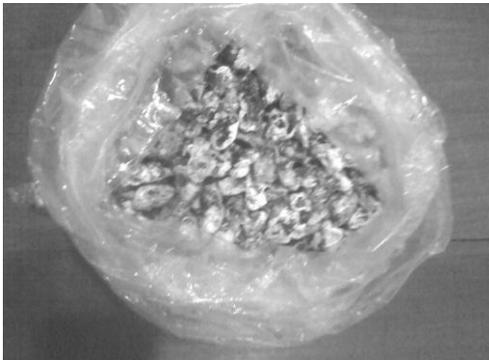
Gambar 5.40.
Proses pembuatan agregat [2]



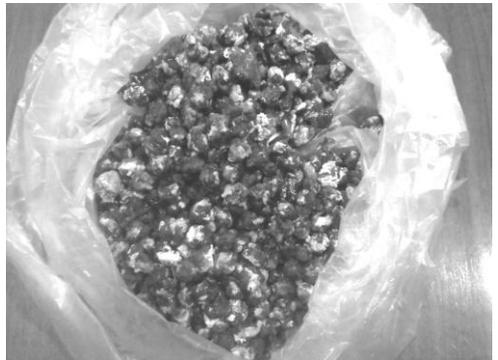
Gambar 5.41.
Agregat yang direndam air [2]



Gambar 5.42.
Perendaman agregat plastik [2]



Gambar 5.43.
Agregat polimer ukuran sedang[2]



Gambar 5.44.
Agregat *polymer* ukuran kecil [2]



Gambar 5.45.
Pengemasan agregat[2]



Gambar 5.46.
Agregat *polymer* ukuran besar[2]



Gambar 5.47.
Agregat *polymer* dengan berbagai ukuran [2]



Gambar 5.48.
Agregat *polymer* ukuran sedang dan kecil [2]

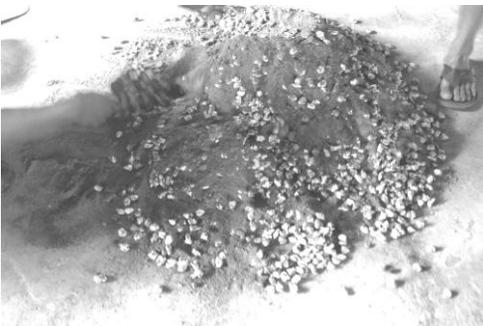


Gambar 5.49.
Agregat *polymer* ukuran kecil[2]

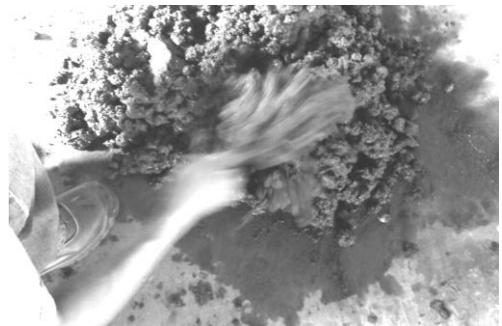


Gambar 5.50.
Agregat *polymer* berbagai ukuran[2]

Kerjasama dengan mitra pemilik pabrik batako cetak yang berlokasi di Karangawen, Demak Berikut adalah visualisasi proses cetak batako dari limbah *polymer* dan abu ampas tebu:



Gambar 5.51.
Mix design pada pabrik batako cetak [2]



Gambar 5.52.
Mix design bata *polymer* [2]



Gambar 5.53.
Polymer brick pada perusahaan mitra [2]



Gambar 5.54.
Pembuatan *polymer brick* pada mitra [2]



Gambar 5.55.
Mitra pemilik pabrik bata cetak [2]



Gambar 5.56.
Mesin *press* batako cetak [2]



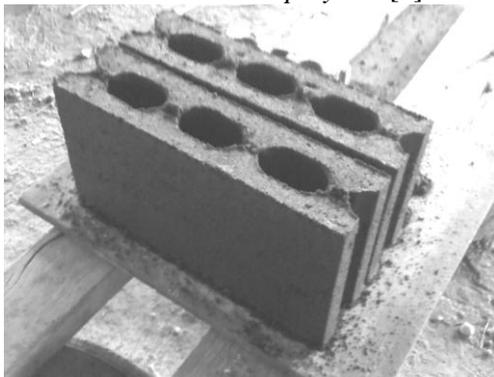
Gambar 5.57
Diskusi *shell-brick* di laboratorium



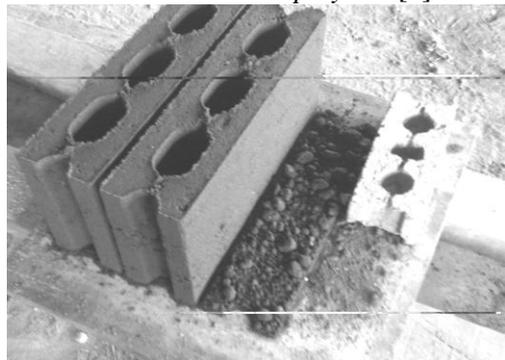
Gambar 5.58.
Proses cetak bata *polymer* [2]



Gambar 5.59.
Proses cetak bata *polymer* [2]



Gambar 5.60.
Hasil cetakan bata *polymer*[2]



Gambar 5.61.
Hasil cetakan bata *polymer*[2]

BAB VI

MATERIAL BETON BERBAHAN LIMBAH CANGKANG KERANG

6.1 LATAR BELAKANG

Limbah cangkang kerang belum secara optimal dimanfaatkan, sehingga perlu observasi material yang dapat dihasilkan dari limbah tersebut. Jenis kerang yang diamati adalah: kerang hijau (*Perna viridis* Linn), kerang darah (*Anadara granosa* Linn) dan kerang simping (*Placuna placenta* Linn). Cangkang kerang digiling kasar dan halus. Agregat kasar dan halus dari cangkang kerang berfungsi sebagai pengganti sebagian semen dan pasir. Substitusi ditujukan untuk mengurangi emisi CO₂ [23,36]. Selain itu, dengan menggunakan serbuk halus cangkang kerang, maka mortar dihasilkan akan terlihat lebih indah dari ampas tebu [2, 23, 41].

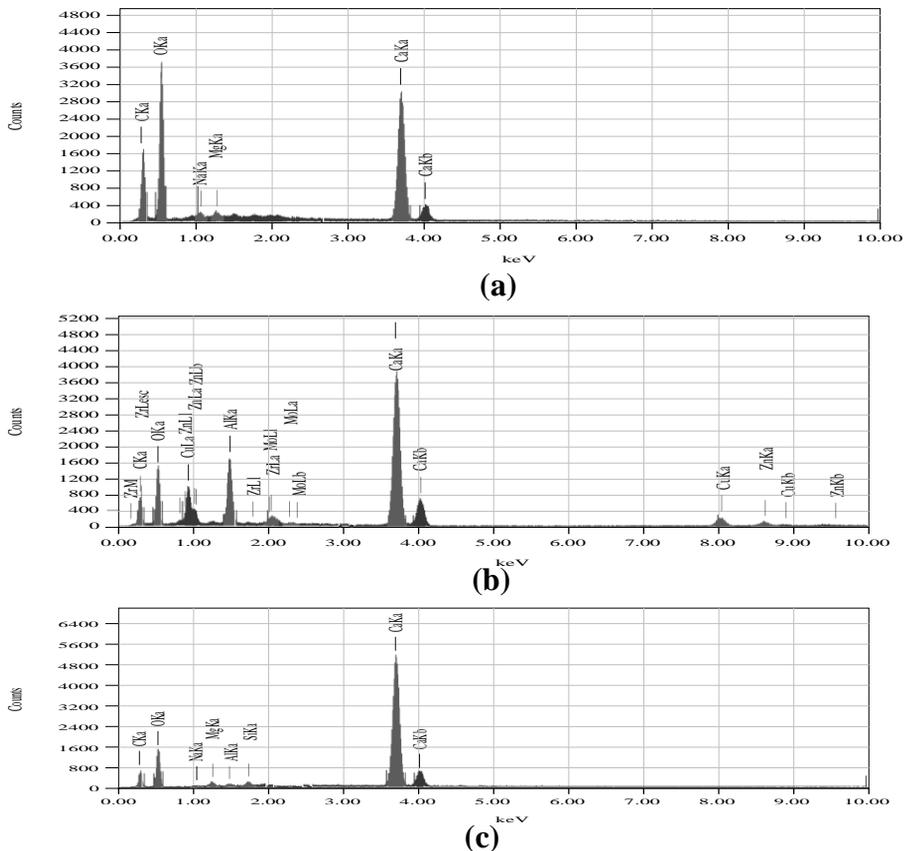
Kebaharuan material ini adalah bahwa pemakaian mortar kerang tidak hanya dapat memberi keindahan secara visual, tetapi juga dapat mengurangi kebisingan akibat rongga yang terbentuk dari agregat kasar kerang. Karena terbuat dari limbah, bahan ini diharapkan menjadi bahan alternatif untuk pembangunan perumahan murah.

6.2 LIMBAH CANGKANG KERANG

Indonesia memiliki garis pantai sepanjang 81.000 km, terpanjang setelah Kanada. Kementerian Kelautan dan Perikanan mengungkapkan, bahwa dengan memiliki garis pantai yang panjang, maka Indonesia dapat menghasilkan produk kekayaan laut senilai US \$ 1,2 triliun per tahun [42]. Kerang adalah jenis moluska yang digemari oleh masyarakat pesisir meskipun kerang sangat rentan terhadap kontaminan zat berbahaya. Jenis kerang yang biasanya mudah ditemukan di kota pesisir dengan mengedepankan bisnis kuliner adalah: Kerang hijau (*Perna viridis* Linn), kerang darah (*Anadara granosa* Linn) dan kerang simping (*Placuna placenta* Linn).

Mengacu pada hasil tes (SEM) yang dilakukan di laboratorium terpadu, Universitas Diponegoro, kandungan kerang hijau adalah: karbon 55.36%; Na₂O (Natrium oksida) 1,28%; MgO (Magnesium oksida) 1,32% dan CaO (kalsium oksida) 42.04%. Berdasarkan kandungan dari elemen pada kerang hijau dimana unsur kapur (CaO) cukup tinggi, maka kerang hijau dapat digunakan sebagai bahan komposit mortar (Lihat gambar 6.01.a). Komposisi kerang darah adalah:

karbon (C) 27.19%; Na₂O (*Natrium oksida*) 0,68%; MgO (*Magnesium oksida*) 1.92%, Al₂O₃ (*Aluminium oksida*) 0,81%, SiO₂ (*silika oksida*) 2,03% dan CaO (*kalsium oksida*) 67.16% (Lihat gambar 6.01b). Kerang darah mengandung kalsium oksida dan silika yang cukup maka dapat digunakan sebagai bahan agregat pengganti bahan beton atau biasa disebut *Recycled Concrete Aggregate* (RCA). Selain itu, berdasarkan komposisi dari elemen pada *Placuna placenta* Linn (kerang), maka jenis kerang dapat sebagai bahan dasar komposit beton. Merujuk ke ASTM C 618, maka tak satu pun dari ketiga cangkang kerang yang benar-benar memenuhi persyaratan standar dan peraturan sebagai komposit material beton [17]. Namun, dari zat kalsium oksida (CaO) yang ada, maka cangkang kerang dari spesies *Anadara granosa* (kerang darah) memiliki zat-zat yang layak digunakan sebagai bahan dasar material beton daripada yang lain.



Gambar 6.01: *Scanning Electron Microscope* (SEM) dari (a) kerang hijau (b) kerang darah (c) kerang simping [3]

6.3 METODE PEMBUATAN

Metode *Mix Design* yang digunakan merupakan metode DOE yang bertujuan untuk menentukan komposisi perbandingan material, yaitu perbandingan air, agregat kasar, agregat halus serta semen. Agregat kasar berupa agregat kerikil dalam beton normal disubstitusi dengan tumbukan kerang kasar. Selain itu, dilakukan beberapa pengujian beton pada beberapa rentang usia beton. Untuk benda uji kuat tekan, benda uji yang akan ditest adalah sebuah kubus 5x5x5 cm (ASTM 109/C 109M)[43]. Jumlah kubus disajikan dalam tabel VI.01.

Table VI.01. Kubus 5x5x5 cm³ uji kuat tekan material cangkang kerang [3]

	Type Cangkang	Umur 7 hari	Umur 14 hari	Umur 21 hari	keterangan
Type I	<i>Green mussels</i>	3 unit	3 unit	3 unit	<i>Agregat kasar dan halus dalam mortar</i>
Type II	Blood clams	3 unit	3 unit	3 unit	
Type III	Scallop shells	3 unit	3 unit	3 unit	

Untuk mengetahui kualitas campuran dengan agregat kerang maka dilakukan beberapa tes sebagai berikut:

1. Berat Jenis

Untuk menentukan tingkat gravitasi pada komposit dengan campuran semen dan kerang, digunakan

$$D = \frac{A}{V} \dots\dots\dots(5-12)$$

dimana D adalah Berat Jenis, A adalah luas permukaan dalam cm² dan V adalah volume dalam m³.

2. Kuat Tekan (*Compressive Strength*)

Dengan variasi agregat kerang hijau, kerang simping dan kerang darah yang dicampur dengan yang diharapkan dapat menghasilkan kuat tekan secara optimal

$$\sigma = \frac{P}{A} \dots\dots\dots(18)$$

σ adalah kekuatan tekan dalam kg/cm², P adalah beban dalam kg dan A adalah luas permukaan pada sentimeter persegi dalam cm².

3. Koefisien Absorpsi (α) dan *Sound Transmission Loss (STL)*

Tes yang dilakukan dengan menggunakan perangkat tabung impedansi, frekuensi filter dengan oktaf 1/3 akan termasuk kemudian direkam ke *software* komputer (PC) sehingga hasilnya akan ditabulasi dan terkomputerisasi [29]. Uji visual STL dan penyerapan koefisien (α) pada sampel bahan limbah cangkang kerang dapat dilihat pada gambar 6.02 [44].



Gambar 6.02: (a) Test Akustik: *STL* dan Koefisien Absorpsi (α) dengan menggunakan (b) Tabung impedansi [41,44]

6.4 UJI MATERIAL

Data yang dikumpulkan dari laboratorium akan dianalisis dan didiskusikan.

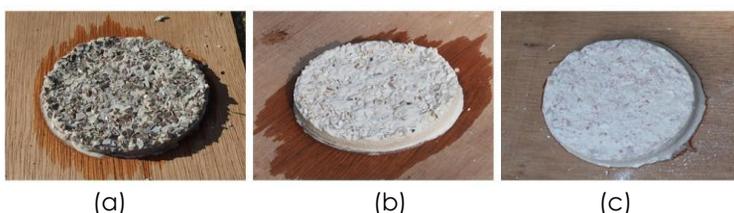
6.4.1. Kuat Tekan (*Compressive Strength*)

Untuk memastikan bahwa limbah cangkang dapat digunakan sebagai komponen beton, maka satu-satunya indikator yang dapat dilakukan adalah melakukan tes kekuatan tekan adukan semen Beton dengan penambahan tepung cangkang kerang sebagai agregat halus. Dari hasil uji kekuatan tekan dengan berbagai macam kerang, maka dapat diringkas sebagai berikut:

Tabel VI.02. Test Kuat tekan pada mortar Cangkang kerang [1,3, 43]

No	Tipe cangkang	Umur mortar (days)	Kuat Tekan (kg/cm ²)	Kualitas mortar
1	Kerang hijau (<i>Perna viridis</i> <i>Linn</i>)	7	26.5	K -60
		7	35.2	
		14	36.3	
		14	41.1	
		21	61.6	
2	Kerang darah (<i>Anadara granosa</i> <i>Linn</i>)	7	224.2	K -200
		7	194.8	
		14	243.1	
		14	227.8	
		21	214.6	
3	Kerang simping (<i>Placuna placenta</i> <i>Linn</i>)	7	139.2	K -175
		7	150.5	
		14	153.0	
		14	160.6	
		21	178.5	

Mortar terbuat dari cangkang *Anadara granosa* memiliki kekuatan tekan tertinggi diantara ketiga mortar (tabel VI.02). Kekuatan tekan rata-rata mortar cangkang *Anadara granosa* adalah 220 kg/cm² atau 22,09 Mpa yang lebih baik dari mortar *polimer* yang memiliki kuat tekan 133,33 kg/cm² dan mortar sterofom dengan kuat tekan 60,24 kg/cm² pada penelitian sebelumnya [2,23,41]. Keuntungan mortar cangkang kerang adalah pengurangan penggunaan semen dalam industri konstruksi karena mengandung cukup kalsium oksida (CaO). Penggunaan mortar cangkang kerang dapat menghemat anggaran konstruksi, karena terbuat dari limbah. Mortar cangkang kerang dapat digunakan sebagai bahan bangunan, seperti: terazzo, dinding dan keramik. Sebagai contoh, campuran disain terazzo memiliki komposisi bahan, putih semen: air: cangkang halus : cangkang kasar sebagai 2,00: 1.00: 3.00: 0,75 (Lihat gambar 6.03.a-c).



Gambar 6.03. Komposit mortar cangkang kerang (a) Kerang hijau; (b) Kerang simping mortar; (c). Kerang darah [1,3]

Observasi pembuatan material ini berbeda dengan kegiatan sebelumnya yang menggunakan limbah polimer dan ampas abu [2,19,45]. Meskipun kegiatan sebelumnya menggunakan bahan ampas abu yang mengandung unsur-unsur yang memenuhi syarat untuk ASTM C 618, namun abu ampas tebu dan polimer hanya memiliki kuat tekan sebesar $166,66 \text{ kg/cm}^2$ [36]. Penelitian yang dilakukan oleh V. Spaeth. dan A.D. Tegguer, menemukan bahwa resistansi terhadap air dan fragmentasi ditemukan oleh penggunaan agregat polimer dalam bahan beton [19]. Kekuatan tekan mortar *Anadara granosa* bahkan mencapai $243,1 \text{ kg/cm}^2$ (lihat tabel VI.02). Hal ini karena kandungan CaO (kalsium oksida) dari adukan semen yang cukup tinggi dengan nilai 67,16% (lihat gambar 6.01.b). Yang perlu dicatat adalah bahwa unsur carbon pada mortar kerang akan melemahkan kekuatan tekan. Semakin rendah elemen carbon pada mortar kerang, maka semakin tinggi kuat tekan itu. Seperti yang terlihat di gambar. 6.01, bahwa kandungan Carbon di Kerang Hijau (*Perna viridis*) adalah 55,36%; pada kerang darah adalah sebesar 27,19% dan kerang simping sebesar 32,73%. Jadi, mortar kerang darah memiliki kekuatan tekan tertinggi diantara ketiga mortar kerang.

6.4.2 Koefisien absorpsi dan *Sound Transmission Loss* (STL)

Pembuatan sampel material dalam bentuk silinder plate dengan tebal 10 cm dengan diameter 1,5 cm dilakukan di awal kegiatan. Campuran bahan adalah agregat kasar kerang serta agregat halus kerang dan semen putih sebagai perekat. Lebih lanjut, sampel diuji dengan parameter nilai rerugi transmisi suara/ *Sound Transmission Loss* (STL) dan koefisien penyerapan (α) yang dilaksanakan di laboratorium akustik. Hasil data uji laboratorium dilakukan secara terkomputerisasi dan kemudian dianalisis menggunakan SPSS sehingga hasilnya dalam bentuk grafik, tabel, analisis deskriptif dan sintesis dengan peringkat spesifikasi bahan.

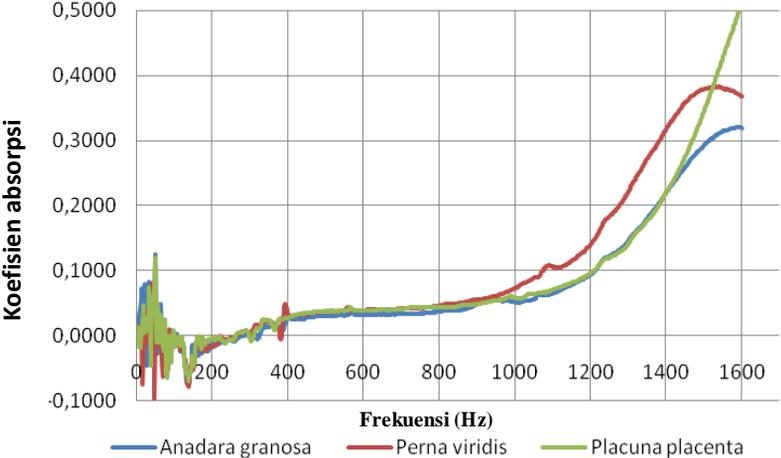
Koefisien penyerapan suara yang dapat dihitung adalah koefisien penyerapan suara normal. Koefisien penyerapan suara (α_0) dihitung dengan mengukur tekanan aound yang datang pada permukaan bahan dan mencerminkan oleh itu. Absorber baik harus memiliki koefisien penyerapan setidaknya 0,2 [46]. Koefisien bisa dihitung dengan rumus di bawah ini, antara lain:

$$\alpha_0 = \frac{4}{n + \left(\frac{L}{n}\right) + 2} \dots\dots\dots (5-13)$$

Dengan α_0 adalah koefisien penyerapan suara dan n adalah rasio gelombang berdiri. Dimana, rasio gelombang berdiri (n) diukur dengan menggantikan perlawanan dengan redaman, menentukan rasio gelombang berdiri dari perbedaan tekanan suara (L) dB menggunakan persamaan sebagai berikut [27]:

$$n = 10^{\left(\frac{L}{20}\right)} \dots\dots\dots (5-14)$$

Dengan n adalah rasio gelombang berdiri dan L perbedaan tekanan suara. Dalam proses test koefisien absorpsi (α), pada laboratorium akustik digunakan tabung impedansi yang dilengkapi oleh 1 unit mikrofon untuk mengirimkan suara frekuensi dalam kisaran rendah hingga tinggi. Sementara itu, nilai Rugi transmisi suara/ *Sound Transmission Loss* (STL) adalah hilangnya energi suara dalam proses transmisi suara melalui sesuatu bahan [30]. Berbeda dengan uji coba penelitian M.D. Shavitri dan H.F.S. Rusyda (2015), yang melakukan uji akustik pada rentang frekuensi terbatas (500-1000 Hz) [47], maka rekayasa material ini melakukan uji akustik dengan rentang frekuensi rendah sampai tinggi. Uji Koefisien absorpsi bertujuan untuk mengetahui kemampuan bahan untuk mengurangi kebisingan yang ditransmisikan ke luar. Sampel material yang diuji memiliki diameter tebal 10 cm dan 1,5 cm.



Gambar 6.04: Grafik Koefisien Absorpsi Mortar Cangkang Kerang [1,3]

Berikut adalah tabel deskriptif performa Koefisien absorpsi material cangkang kerang:

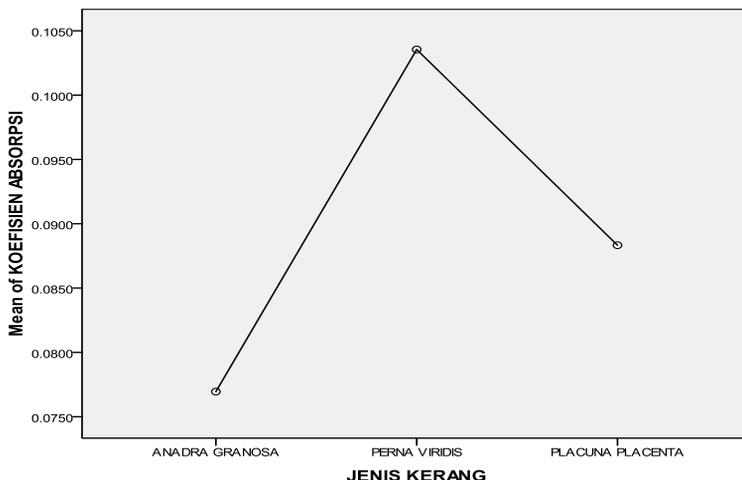
Tabel VI.03. Statistik deskriptif performa Koefisien Absorpsi mortar cangkang kerang [1,3]

Descriptives

KOEFISIEN ABSORPSI

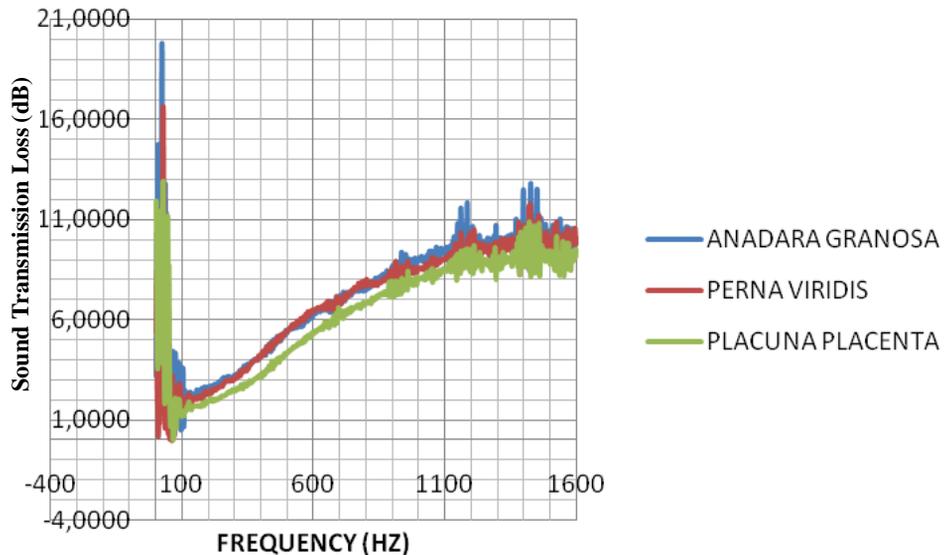
	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval for Mean		Minimum	Maximum
					Lower Bound	Upper Bound		
ANADRA GRANOSA	800	.076950	.0940029	.0033235	.070426	.083474	-.0749	.3208
PERNA VIRIDIS	800	.103545	.1240104	.0043844	.094939	.112151	-.0969	.3835
PLACUNA PLACENTA	800	.088330	.1156896	.0040902	.080301	.096359	-.0703	.5108
Total	2400	.089608	.1124339	.0022950	.085108	.094109	-.0969	.5108

Terlihat bahwa koefisien absorpsi terbaik diidentifikasi oleh mortar *Perna viridis* (kerang hijau) dengan angka 0,1035. Sedangkan tempat kedua diidentifikasi oleh kerang simping (*Placuna placenta*) dengan nilai 0,0883, sedangkan yang terakhir adalah kerang darah (*Anadara granosa*) dengan angka koefisien absorpsi sebesar 0,0769. Berikut adalah grafik *means plot* (rata-rata) yang menunjukkan ranking Koefisien absorpsi mortar cangkang kerang.



Gambar 6.05. Grafik Means plot Koefisien Absorpsi mortar cangkang kerang

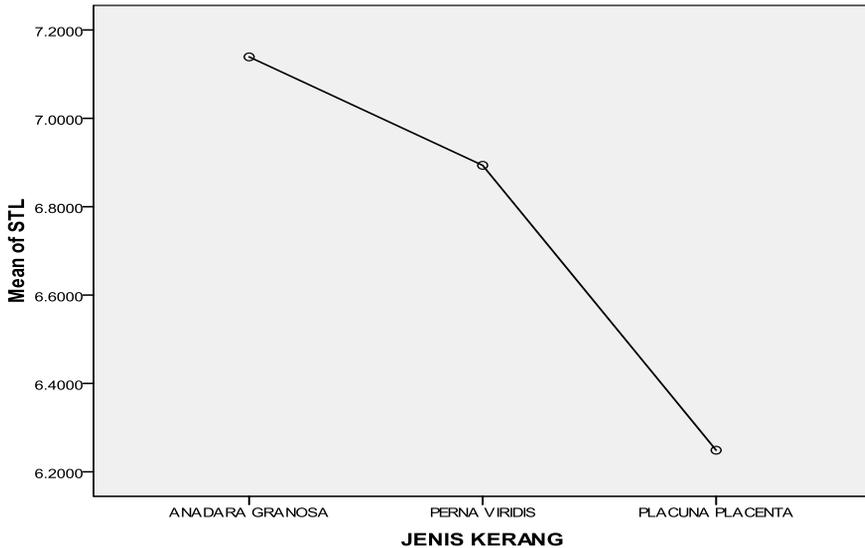
Hasil tersebut di atas sangatlah berbeda dengan hasil uji coba M.D. Shavitri dan H.F.S. Rusyda (2015) dimana rentang koefisien absorpsi mortar cangkang kerang berkisar antara 0,04-0,05 saja, lihat tabel VI.05 [47]. Hal ini disebabkan karena pengukuran dalam rentang 500-1000 Hz belum terperinci mewakili rentang bunyi. Oleh karena itu, hasil ini sekaligus menjadi koreksi dari uji coba yang pernah dilakukan sebelumnya. Berikutnya adalah hasil observasi dalam uji *Sound Transmission Loss* (STL):



Gambar 6.06: *Sound Transmission Loss* (STL) Mortar cangkang Kerang [1,3]

Dari gambar 6.06 di atas, terlihat bahwa nilai koefisien penyerapan bahan yang terbuat dari sampel *Anadara granosa* Linn, *Perna viridis* Linn dan *Placuna plasenta* Linn adalah cenderung meningkat seiring dengan meningkatnya frekuensi. Grafik koefisien absorpsi masih meningkat pada frekuensi di atas 1000 Hz. sedangkan grafik koefisien absorpsi mortar *Anadara granosa* dan *Placuna placenta* menunjukkan sedikit penurunan pada frekuensi 980 Hz. Pada frekuensi 554-566 Hz, grafik menunjukkan fluktuasi dalam nilai koefisien penyerapan untuk semua sampel. Fluktuasi dapat terjadi karena frekuensi tabung impedansi yang digunakan memiliki kepekaan berbeda pada frekuensi tersebut dibandingkan frekuensi lainnya. (Lihat gambar 6.06). Dari grafik pada gambar 6.06, dapat dilihat bahwa nilai STL mortar yang terbuat dari *Anadara granosa*, *Perna viridis* dan *Placuna placenta* cenderung meningkat seiring dengan

meningkatnya frekuensi. Grafik STL dari ketiga material yang terbuat dari *Anadara granosa*, *Perna viridis* dan *Placuna placenta* masih cenderung meningkatkan sampai dengan diatas 1000 Hz. Berikut gambar grafik *Means Plot Sound Transmission Loss (STL)*:



Gambar 6.07. Grafik *Means plot Sound Transmission Loss (STL)* mortar cangkang kerang

Tabel VI.04. Performa Akustik (rentang 500-1.000 Hz) Mortar Cangkang Kerang [47]

Jenis Kerang	Koefisien Serap		Sound Transmission Loss	
	Nilai	Peringkat	Nilai	Peringkat
Anadara granosa	0.04	2	7.3	1
Perna viridis	0.05	1	7.3	1
Placuna placenta	0.04	2	6.4	2
Total	0.04		7.0	

*) Dibulatkan menjadi 2 desimal di belakang koma

**) Dibulatkan menjadi 1 desimal

Tabel VI.04 menunjukkan bahwa mortar *Perna viridis* memiliki koefisien penyerapan terbaik daripada yang lain, sementara mortar *Anadara granosa* dan *Perna viridis* memiliki nilai STL yang cukup tinggi daripada mortar *Placuna*

placenta. Baik dari Test koefisien absorpsi atau test *Sound Transmission Loss*, ketiga mortar cangkang kerang cenderung memiliki nilai rata-rata yang setara. Hasil yang berbeda ditunjukkan pada percobaan yang dilakukan oleh M.D. Shavitri dan H.F.S. Rusyda dimana STL yang didapatkan sebagaimana terlihat dalam tabel VI.04. Sedangkan pada rekayasa material ini, dimana rentang frekuensi yang diteliti lebih lebar (0-1600 Hz) maka hasilnya juga lebih akurat. Hasil observasi ini sekaligus melakukan koreksi terhadap penelitian M.D. Shavitri dan H.F.S. Rusyda (2015) [47]. Berikut pemeringkatan Koefisien absorpsi dan STL dengan rentang frekuensi 0-1.600 Hz.

Tabel VI. 05. Peringkat Koefisien absorpsi mortar Cangkang Kerang (*output SPSS*)

KOEFSIEN ABSORPSI				
JENIS KERANG		N	Subset for alpha = 0.05	
			1	2
Tukey HSD ^a	ANADRA GRANOSA	800	.076950	
	PLACUNA PLACENTA	800	.088330	
	PERNA VIRIDIS	800		.103545
	Sig.		.105	1.000
Waller-Duncan ^a ..b	ANADRA GRANOSA	800	.076950	
	PLACUNA PLACENTA	800	.088330	
	PERNA VIRIDIS	800		.103545

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 800,000.

b. Type 1/Type 2 Error Seriousness Ratio = 100.

Tabel VI. 06. Peringkat *Sound Transmission Loss* (STL) mortar Cangkang Kerang (*output SPSS*):

STL				
JENIS KERANG		N	Subset for alpha = 0.05	
			1	2
Tukey HSD ^a	PLACUNA PLACENTA	800	6.248861	
	PERNA VIRIDIS	800		6.893635
	ANADARA GRANOSA	800		7.139092
	Sig.		1.000	.190
Waller-Duncan ^a ..b	PLACUNA PLACENTA	800	6.248861	
	PERNA VIRIDIS	800		6.893635
	ANADARA GRANOSA	800		7.139092

Means for groups in homogeneous subsets are displayed.

a. Uses Harmonic Mean Sample Size = 800,000.

b. Type 1/Type 2 Error Seriousness Ratio = 100.

6.5. KESIMPULAN

Limbah kerang dapat digunakan sebagai agregat kasar dan halus pada material bangunan hijau seperti terazzo, keramik dan batu bata selain dapat digunakan juga sebagai bahan interior seperti *wall paper*, pot bunga, pelapis atas meja dan seterusnya. Kinerja akustik bahan-bahan ini perlu dilakukan review kembali karena nilai koefisien absorpsi dan *Sound Transmission Loss* (STL) akan berbeda pada ketebalan material yang berbeda. Semakin besar ketebalan material, semakin baik kemampuan bahan untuk menyerap suara. Dari hasil analisis dan referensi, dapat ditemukan bahwa sampel bahan memiliki tebal 1 cm terbuat dari campuran limbah kerang dan semen putih memiliki kemampuan serap dan peredaman suara setara dengan karpet tipis yang menempel di atas lantai beton.

Dari tabel VI.02, gambar 6.05, gambar 6.07, tabel VI.05 dan VI.06, maka dapat disimpulkan bahwa mortar terkuat pada kekuatan tekan adalah mortar Anadara granosa, sementara kekuatan tekan paling rendah adalah mortar Perna viridis. Akan tetapi, kekuatan tekan mortar Perna viridis dapat dikatakan sama dengan kekuatan tekan yang berasal dari mortar sterofom [23,41]. Di sisi lain, kekuatan tekan mortar Anadara granosa telah melebihi mortar *polimer* dengan teknologi nano pada kegiatan pembuatan material sebelumnya [36]. Seperti yang disimpulkan sebelumnya bahwa teknologi nano pada ampas tebu (SCBA) dalam mortar polimer dapat meningkatkan kekuatan tekan hingga 24,50% dari 133.33 kg/cm² hingga 166,00 kg/cm² [2]. Merujuk ke ASTM C 33-03, bahwa semua mortar cangkang kerang tidak dapat diklasifikasikan sebagai mortar beton ringan, karena kepadatannya yang lebih dari 1.900 kg/cm³ [10]. Gambar VI.0 3 (a, b, c) dan Tabel VI.02 menunjukkan bahwa semakin rendah unsur karbon yang terkandung dalam mortar kerang, semakin tinggi kekuatannya. Maka terkait dengan ASTM C 618, meskipun mortar kerang darah tidak mengandung Fe₂O₃ (besi oksida) dan abu ampas tebu, akan tetapi substitusi agregat halus dengan kerang membuat mortar tersebut memiliki kuat tekan lebih besar dibandingkan dengan mortar polimer [39]. Pada uji akustik, ditemukan bahwa ketiga mortar cangkang kerang cenderung tidak digunakan sebagai bahan penyerap karena koefisien penyerapan dan *Sound Transmission Loss* (STL) lebih rendah secara signifikan jika mereka dibandingkan dengan spesifikasi akustik mortar polimer dan mortar sterofom [2,23,41].

Agregat Cangkang Kerang di laboratorium



Gambar 6.08.
Cangkang kerang hijau (*Perna viridis* Linn)
[3]



Gambar 6.09.
Serpihan cangkang kerang hijau (*Perna viridis*
Linn) [3]



Gambar 6.10.
Cangkang kerang darah (*Anadara granosa*
Linn) [3]



Gambar 6.11.
Serpihan cangkang kerang darah (*Anadara*
granosa Linn)[3]



Gambar 6.12.
Cangkang kerang simping (*Placuna placenta*
Linn)[3]



Gambar 6.13.
Serpihan cangkang kerang simping (*Placuna*
placenta Linn)[3]



Gambar 6.14.
Penggerus manual dalam rekayasa material



Gambar 6.15.
Mortar cangkang kerang dari ketiga jenis kerang untuk sampel uji



Gambar 6.16.
Mortar cangkang kerang hijau (*Perna viridis*Lim)

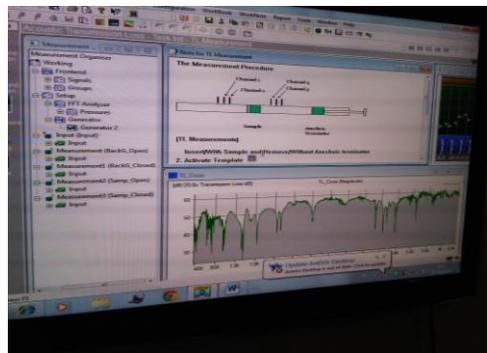


Gambar 6.17.
Mortar cangkang kerang simping (*placuna placenta* Linn)

Uji Akustik pada Laboratorium



Gambar 6.18.
Tabung Impedansi di Laboratorium Akustik



Gambar 6.19.
Output data pada monitor komputer pada laboratorium Akustik [1,3]

Aktivitas pencetakan batako cetak dari cangkang kerang



Gambar 6.20.
Mesin press pada pabrik batako pracetak mitra penelitian [4]



Gambar 6.21.
Kegiatan mix-design pada pabrik batako pracetak mitra penelitian [4]



Gambar 6.22.
Bata pracetak dari cangkang kerang.hijau (*Perna viridis* Linn) [4]



Gambar 6.23.
Bata pracetak dari cangkang kerang darah (*Anadara granosa* Linn) [4]



Gambar 6.24.
Bata pracetak dari cangkang kerang simping (*Placuna placenta* Linn) [4]



Gambar 6.25.
Detail bata pracetak dari cangkang kerang [4]



Gambar 6.26.

Bata pracetak dari cangkang kerang [3]



Gambar 6.27.

Bata pracetak dari cangkang kerang [3]

Proses pembuatan Panel Dinding dari cangkang kerang



Gambar 6.28.

Persiapan pembuatan panel dinding



Gambar 6.29.

Persiapan pasir dan semen untuk pembuatan panel dinding



Gambar 6.30.

Alat-alat yang digunakan



Gambar 6.31.

Pencampuran agregat, pasir dan semen pada pembuatan panel dinding



Gambar 6.32.
Proses pengadukan bahan



Gambar 6.34.
Pemberian air pada campuran beton



Gambar 6.33. Proses
pengadukan bahan



Gambar 6.35.
Agregat pada beton



Gambar 6.36.
Proses penuangan adonan pada rangka cetakan



Gambar 6.37.
Proses pencetakan

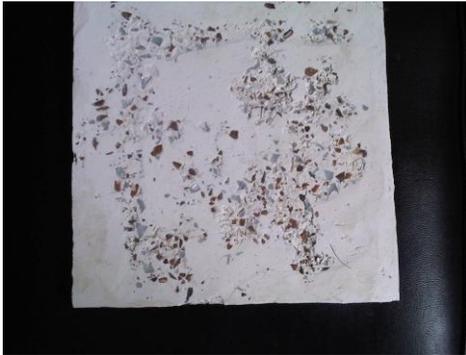


Gambar 6.38.
Proses pencetakan hampir selesai, tebal 5 cm



Gambar 6.39.
Proses pencetakan telah selesai, ditinggalkan
sampai dengan beton mengeras

Terazzo dari Cangkang Kerang



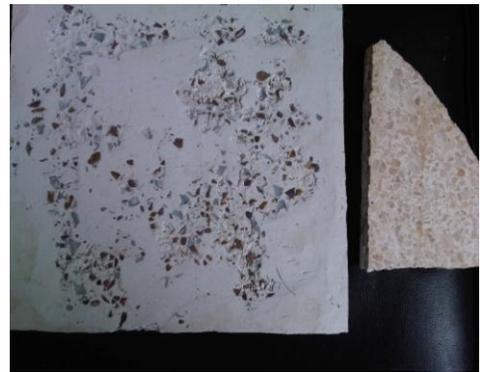
Gambar 6.40.
Percobaan pembuatan *terazzo* dengan bahan cangkang kerang



Gambar 6.41.
Pola cangkang kerang pada permukaan *terazzo*



Gambar 6.42.
Detail pola cangkang kerang pada permukaan *terazzo*



Gambar 6.43.
Perbandingan antara *terazzo* hasil percobaan pada rekayasa material dengan parsial *terazzo* yang ada di pasaran

BAB VII

KESIMPULAN DAN REKOMENDASI

7.1. KESIMPULAN

Dari pembahasan mengenai material beton yang sudah dilakukan, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

- a. Pembangunan berkelanjutan memerlukan inovasi-inovasi material baru yang berbasis pada pemanfaatan limbah baik limbah alam maupun buatan. Selain itu, isu pemanasan global dimana emisi gas karbondioksida (CO_2) terjadi dimana saja memerlukan tindakan konkrit untuk meredakannya. Dunia konstruksi sebagai bidang yang turut mengakibatkan emisi gas CO_2 harus menunjukkan perannya dalam penurunan pemakaian material semen yang memicu terjadinya pemanasan global tersebut.
- b. Rekayasa material yang berfokus pada material hijau ini telah melakukan serangkaian percobaan dan penemuan yang berkaitan dengan material baru yang ikut mendukung penurunan pemakaian material semen dalam bidang material bangunan yang berkelanjutan.
- c. Pemanfaatan limbah sterofom dan *polymer* yang sulit diurai oleh lingkungan dimanfaatkan dengan baik. Dari hasil observasi diketahui bahwa mortar Sterofom dan *Polymer* merupakan material beton ringan karena kepadatannya yang $< 1.900 \text{ kg/cm}^3$. Dari uji Kuat tekan, material ini memiliki nilai kuat tekan antara $60,24 - 133,33 \text{ kg/cm}^2$.
- d. Inovasi teknologi nano pada mortar *polymer* terbukti mampu meningkatkan kekuatan tekan dari $133,33 \text{ kg/cm}^2$ menjadi $166,66 \text{ kg/cm}^2$, atau naik sebesar 24,50%. Namun teknologi nano untuk material bangunan ini dirasakan masih terlalu mahal, sehingga pemanfaatan untuk material bangunan menjadi kurang optimal.
- e. Dari sisi akustik, hasil yang diperoleh pada studi ini adalah bahwa mortar *polymer* memiliki koefisien absorpsi 0,350-0,800 pada frekuensi 2.500–3.500 Hz. *Sound Transmission Loss* mortar *polymer* adalah 52 dB pada frekuensi di atas 1.500 Hz. Jadi material ini cukup baik dimanfaatkan sebagai elemen pengisi dinding dan pereduksi bunyi.
- f. Material cangkang kerang sangat mendukung pembangunan berbasis maritim. Dengan kekayaan laut yang sangat besar, maka Indonesia mampu menjadi negara penghasil material berbasis hasil laut. Pada rekayasa material mortar cangkang kerang, material ini memiliki kekuatan

- tekan sampai dengan 240 kg/cm^2 Sementara dalam hal akustik, material mortar cangkang kerang memiliki koefisien absorpsi antara 0,04 – 0,05 dan rentang *Sound Transmission Loss (STL)* antara 6,39-7,29 dB.
- g. Pola dan tekstur material cangkang kerang terutama untuk spesies *Perna viridis* Linn (kerang hijau) sangat indah, sehingga dapat dimanfaatkan sebagai material finishing pada bangunan seperti terazzo dan panel dinding.

7.2. REKOMENDASI DAN UCAPAN TERIMAKASIH

Kegiatan serial ini didanai oleh Universitas Diponegoro dan Kemenristek dan Dikti (Kementerian Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi). Dari inovasi yang dilakukan, terbukti bahwa material limbah baik limbah alam, industri maupun buatan sangat bermanfaat untuk teknologi material bangunan. Namun dalam perkembangannya, masih diketemukan beberapa kendala seperti: alat, output material yang kurang halus dan kekurangan lainnya. Untuk itu perlu dilakukan observasi lebih lanjut untuk memperhalus hasil material bangunan yang didapatkan.

Sekali lagi, kami menghaturkan terimakasih kepada Kementerian Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi serta Universitas Diponegoro atas hibah yang diberikan, sehingga tim dapat melakukan serangkaian observasi yang sangat bermanfaat bagi industri konstruksi yang berkelanjutan di Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] E. Setyowati dan G. Hardiman, 2015, The Acoustical Performances of Oyster Shell Waste Based Green Concrete Materials, *GSTF Journal of Engineering Technology (JET)*, Vol. 3 (3), pp. 31-36.
- [2] E. Setyowati dan Purwanto, 2015, *The Polymer Brick as Nano-Technology based Material to Support Green Building Construction*, The 3rd Annual International Conference Proceedings on Architecture and Civil Engineering, pp. 224-228, 13-14 April 2015, Singapore.
- [3] E. Setyowati, G. Hardiman, Purwanto, 2015, Green Concrete made of Oyster Shell Waste to Support Green Building Material, *Jurnal Teknologi*, terindeks Scopus.
- [4] E. Setyowati dan Purwanto, 2014, Bata Polymer dari Limbah Polymer dan Abu Ampas Tebu Berbasis Nano-Technology untuk Industri Bangunan, terdaftar Paten Nomor: EP 09201400004.
- [5] A. W. Nova, F. A. Hasani, T. Wijayanti, LKTIN, 2013, *Bata Beton Ringan Styrofoam dari Abu Ampas Tebu Sebagai Inovasi Eco-Material Dinding Akustik Berkualitas Ramah Lingkungan, Hemat Energi*.
- [6] SNI 03-0349-1989: *Bata beton untuk Pasangan Dinding*, Badan Standardisasi Nasional – Standar Nasional Indonesia.
- [7] H. Trilistyo dan E. Setyowati, 2015, *Strategy on Green Building to Reduce Overall Thermal Transfer Value in the Orthopedic Hospital in the Tropics*, The 6th International Conference on Green Technology Proceedings, pp. 362-368, Malang, 18-19 September, 2015, Science and Technology Faculty, Maulana Malik Ibrahim, State Islamic University, Malang.
- [8] E. Setyowati, G. Hardiman, S.T. Atmadja, A. Satyapratama, 2016, *Material Akustik Berbahan Limbah Hasil Hutan dan Perkebunan*, Penerbit UPT UNDIP Press, Semarang.
- [9] *American Society for Testing and Materials for Standard Specification for Concrete Aggregates*, ASTM C 330.
- [10] *American Society for Testing and Materials for Standard Specification for Dried Unit Mass of Concrete*, ASTM C 567.
- [11] E. Setyowati, 2015, *Strategi Kontrol Kebisingan Melalui Disain Master Plan – Studi Kasus: Perumahan Kawasan Bandara*, Penerbit: CV. Tigamedia Pratama, Semarang.
- [12] E. Setyowati dan A. F. Sadwikasari, 2013, Building Materials Composition Influence to Sound Transmission Loss (STL) Reduction, *J. Advanced Materials Research* Vol. 789 pp. 242-247, terindeks Scopus.

- [13] E. Setyowati, 2013, Algorithym Evolution of New Environmental Acoustic Theory on Housing Master plan Design, *International Journal of Engineering and Technology*, Vol. 13 (4), pp.10-20.
- [14] P. O Modania, M.R. Vyawahareb, 2013, Utilization of Bagasse Ash as a Partial Replacement of Fine Aggregate in Concrete, *Procedia Engineering* Vol. 51, pp.25-29.
- [15] Purwanto, H. A. Lie, H. Sutanto, E. Fathias, W.A. Arini, 2013, *Studi Eksperimental Aplikasi Material Nano Fly Ash terhadap Kuat Tekan Mortar Beton*, The 2nd Indonesian Structural Engineering and Materials Symposium Proceeding.
- [16] B. B. Mukharjee, S. V. Barai, 2014, Influence of Nano-Silica on the Properties of Recycled Aggregate Concrete, *J. Construction and Building Materials*, Vol. 56, pp. 29 – 37.
- [17] *American Society for Testing and Materials: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete*, ASTM C-618.
- [18] K.C.P. Faria, R.F. Gurgel, J.N.F. Holanda, 2012, Recycling of Sugarcane Bagasse Ash Waste in the Production of Clay Bricks, *Journal of Environmental Management*, V. 101, pp. 7-12.
- [19] V. Spaeth, A. D. Tegguer, 2013, Improvement of Recycled Concrete Aggregate Properties by Polymer Treatments, *International Journal of Sustainable Built Environment*, Vol. 2 (2), pp. 143-152.
- [20] G. Staib, A. Dorrhofer, M. Rosenthal, 2008, *Component and Systems – Modular Construction – Design Structure New Technology – 1st Edition*, Institute fur Internationale Architektur – Dokumentation GmbH & Co. KG, Munchen.
- [21] S., Konstantin, F., Ismail, H.,Roman, L. M.T. Martinez., 2006, *Nano materials and Nano Technology for High- Performance Cement Composites*, Proceeding of ACI Session on Nano Technology of Concrete, Recent Developments and Future Perspectives, Denver, USA, pp. 91 – 118.
- [22] S. Kang, S.I. Hong, C.R.,Choe, M.,Park, S.,Rim, J.,Kim, 2001, Preparation and characterization of epoxy composites filled with functionalized nano silica particles obtained via sol-gel process, *J. Polymer*, 42, pp. 879-887.
- [23] E. Setyowati, 2013, *Eco-Building Material of Styrofoam Waste and Sugar Industry Fly-ash Based on Nano-Technology*, The 4th International Conference on Sustainable Future for Human Security 2013, *Procedia Environmental Sciences*, Vol. 20, pp. 245-253.
- [24] *American Society for Testing and Materials: Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (using 50 mm Cube Specimens)*, ASTM 109 / C 109M – 08ASTM Book of Standards 04.01.

- [25] SNI 03-682-2002.(2000), *Metode pengujian kekuatan tekan mortar Portland.Badan Standardisasi Nasional Indonesia (Test method for compressive strength of the mortar Portland. BSN Indonesia).*
- [26] M. Mahesh, 2012, Elastic Characteristic of Optimized Composition of Reactive Powder Concrete, *International Journal of Engineering Technology and Advanced Engineering*, Vol. 2, pp. 70-72.
- [27] *Japanese Standard Association (JSA). 1963. JIS A 1405. Methods of Test for Sound Absorption of Acoustical Material by the Tube Method.*
- [28] C.B, Vick, 1999, *Wood Handbook, Wood as an Engineering Material*. Chapter 9. *Adhesive Bonding of Wood Materials*. Forest Products Society. USA.
- [29] *American Society for Testing and Materials: Classification for Rating Sound Insulation. ASTM E 413.*
- [30] *American Society for Testing and Materials: Standard Test Method for Measurement of Normal Incidence Sound Transmission of acoustical Material Based on The Transfer Matrixs Method, ASTM E 2611-09.*
- [31] S.A. Yousaf dan S.Ali, 2007. Why Nanoscience and Nanotechnology? What is there for us?, *Journal of Faculty of Engineering & Technology 2007-2008*, pp. 11-20.
- [32] S.K. Syal and K.,Vikas, 2013, *Nanotechnology for High Performance Universal Hydraulic Cement Composite, J. of Academia and Industrial Research*, Vol. 2, pp. 196 – 199.
- [33] G. Elvin, 2009, *Nanotechnology for Green Building*, Green Technology Forum, Brighttalk Green Building Summit, Earth Day.
- [34] A.S.,Hanafi, A.R., Nandang, 2010, Studi Pengaruh Bentuk Silika dari Abu Ampas Tebu terhadap Kekuatan Produk Keramik, *Jurnal Kimia Indonesia*, Vol. 5, pp. 35-38.
- [35] A., Bahurudeen, A.V., Marckson, A., Kishore, M.,Santhanam, 2014, Development of Sugar Cane Bagasse Ash based Portland Pozzolana Cement and Evaluation Of Compatibility with Superplasticizers, *J. Contruction and Building Material*, Vol. 68, pp. 465-475.
- [36] A. Monshi, M.R.,Foroughi, M.R.,Monshi, 2012, Modified Scherrer Equation to Estimate More Accurately Nano-Crystallite Size Using XRD, *World Journal of Nano Science and Engineering*, Vol. 2, pp. 154-160.
- [37] Bulletin Tata Ruang, 2011, *Green Building a Sustainable Concept for Construction Development in Indonesia*, penerbit: Badan Koordinasi Penataan Ruang Nasional (BKPRN), Jakarta, Edisi Mei-Juni 2011.
- [38] Inter-Governmental Panel on Climate Change/IPCC (2014), *Synthesis Report – Summary for Policy makers*.
- [39] Properti.biz, 2008, *Dasar– dasar Perhitungan Insulasi Termal dan Akustik pada Bangunan*, e-brosur b-panel.com.

- [40] I.K. Lucky, 2011, *Karakteristik Panel Akustik Papan Partikel Bambu Betung (Dendrocalamus asper Backer) Berperekat Iocyanate*, Departemen Hasil Hutan, Fakultas Kehutanan, IPB.
- [41] E. Setyowati dan A.W.Nova, 2014, *The New Building Material and Technical Specification of Foam-Brick*, The 2nd Annual International Conference Proceedings on Architecture and Civil Engineering, pp. 188-192, 24-25 March 2014, Singapore.
- [42] Sekretariat Jenderal Kementerian Kelautan dan Perikanan RI, 2004, *Kekayaan Laut Indonesia*, Penerbit KKP Setjen, Jakarta.
- [43] *American Society for Testing and Materials*: Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (using 50 mm Cube Specimens), ASTM 109/C 109M-08, *ASTM Book of Standards* 04.01.
- [44] E. Setyowati, G. Hardiman and S.T. Atmadja, 2014, Green Materials Comparison of Sawdust and Coconut Fiber Acoustical Waffle Panel, *J. Applied Mechanic and Material (AMM)*, Vol. 747, pp. 221-226, terindeks SCOPUS.
- [45] Y. Kazuo, S.Takumi, N. Hiroshi, 2006, Fluidity Performance Evaluation of Cement and Superplasticizer, *J. of Advanced Concrete Technology*, Vol. 4(2), pp. 241-249.
- [46] M. Ermann, 2015, *Architectural Acoustics*, Wiley, New Jersey.
- [47] M.D. Shavitri dan H.F.S. Rusyda, 2015, *Performa Akustik Green Material Berbasis Cangkang Kerang*, UNDIP, *unpublished*.

**LAMPIRAN OUTPUT SAMPEL
UJI LABORATORIUM AKUSTIK**

ABSORPTION COEFFICIENT TEST - POLYMER MORTAR (SAMPEL)

FREQ	α										
8	0.0294	1008	0.0804	2008	0.3139	3008	0.5321	4008	0.2753	5008	0.1799
16	0.0179	1016	0.0816	2016	0.3194	3016	0.5263	4016	0.2732	5016	0.1794
24	-0.0071	1024	0.0818	2024	0.3244	3024	0.5208	4024	0.2717	5024	0.1797
32	-0.0066	1032	0.0811	2032	0.3304	3032	0.5149	4032	0.2705	5032	0.1795
40	0.0241	1040	0.0905	2040	0.3361	3040	0.5104	4040	0.2679	5040	0.1803
48	0.0177	1048	0.0832	2048	0.3414	3048	0.5040	4048	0.2675	5048	0.1794
56	0.0203	1056	0.0864	2056	0.3479	3056	0.4992	4056	0.2669	5056	0.1797
64	0.0224	1064	0.0869	2064	0.3528	3064	0.4934	4064	0.2666	5064	0.1797
72	0.0033	1072	0.0852	2072	0.3588	3072	0.4883	4072	0.2669	5072	0.1791
80	0.0182	1080	0.0880	2080	0.3647	3080	0.4836	4080	0.2664	5080	0.1787
88	0.0157	1088	0.0857	2088	0.3711	3088	0.4782	4088	0.2648	5088	0.1774
96	0.0163	1096	0.0893	2096	0.3772	3096	0.4732	4096	0.2641	5096	0.1778
104	0.0199	1104	0.0886	2104	0.3847	3104	0.4682	4104	0.2625	5104	0.1773
112	-0.0122	1112	0.0917	2112	0.3931	3112	0.4633	4112	0.2616	5112	0.1767
120	-0.0180	1120	0.0930	2120	0.4009	3120	0.4595	4120	0.2604	5120	0.1767
128	0.0076	1128	0.0905	2128	0.4073	3128	0.4543	4128	0.2585	5128	0.1758
136	-0.0085	1136	0.0929	2136	0.4140	3136	0.4509	4136	0.2577	5136	0.1755
144	-0.0074	1144	0.0938	2144	0.4199	3144	0.4457	4144	0.2563	5144	0.1748
152	0.0000	1152	0.0947	2152	0.4272	3152	0.4421	4152	0.2548	5152	0.1737
160	-0.0193	1160	0.0955	2160	0.4345	3160	0.4379	4160	0.2538	5160	0.1730
168	-0.0232	1168	0.0957	2168	0.4436	3168	0.4341	4168	0.2529	5168	0.1732
176	-0.0194	1176	0.0966	2176	0.4507	3176	0.4296	4176	0.2508	5176	0.1724
184	-0.0223	1184	0.0974	2184	0.4578	3184	0.4256	4184	0.2500	5184	0.1722
192	-0.0227	1192	0.0963	2192	0.4660	3192	0.4214	4192	0.2479	5192	0.1715
200	-0.0191	1200	0.0990	2200	0.4739	3200	0.4177	4200	0.2475	5200	0.1706
208	-0.0200	1208	0.0988	2208	0.4815	3208	0.4143	4208	0.2460	5208	0.1700
216	-0.0165	1216	0.0996	2216	0.4887	3216	0.4110	4216	0.2458	5216	0.1697
224	-0.0234	1224	0.0998	2224	0.4975	3224	0.4073	4224	0.2445	5224	0.1687
232	-0.0230	1232	0.1010	2232	0.5063	3232	0.4043	4232	0.2435	5232	0.1683
240	-0.0220	1240	0.1015	2240	0.5143	3240	0.4005	4240	0.2425	5240	0.1687
248	-0.0221	1248	0.1035	2248	0.5234	3248	0.3977	4248	0.2416	5248	0.1672
256	-0.0228	1256	0.1027	2256	0.5306	3256	0.3945	4256	0.2405	5256	0.1669
264	-0.0231	1264	0.1048	2264	0.5404	3264	0.3916	4264	0.2400	5264	0.1671
272	-0.0238	1272	0.1046	2272	0.5485	3272	0.3882	4272	0.2388	5272	0.1663
280	-0.0222	1280	0.1057	2280	0.5575	3280	0.3858	4280	0.2380	5280	0.1667
288	-0.0202	1288	0.1069	2288	0.5657	3288	0.3832	4288	0.2371	5288	0.1655
296	-0.0218	1296	0.1081	2296	0.5743	3296	0.3807	4296	0.2354	5296	0.1657
304	-0.0222	1304	0.1074	2304	0.5828	3304	0.3778	4304	0.2346	5304	0.1649
312	-0.0214	1312	0.1101	2312	0.5928	3312	0.3754	4312	0.2336	5312	0.1649
320	-0.0206	1320	0.1093	2320	0.6007	3320	0.3720	4320	0.2325	5320	0.1647
328	-0.0184	1328	0.1122	2328	0.6098	3328	0.3698	4328	0.2316	5328	0.1643
336	-0.0167	1336	0.1147	2336	0.6181	3336	0.3673	4336	0.2306	5336	0.1638
344	-0.0176	1344	0.1164	2344	0.6270	3344	0.3654	4344	0.2300	5344	0.1619
352	-0.0173	1352	0.1166	2352	0.6352	3352	0.3626	4352	0.2289	5352	0.1610
360	-0.0163	1360	0.1172	2360	0.6442	3360	0.3608	4360	0.2281	5360	0.1613
368	-0.0148	1368	0.1174	2368	0.6525	3368	0.3585	4368	0.2274	5368	0.1603
376	-0.0137	1376	0.1190	2376	0.6605	3376	0.3567	4376	0.2265	5376	0.1588
384	-0.0104	1384	0.1197	2384	0.6690	3384	0.3543	4384	0.2257	5384	0.1586
392	-0.0100	1392	0.1201	2392	0.6764	3392	0.3526	4392	0.2250	5392	0.1588
400	-0.0088	1400	0.1207	2400	0.6847	3400	0.3512	4400	0.2242	5400	0.1589
408	-0.0093	1408	0.1224	2408	0.6929	3408	0.3491	4408	0.2233	5408	0.1580
416	-0.0080	1416	0.1240	2416	0.7004	3416	0.3474	4416	0.2227	5416	0.1575
424	-0.0070	1424	0.1258	2424	0.7071	3424	0.3461	4424	0.2220	5424	0.1563
432	-0.0056	1432	0.1266	2432	0.7143	3432	0.3444	4432	0.2210	5432	0.1557
440	-0.0030	1440	0.1282	2440	0.7215	3440	0.3429	4440	0.2204	5440	0.1551
448	-0.0020	1448	0.1288	2448	0.7276	3448	0.3411	4448	0.2200	5448	0.1550

456	-0.0006	1456	0.1305	2456	0.7339	3456	0.3408	4456	0.2193	5456	0.1546
464	0.0000	1464	0.1330	2464	0.7400	3464	0.3390	4464	0.2187	5464	0.1538
472	0.0012	1472	0.1358	2472	0.7460	3472	0.3375	4472	0.2182	5472	0.1537
480	0.0053	1480	0.1364	2480	0.7518	3480	0.3365	4480	0.2174	5480	0.1526
488	0.0055	1488	0.1358	2488	0.7570	3488	0.3352	4488	0.2168	5488	0.1526
496	0.0061	1496	0.1360	2496	0.7617	3496	0.3343	4496	0.2161	5496	0.1515
504	0.0086	1504	0.1387	2504	0.7665	3504	0.3336	4504	0.2155	5504	0.1511
512	0.0112	1512	0.1372	2512	0.7707	3512	0.3332	4512	0.2155	5512	0.1511
520	0.0125	1520	0.1405	2520	0.7744	3520	0.3316	4520	0.2141	5520	0.1503
528	0.0141	1528	0.1425	2528	0.7781	3528	0.3314	4528	0.2132	5528	0.1502
536	0.0134	1536	0.1426	2536	0.7815	3536	0.3306	4536	0.2122	5536	0.1494
544	0.0153	1544	0.1430	2544	0.7842	3544	0.3296	4544	0.2121	5544	0.1487
552	0.0160	1552	0.1439	2552	0.7863	3552	0.3292	4552	0.2114	5552	0.1478
560	0.0175	1560	0.1449	2560	0.7885	3560	0.3285	4560	0.2109	5560	0.1480
568	0.0228	1568	0.1456	2568	0.7902	3568	0.3285	4568	0.2104	5568	0.1480
576	0.0256	1576	0.1468	2576	0.7914	3576	0.3279	4576	0.2097	5576	0.1475
584	0.0223	1584	0.1491	2584	0.7923	3584	0.3277	4584	0.2087	5584	0.1472
592	0.0251	1592	0.1511	2592	0.7928	3592	0.3274	4592	0.2086	5592	0.1472
600	0.0299	1600	0.1534	2600	0.7930	3600	0.3269	4600	0.2080	5600	0.1468
608	0.0241	1608	0.1546	2608	0.7925	3608	0.3271	4608	0.2079	5608	0.1467
616	0.0286	1616	0.1564	2616	0.7917	3616	0.3261	4616	0.2070	5616	0.1464
624	0.0326	1624	0.1584	2624	0.7909	3624	0.3262	4624	0.2066	5624	0.1460
632	0.0298	1632	0.1597	2632	0.7896	3632	0.3255	4632	0.2059	5632	0.1445
640	0.0360	1640	0.1620	2640	0.7879	3640	0.3255	4640	0.2052	5640	0.1443
648	0.0352	1648	0.1637	2648	0.7857	3648	0.3253	4648	0.2050	5648	0.1437
656	0.0323	1656	0.1654	2656	0.7832	3656	0.3245	4656	0.2045	5656	0.1442
664	0.0359	1664	0.1672	2664	0.7806	3664	0.3247	4664	0.2039	5664	0.1437
672	0.0426	1672	0.1692	2672	0.7776	3672	0.3240	4672	0.2036	5672	0.1431
680	0.0483	1680	0.1722	2680	0.7746	3680	0.3237	4680	0.2024	5680	0.1432
688	0.0473	1688	0.1745	2688	0.7704	3688	0.3231	4688	0.2028	5688	0.1430
696	0.0439	1696	0.1769	2696	0.7664	3696	0.3232	4696	0.2020	5696	0.1424
704	0.0444	1704	0.1793	2704	0.7624	3704	0.3227	4704	0.2017	5704	0.1420
712	0.0436	1712	0.1818	2712	0.7584	3712	0.3221	4712	0.2014	5712	0.1420
720	0.0407	1720	0.1842	2720	0.7534	3720	0.3217	4720	0.2013	5720	0.1418
728	0.0452	1728	0.1864	2728	0.7486	3728	0.3213	4728	0.2011	5728	0.1418
736	0.0563	1736	0.1889	2736	0.7438	3736	0.3208	4736	0.2004	5736	0.1419
744	0.0588	1744	0.1909	2744	0.7377	3744	0.3204	4744	0.2004	5744	0.1416
752	0.0550	1752	0.1939	2752	0.7328	3752	0.3191	4752	0.1999	5752	0.1419
760	0.0534	1760	0.1959	2760	0.7273	3760	0.3181	4760	0.1998	5760	0.1419
768	0.0570	1768	0.1987	2768	0.7211	3768	0.3176	4768	0.1985	5768	0.1420
776	0.0559	1776	0.2015	2776	0.7157	3776	0.3164	4776	0.1990	5776	0.1421
784	0.0532	1784	0.2040	2784	0.7092	3784	0.3154	4784	0.1979	5784	0.1422
792	0.0560	1792	0.2079	2792	0.7031	3792	0.3134	4792	0.1966	5792	0.1413
800	0.0599	1800	0.2108	2800	0.6973	3800	0.3122	4800	0.1964	5800	0.1402
808	0.0631	1808	0.2141	2808	0.6910	3808	0.3096	4808	0.1951	5808	0.1391
816	0.0609	1816	0.2163	2816	0.6846	3816	0.3081	4816	0.1953	5816	0.1395
824	0.0621	1824	0.2195	2824	0.6785	3824	0.3070	4824	0.1948	5824	0.1399
832	0.0643	1832	0.2220	2832	0.6719	3832	0.3056	4832	0.1937	5832	0.1396
840	0.0647	1840	0.2263	2840	0.6652	3840	0.3059	4840	0.1941	5840	0.1401
848	0.0650	1848	0.2294	2848	0.6586	3848	0.3051	4848	0.1930	5848	0.1400
856	0.0651	1856	0.2332	2856	0.6522	3856	0.3044	4856	0.1928	5856	0.1404
864	0.0646	1864	0.2362	2864	0.6457	3864	0.3039	4864	0.1918	5864	0.1410
872	0.0675	1872	0.2398	2872	0.6392	3872	0.3017	4872	0.1911	5872	0.1412
880	0.0675	1880	0.2432	2880	0.6325	3880	0.3007	4880	0.1907	5880	0.1417
888	0.0714	1888	0.2472	2888	0.6259	3888	0.2986	4888	0.1904	5888	0.1420
896	0.0751	1896	0.2507	2896	0.6192	3896	0.2967	4896	0.1904	5896	0.1431
904	0.0727	1904	0.2550	2904	0.6128	3904	0.2952	4904	0.1894	5904	0.1433
912	0.0753	1912	0.2588	2912	0.6068	3912	0.2928	4912	0.1889	5912	0.1436
920	0.0761	1920	0.2627	2920	0.6001	3920	0.2923	4920	0.1888	5920	0.1448

UJI STL - LABORATORIUM AKUSTIK

FREQ	STL										
2	46.998	1002	49.541	2002	54.069	3002	55.235	4002	55.389	5002	55.762
4	54.698	1004	50.371	2004	54.075	3004	55.232	4004	55.406	5004	55.724
6	54.193	1006	50.009	2006	54.080	3006	55.230	4006	55.367	5006	55.772
8	51.568	1008	49.967	2008	54.101	3008	55.262	4008	55.422	5008	55.797
10	45.087	1010	49.338	2010	54.102	3010	55.245	4010	55.382	5010	55.838
12	48.653	1012	49.918	2012	54.094	3012	55.273	4012	55.416	5012	55.717
14	53.018	1014	49.672	2014	54.093	3014	55.259	4014	55.373	5014	55.750
16	55.820	1016	49.863	2016	54.067	3016	55.257	4016	55.324	5016	55.852
18	55.463	1018	49.659	2018	54.122	3018	55.259	4018	55.383	5018	55.789
20	46.014	1020	49.803	2020	54.115	3020	55.277	4020	55.413	5020	55.739
22	42.623	1022	49.873	2022	54.111	3022	55.249	4022	55.400	5022	55.775
24	42.808	1024	50.360	2024	54.124	3024	55.251	4024	55.461	5024	55.907
26	52.996	1026	50.947	2026	54.122	3026	55.262	4026	55.307	5026	55.896
28	53.893	1028	51.057	2028	54.110	3028	55.255	4028	55.361	5028	55.797
30	55.218	1030	50.349	2030	54.115	3030	55.243	4030	55.386	5030	55.805
32	50.531	1032	50.212	2032	54.141	3032	55.255	4032	55.382	5032	55.808
34	52.861	1034	50.012	2034	54.150	3034	55.255	4034	55.414	5034	55.784
36	48.403	1036	49.907	2036	54.136	3036	55.267	4036	55.400	5036	55.858
38	55.652	1038	50.034	2038	54.130	3038	55.263	4038	55.402	5038	55.748
40	55.026	1040	49.973	2040	54.156	3040	55.274	4040	55.409	5040	55.867
42	56.912	1042	50.179	2042	54.123	3042	55.256	4042	55.406	5042	55.891
44	55.024	1044	49.876	2044	54.150	3044	55.275	4044	55.410	5044	55.851
46	53.776	1046	49.894	2046	54.184	3046	55.276	4046	55.431	5046	55.713
48	55.015	1048	50.037	2048	54.165	3048	55.266	4048	55.421	5048	55.960
50	57.087	1050	50.180	2050	54.140	3050	55.256	4050	55.422	5050	55.913
52	54.044	1052	50.256	2052	54.143	3052	55.260	4052	55.419	5052	55.827
54	56.561	1054	50.206	2054	54.186	3054	55.284	4054	55.412	5054	55.785
56	44.736	1056	50.177	2056	54.188	3056	55.257	4056	55.420	5056	56.027
58	51.154	1058	50.298	2058	54.173	3058	55.260	4058	55.430	5058	55.782
60	40.308	1060	50.282	2060	54.197	3060	55.251	4060	55.399	5060	55.861
62	52.213	1062	50.279	2062	54.197	3062	55.266	4062	55.463	5062	55.886
64	52.264	1064	50.365	2064	54.170	3064	55.241	4064	55.437	5064	55.813
66	54.761	1066	50.304	2066	54.206	3066	55.249	4066	55.418	5066	55.823
68	44.510	1068	50.263	2068	54.191	3068	55.285	4068	55.448	5068	55.756
70	47.361	1070	50.400	2070	54.212	3070	55.281	4070	55.438	5070	55.947
72	55.886	1072	50.356	2072	54.192	3072	55.254	4072	55.480	5072	56.006
74	40.613	1074	50.370	2074	54.216	3074	55.261	4074	55.486	5074	55.885
76	49.215	1076	50.338	2076	54.206	3076	55.304	4076	55.482	5076	55.659
78	49.746	1078	50.378	2078	54.214	3078	55.272	4078	55.480	5078	55.834
80	54.834	1080	50.416	2080	54.207	3080	55.218	4080	55.469	5080	55.938
82	51.437	1082	50.385	2082	54.219	3082	55.260	4082	55.466	5082	55.855
84	51.960	1084	50.428	2084	54.218	3084	55.245	4084	55.433	5084	55.859
86	50.004	1086	50.423	2086	54.237	3086	55.189	4086	55.491	5086	55.850
88	53.695	1088	50.364	2088	54.239	3088	55.213	4088	55.456	5088	55.764
90	42.194	1090	50.329	2090	54.219	3090	55.200	4090	55.481	5090	55.838
92	47.825	1092	50.318	2092	54.225	3092	55.269	4092	55.532	5092	55.828
94	57.976	1094	50.479	2094	54.231	3094	55.292	4094	55.471	5094	55.845
96	50.273	1096	50.535	2096	54.232	3096	55.245	4096	55.518	5096	55.766
98	52.056	1098	50.475	2098	54.228	3098	55.239	4098	55.500	5098	55.905
100	44.534	1100	50.423	2100	54.230	3100	55.247	4100	55.514	5100	55.788
102	56.437	1102	50.366	2102	54.237	3102	55.247	4102	55.505	5102	55.863
104	51.978	1104	50.431	2104	54.251	3104	55.262	4104	55.415	5104	55.823
106	48.889	1106	50.561	2106	54.242	3106	55.293	4106	55.493	5106	55.853
108	52.055	1108	50.579	2108	54.238	3108	55.269	4108	55.568	5108	55.760
110	51.892	1110	50.556	2110	54.244	3110	55.299	4110	55.562	5110	55.803
112	49.735	1112	50.551	2112	54.255	3112	55.275	4112	55.529	5112	55.827

114	43.363	1114	50.463	2114	54.255	3114	55.221	4114	55.526	5114	55.850
116	45.185	1116	50.497	2116	54.252	3116	55.241	4116	55.569	5116	55.776
118	51.229	1118	50.604	2118	54.251	3118	55.281	4118	55.524	5118	55.782
120	48.672	1120	50.621	2120	54.251	3120	55.283	4120	55.501	5120	55.799
122	52.324	1122	50.506	2122	54.267	3122	55.292	4122	55.451	5122	55.793
124	45.790	1124	50.614	2124	54.259	3124	55.244	4124	55.506	5124	55.768
126	40.613	1126	50.618	2126	54.264	3126	55.259	4126	55.552	5126	55.798
128	41.190	1128	50.607	2128	54.254	3128	55.287	4128	55.517	5128	55.754
130	50.545	1130	50.617	2130	54.257	3130	55.265	4130	55.597	5130	55.777
132	49.504	1132	50.644	2132	54.271	3132	55.249	4132	55.550	5132	55.769
134	49.260	1134	50.667	2134	54.249	3134	55.274	4134	55.681	5134	55.774
136	54.771	1136	50.642	2136	54.251	3136	55.263	4136	55.490	5136	55.744
138	53.343	1138	50.652	2138	54.270	3138	55.292	4138	55.458	5138	55.726
140	46.332	1140	50.722	2140	54.264	3140	55.287	4140	55.586	5140	55.720
142	46.110	1142	50.658	2142	54.267	3142	55.290	4142	55.500	5142	55.754
144	45.625	1144	50.664	2144	54.288	3144	55.266	4144	55.635	5144	55.720
146	47.708	1146	50.700	2146	54.267	3146	55.264	4146	55.532	5146	55.713
148	47.523	1148	50.723	2148	54.293	3148	55.271	4148	55.520	5148	55.732
150	51.716	1150	50.779	2150	54.285	3150	55.303	4150	55.590	5150	55.689
152	47.173	1152	50.762	2152	54.262	3152	55.277	4152	55.627	5152	55.709
154	47.000	1154	50.726	2154	54.273	3154	55.258	4154	55.498	5154	55.700
156	44.972	1156	50.804	2156	54.290	3156	55.266	4156	55.490	5156	55.674
158	48.084	1158	50.786	2158	54.295	3158	55.281	4158	55.478	5158	55.701
160	52.867	1160	50.761	2160	54.301	3160	55.283	4160	55.711	5160	55.728
162	52.403	1162	50.765	2162	54.309	3162	55.261	4162	55.492	5162	55.680
164	51.842	1164	50.728	2164	54.283	3164	55.252	4164	55.401	5164	55.686
166	51.255	1166	50.831	2166	54.307	3166	55.278	4166	55.686	5166	55.705
168	47.061	1168	50.854	2168	54.295	3168	55.283	4168	55.633	5168	55.671
170	32.240	1170	50.856	2170	54.299	3170	55.291	4170	55.638	5170	55.716
172	48.635	1172	50.781	2172	54.318	3172	55.267	4172	55.574	5172	55.672
174	50.516	1174	50.806	2174	54.325	3174	55.268	4174	55.548	5174	55.704
176	52.490	1176	50.883	2176	54.294	3176	55.284	4176	55.459	5176	55.669
178	52.426	1178	50.840	2178	54.294	3178	55.291	4178	55.625	5178	55.685
180	46.398	1180	50.839	2180	54.309	3180	55.288	4180	55.642	5180	55.606
182	48.877	1182	50.860	2182	54.293	3182	55.292	4182	55.505	5182	55.655
184	52.175	1184	50.883	2184	54.332	3184	55.249	4184	55.554	5184	55.674
186	53.137	1186	50.916	2186	54.334	3186	55.280	4186	55.491	5186	55.701
188	50.778	1188	50.935	2188	54.299	3188	55.262	4188	55.646	5188	55.639
190	46.650	1190	50.899	2190	54.338	3190	55.257	4190	55.518	5190	55.611
192	48.237	1192	50.925	2192	54.318	3192	55.248	4192	55.578	5192	55.661
194	45.243	1194	50.957	2194	54.322	3194	55.251	4194	55.494	5194	55.645
196	44.538	1196	50.941	2196	54.311	3196	55.285	4196	55.557	5196	55.678
198	33.405	1198	50.957	2198	54.327	3198	55.273	4198	55.531	5198	55.653
200	42.368	1200	50.979	2200	54.336	3200	55.278	4200	55.553	5200	55.652
202	48.068	1202	50.973	2202	54.314	3202	55.282	4202	55.523	5202	55.624
204	47.078	1204	50.965	2204	54.322	3204	55.275	4204	55.409	5204	55.653
206	35.498	1206	50.967	2206	54.334	3206	55.255	4206	55.531	5206	55.669
208	33.493	1208	50.999	2208	54.356	3208	55.237	4208	55.516	5208	55.643
210	39.826	1210	51.041	2210	54.333	3210	55.279	4210	55.567	5210	55.655
212	43.932	1212	51.015	2212	54.355	3212	55.332	4212	55.530	5212	55.659
214	42.928	1214	51.063	2214	54.336	3214	55.277	4214	55.531	5214	55.677
216	32.556	1216	51.049	2216	54.356	3216	55.299	4216	55.514	5216	55.717
218	42.920	1218	51.050	2218	54.364	3218	55.276	4218	55.512	5218	55.593
220	43.444	1220	51.072	2220	54.378	3220	55.262	4220	55.492	5220	55.669
222	44.009	1222	51.066	2222	54.369	3222	55.283	4222	55.440	5222	55.702
224	36.377	1224	51.078	2224	54.369	3224	55.302	4224	55.522	5224	55.626
226	44.480	1226	51.093	2226	54.363	3226	55.264	4226	55.464	5226	55.686
228	43.146	1228	51.109	2228	54.395	3228	55.285	4228	55.502	5228	55.705
230	47.604	1230	51.101	2230	54.379	3230	55.287	4230	55.440	5230	55.699

232	47.357	1232	51.130	2232	54.379	3232	55.296	4232	55.483	5232	55.678
234	44.562	1234	51.122	2234	54.398	3234	55.252	4234	55.456	5234	55.737
236	46.464	1236	51.142	2236	54.398	3236	55.259	4236	55.475	5236	55.695
238	46.161	1238	51.144	2238	54.381	3238	55.250	4238	55.474	5238	55.730
240	42.817	1240	51.169	2240	54.404	3240	55.309	4240	55.463	5240	55.740
242	44.766	1242	51.196	2242	54.418	3242	55.250	4242	55.451	5242	55.661
244	43.568	1244	51.197	2244	54.381	3244	55.288	4244	55.433	5244	55.744
246	39.862	1246	51.188	2246	54.409	3246	55.289	4246	55.469	5246	55.745
248	45.956	1248	51.191	2248	54.412	3248	55.280	4248	55.417	5248	55.760
250	39.916	1250	51.205	2250	54.400	3250	55.268	4250	55.420	5250	55.710
252	46.181	1252	51.215	2252	54.395	3252	55.279	4252	55.437	5252	55.751
254	49.435	1254	51.215	2254	54.427	3254	55.304	4254	55.450	5254	55.742
256	47.249	1256	51.211	2256	54.415	3256	55.312	4256	55.435	5256	55.759
258	43.903	1258	51.224	2258	54.439	3258	55.287	4258	55.422	5258	55.775
260	45.532	1260	51.253	2260	54.422	3260	55.264	4260	55.398	5260	55.741
262	45.635	1262	51.246	2262	54.428	3262	55.317	4262	55.461	5262	55.769
264	45.457	1264	51.284	2264	54.436	3264	55.310	4264	55.386	5264	55.751
266	46.865	1266	51.252	2266	54.438	3266	55.307	4266	55.416	5266	55.761
268	46.442	1268	51.301	2268	54.439	3268	55.298	4268	55.406	5268	55.794
270	47.502	1270	51.281	2270	54.446	3270	55.255	4270	55.392	5270	55.823
272	46.201	1272	51.274	2272	54.456	3272	55.342	4272	55.398	5272	55.837
274	45.955	1274	51.271	2274	54.459	3274	55.318	4274	55.340	5274	55.832
276	45.887	1276	51.340	2276	54.461	3276	55.325	4276	55.400	5276	55.875
278	46.699	1278	51.354	2278	54.464	3278	55.296	4278	55.367	5278	55.826
280	47.178	1280	51.325	2280	54.453	3280	55.336	4280	55.388	5280	55.872
282	47.737	1282	51.347	2282	54.465	3282	55.277	4282	55.400	5282	55.878
284	47.416	1284	51.354	2284	54.466	3284	55.298	4284	55.386	5284	55.870
286	47.587	1286	51.362	2286	54.470	3286	55.296	4286	55.358	5286	55.919
288	47.340	1288	51.372	2288	54.473	3288	55.325	4288	55.352	5288	55.898
290	45.898	1290	51.381	2290	54.470	3290	55.339	4290	55.323	5290	55.972
292	45.519	1292	51.378	2292	54.466	3292	55.321	4292	55.419	5292	55.960
294	45.513	1294	51.404	2294	54.484	3294	55.330	4294	55.357	5294	55.941
296	45.255	1296	51.401	2296	54.485	3296	55.354	4296	55.376	5296	56.008
298	44.706	1298	51.380	2298	54.487	3298	55.276	4298	55.368	5298	55.905
300	46.651	1300	51.469	2300	54.500	3300	55.346	4300	55.341	5300	56.004
302	46.959	1302	51.383	2302	54.484	3302	55.307	4302	55.260	5302	56.097
304	46.758	1304	51.466	2304	54.482	3304	55.331	4304	55.380	5304	56.065
306	46.471	1306	51.506	2306	54.505	3306	55.333	4306	55.361	5306	56.101
308	46.908	1308	51.450	2308	54.501	3308	55.308	4308	55.338	5308	56.225
310	46.795	1310	51.482	2310	54.502	3310	55.343	4310	55.379	5310	56.072
312	47.068	1312	51.456	2312	54.514	3312	55.329	4312	55.330	5312	56.175
314	47.096	1314	51.505	2314	54.522	3314	55.323	4314	55.341	5314	56.182
316	47.064	1316	51.504	2316	54.531	3316	55.344	4316	55.298	5316	56.099
318	47.029	1318	51.500	2318	54.503	3318	55.321	4318	55.386	5318	56.170
320	47.123	1320	51.540	2320	54.522	3320	55.311	4320	55.348	5320	56.119
322	47.214	1322	51.516	2322	54.521	3322	55.311	4322	55.292	5322	56.055
324	47.132	1324	51.504	2324	54.515	3324	55.325	4324	55.439	5324	56.163
326	46.431	1326	51.560	2326	54.532	3326	55.334	4326	55.353	5326	55.988
328	46.975	1328	51.555	2328	54.554	3328	55.325	4328	55.398	5328	56.034
330	46.999	1330	51.543	2330	54.538	3330	55.319	4330	55.317	5330	56.064
332	46.977	1332	51.609	2332	54.530	3332	55.338	4332	55.410	5332	55.993
334	47.590	1334	51.553	2334	54.529	3334	55.331	4334	55.344	5334	56.016
336	46.974	1336	51.582	2336	54.519	3336	55.337	4336	55.286	5336	55.996
338	46.724	1338	51.619	2338	54.566	3338	55.325	4338	55.365	5338	56.015
340	47.206	1340	51.625	2340	54.508	3340	55.333	4340	55.377	5340	55.775
342	47.307	1342	51.656	2342	54.556	3342	55.353	4342	55.335	5342	55.908
344	47.519	1344	51.628	2344	54.557	3344	55.316	4344	55.377	5344	56.111
346	47.366	1346	51.646	2346	54.532	3346	55.318	4346	55.405	5346	55.937
348	47.006	1348	51.674	2348	54.589	3348	55.295	4348	55.371	5348	56.034

350	47.379	1350	51.626	2350	54.563	3350	55.309	4350	55.370	5350	55.916
352	47.633	1352	51.644	2352	54.572	3352	55.306	4352	55.404	5352	55.925
354	47.317	1354	51.692	2354	54.574	3354	55.312	4354	55.344	5354	55.922
356	46.741	1356	51.691	2356	54.581	3356	55.326	4356	55.408	5356	55.812
358	46.572	1358	51.709	2358	54.568	3358	55.343	4358	55.425	5358	55.912
360	46.472	1360	51.714	2360	54.575	3360	55.333	4360	55.371	5360	56.091
362	47.161	1362	51.709	2362	54.589	3362	55.337	4362	55.422	5362	55.959
364	47.668	1364	51.724	2364	54.604	3364	55.317	4364	55.377	5364	55.954
366	47.685	1366	51.743	2366	54.587	3366	55.313	4366	55.424	5366	55.962
368	48.048	1368	51.754	2368	54.580	3368	55.364	4368	55.408	5368	56.019
370	48.725	1370	51.763	2370	54.593	3370	55.373	4370	55.447	5370	56.117
372	47.250	1372	51.777	2372	54.603	3372	55.273	4372	55.431	5372	55.889
374	45.508	1374	51.785	2374	54.610	3374	55.294	4374	55.423	5374	56.030
376	47.330	1376	51.798	2376	54.610	3376	55.335	4376	55.382	5376	55.882
378	46.744	1378	51.813	2378	54.594	3378	55.305	4378	55.416	5378	56.106
380	46.903	1380	51.810	2380	54.596	3380	55.307	4380	55.424	5380	56.021
382	48.256	1382	51.823	2382	54.592	3382	55.303	4382	55.426	5382	56.046
384	48.614	1384	51.834	2384	54.624	3384	55.385	4384	55.469	5384	56.018
386	47.946	1386	51.843	2386	54.623	3386	55.381	4386	55.472	5386	55.994
388	49.026	1388	51.860	2388	54.616	3388	55.308	4388	55.457	5388	56.009
390	47.823	1390	51.864	2390	54.614	3390	55.295	4390	55.450	5390	55.931
392	46.470	1392	51.882	2392	54.607	3392	55.337	4392	55.445	5392	56.087
394	49.495	1394	51.890	2394	54.620	3394	55.285	4394	55.479	5394	56.038
396	44.287	1396	51.893	2396	54.643	3396	55.318	4396	55.486	5396	56.211
398	44.270	1398	51.891	2398	54.637	3398	55.297	4398	55.442	5398	55.966
400	45.766	1400	51.908	2400	54.630	3400	55.299	4400	55.483	5400	55.974
402	46.252	1402	51.927	2402	54.640	3402	55.350	4402	55.481	5402	55.978
404	48.196	1404	51.923	2404	54.630	3404	55.317	4404	55.488	5404	55.979
406	51.826	1406	51.924	2406	54.641	3406	55.299	4406	55.518	5406	56.050
408	51.808	1408	51.950	2408	54.634	3408	55.315	4408	55.506	5408	55.966
410	50.897	1410	51.945	2410	54.641	3410	55.338	4410	55.440	5410	56.023
412	50.473	1412	51.953	2412	54.643	3412	55.318	4412	55.466	5412	55.901
414	50.697	1414	51.959	2414	54.644	3414	55.313	4414	55.561	5414	56.021
416	49.508	1416	51.979	2416	54.637	3416	55.344	4416	55.474	5416	55.967
418	48.437	1418	51.986	2418	54.651	3418	55.334	4418	55.506	5418	56.003
420	49.617	1420	52.013	2420	54.652	3420	55.326	4420	55.422	5420	55.936
422	50.064	1422	52.022	2422	54.670	3422	55.353	4422	55.570	5422	55.957
424	49.548	1424	52.033	2424	54.666	3424	55.319	4424	55.461	5424	55.959
426	49.065	1426	52.053	2426	54.659	3426	55.332	4426	55.540	5426	55.952
428	47.720	1428	52.038	2428	54.662	3428	55.309	4428	55.520	5428	55.942
430	47.508	1430	52.046	2430	54.672	3430	55.306	4430	55.578	5430	55.940
432	47.219	1432	52.056	2432	54.656	3432	55.319	4432	55.505	5432	55.926
434	47.160	1434	52.027	2434	54.679	3434	55.307	4434	55.552	5434	55.897
436	46.462	1436	52.097	2436	54.660	3436	55.277	4436	55.524	5436	55.974
438	46.620	1438	52.074	2438	54.694	3438	55.340	4438	55.458	5438	55.916
440	46.561	1440	52.080	2440	54.682	3440	55.360	4440	55.608	5440	55.895
442	46.992	1442	52.140	2442	54.668	3442	55.314	4442	55.519	5442	55.901
444	47.036	1444	52.163	2444	54.676	3444	55.337	4444	55.420	5444	55.912
446	47.628	1446	52.148	2446	54.677	3446	55.346	4446	55.503	5446	55.885
448	47.866	1448	52.142	2448	54.677	3448	55.349	4448	55.620	5448	55.878
450	48.110	1450	52.128	2450	54.691	3450	55.321	4450	55.527	5450	55.859
452	47.763	1452	52.161	2452	54.720	3452	55.312	4452	55.578	5452	55.857
454	47.386	1454	52.173	2454	54.682	3454	55.332	4454	55.535	5454	55.860
456	47.885	1456	52.124	2456	54.735	3456	55.327	4456	55.489	5456	55.860
458	48.125	1458	52.260	2458	54.684	3458	55.332	4458	55.562	5458	55.836
460	48.181	1460	52.221	2460	54.719	3460	55.345	4460	55.610	5460	55.815
462	47.686	1462	52.170	2462	54.728	3462	55.347	4462	55.492	5462	55.807
464	47.796	1464	52.216	2464	54.703	3464	55.330	4464	55.569	5464	55.768
466	47.755	1466	52.211	2466	54.700	3466	55.318	4466	55.542	5466	55.878

468	47.807	1468	52.249	2468	54.723	3468	55.338	4468	55.512	5468	55.776
470	47.989	1470	52.270	2470	54.723	3470	55.354	4470	55.569	5470	55.797
472	48.010	1472	52.284	2472	54.732	3472	55.340	4472	55.594	5472	55.785
474	47.840	1474	52.233	2474	54.723	3474	55.373	4474	55.511	5474	55.820
476	47.083	1476	52.270	2476	54.715	3476	55.344	4476	55.605	5476	55.743
478	47.576	1478	52.300	2478	54.717	3478	55.369	4478	55.519	5478	55.750
480	47.558	1480	52.309	2480	54.719	3480	55.355	4480	55.565	5480	55.719
482	48.711	1482	52.308	2482	54.749	3482	55.342	4482	55.533	5482	55.731
484	49.739	1484	52.304	2484	54.732	3484	55.328	4484	55.607	5484	55.778
486	49.367	1486	52.372	2486	54.752	3486	55.326	4486	55.491	5486	55.733
488	48.965	1488	52.361	2488	54.725	3488	55.335	4488	55.513	5488	55.725
490	48.231	1490	52.329	2490	54.711	3490	55.328	4490	55.479	5490	55.773
492	46.203	1492	52.357	2492	54.712	3492	55.347	4492	55.588	5492	55.778
494	45.197	1494	52.378	2494	54.760	3494	55.367	4494	55.501	5494	55.688
496	47.281	1496	52.390	2496	54.753	3496	55.387	4496	55.498	5496	55.614
498	47.982	1498	52.380	2498	54.742	3498	55.357	4498	55.509	5498	55.723
500	48.664	1500	52.374	2500	54.777	3500	55.339	4500	55.494	5500	55.726
502	50.921	1502	52.407	2502	54.715	3502	55.364	4502	55.482	5502	55.698
504	50.895	1504	52.434	2504	54.733	3504	55.337	4504	55.550	5504	55.736
506	49.891	1506	52.422	2506	54.757	3506	55.317	4506	55.533	5506	55.701
508	51.080	1508	52.423	2508	54.769	3508	55.357	4508	55.565	5508	55.735
510	50.861	1510	52.420	2510	54.750	3510	55.356	4510	55.477	5510	55.735
512	51.173	1512	52.438	2512	54.777	3512	55.298	4512	55.558	5512	55.668
514	47.292	1514	52.468	2514	54.754	3514	55.381	4514	55.484	5514	55.699
516	48.637	1516	52.498	2516	54.783	3516	55.370	4516	55.484	5516	55.694
518	50.538	1518	52.489	2518	54.791	3518	55.335	4518	55.468	5518	55.723
520	51.350	1520	52.473	2520	54.769	3520	55.319	4520	55.487	5520	55.781
522	52.074	1522	52.472	2522	54.758	3522	55.387	4522	55.481	5522	55.682
524	49.109	1524	52.486	2524	54.771	3524	55.346	4524	55.563	5524	55.734
526	48.665	1526	52.509	2526	54.793	3526	55.376	4526	55.474	5526	55.792
528	48.197	1528	52.521	2528	54.763	3528	55.354	4528	55.404	5528	55.669
530	47.353	1530	52.522	2530	54.765	3530	55.338	4530	55.392	5530	55.677
532	48.119	1532	52.533	2532	54.784	3532	55.346	4532	55.435	5532	55.733
534	47.587	1534	52.570	2534	54.780	3534	55.352	4534	55.470	5534	55.718
536	47.159	1536	52.561	2536	54.788	3536	55.312	4536	55.454	5536	55.769
538	47.123	1538	52.574	2538	54.783	3538	55.372	4538	55.431	5538	55.725
540	47.273	1540	52.558	2540	54.803	3540	55.291	4540	55.480	5540	55.743
542	47.366	1542	52.583	2542	54.782	3542	55.399	4542	55.459	5542	55.754
544	47.389	1544	52.592	2544	54.797	3544	55.356	4544	55.470	5544	55.732
546	50.366	1546	52.589	2546	54.817	3546	55.318	4546	55.443	5546	55.778
548	50.439	1548	52.631	2548	54.786	3548	55.304	4548	55.428	5548	55.745
550	49.465	1550	52.637	2550	54.800	3550	55.379	4550	55.442	5550	55.783
552	48.756	1552	52.648	2552	54.813	3552	55.396	4552	55.439	5552	55.745
554	46.507	1554	52.636	2554	54.794	3554	55.319	4554	55.417	5554	55.765
556	43.934	1556	52.707	2556	54.801	3556	55.355	4556	55.426	5556	55.768
558	47.101	1558	52.647	2558	54.819	3558	55.372	4558	55.438	5558	55.805
560	47.334	1560	52.677	2560	54.834	3560	55.402	4560	55.411	5560	55.770
562	47.899	1562	52.701	2562	54.837	3562	55.388	4562	55.396	5562	55.840
564	48.749	1564	52.686	2564	54.826	3564	55.330	4564	55.415	5564	55.810
566	49.763	1566	52.700	2566	54.829	3566	55.333	4566	55.390	5566	55.782
568	49.377	1568	52.740	2568	54.835	3568	55.382	4568	55.428	5568	55.814
570	47.059	1570	52.712	2570	54.842	3570	55.313	4570	55.370	5570	55.803
572	48.195	1572	52.749	2572	54.850	3572	55.346	4572	55.401	5572	55.841
574	48.743	1574	52.732	2574	54.846	3574	55.359	4574	55.421	5574	55.830
576	47.961	1576	52.717	2576	54.849	3576	55.377	4576	55.488	5576	55.898
578	48.123	1578	52.778	2578	54.852	3578	55.396	4578	55.344	5578	55.860
580	48.945	1580	52.785	2580	54.854	3580	55.360	4580	55.368	5580	55.868

BIODATA RINGKAS PENULIS



Lahir di Yogyakarta, 04 April 1967. Dr. Erni Setyowati bekerja di Jurusan Arsitektur, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Indonesia. Melakukan penelitian tentang Nano-material dan material berbahan limbah. Tahun 2015, merupakan tahun lepas landas dalam penelitian material, dimana pada tahun tersebut penulis berkesempatan melakukan “*public lecture*” tentang material untuk *Universal Design di Akashi National College of Technology (ANCT)*, Jepang. Output penelitian yang sudah dihasilkan adalah: terdaftar Paten Material Akustik dan material batu bata dari polymer dan cangkang kerang, jurnal internasional terindeks SCOPUS (*Journal Advanced Material Research, Journal of Applied Mechanics and Material*, Jurnal Teknologi) buku teks, buku ajar, dan Teknologi Tepat Guna (mesin hot press, panel dinding, bata rendah emisi, *terazzo* cangkang kerang).



Gagoek Hardiman dianugerahi gelar Profesor oleh Universitas Diponegoro pada tahun 2013. Dilahirkan di Madiun, kota kecil di Jawa Timur, Indonesia pada tanggal 19 Agustus 1953. Mulai belajar di Program S1 Sarjana Arsitektur, Universitas Diponegoro pada tahun 1973. Kemudian, mendapat gelar Dr.-Ing dalam Arsitektur dan Perencanaan kota dari Universitas Stuttgart, Jerman pada tahun 1992. Karir dimulai di tahun 1983 sebagai dosen di jurusan Arsitektur, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro. Saat ini memimpin Program Doktor Arsitektur dan Perkotaan (PDTAP) Universitas Diponegoro. Topik penelitian yang ditekuni adalah Arsitektur Tropis dengan beberapa publikasi pada *Journal of Applied Mechanics and Material* serta *the Journal of Engineering and Science*.



Ir. Purwanto, MT.,M.Eng. lahir di Pati, 11 Juli 1963. Karir dimulai sebagai Dosen di Jurusan Teknik Sipil UNDIP pada Februari 1991, pernah menjabat sebagai Sekretaris Laboratorium Bahan dan Konstruksi UNDIP. Lulusan S1 Teknik Sipil UNDIP tahun 1989, S2 Magister Teknik Sipil ITB (Rekayasa Struktur) tahun 1997, dan S2 IHE-UNESCO Delft Belanda (*Coastal Engineering & Port Development*) pada tahun 2003. Aktif berkecimpung di dunia Konsultan sejak tahun 1991 hingga sekarang sebagai Tenaga Ahli Sipil dan Konstruksi (*Port and Development*). Aktif menulis Jurnal nasional maupun Internasional yang berkaitan dengan topik material dan struktur. Pengalaman proyek yang ditangani seperti: Perencanaan Struktur Dermaga Tanjung Mas, *Feasibility Study-Fly Over* Dewaruci Bali, Struktur Jembatan dan masih banyak lagi proyek-proyek lain.