

**PENGARUH VARIASI PROPORSI CAMPURAN BETON TERHADAP
MODULUS ELASTISITAS BETON MENGGUNAKAN METODE
NON DESTRUCTIVE TEST (NDT)**

**SKRIPSI
TEKNIK SIPIL**

**Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
Memperoleh gelar Sarjana Teknik**



**NUNGKI YUNIAWATI
NIM. 175060101111024**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2021**



LEMBAR PENGESAHAN

PENGARUH VARIASI PROPORSI CAMPURAN BETON TERHADAP MODULUS ELASTISITAS BETON MENGGUNAKAN METODE *NON DESTRUCTIVE TEST* (NDT)

SKRIPSI TEKNIK SIPIL

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



NUNGKI YUNIAWATI

NIM. 175060101111024

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing
pada tanggal 4 Agustus 2021

Dosen Pembimbing I

Dr. Eng. Ir. Indradi W., ST., M.Eng. (Prac.)

NIP. 19810220 200604 1 002

Dosen Pembimbing II

Ir. Sugeng Prayitno Budio, MS., IPU

NIP. 19610125 198601 1 001



Mengetahui,
Ketua Program Studi S1

Dr. Eng. Ir. Indradi W., ST., M.Eng. (Prac.)

NIP. 19810220 200604 1 002

HALAMAN IDENTITAS TIM PENGUJI SKRIPSI**JUDUL SKRIPSI:**

Pengaruh Variasi Proporsi Campuran Beton terhadap Modulus Elastisitas Beton menggunakan Metode *Non Destructive Test* (NDT)

Nama Mahasiswa : Nungki Yuniawati

NIM : 175060101111024

Program Studi : Teknik Sipil

Minat : Struktur

TIM DOSEN PENGUJI

Dosen Penguji I : Ir. Siti Nurlina, MT., IPP

Dosen Penguji II : Dr. Eng. Ir. Indradi Wijatmiko, ST., M.Eng (Prac)

Dosen Penguji III : Ir. Sugeng Prayitno Budio, MS., IPU

Tanggal Ujian : 28 Juli 2021

SK Penguji : 1287/UN10.F07/KP/2021

PERNYATAAN ORISINILITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam Naskah Skripsi adalah asli dari pemikiran saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam Naskah Skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Skripsi ini dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, 9 Agustus 2021

Mahasiswa

Nungki Yuniawati

175060101111024



13. Teman-teman Himpunan Mahasiswa Sipil (HMS) yang telah memberikan pengalaman berorganisasi.
14. Teman-teman Keluarga Besar Mas Sjahihza yang telah mengukir momen-momen selama di bangku kuliah.
15. Teman-teman dari Reyog Brawijaya dan Unitantri yang telah memberikan banyak ilmu dan pengalaman.
16. Sigit Widyo Puspito yang selalu memberikan semangat dalam menyelesaikan skripsi.
17. Dan semua pihak yang telah membantu kelancaran penulisan skripsi ini, yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.

Penulisan skripsi ini tidak lepas dari kekurangan dan kesalahan yang tidak diketahui. Maka dari itu penulis sangat mengharapkan segala kritik dan saran yang sangat mendukung dalam kesempurnaan skripsi ini. Akhir kata, penulis berharap semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi pembaca.

Malang, 19 Juli 2021

Nungki Yuniawati



DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR LAMPIRAN	xi
RINGKASAN	xiii
SUMMARY	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Identifikasi Masalah	2
1.3. Rumusan Masalah	2
1.4. Batasan Masalah	2
1.5. Tujuan Penelitian	3
1.6. Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1. Beton	5
2.1.1. Agregat	5
2.1.2. Semen	6
2.1.3. Air	6
2.2. Perawatan Beton	7
2.3. Kuat Tekan Beton	7
2.4. Kuat Lentur Beton	8
2.5. Tegangan dan Regangan Beton	8
2.5.1. Tegangan Beton	8
2.5.2. Regangan Beton	8
2.5.3. Hubungan Tegangan Regangan Beton	9
2.6. Modulus Elastisitas	10
2.6.1. Modulus Elastisitas Statis	10
2.6.2. Modulus Elastisitas Dinamis	12
2.6.3. Rasio Poisson	12
2.7. <i>Non Destructive Test</i> (NDT)	13
2.8. Pengujian Kuat Tekan dengan Metode <i>Rebound Hammer</i>	13
2.9. Pengujian UPV	14

2.10.	Metode Pengujian UPV	15
2.11.	Gelombang Mekanik	18
2.12.	Analisis Korelasi	19
2.13.	Hubungan Modulus Elastisitas dengan Cepat Rambat Gelombang	21
2.14.	Penelitian Terdahulu	23
BAB III METODE PENELITIAN		25
3.1.	Tempat dan Waktu Penelitian	25
3.2.	Peralatan dan Bahan Penelitian	25
3.2.1.	Peralatan Penelitian	25
3.2.2.	Bahan Penelitian	26
3.3.	Variabel Penelitian	26
3.4.	Analisis Bahan	26
3.4.1.	Agregat Kasar	26
3.4.2.	Agregat Halus	26
3.4.3.	Semen	26
3.4.4.	Air	27
3.5.	Tahapan Penelitian	27
3.6.	Rancangan Penelitian	28
3.7.	Prosedur Penelitian	28
3.7.1.	Pengujian Bahan Dasar	28
3.7.2.	Pengujian Beton Segar	29
3.7.3.	Pembuatan Benda Uji	29
3.7.4.	Perawatan Benda Uji	29
3.7.5.	Pengujian Kuat Tekan	30
3.7.6.	Pengujian UPV (<i>Ultrasonic Pulse Velocity</i>)	31
3.7.7.	Pengujian Kuat Lentur	32
3.8.	Metode Pengumpulan Data	33
3.9.	Pengolahan Data	34
3.10.	Hipotesis	36
BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN		37
4.1.	Pembuatan Benda Uji	37
4.1.1.	Perencanaan Campuran Benda Uji	37
4.1.2.	Proses Pembuatan Benda Uji	37
4.1.3.	Proses <i>Curing</i>	38
4.2.	Pengujian Kuat Tekan	39

4.2.1.	Pengujian Kuat Tekan dengan CTM.....	39
4.2.2.	Pengujian Kuat Tekan dengan <i>Hammer Test</i>	41
4.3.	Pengujian Modulus Elastisitas.....	43
4.3.1.	Modulus Elastisitas Dinamis.....	43
4.3.2.	Modulus Elastisitas Statis.....	49
4.4.	Hubungan antara Proporsi Campuran Beton dengan Modulus Elastisitas.....	55
4.5.	Hubungan antara Modulus Elastisitas Dinamis dan Statis.....	57
4.5.1.	Modulus Elastisitas Dinamis dengan Modulus Elastisitas Statis berdasarkan Uji Kuat Lentur.....	57
4.5.2.	Modulus Elastisitas Dinamis dengan Modulus Elastisitas Statis berdasarkan SNI-2847-2019 (a) CTM.....	58
4.5.3.	Modulus Elastisitas Dinamis dengan Modulus Elastisitas Statis berdasarkan SNI-2847-2019 (a) HT.....	59
4.5.4.	Modulus Elastisitas Dinamis dengan Modulus Elastisitas Statis berdasarkan SNI-2847-2019 (b) CTM.....	60
4.5.5.	Modulus Elastisitas Dinamis dengan Modulus Elastisitas Statis berdasarkan SNI-2847-2019 (b) HT.....	61
4.5.6.	Gabungan Hubungan Modulus Elastisitas Dinamis dan Statis.....	62
BAB V PENUTUP.....		65
5.1.	Kesimpulan.....	65
5.2.	Saran.....	66
DAFTAR PUSTAKA.....		67
LAMPIRAN.....		69

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Kualifikasi Kualitas Beton berdasarkan Cepat Rambat Gelombang 18

Tabel 2. 2 Pedoman Interpretasi Koefisien Korelasi 20

Tabel 2. 3 Penelitian Terdahulu 23

Tabel 3. 1 Rancangan Benda Uji 28

Tabel 3. 2 Hasil Pengujian Modulus Elastisitas Statis 34

Tabel 3. 3 Hasil Pengujian Modulus Elastisitas Dinamis 34

Tabel 4. 1 Kebutuhan Bahan untuk Campuran Pembuatan Benda Uji 37

Tabel 4. 2 Hasil Pengujian *Slump* 37

Tabel 4. 3 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton dengan CTM 40

Tabel 4. 4 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton dengan *Hammer Test* 41

Tabel 4. 5 Perbandingan Hasil Kuat Tekan antara CTM dan HT 42

Tabel 4. 6 Hasil Modulus Elastisitas Dinamis pada Aplikasi PL-Link 44

Tabel 4. 7 Hasil Modulus Elastisitas Dinamis Aktual 46

Tabel 4. 8 Hasil Modulus Elastisitas Dinamis Teoritis 48

Tabel 4. 9 Persentase Selisih Hasil Modulus Elastisitas Dinamis Aktual dan Teoritis 49

Tabel 4. 10 Hasil Modulus Elastisitas Statis berdasarkan Uji Kuat Lentur 51

Tabel 4. 11 Nilai Modulus Elastisitas Statis berdasarkan Berat Isi dan Kuat Tekan CTM 52

Tabel 4. 12 Nilai Modulus Elastisitas Statis berdasarkan Berat Isi dan Kuat Tekan HT 52

Tabel 4. 13 Persentase Selisih Nilai Modulus Elastisitas Statis berdasarkan SNI-2847-2019
(a) 53

Tabel 4. 14 Nilai Modulus Elastisitas Statis berdasarkan Kuat Tekan CTM 54

Tabel 4. 15 Nilai Modulus Elastisitas Statis berdasarkan Kuat Tekan HT 54

Tabel 4. 16 Persentase Selisih Nilai Modulus Elastisitas Statis berdasarkan SNI-2847-2019
(b) 55

Tabel 4. 17 Nilai Modulus Elastisitas Dinamis dan Statis 55

Tabel 4. 18 Nilai Modulus Elastisitas Dinamis dan Statis berdasarkan Uji Kuat Lentur 57

Tabel 4. 19 Nilai Modulus Elastisitas Dinamis dan Statis berdasarkan SNI-2847-2019 (a)
CTM 58

Tabel 4. 20 Nilai Modulus Elastisitas Dinamis dan Statis berdasarkan SNI-2847-2019 (a)
HT 59

Tabel 4. 21 Nilai Modulus Elastisitas Dinamis dan Statis berdasarkan SNI-2847-2019 (b)

CTM 60

Tabel 4. 22 Nilai Modulus Elastisitas Dinamis dan Statis berdasarkan SNI-2847-2019 (b)

HT 62

Tabel 4. 23 Persamaan Hubungan Modulus Elastisitas Dinamis dan Modulus Elastisitas

Statis 63



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Kurva Tegangan Regangan untuk Beberapa Nilai Kuat Tekan Beton 9

Gambar 2. 2 Kurva Tegangan Regangan Beton 10

Gambar 2. 3 Modulus Elastisitas Statis Beton 11

Gambar 2. 4 Prinsip Kerja Rebound Hammer 14

Gambar 2. 5 Metode Langsung 15

Gambar 2. 6 Metode Semi Langsung 15

Gambar 2. 7 Metode Tidak Langsung 16

Gambar 2. 8 Diagram Skematik dari Instrumen UPV 17

Gambar 2. 9 Pergerakan Partikel pada Gelombang P-Waves 18

Gambar 2. 10 Pergerakan Partikel pada Gelombang S-Waves 19

Gambar 2. 11 Pergerakan Partikel pada Gelombang Permukaan, Rayleigh Waves (Kiri) dan Love Waves (Kanan) 19

Gambar 2. 12 Grafik Ilustrasi Korelasi 20

Gambar 2. 13 Perhitungan Modulus Elastisitas Dinamis 22

Gambar 3. 1 Flowchart Penelitian 27

Gambar 3. 2 Dimensi Benda Uji Balok (a) dan Silinder (b) 28

Gambar 3. 3 Compression Test Machine 30

Gambar 3. 4 Pengujian UPV dengan Metode Langsung (Direct Method) 31

Gambar 3. 5 Proses Kalibrasi Alat Uji UPV 31

Gambar 3. 6 Transducer Standar 32

Gambar 3. 7 Transducer S-wave 32

Gambar 3. 8 Perletakan dan Pembebanan pada Pengujian Kuat Lentur 33

Gambar 3. 9 Tampilan Data Hasil Pengujian UPV menggunakan Aplikasi PL-Link 33

Gambar 3. 10 Grafik Hubungan antara Mutu Beton dengan Modulus Elastisitas 35

Gambar 3. 11 Grafik Hubungan antara Tegangan dan Regangan Beton 35

Gambar 4. 1 Pembuatan Benda Uji (a) Pengujian Slump, (b) Pemadatan Beton dengan Vibrator 38

Gambar 4. 2 (a) Benda Uji pada Bekisting Balok (b) Benda Uji pada Cetakan Silinder 38

Gambar 4. 3 Uji Tekan Silinder 39

Gambar 4. 4 Hasil Kuat Tekan Beton dengan CTM 40

Gambar 4. 5 Pengujian Kuat Tekan *Hammer Test* 41

Gambar 4. 6 Hasil Kuat Tekan dengan Hammer Test	42
Gambar 4. 7 Hasil Pengujian Kuat Tekan.....	43
Gambar 4. 8 Pelaksanaan Pengujian Modulus Elastisitas dengan (a) Transducer P-wave (b) Transducer S-wave.....	43
Gambar 4. 9 Nilai Modulus Elastisitas Dinamis dari Pembacaan Alat PUNDIT PL-200..	46
Gambar 4. 10 Nilai Modulus Elastisitas Dinamis secara Teoritis.....	49
Gambar 4. 11 Pengujian Kuat Lentur (a) Perletakan Benda Uji (b) Benda Uji Hancur	50
Gambar 4. 12 Contoh Grafik Hubungan Tegangan dan Regangan.....	50
Gambar 4. 13 Nilai Modulus Elastisitas Statis dari Pengujian Kuat Lentur	51
Gambar 4. 14 Nilai Modulus Elastisitas Statis berdasarkan SNI-2847-2019 (a).....	53
Gambar 4. 15 Nilai Modulus Elastisitas Statis berdasarkan SNI-2847-2019 (b).....	55
Gambar 4. 16 Grafik Hubungan Modulus Elastisitas dengan Kuat Tekan CTM	56
Gambar 4. 17 Grafik Hubungan Modulus Elastisitas dengan Kuat Tekan HT.....	56
Gambar 4. 18 Hubungan antara Modulus Elastisitas Dinamis dengan Modulus Elastisitas Statis berdasarkan Uji Kuat Lentur	58
Gambar 4. 19 Hubungan antara Modulus Elastisitas Dinamis dengan Modulus Elastisitas Statis berdasarkan SNI-2847-2019 (a) CTM	59
Gambar 4. 20 Hubungan antara Modulus Elastisitas Dinamis dengan Modulus Elastisitas Statis berdasarkan SNI-2847-2019 (a) HT.....	60
Gambar 4. 21 Hubungan antara Modulus Elastisitas Dinamis dengan Modulus Elastisitas Statis berdasarkan SNI-2847-2019 (b) CTM	61
Gambar 4. 22 Hubungan antara Modulus Elastisitas Dinamis dengan Modulus Elastisitas Statis berdasarkan SNI-2847-2019 (b) HT.....	62

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Pembuatan Benda Uji..... 69

Lampiran 2 Pengujian Kuat Tekan..... 71

Lampiran 3 Pengujian Modulus Elastisitas Dinamis..... 72

Lampiran 4 Pengujian Kuat Lentur..... 72

Lampiran 5 Tabel Modulus Elastisitas Statis berdasarkan Uji Kuat Lentur..... 74





(halaman ini sengaja dikosongkan)



RINGKASAN

Nungki Yuniawati, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Juli 2021, *Pengaruh Variasi Proporsi Campuran Beton terhadap Modulus Elastisitas Beton menggunakan Metode Non Destructive Test (NDT)*, Dosen Pembimbing : Dr. Eng. Ir. Indradi Wijatmiko, ST., M.Eng (Prac) dan Ir. Sugeng Prayitno Budio, MS., IPU.

Meningkatnya penggunaan beton dalam konstruksi menuntut adanya beton dengan kualitas yang baik agar dapat menahan beban suatu bangunan. Penentuan kualitas suatu beton dapat ditinjau dari kuat tekan dan modulus elastisitas beton tersebut. Untuk memastikan kualitas beton tersebut maka perlu dilakukan pengujian beton salah satunya dengan metode *non destructive test* (NDT) tanpa mengakibatkan kerusakan pada beton.

Penelitian ini menggunakan benda uji balok beton tak bertulang ukuran 20 x 20 x 70 cm dengan variasi proporsi campuran beton 1 : 1,3 : 2,3, 1 : 1,6 : 2,6, dan 1 : 1,7 : 2,7. Pengujian kuat tekan beton dilakukan menggunakan alat *Compression Test Machine* (CTM) untuk benda uji silinder dan *Rebound Schmidt Hammer* untuk benda uji balok. Untuk mendapatkan nilai modulus elastisitas dinamis dilakukan pengujian dengan menggunakan alat PUNDIT PL-200. Sedangkan nilai modulus elastisitas statis didapatkan dari pengujian kuat lentur benda uji balok dan perhitungan secara teori yang tercantum dalam SNI-2847-2019 dengan menggunakan kuat tekan hasil dari CTM dan *Hammer Test*.

Berdasarkan hasil pengujian, didapatkan nilai kuat tekan dan modulus elastisitas menggunakan metode NDT yang berbeda dari ketiga variasi proporsi campuran beton. Nilai kuat tekan dan modulus elastisitas menggunakan metode NDT dari yang tertinggi hingga terendah secara berturut-turut yaitu benda uji dengan proporsi campuran beton 1 : 1,3 : 2,3, benda uji dengan proporsi campuran beton 1 : 1,6 : 2,6, dan benda uji dengan proporsi campuran beton 1 : 1,7 : 2,7. Sehingga dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi kuat tekan beton maka semakin tinggi pula modulus elastisitasnya. Dari penelitian ini juga didapatkan hubungan erat antara modulus elastisitas dinamis dari pengujian NDT dan modulus elastisitas statis. Nilai modulus elastisitas dinamis yang diperoleh lebih besar dari modulus elastisitas statis. Hal ini dapat terjadi karena modulus elastisitas dinamis ditentukan oleh pengukuran cepat rambat gelombang dimana cepat rambat gelombang tersebut dipengaruhi oleh homogenitas beton.

Kata Kunci : Proporsi Campuran Beton, Kuat Tekan, Modulus Elastisitas, *Non Destructive Test* (NDT)

SUMMARY

Nungki Yuniawati, Departemen of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Brawijaya, July 2021, *The Effect of Concrete Mixture Variations on the Modulus of Elasticity of Concrete using Non Destructive Test (NDT) Method*, Academic Supervisor: Dr. Eng. Ir. Indradi Wijatmiko, ST., M.Eng (Prac) and Ir. Sugeng Prayitno Budio, MS., IPU.

The increasing use of concrete in construction requires concrete with good quality in order to withstand the load of a building. Determination of the quality of a concrete can be viewed from the compressive strength and modulus of elasticity of the concrete. To ensure the quality of the concrete, it is necessary to test the concrete, one of which is the non-destructive test (NDT) method without causing damage to the concrete.

This study used unreinforced concrete beam specimens of 20 x 20 x 70 cm with the concrete mixture variations are 1: 1.3 : 2.3, 1: 1.6 : 2.6, and 1: 1.7 : 2.7. The compressive strength of concrete was tested using Compression Test Machine (CTM) for cylindrical specimens and Rebound Schmidt Hammer for beam specimens. To obtain the value of the dynamic modulus of elasticity, a test was carried out using the PUNDIT PL-200. While the value of the static modulus of elasticity is obtained from the flexural strength test of the beam specimens and the theoretical calculations listed in SNI-2847-2019 using the compressive strength results from CTM and Hammer Test.

Based on the test results, the compressive strength and modulus of elasticity values obtained using NDT method are different from the three concrete mixture variations. The value of compressive strength and modulus of elasticity using NDT method from the highest to the lowest, respectively, is the specimen with the concrete mixture 1 : 1,3 : 2,3, the specimen with the concrete mixture 1 : 1,6 : 2,6, and the specimen with the concrete mixture 1 : 1,7 : 2,7. It can be concluded that the higher the compressive strength of the concrete, the higher the modulus of elasticity. This study also found a close relationship between the dynamic modulus of elasticity and the static modulus of elasticity. The dynamic modulus of elasticity obtained is greater than the static modulus of elasticity. This can happen because the dynamic modulus of elasticity is determined by the measurement of wave propagation where the wave propagation speed is affected by the homogeneity of the concrete.

Keywords : Concrete Mixture, Compressive Strength, Modulus of Elasticity, Non Destructive Test (NDT)

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pengembangan infrastruktur di Indonesia tidak lepas dari penggunaan beton. Sebagian besar komponen utama dari bangunan terbuat dari beton, mulai dari pondasi hingga atap. Selain dari biaya pemeliharannya yang murah, beton juga tahan terhadap gaya tekan. Meningkatnya penggunaan beton dalam konstruksi menuntut adanya beton dengan kualitas yang baik agar dapat menahan beban suatu bangunan. Penentuan kualitas suatu beton dapat dilihat dari modulus elastisitas dan kuat tekannya. Kuat tekan beton merupakan kekuatan beton dalam menahan beban tekan yang diberikan tiap satu satuan luas permukaan beton tersebut. Modulus elastisitas mengindikasikan sifat elastisitas dari suatu bahan yang merupakan kemampuan suatu bahan untuk berdeformasi saat diberi beban secara sementara tanpa ada perubahan yang tetap.

Untuk memastikan beton sesuai dengan yang direncanakan maka perlu dilakukan pengujian beton. Dalam pengujian beton khususnya modulus elastisitas ada dua metode yang dapat digunakan, yaitu *destructive test* (DT) dan *non destructive test* (NDT). Pengujian dengan metode *destructive test* ini dapat dilakukan dengan membawa sampel uji ke laboratorium untuk diuji dan metode ini dapat merusak benda uji tersebut. Pengujian *non destructive test* dapat dikerjakan tanpa mengakibatkan kerusakan pada beton. Maka dari itu, metode *non destructive test* menjadi alternatif dalam pengujian agar sampel beton tidak mengalami kerusakan.

Modulus elastisitas beton dapat diketahui dengan pengujian menggunakan metode *non destructive test* (NDT), yaitu *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV) dengan bantuan alat *Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester* (PUNDIT). Alat akan membaca cepat rambat gelombang ultrasonik yang menjalar pada beton. Nilai cepat rambat gelombang nantinya akan diaplikasikan dalam memperoleh modulus elastisitas suatu beton.

Penelitian ini dilaksanakan untuk mengetahui pengaruh dari variasi proporsi campuran terhadap modulus elastisitas dengan menggunakan UPV (*Ultrasonic Pulse Velocity*). Modulus elastisitas yang dihasilkan dari pengujian ini adalah modulus elastisitas dinamis,

yang kemudian akan dibandingkan dengan pengujian secara *destructive test* di laboratorium yang menghasilkan modulus elastisitas statis.

1.2. Identifikasi Masalah

Penentuan kualitas suatu beton dapat ditinjau dari modulus elastisitas beton tersebut.

Salah satu pengujian modulus elastisitas beton adalah menggunakan metode *non destructive test* (NDT), yaitu *UPV test*. Nilai cepat rambat gelombang ultrasonik yang diperoleh dari *UPV test* digunakan untuk menghitung modulus elastisitas suatu beton. Kekuatan beton akan mempengaruhi nilai dari modulus elastisitas. Maka dari itu perlu dilakukan penelitian mengenai modulus elastisitas dengan berbagai proporsi campuran beton.

1.3. Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini, antara lain :

1. Bagaimana pengaruh variasi proporsi campuran beton terhadap modulus elastisitas beton menggunakan metode *non destructive test* (NDT) ?
2. Bagaimana hubungan modulus elastisitas statis beton dengan modulus elastisitas dinamis beton yang diperoleh dari metode *non destructive test* (NDT) ?

1.4. Batasan Masalah

Pembatasan masalah dari penelitian ini, antara lain :

1. Penelitian ini menggunakan benda uji balok tanpa tulangan berukuran 20 x 20 x 70 cm.
2. Pengujian dilakukan menggunakan berbagai macam variasi proporsi campuran beton, yaitu beton normal dengan proporsi campuran 1 : 1,3 : 2,3 ; 1 : 1,6 : 2,6 ; dan 1 : 1,7 : 2,7.
3. Jumlah sampel benda uji balok hanya 1 untuk setiap variasi, jumlah tersebut diambil dengan mempertimbangkan kondisi pandemi.
4. Pengujian dikerjakan pada beton yang sudah berumur 28 hari.
5. Pengujian NDT menggunakan bantuan alat Proceq berupa PUNDIT PL-200 dan *Schmidr Rebound Hammer*
6. Pengujian modulus elastisitas dilakukan dengan metode langsung (*direct method*).

1.5. Tujuan Penelitian

Tujuan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Untuk menganalisis pengaruh variasi proporsi campuran beton terhadap modulus elastisitas beton menggunakan metode *non destructive test* (NDT).
2. Untuk membandingkan modulus elastisitas statis beton dengan modulus elastisitas dinamis beton yang diperoleh dari metode *non destructive test* (NDT).

1.6. Manfaat Penelitian

Manfaat yang bisa diambil dari penelitian ini adalah :

1. Bagi penulis:
 - Dapat mengerti pengaruh variasi proporsi campuran beton dengan *Ultrasonic Pulse Velocity* terhadap modulus elastisitas beton.
2. Bagi pembaca:
 - Penelitian ini dapat dijadikan acuan bagi penelitian selanjutnya tentang modulus elastisitas beton.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



(halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Beton

Beton ialah campuran yang berasal dari bahan-bahan penyusunnya yang dicampur menggunakan perbandingan tertentu. Komposisi beton terdiri dari kerikil, pasir, air, serta semen. Bahan tambah (*admixture*) juga dapat ditambahkan ke dalam campuran beton untuk mendapatkan tujuan tertentu pada beton. Karakteristik dan sifat dari komposisi beton akan mempengaruhi performa dari beton tersebut. Untuk memperoleh beton dengan kekuatan optimum maka material yang digunakan harus memenuhi persyaratan dalam perencanaan beton. Berikut adalah bahan-bahan penyusun beton :

2.1.1. Agregat

Agregat ialah bahan berbutir, seperti kerikil, batu pecah, pasir dan slag tanur, yang diaplikasikan bersama menggunakan alat perekat yaitu semen untuk membuat mortar ataupun beton. Agregat berpengaruh besar terhadap daya tahan dan sifat beton, karena komposisinya dapat mencapai 70-75% dari total volume beton. Agregat dengan kualitas yang baik akan memberikan pengaruh pada kekuatan, durabilitas, kelecakan, dan nilai ekonomi beton. Sifat terpenting agregat yaitu ketahanan terhadap beban dan kekuatan hancur yang bisa mempengaruhi ikatan antara agregat dengan porositas, pasta semen, dan karakteristik penyerapan. Berdasarkan ukurannya, agregat dibedakan menjadi :

2.1.1.1. Agregat Halus

Agregat halus ialah mineral alam yang digunakan untuk bahan pengisi pada campuran beton dengan mempunyai ukuran butiran terbesar 4,75 mm atau tertahan di saringan no.200 dan lolos saringan no.4. Agregat halus merupakan hasil perpecahan alami yang diperoleh dari batuan alam atau pasir buatan menggunakan alat pemecah batu. Agregat halus dapat mengisi rongga yang terdapat dalam beton, sehingga agregat halus harus memiliki gradasi yang baik. Agregat halus juga tidak diperbolehkan memiliki kandungan lumpur melebihi 5% terhadap berat keringnya. Agregat wajib dicuci apabila melebihi batas tersebut.

2.1.1.2. Agregat Kasar

Agregat kasar ialah batuan dengan ukuran butiran lebih besar dari 4,75 mm sampai 40 mm. Agregat kasar merupakan hasil perpecahan alami oleh industri pemecah batu dari batuan atau berupa batu pecah. Pemilihan agregat harus tepat dari kekasaran permukaan, bentuk maupun kekuatannya. Agregat kasar harus mencakup butiran yang keras serta tidak akan hancur akibat cuaca. Agregat kasar memiliki kandungan lumpur maksimum 1%, agregat harus dicuci apabila melebihi batas tersebut.

2.1.2. Semen

Semen ialah bahan yang mempunyai sifat hidrolis, dimana semen dapat mengikat agregat kasar dan halus jika tercampur dengan air. Semen juga akan mengisi celah-celah antar agregat tersebut. Bahan baku pembentuk semen adalah tanah liat (*clay*) dan batu kapur (*limestone*). Jumlah dari semen dalam beton sangat berdampak pada kuat tekan beton. Apabila dalam suatu campuran beton kekurangan semen, berarti campuran tersebut juga kekurangan air sehingga beton sukar dipadatkan, hal ini menjadikan kuat tekan beton yang rendah. Begitu juga apabila semen yang diberikan berlebih, maka banyaknya air juga berlebih sehingga beton menjadi berpori, dan hal ini juga mengakibatkan kuat tekan beton menjadi rendah.

Berdasarkan SNI 7064:2014, semen portland komposit adalah suatu semen hidrolis hasil penggilingan terak semen portland dan gips dengan satu atau lebih bahan anorganik. Bahan anorganik tersebut antara lain terak tanur tinggi (*blast furnace slag*), pozzolan, senyawa silika, batu kapur, dengan kadar total bahan anorganik 6%-35% dari massa total semen Portland komposit.

2.1.3. Air

Air ialah bahan yang diperlukan saat pembentukan beton sebab air bisa membantu reaksi kimiawi semen sehingga proses pengikatan dapat berlangsung, serta air dapat sebagai bahan pelumas antar butiran agregat agar mempermudah proses pengerjaan dan pematangan.

Air wajib ada pada campuran beton sebab digunakan dalam proses hidrasi semen serta memberikan kemudahan saat pengerjaan beton (*workability*). Perbandingan antara air dan semen disebut dengan FAS (faktor air semen). Semakin besar nilai FAS maka *workability* tinggi namun semakin rendah mutu beton tersebut. Sebaliknya semakin rendah nilai FAS maka *workability* rendah dan mutu betonnya akan tinggi. Air yang digunakan untuk bereaksi dengan semen hanya berkisar 35% dari berat semennya). Persyaratan air yang bisa

ditambahkan pada campuran beton adalah air yang dapat diminum dan wajib bersih bebas dari bahan-bahan yang dapat merusak beton.

2.2. Perawatan Beton

Menurut SNI 03 – 2847 – 2002 tentang Tata Cara Perencanaan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung, suatu beton wajib dirawat dengan suhu lebih dari 10°C serta dalam kondisi lembab minimal selama 7 hari setelah pengecoran kecuali apabila perawatan dipercepat. Perawatan beton atau *curing* merupakan suatu usaha untuk memelihara kelembapan selama masa tertentu setelah pengecoran selesai. Perawatan beton sangat berdampak pada sifat-sifat beton keras. Perawatan beton secara umum terbagi atas metode sebagai berikut :

a. Metode perawatan basah

Metode tersebut dilakukan dengan memanfaatkan genangan air di atas permukaan beton atau menyelimuti permukaannya menggunakan karung basah, terpal, plastik ataupun yang lain.

b. Metode perawatan kering

Metode ini dilakukan tanpa menggunakan air, yaitu dengan membentuk selaput tipis di permukaan beton yang terbentuk dari campuran bahan kimia sehingga dapat mencegah hilangnya air.

c. Metode dengan memberi kelembapan dan panas di dalam beton

Metode tersebut diberikan menggunakan bekisting yang dipanaskan atau memberikan uap panas agar beton dapat digunakan segera dengan kuat tekan yang tinggi di usia awal.

2.3. Kuat Tekan Beton

Kuat tekan beton adalah kekuatan tekan maksimum yang bisa ditahan oleh beton tiap satuan luas. Hal ini menunjukkan mutu dari beton tersebut. Jika menginginkan kekuatan struktur yang tinggi, maka mutu yang direncanakan juga harus tinggi. Kuat tekan beton dipengaruhi oleh jenis dan sifat agregat, FAS (*water cement ratio*), proporsi campuran, kelecakan (*workability*), perawatan (*curing*) dan usia beton. Kuat tekan beton ditetapkan dari pemberian beban terhadap benda uji silinder berukuran diameter 15cm dan tinggi 30cm dengan satuan MPa (N/mm²). Selepas beton berumur 28 hari, maka kuat tekan beton dianggap mencapai sempurna. Pengujian kuat tekan beton dikerjakan menggunakan bantuan alat *Compression Test Machine* (CTM) dengan memberikan beban tekan bertingkat serta kecepatan peningkatan tertentu hingga benda uji hancur. Hasil pengujian akan

didapatkan beban maksimum yang dapat ditahan silinder beton. Beban maksimum dibagi luas permukaan silinder beton untuk mendapatkan kuat tekannya.

2.4. Kuat Lentur Beton

Kuat lentur beton ialah kekuatan beton dalam menahan beban yang diberikan dengan arah tegak lurus sumbu benda uji hingga benda uji tersebut patah. Adapun cara menghitung tegangan lentur benda uji adalah sebagai berikut :

$$\sigma = \frac{M \times y}{I} \quad (2-1)$$

dimana :

σ : tegangan (N/mm² atau MPa)

M : momen lentur (Nmm)

y : jarak garis netral ke serat terluar (mm)

I : momen inersia (mm⁴)

2.5. Tegangan dan Regangan Beton

2.5.1. Tegangan Beton

Tegangan ialah besarnya beban aksial yang terdapat pada suatu benda tiap satuan luas penampang. Beban aksial merupakan beban yang memiliki arah sama dengan sumbu elemen, kemudian menyebabkan terjadinya tekan atau tarik pada batang. Tegangan memiliki simbol σ (dibaca sigma). Rumus tegangan secara matematis adalah sebagai berikut :

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2-2)$$

dimana :

σ : tegangan (N/mm² atau MPa)

P : beban aksial (N)

A : luas penampang benda uji (mm²)

2.5.2. Regangan Beton

Suatu batang yang dibebani gaya aksial maka akan mengalami perubahan panjang, artinya batang tersebut akan tambah panjang apabila terjadi gaya tarik dan akan lebih pendek apabila terjadi gaya tekan. Pertambahan panjang pada batang dinotasikan dengan

ΔL . Perbandingan antara pertambahan panjang terhadap panjang awal suatu batang disebut dengan regangan. Regangan diberi notasi ϵ (epsilon) yang dirumuskan sebagai berikut :

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2-3)$$

dengan :

ϵ : regangan

ΔL : perubahan panjang (m)

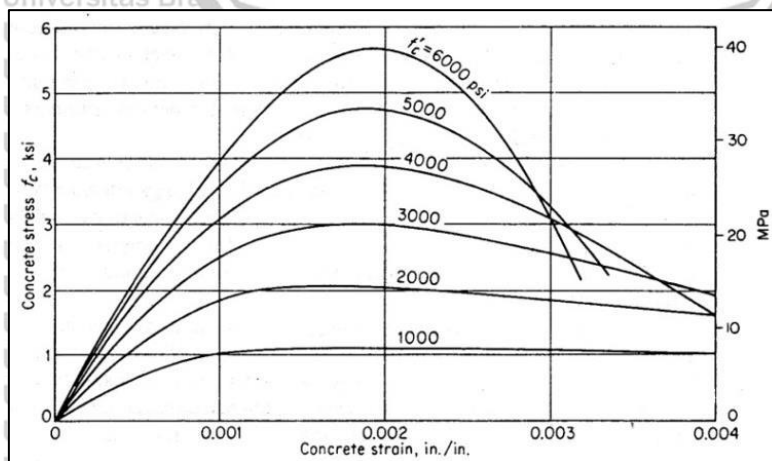
L : Panjang awal (m)

Regangan normal erat kaitannya dengan tegangan normal. Apabila batang terjadi gaya tarik, maka regangannya juga regangan tarik, yang ditandai dengan pertambahan panjang batang. Sama halnya apabila batang terjadi gaya tekan, maka regangannya juga regangan tekan ditandai dengan perpendekkan batang. Regangan tarik memiliki tanda positif dan regangan tekan memiliki tanda negatif.

Untuk mengetahui nilai regangan pada pengujian benda uji dapat menggunakan *strain gauge*, yaitu kawat logam berliku-liku dan tipis yang dilekatkan pada permukaan benda uji. Akan terjadi regangan apabila kawat logam tersebut dibebani. Tahanan pada kawat logam sebanding dengan regangan induksi beban. Dengan melekatkan *strain gauge* di benda uji memakai perekat isolative dengan arus listrik, maka *strain gauge* menghasilkan suatu perubahan resistansi yang nilainya sebanding dengan deformasi kawat.

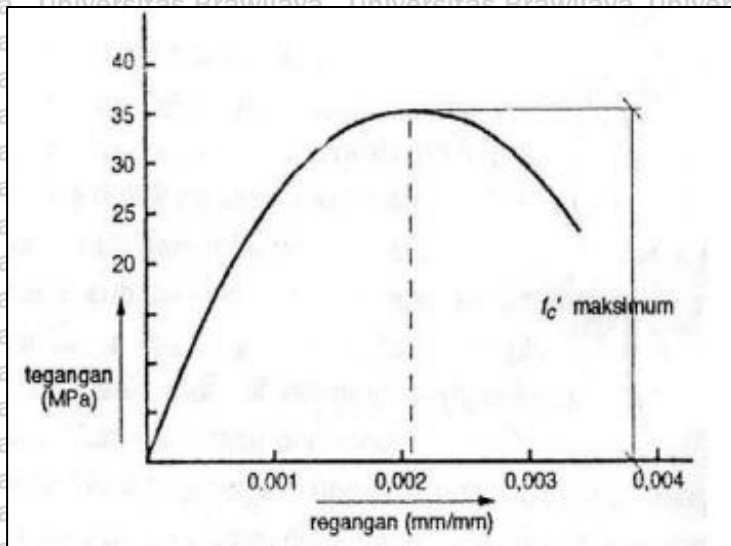
2.5.3. Hubungan Tegangan Regangan Beton

Perilaku beton dipengaruhi oleh hubungan antara tegangan-regangan yang terjadi pada beton. Kurva hubungan antara tegangan regangan pada beton tidak sama yang dipengaruhi oleh nilai kuat tekannya sesuai *Gambar 2.1*.



Gambar 2. 1 Kurva Tegangan Regangan untuk Beberapa Nilai Kuat Tekan Beton
Sumber : McCormac & Brown (2014)

Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa kurva hubungan tegangan regangan beton yang berbeda pada nilai kuat tekan (f'_c) yang berbeda. Kuat tekan maksimum terjadi ketika nilai regangannya ϵ' sampai $\pm 0,002$. Kemudian nilai tegangan menurun dengan meningkatnya nilai regangan hingga benda uji hancur seperti terlihat di *Gambar 2.2*.



Gambar 2. 2 Kurva Tegangan Regangan Beton
Sumber : Istimawan Dipohusodo (1997)

Beton yang memiliki kuat tekan tinggi akan lebih getas serta hancur di nilai regangan maksimum. Berdasarkan SNI 2847-2013 pasal 10.2.3, regangan kerja maksimum yang digunakan pada serat tepi terluar harus diperkirakan sama dengan 0,003 sebagai batas hancur.

2.6. Modulus Elastisitas

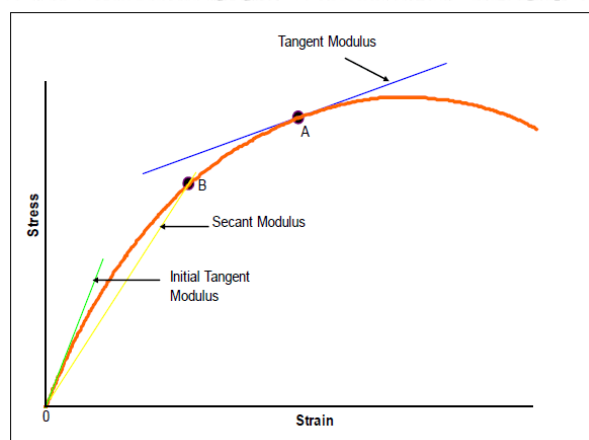
2.6.1. Modulus Elastisitas Statis

Modulus elastisitas beton tidak pasti nilainya, kejadian tersebut dipengaruhi oleh karakteristik agregat dan semen, jenis pembebanan, kekuatan beton, serta umur beton.

Modulus elastisitas yang ditentukan atas kekuatan beton terhadap perubahan (uji kuat tekan) dikatakan modulus elastisitas statis. Beton akan memperlihatkan deformasi permanen sekalipun dengan beban kecil. Sebagai tambahan seperti pada *Gambar 2.3* terdapat beberapa definisi mengenai modulus elastisitas, antara lain :

- Modulus awal, yaitu kemiringan grafik tegangan regangan di titik awal kurva.
- Modulus tangen, yaitu kemiringan salah satu tangen (garis singgung) kurva pada titik tertentu di sepanjang kurva, contohnya di 50% dari kuat maksimum beton.
- Modulus sekan, yaitu kemiringan suatu garis dari titik mula kurva ke titik lain kurva tersebut di suatu tempat antara 25% hingga 50% dari kuat tekan maksimumnya.

d. Modulus semu (*apparent modulus*) atau modulus jangka panjang, ditetapkan menggunakan tegangan serta regangan yang dihasilkan setelah beban diberikan selama waktu tertentu.



Gambar 2. 3 Modulus Elastisitas Statis Beton

Sumber : [\(PDF\) MECHANICAL BEHAVIOUR AND DURABILITY PERFORMANCE OF CONCRETE CONTAINING RECYCLED CONCRETE AGGREGATE \(researchgate.net\)](#)

Berdasarkan SNI-2487-2019, beton yang memiliki berat isi (w_c) 1400 kg/m³ hingga 2560 kg/m³, maka modulus elastisitas beton dapat dicari dengan rumus berikut :

$$E_c = w_c^{1,5} \cdot 0,043 \cdot \sqrt{f_c} \quad (2-4)$$

dengan :

w_c : berat isi beton (kg/m³)

f_c : mutu beton (Mpa)

E_c : modulus elastisitas (Mpa)

Sedangkan nilai modulus elastisitas beton normal dapat dicari dengan rumus sebagai berikut:

$$E_c = 4700 \cdot \sqrt{f_c} \quad (2-5)$$

dengan :

f_c : mutu beton (Mpa)

E_c : modulus elastisitas (Mpa)

Modulus elastisitas beton juga ditentukan berdasarkan ASTM C-469 sebagai berikut :

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (2-6)$$

dengan :

E : Modulus elastisitas (N/mm²)

- σ_2 : 40% Tegangan runtuh (N/mm^2 atau MPa)
- σ_1 : Tegangan pada regangan ε_1 (N/mm^2 atau MPa)
- ε_2 : Regangan yang terjadi saat σ_2
- ε_1 : Regangan sebesar 0.00005

2.6.2. Modulus Elastisitas Dinamis

Modulus elastisitas dinamis berkorespondensi dengan regangan-regangan sesaat yang sangat kecil dan dihasilkan dari pengujian sonik. Nilai modulus elastisitas dinamis biasanya lebih besar 20%-40% dari modulus elastisitas statis. Hal ini dapat terjadi karena perhitungan modulus dinamis ditentukan oleh pengukuran cepat rambat gelombang, yang nilainya dipengaruhi oleh homogenitas dari beton. Modulus elastisitas dinamis sering digunakan pada analisa struktur dengan beban tumbukan ataupun gempa.

Pengujian untuk mendapatkan modulus elastisitas dinamis dapat menggunakan metode tidak merusak, seperti UPV. Sedangkan untuk mendapatkan nilai modulus elastisitas statis dapat diperoleh dari pengujian yang bersifat merusak, seperti *Compression Test Machine*.

Keuntungan dari metode uji sonik dalam pengukuran modulus elastisitas dinamis beton adalah pengujian dapat dilakukan secara langsung di lapangan (in situ), waktu yang diperlukan relatif singkat, peralatan yang digunakan juga relatif ringan sehingga mobilisasinya di lapangan lebih gampang, apabila dibandingkan dengan pengujian untuk mendapatkan modulus elastisitas statis beton dengan metode merusak.

2.6.3. Rasio Poisson

Suatu beton jika mendapatkan beban tekan, maka beton tidak hanya berkurang tingginya namun juga terjadi pelebaran. Keduanya dapat dikatakan regangan. Regangan yang arahnya segaris atau transversal arah beban dikatakan regangan longitudinal, sedangkan regangan yang arahnya tegak lurus atau axial terhadap arah beban dikatakan regangan lateral. Rasio regangan lateral terhadap regangan longitudinal disebut rasio poisson (*Poisson's ratio*) yang dilambangkan dengan "v" (nu). Berikut rumus untuk menghitung rasio poisson suatu material.

$$\nu = -\frac{\varepsilon'}{\varepsilon} \quad (2-7)$$

dengan :

ν : Rasio Poisson

ϵ' : Regangan transversal

ϵ : Regangan axial

Besarnya nilai rasio poisson suatu bahan adalah tetap (konstan). Nilai rasio poisson untuk beton berkisar 0,15–0,25. Jika regangan di suatu bahan menjadi besar, maka rasio poissonnya juga akan berubah (Gere, Timoshenko, 1997)

2.7. Non Destructive Test (NDT)

Non Destructive Test (NDT) ialah suatu metode pengujian yang dikerjakan terhadap benda uji tanpa menyebabkan kerusakan permanen pada benda uji tersebut. NDT dapat digunakan untuk mengetahui karakteristik dan kondisi dari benda uji, serta kekurangan yang mungkin menyebabkan benda uji mengalami kegagalan. Dengan metode NDT, pengujian benda uji dapat dilakukan langsung di lapangan dan dinilai lebih praktis. Metode ini juga dinilai lebih efisien karena dapat digunakan untuk memeriksa atau mengetahui kerusakan bangunan eksisting yang tidak mungkin dilakukan menggunakan metode destruktif karena struktur yang ada akan rusak dan dapat mengurangi kekuatan dari struktur tersebut.

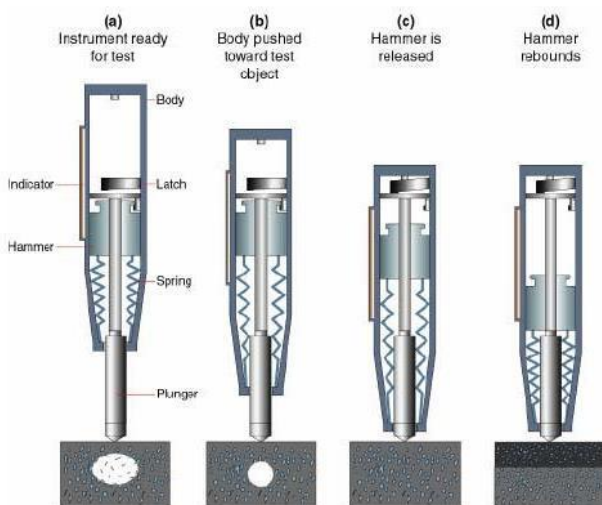
Ada 5 metode umum yang dipakai pada pengujian NDT, yang dibedakan dari media penetesannya, yaitu :

- a. *Liquid Penetrant Testing*, memanfaatkan cairan penetran untuk meresap ke dalam cacat suatu permukaan sehingga memberikan indikasi yang dapat terlihat.
- b. *Magnetic Particle Testing*, memanfaatkan arus listrik untuk memperoleh medan magnet ke dalam permukaan benda serta partikel magnet akan mengindikasikan lokasi cacat.
- c. *Radiographic Testing*, memanfaatkan sinar radiografi (sinar gamma atau sinar X) untuk menerobos material kemudian cacat dapat terlihat di film.
- d. *Eddy Current*, memanfaatkan induksi elektromagnetik berasal dari kumparan yang dialiri arus AC sehingga cacat dapat terlihat di display.
- e. *Ultrasonic Testing*, memanfaatkan *ultrasound* untuk menerobos material sehingga cacat dapat terlihat di display.

2.8. Pengujian Kuat Tekan dengan Metode *Rebound Hammer*

Seorang insinyur Ernest Schmidt membuat sebuah alat pengujian dan dinamakan *rebound hammer* pada tahun 1944. Pengujian tersebut dilakukan guna memperkirakan mutu beton khususnya pada struktur beton yang sudah jadi dengan mudah dan praktis. Prinsip

kerja pada alat ini ialah dengan memberikan beban tumbukan (*impact*) di sisi beton menggunakan suatu massa yang diaktifkan dengan energi yang besarnya tertentu. Permukaan beton yang akan dilakukan pengujian wajib bersih serta rata sebab alat tersebut peka akan variasi yang terdapat di sisi beton. Massa tersebut akan dipantulkan kembali akibat tumbukan antara massa dengan permukaan beton. Jarak pantulan massa yang terukur memberikan indikasi kekerasan permukaan beton. Kekerasan tersebut akan mengindikasikan kuat tekannya. *Gambar 2.4* berikut mengilustrasikan prinsip kerja uji *hammer*.



Gambar 2. 4 Prinsip Kerja Rebound Hammer

Sumber : Civil Engineers PK. <https://www.civilengineerspk.com/rebound-hammer-test/>

2.9. Pengujian UPV

Pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV) adalah salah satu dari metode NDT yang dapat dilaksanakan di lapangan. Pengujian ini dapat dimanfaatkan guna mendeteksi keretakan internal, cacat yang lain serta perubahan beton seperti turunnya kualitas beton dampak dari lingkungan kimia yang agresif atau pembekuan dan pencairan (V.M Malhotra & N.J Carino, 2004). UPV bekerja menurut pengukuran waktu tempuh gelombang ultrasonik yang merambat pada beton.

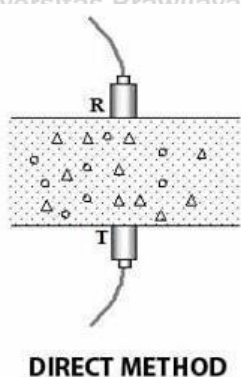
Transmitter transducer yang diletakkan di permukaan beton akan menyalurkan gelombang ultrasonic kemudian merambat melalui material beton ke *receiver transducer* pada sisi yang lain. Pengujian UPV ini akan didapatkan kecepatan waktu tempuh gelombang ultrasonik menggunakan alat PUNDIT dengan satuan *micro second*.

2.10. Metode Pengujian UPV

Dalam pelaksanaan metode UPV ini di lapangan, ada beberapa hal yang harus dicermati, salah satunya ialah metode / konfigurasi pengukuran. Terdapat 3 metode yang digunakan dalam pengujian UPV, yaitu :

a. Metode Langsung (*Direct Method*)

Kedua *transducer* ditempatkan saling berhadapan pada dua sisi beton yang berbeda seperti pada *Gambar 2.5*, lintasan gelombang yang terjadi akan tegak lurus dengan permukaan *transducer* dan panjang lintasannya adalah jarak antara *transmitter* dan *receiver* di kedua sisi beton. Metode ini dapat memberikan transmisi energi gelombang terbesar dibandingkan metode lain.

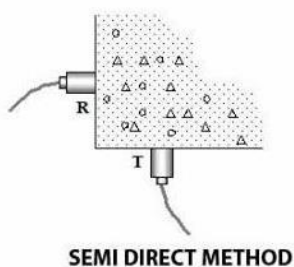


Gambar 2. 5 Metode Langsung

Sumber : *International Atomic Energy Agency*, 2002: 101 – 102

b. Metode Semi Langsung (*Semi Direct Method*)

Kedua *transducer* ditempatkan saling tegak lurus pada dua sisi yang berbeda seperti pada *Gambar 2.6*. Panjang lintasan gelombang didapat dari jarak miring antara *transmitter* dan *receiver*. Hasil yang diperoleh dari metode ini tidak seakurat jika dibandingkan *direct method*, namun untuk memperoleh hasil yang baik dapat dilaksanakan dengan jarak antar *transducer* ditempatkan tidak begitu jauh.

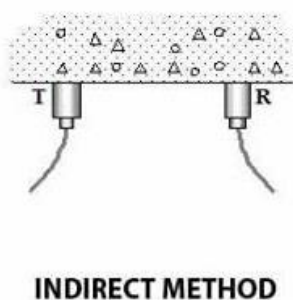


Gambar 2. 6 Metode Semi Langsung

Sumber : *International Atomic Energy Agency*, 2002: 101 – 102

c. Metode Tidak Langsung (*Indirect Method*)

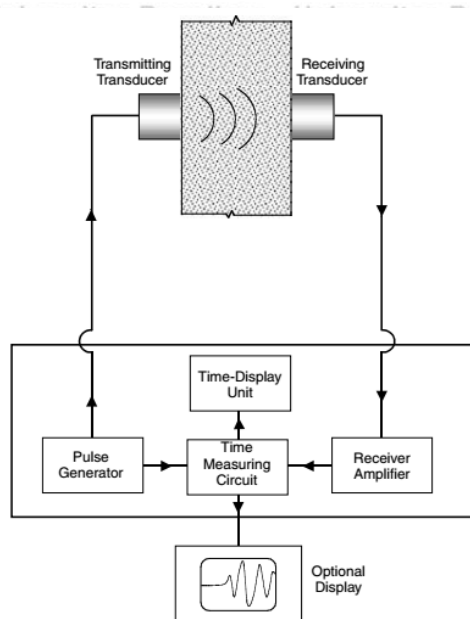
Kedua *transducer* ditempatkan sejajar di sisi yang sama sesuai *Gambar 2.7*. Panjang lintasan gelombang didapat dari jarak antar *transducer* yang telah ditetapkan sebelumnya. Hasil yang diperoleh dari metode ini dapat dikatakan kurang memuaskan, hal ini disebabkan amplitudo dari sinyal yang didapat lebih kecil jika dibandingkan dengan metode langsung. Akibat posisi ruang yang terbatas untuk menguji beton dan hanya salah satu sisi beton yang dapat diuji, maka metode ini sering digunakan di lapangan untuk pengujian UPV.



Gambar 2. 7 Metode Tidak Langsung

Sumber : *International Atomic Energy Agency*, 2002: 101 – 102

Skema pengujian alat UPV (*Ultrasonic Pulse Velocity*) terlihat pada *Gambar 2.8* ialah dengan memberikan getaran gelombang *longitudinal* melalui *transducer* elektro-akustik, yang menjalar melalui *couplant* (cairan perantara) berbentuk gel pasta, yang dioleskan sebelum pengujian mulai. Fungsi *couplant* adalah agar tidak ada rongga di antara *transducer* dan permukaan beton, jadi gelombang bisa menjalar sempurna. Gelombang menjalar melalui media yang berbeda (beton dan *couplant*), di batas kedua media tersebut akan mengalami pantulan gelombang longitudinal (*P-wave*) dan gelombang geser (*S-wave*). Gelombang longitudinal (*P-wave*) menjalar sejajar dengan lintasan dan gelombang geser (*S-wave*) menjalar tegak lurus dengan lintasan.



Gambar 2. 8 Diagram Skematik dari Instrumen UPV
 Sumber : V.M Malhotra & N.J Carino (2004)

Berikut merupakan rumus untuk menghitung kecepatan gelombang dari waktu tempuh yang telah diketahui pada pengujian UPV :

$$v = \frac{L}{T}$$

di mana:

v : Kecepatan gelombang (m/detik)

L : Panjang gelombang (m)

T : Waktu tempuh gelombang (detik)

Hasil dari perhitungan kecepatan gelombang dapat menafsirkan kualitas dari beton, sebagai berikut:

- Homogenitas beton
- Mendeteksi rongga
- Menetapkan modulus elastisitas dinamis dan rasio poisson dinamis
- Menaksir modulus elastisitas statis beton
- Mendeteksi keretakan
- Memperkirakan kuat lentur beton

Tabel 2. 1
Kualifikasi Kualitas Beton berdasarkan Cepat Rambat Gelombang

<i>Speed (m/s)</i>	<i>Quality</i>
> 4500	<i>Excellent</i>
$3500 - 4500$	<i>Good</i>
$3000 - 3500$	<i>Medium</i>
< 3000	<i>Doubtful</i>

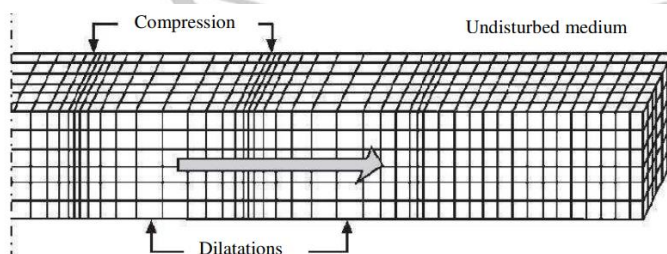
Sumber : Proceq (2015)

2.11. Gelombang Mekanik

Gelombang mekanik merupakan sebuah gelombang perambatannya membutuhkan penghantar atau medium. Medium tersebut bisa berupa zat padat, cair, ataupun gas. Menurut arah getarnya, gelombang mekanik dibagi dua yaitu gelombang longitudinal serta gelombang transversal. Gelombang mekanik menyalurkan energi pada partikel dalam medium rambatnya, sehingga dalam perambatannya terjadi pergerakan dan interaksi antar partikel. Tiga jenis gelombang mekanis akan timbul ketika suatu permukaan dari media padat elastis yang besar diberikan beban dinamis maupun getaran, yaitu:

1. Gelombang kompresi atau longitudinal (*compressional waves* atau *P-waves*)

Gelombang ini memberikan tegangan tekan dan tarik (sejajar arah rambatnya) pada medium rambatnya seperti pada *Gambar 2.9*. Waktu perambatan gelombang ini terjadi lebih dahulu dari pada gelombang transversal. Gelombang ini mampu merambat melalui segala jenis medium baik padat, cair, maupun gas. *P-waves* memiliki kecepatan rambat yang paling cepat, tetapi amplitudonya paling kecil di antara gelombang-gelombang lainnya. Cepat rambat gelombang akan semakin cepat jika medium yang dilalui semakin keras.

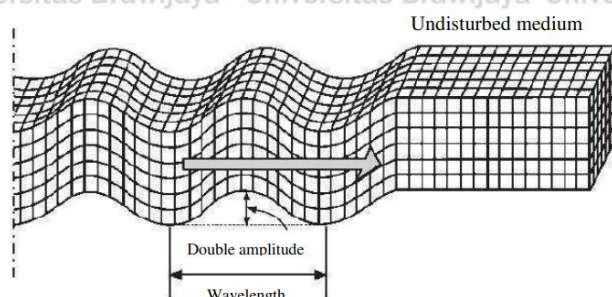


Gambar 2. 9 Pergerakan Partikel pada Gelombang P-Waves

Sumber : Elnashai dan Sarno (2008)

2. Gelombang geser atau transversal (*shear waves* atau *S-waves*)

Pada gelombang ini terjadi tegangan geser pada partikel dalam medium rambatnya karena partikel berosilasi secara tegak lurus dengan arah rambatan (transversal) seperti pada *Gambar 2.10*. Gelombang ini terjadi setelah gelombang *P-waves*.

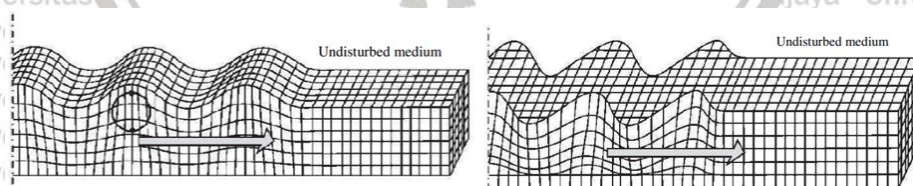


Gambar 2.10 Pergerakan Partikel pada Gelombang S-Waves

Sumber : Elnashai dan Sarno (2008)

3. Gelombang permukaan (*surface waves*)

Gelombang ini menjalar melalui permukaan serta semakin mengecil apabila semakin menjauhi permukaan. Gelombang permukaan yaitu gelombang yang kompleks dengan frekuensi yang lebih rendah namun amplitudo lebih besar dari gelombang badan (*P-waves* dan *S-waves*). Terdapat dua jenis gelombang permukaan antara lain *Love wave* dan *Rayleigh wave* seperti pada *Gambar 2.11*. *Love waves* merupakan gelombang yang arah gerak partikelnya tegak lurus arah rambatnya (transversal) yang penjaralannya terjadi di permukaan. Sedangkan *Rayleigh waves* memiliki gerakan partikel yang *eliptik retrograde*, yaitu bergerak menggulung medium yang dilalui dan terlihat seperti gerakan gelombang air di laut.



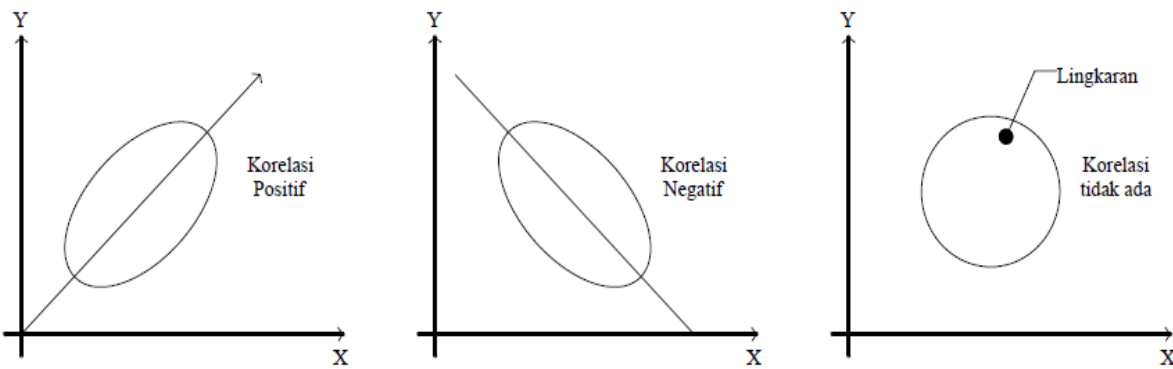
Gambar 2.11 Pergerakan Partikel pada Gelombang Permukaan, Rayleigh Waves (Kiri) dan Love Waves (Kanan)

Sumber : Elnashai dan Sarno (2008)

2.12. Analisis Korelasi

Analisis korelasi merupakan metode dalam statistika guna menetapkan kuatnya atau derajat hubungan linier antara dua variabel atau lebih. Semakin nyata hubungan linier (garis lurus), semakin kuat derajat hubungan antar variabelnya. Ukuran derajat hubungan linier

tersebut dikatakan koefisien korelasi yang dinyatakan dalam bilangan antara 0 dan +1 (korelasi positif) dan atau antara 0 dan -1 (korelasi negatif). Koefisien korelasi yang bernilai 0 memerikan arti bahwa tidak ada korelasi antara variabel tersebut. Korelasi positif sempurna apabila dua variabel mempunyai koefisien korelasi sebesar +1, sebaliknya korelasi negatif sempurna apabila dua variabel mempunyai koefisien korelasi -1.



Gambar 2. 12 Grafik Ilustrasi Korelasi

Tabel 2. 2

Pedoman Interpretasi Koefisien Korelasi

Interval Koefisien	Tingkat Hubungan
0,00 – 0,199	Sangat Rendah
0,20 – 0,399	Rendah
0,40 – 0,599	Sedang
0,60 – 0,799	Kuat
0,80 – 1,000	Sangat Kuat

Sumber : Metode Penelitian Pendidikan Pendekatan Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D (2006)

Berdasarkan jumlah variabelnya analisis korelasi terbagi atas korelasi linear sederhana juga korelasi linear berganda. Korelasi linier berganda (*multiple correlation*) yaitu angka yang menggambarkan arah dan kuatnya hubungan antara dua variabel *independent* secara bersama-sama atau lebih dengan satu variabel *dependent*. Uji korelasi linier sederhana bisa dilakukan menggunakan rumus sebagai berikut.

1. Korelasi Pearson

Koefisien korelasi ini dipakai untuk memperkirakan hubungan antara dua variabel yang memiliki data rasio atau interval.

$$r = \frac{n \sum XY - \sum X \sum Y}{\sqrt{(n \sum X^2 - (\sum X)^2)(n \sum Y^2 - (\sum Y)^2)}} \quad (2-9)$$

Keterangan :

r : koefisien korelasi

n : banyak sampel

X : nilai variabel X

Y : nilai variabel Y

2. Korelasi Spearman

Koefisien korelasi ini dipakai untuk memperkirakan hubungan antara dua variable yang memiliki data bertingkat (data ordinal).

$$r = 1 - \frac{6 \sum D^2}{n(n^2-1)} \quad (2-10)$$

Keterangan :

r : koefisien korelasi

D : selisih antara X dan Y

6 : angka konstan

n : banyaknya pasangan data

3. Koefisien Penentu (KP)

Koefisien penentu (KP) atau koefisien determinasi (R^2) merupakan besarnya pengaruh nilai suatu variabel terhadap naik/turunnya nilai variabel lainnya.

$$KP = R^2 = r^2 \times 100\% \quad (2-11)$$

2.13. Hubungan Modulus Elastisitas dengan Cepat Rambat Gelombang

Modulus elastisitas suatu beton dapat diketahui dengan menggunakan alat UPV (*Ultrasonic Pulse Velocity*) berdasarkan cepat rambat gelombangnya yang tergantung dari kerapatan medium dan sifat elastisitasnya. Rasio poisson juga mempengaruhi nilai dari modulus elastisitas beton, di mana rasio poisson diperoleh dari parameter kecepatan gelombang yang diperoleh dari alat UPV. Parameter kecepatan gelombang tersebut ialah kecepatan gelombang P dan kecepatan gelombang S.

Calculate Poisson's Ratio + E-Modulus

P-Wave Velocity (V_p): 4870 m/s

S-Wave Velocity (V_s): 2717 m/s

Poisson's ratio (ν): 0.27

Density of material (ρ): 2400 kg/m³

E-Modulus (E): 45144.30 MPa

Ok Cancel

Gambar 2. 13 Perhitungan Modulus Elastisitas Dinamis

Sumber : Proceq (2015)

Sesuai yang terlihat pada Gambar 2.12, kedua parameter kecepatan gelombang (*P-wave* dan *S-wave*) digunakan untuk mendapatkan nilai *poisson's ratio*. Untuk mencari nilai modulus elastisitas, selain nilai *poisson's ratio* juga dibutuhkan nilai rapat massa dari beton tersebut. Modulus elastisitas dinamis beton dapat dicari dengan menggunakan rumus sebagai

berikut: (PROCEQ)

$$\nu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (2-12)$$

$$E = 2G(1 + \nu) \quad (2-13)$$

$$G = \rho \times V_s^2 \quad (2-14)$$

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2-15)$$

dimana :

v_p : *P-wave velocity* (m/s)

v_s : *S-wave velocity* (m/s)

ν : *Poisson's ratio*

E : Modulus elastisitas dinamis (GPa)

G : Modulus Geser

ρ : Rapat massa (kg/m³)

m : Massa (kg)

V : Volume (m³)

2.14. Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu dimanfaatkan sebagai referensi untuk mengetahui kelebihan maupun kekurangan dari penelitian sebelumnya sehingga dapat digunakan untuk memulai penelitian yang baru. Berikut ini penjelasan singkat dari penelitian terdahulu:

Tabel 2.3
Penelitian Terdahulu

No	Nama Peneliti	Judul Penelitian	Hasil Penelitian
1	Fatimah Azzahra Fitri, Eva Arifi, Roland Martin S (2018)	Analisis Modulus Elastisitas Beton dengan menggunakan Alat PUNDIT PL-200	1. Pengujian dengan alat PUNDIT PL-200 menunjukkan nilai modulus elastisitas yang relatif sama pada kuat tekan yang berbeda, yaitu 30000 MPa 2. Hasil uji modulus elastisitas beton menggunakan alat <i>compression strength machine</i> dengan alat PUNDIT PL-200 tidak menunjukkan hubungan yang signifikan
2	Julian Carrilo, Julieth Ramirez, Juan Lizarazo-Marriga (2019)	Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Fiber-reinforced concrete in Colombia from Ultrasonic Pulse Velocities	Pada penelitian ini diperoleh nilai modulus elastisitas statis yang diuji dengan <i>destructive test</i> memiliki kesamaan dengan nilai modulus elastisitas dinamis yang diuji dengan alat UPV menggunakan metode semi langsung.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1. Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Struktur dan Bahan Konstruksi Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang dari Maret 2021 hingga selesai.

3.2. Peralatan dan Bahan Penelitian

3.2.1. Peralatan Penelitian

- a. Ayakan agregat halus dan kasar
- b. Piknometer
- c. Timbangan dengan kapasitas 150 kg dan 5 kg
- d. Kerucut terpancung dan batang penumbuk
- e. *Concrete mixer* (mesin pencampur beton)
- f. Sendok semen
- g. Talam
- h. Bekisting balok beton berukuran 20x20x70cm
- i. Bekisting silinder 15 x 30cm
- j. Kerucut Abrahm
- k. Mistar/Meteran
- l. Kain lap penyerap air
- m. Gerobak Pengangkut
- n. *Vibrator*
- o. *Rebound Hammer*
- p. Satu set alat pengukur modulus elastisitas UPV
- q. Mesin uji tekan beton (*Compression Testing Machine*)
- r. *Loading Frame*
- s. *LVDT*
- t. *Hydraulic Jack*
- u. *Strain Gauge*

3.2.2. Bahan Penelitian

- a. Pasir (agregat halus)
- b. Kerikil (agregat kasar)
- c. *Portland Composite Cement* (PCC)
- d. Air bersih

3.3. Variabel Penelitian

- a) *Interdependent Variable* (Variabel Bebas) ialah variabel yang faktornya bebas ditetapkan peneliti guna menentukan hubungan antara yang diamati. Variabel bebas ini dapat mempengaruhi variabel lain. Variabel bebas di penelitian ini yaitu variasi proporsi campuran beton.
- b) *Dependent Variable* (Variabel Terikat) ialah variabel yang faktornya digali oleh peneliti guna memperkirakan pengaruh dari variabel bebas. Variabel terikat pada penelitian ini ialah nilai modulus elastisitas beton dari metode *non destructive test*.
- c) *Control Variable* (Variabel Kontrol) ialah variabel yang dibuat konstan atau dikendalikan, sehingga pengaruh variabel bebas terhadap variabel terikat tidak dipengaruhi oleh factor luar yang tidak sedang digali. Variabel kontrol pada penelitian ini ialah nilai modulus elastisitas beton dari metode *destructive test*.

3.4. Analisis Bahan

3.4.1 Agregat Kasar

Dalam penelitian ini digunakan agregat kasar (kerikil), yang sudah dilakukan pengujian material sebelum pengecoran. Pengujian yang dilakukan terdiri dari analisis gradasi, pengujian berat isi, pengujian kadar air, serta pengujian berat jenis dan penyerapan air.

3.4.2 Agregat Halus

Dalam penelitian ini digunakan pasir alam, yang juga telah melewati tahap pengujian material sebelum pengecoran. Pengujian yang dilakukan pada agregat halus sama dengan pengujian pada agregat kasar.

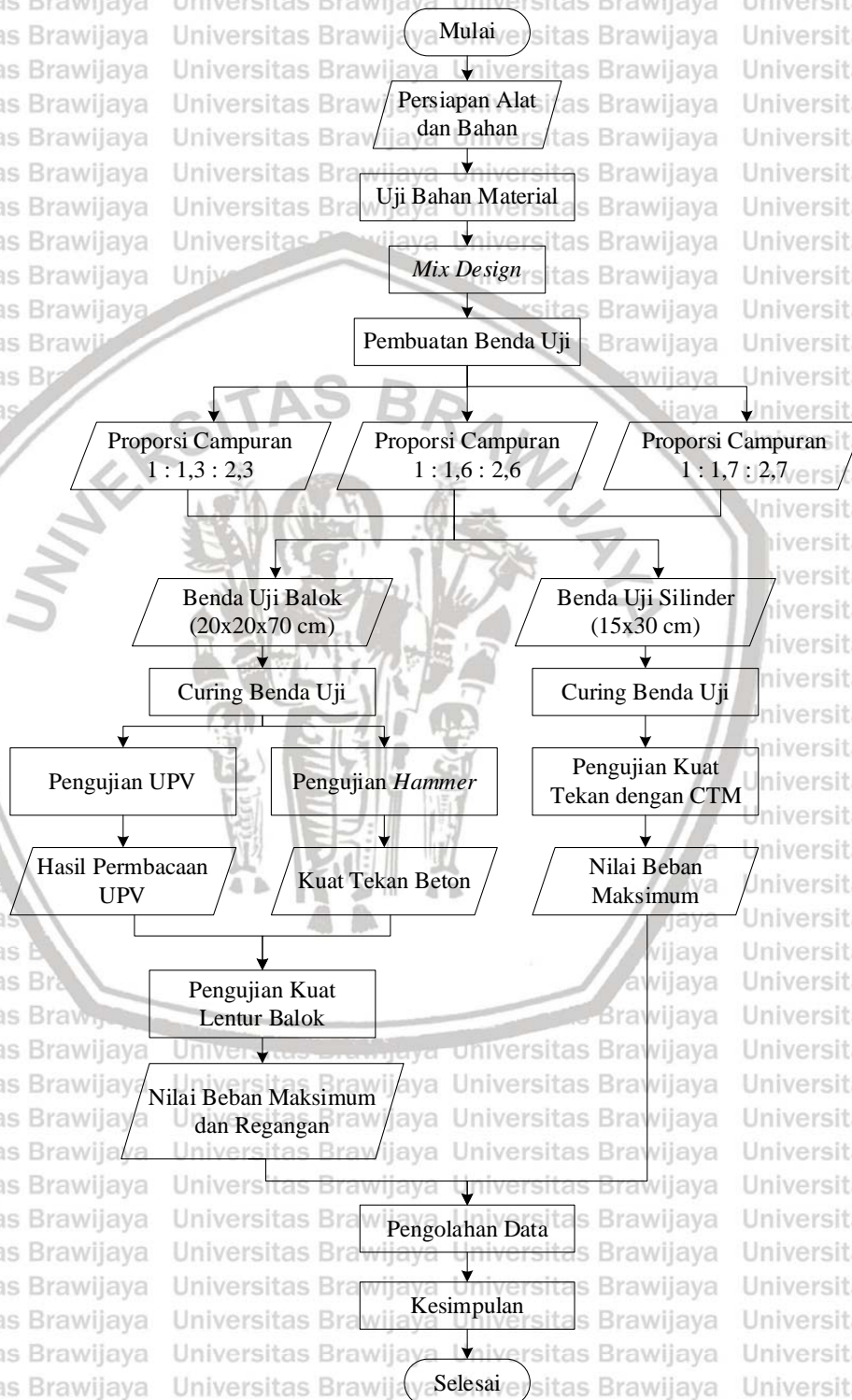
3.4.3 Semen

Dalam penelitian ini dipakai *Portland Composite Cement* (PCC) tipe 1. Semen sebagai campuran beton harus dalam keadaan layak dan baik untuk digunakan dengan cara melihat fisik dari semen tersebut dalam keadaan tidak mengeras dan tidak menggumpal. Semen yang dipakai ialah merk Semen Gresik.

3.4.4 Air

Dalam penelitian ini dipakai air bersih berasal dari PDAM Kota Malang yang tidak berwarna dan tidak berbau.

3.5. Tahapan Penelitian



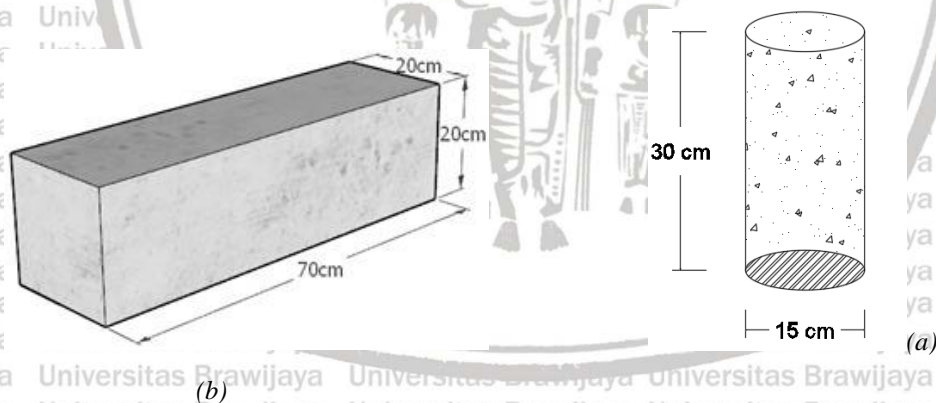
Gambar 3. 1 Flowchart Penelitian

3.6. Rancangan Penelitian

Pada penelitian ini digunakan benda uji balok beton normal berukuran 70 x 20 x 20 cm seperti pada *Gambar 3.2 (a)* sebagai benda uji utama dan benda uji silinder dengan ukuran diameter 15cm dan tinggi 30cm seperti *Gambar 3.2 (b)* sebagai pengontrol kuat tekan. Dalam penelitian ini akan diberikan proporsi campuran yang berbeda. Setiap variasi proporsi campuran dibuat benda uji balok normal berjumlah 1 sampel dan benda uji silinder minimal berjumlah 3 sampel untuk setiap *batch* pengecoran.

Tabel 3. 1
Rancangan Benda Uji

Proporsi Campuran	Jenis Benda Uji	Volume Benda Uji (m ³)	Total Benda Uji
1 : 1,7 : 2,7	Balok	0,028	1
	Silinder	0,0053	3
1 : 1,6 : 2,6	Balok	0,028	1
	Silinder	0,0053	3
1 : 1,3 : 2,3	Balok	0,028	1
	Silinder	0,0053	3



Gambar 3. 2 Dimensi Benda Uji Balok (a) dan Silinder (b)

3.7. Prosedur Penelitian

3.7.1 Pengujian Bahan Dasar

Pengujian ini dilakukan pada pasir dan kerikil untuk menentukan analisis butiran, berat jenis dan penyerapan air, kadar air, serta berat isi. Pengujian ini merujuk pada buku petunjuk praktikum teknologi beton dari Laboratorium Struktur dan Bahan Konstruksi Jurusan Teknik Sipil Universitas Brawijaya, di antaranya adalah :

- SNI 03-4808-1998 untuk metode pengujian berat isi agregat
- SNI 1969 : 2008 serta SNI 1970 : 2008 untuk metode pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat
- SNI 1971 : 2011 untuk metode pengujian kadar air agregat
- ASTM C136-2012 untuk metode pengujian gradasi agregat

3.7.2 Pengujian Beton Segar

Beton segar (*fresh concrete*) dilaksanakan pengujian dengan uji slump. Pengujian ini dilaksanakan setelah proses pengadukan campuran beton telah selesai. Uji slump berfungsi untuk mengetahui tingkat dari campuran beton segar. Kelecekan (*workability*) ialah kemudahan suatu campuran beton segar untuk dikerjakan dan dipadatkan serta tidak terjadi pemisahan agregat (*segregasi*).

3.7.3 Pembuatan Benda Uji

Prosedur dalam pembuatan benda uji ialah sebagai berikut :

1. Menyiapkan bahan-bahan penyusun beton sesuai dengan proporsinya.
2. Memasukkan bahan penyusun beton ke alat pengaduk lalu dibiarkan mengaduk selama ± 15 menit sampai campuran beton homogen.
3. Melakukan pengujian slump dengan mengambil sebagian dari campuran beton segar.
4. Menyiapkan bekisting gbalok dan silinder sesuai ukuran yang telah direncanakan serta mengolesi bagian dalamnya dengan oli agar beton mudah dilepaskan dari bekisting ketika sudah mengeras.
5. Menuang campuran beton ke dalam bekisting balok dan silinder
6. Melakukan pemadatan menggunakan *vibrator*.

3.7.4 Perawatan Benda Uji

Perawatan benda uji dilaksanakan setelah benda uji dibiarkan selama 24 jam serta bekistingnya telah dilepas. Perawatan (*curing*) ini berfungsi untuk memelihara kelembaban selama masa tertentu setelah beton selesai dicor. Perawatan yang dilakukan pada benda uji balok adalah dengan menyelimuti benda uji menggunakan karung goni basah serta setiap hari membasahi karung goni dengan air. Sedangkan untuk benda uji silinder dilaksanakan dengan cara merendamnya di dalam bak air.

Curing benda uji balok dilakukan selama minimal 14 hari dari waktu pengecoran. Sedangkan untuk perawatan benda uji silinder dilakukan selama 6 hari, kemudian dikeluarkan dan diletakkan pada suhu ruangan. Pada hari ke-7, benda uji silinder dilaksanakan pengujian kuat tekan.

3.7.5 Pengujian Kuat Tekan

Pengujian ini dilakukan guna memperoleh nilai kuat tekan benda uji silinder yang kemudian akan digunakan untuk mendapatkan mutu beton. Pengujian kuat tekan dalam penelitian ini dilaksanakan pada saat beton berumur 7 hari, kemudian akan dikonversikan ke dalam 28 hari pada pengolahan data nantinya. Prosedur pada pengujian kuat tekan ialah sebagai berikut :

1. Menimbang benda uji silinder tersebut.
2. Melakukan proses pelapisan (*caping*) pada permukaan benda uji yang tidak rata menggunakan mortar belerang supaya tegangan yang diberikan oleh mesin pengujian (*Compression Test Machine*) akan terbagi merata di sisi benda uji.
3. Meletakkan benda uji pada mesin pengujian.



Gambar 3. 3 Compression Test Machine
Sumber : Dokumentasi Penelitian (2021)

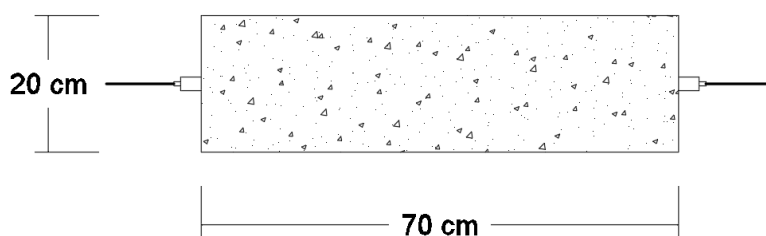
4. Menjalankan mesin pengujian hingga benda uji hancur.
5. Mencatat hasil pengujian, yaitu beban maksimum yang diterima beton hingga beton tersebut hancur.

Pengujian kuat tekan juga dilakukan di benda uji balok dengan metode NDT menggunakan alat *Rebound Schmidt Hammer*. Pengujian ini dilaksanakan setelah benda uji berumur 28 hari, dengan cara menekan secara tegak lurus pada elemen struktur yang akan

diuji. Untuk satu titik uji dilakukan sebanyak 10 pukulan agar memperoleh hasil pengukuran yang lebih akurat.

3.7.6 Pengujian UPV (*Ultrasonic Pulse Velocity*)

Pengujian UPV dilaksanakan pada benda uji balok setelah berumur 28 hari dengan alat PUNDIT-PL-200. Metode yang digunakan ialah metode langsung, dengan meletakkan kedua *transducer* pada 2 permukaan yang berbeda secara parallel seperti Gambar 3.4. Pada penelitian ini dipakai *transducer* standar dengan frekuensi 54 kHz dan *S-Wave transducer* 250 kHz. Hasil yang didapat dari pengujian ini berupa nilai modulus elastisitas dinamis dalam satuan GPa.



Gambar 3. 4 Pengujian UPV dengan Metode Langsung (Direct Method)

Prosedur pengujian UPV adalah sbegai berikut :

1. Membersihkan da meratakan permukaan beton yang akan diuji.
2. Mengkalibrasi alat uji UPV dengan cara menempatkan kedua *transducer* di kedua sisi *calibration rod*.



Gambar 3. 5 Proses Kalibrasi Alat Uji UPV

Sumber : PROCEQ (2015)

3. Menentukan jarak antar *transducer* dan *density* pada layar alat PUNDIT PL-200.
4. Mengoleskan *ultrasonic gel (couplant)* di titik permukaan beton yang akan diuji sesuai jenis *transducernya*.
5. Melakukan pengujian pertama yaitu dengan menggunakan *transducer* standar yang menghasilkan waktu transmisi *P-wave*.



Gambar 3. 6 Transducer Standar
Sumber : Dokumentasi Penelitian (2021)

6. Melakukan pengujian kedua yaitu dengan menggunakan *transducer S-wave* yang menghasilkan waktu transmisi *S-wave*.



Gambar 3. 7 Transducer S-wave
Sumber : Dokumentasi Penelitian (2021)

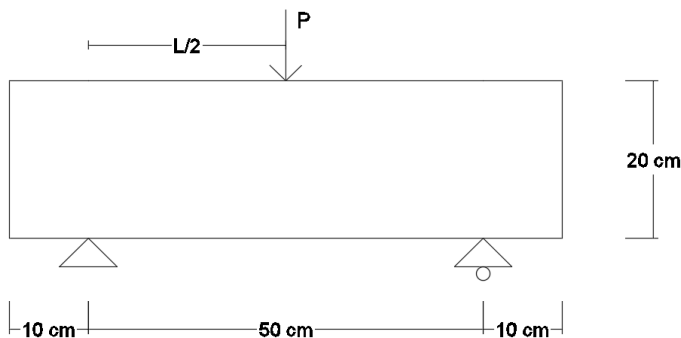
7. Setelah pengujian selesai, akan didapatkan nilai rasio poisson dan modulus elastisitas berdasarkan selisih waktu transmisi *P-wave* dan *S-wave*.

3.7.7 Pengujian Kuat Lentur

Pengujian ini menggunakan bantuan alat LVDT untuk mengukur regangan aksial beton pada benda uji. Pengujian kuat lentur ini hanya ditujukan pada benda uji balok yang telah berumur 28 hari. Bentang bersih balok dalam pengujian ini adalah 50 cm. Prosedur di pengujian kuat lentur ialah sebagai berikut :

1. Meratakan permukaan benda uji yang akan dipasang *Strain Gauge* menggunakan amplas.
2. Memasang *Strain Gauge* pada permukaan beton sisi bawah di tengah bentang benda uji.
3. Memasang *hydraulic jack* dan *load cell* pada *loading frame*.
4. Memasang tumpuan sendi dan *roll* sebagai tumpuan balok saat diuji nanti. Sebelum memasang tumpuan dilakukan pengukuran agar pengujian tepat pada tengah bentang balok.
5. Meletakkan benda uji balok di atas tumpuan pada *loading frame* yang telah disiapkan.

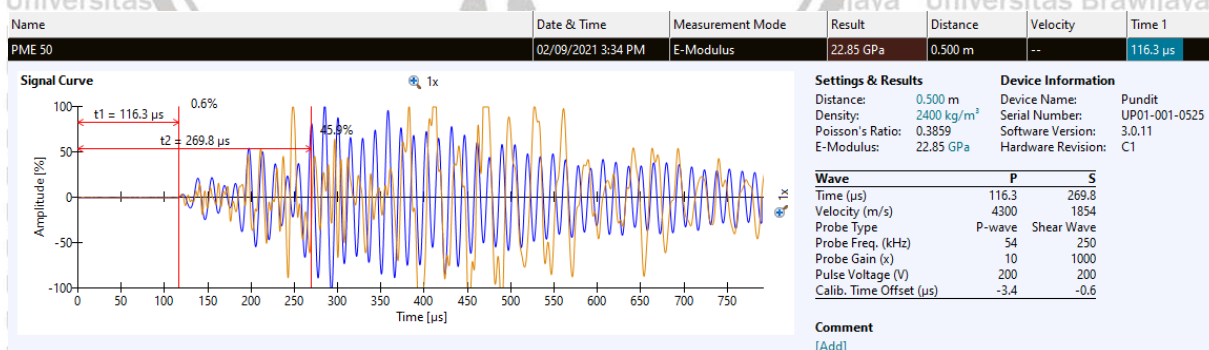
6. Memasang LVDT tepat pada sisi bawah tengah bentang balok.
7. Menghubungkan setiap *Strain Gauge* ke *strain meter* dengan menggunakan kabel.
8. Menyalakan *hydraulic jack* dan mengatur agar kenaikan yang didapat konstan.
9. Mencatat hasil pengujian dan menganalisis menggunakan Microsoft excel.



Gambar 3. 8 Perletakan dan Pembebanan pada Pengujian Kuat Lentur

3.8. Metode Pengumpulan Data

Data yang diperlukan diambil dari pengujian yang telah dilakukan terhadap benda uji balok maupun silinder. Pengujian UPV mendapatkan data yaitu *waveform* dari hasil pembacaan gelombang ultrasonik untuk variasi benda uji balok. Selanjutnya data tersebut diolah dengan aplikasi PL-Link seperti pada *Gambar 3.9*. Dari setiap *waveform* akan didapatkan dua parameter gelombang dengan warna yang berbeda yaitu waktu transmisi P-wave (biru) dan S-wave (orange) yang akan menghasilkan nilai modulus elastisitas dinamis dalam satuan GPa. Sedangkan untuk pengujian dengan *loading frame*, akan diperoleh data berupa nilai beban maksimum (P max) yang dapat ditahan benda uji serta nilai regangannya. Selanjutnya data tersebut dipakai dalam memperhitungkan nilai modulus elastisitas statis.



Gambar 3. 9 Tampilan Data Hasil Pengujian UPV menggunakan Aplikasi PL-Link

3.9. Pengolahan Data

Pengujian dengan metode UPV akan didapatkan data cepat rambat gelombang yang kemudian dimanfaatkan dalam menganalisis modulus elastisitas beton. Pada penelitian ini parameter- parameter gelombang didasarkan pada perlakuan atau variasi mutu beton. Dari data-data yang didapatkan akan diolah menggunakan aplikasi PL-Link. Sedangkan untuk pengujian dengan metode *destructive test*, akan diperoleh data nilai beban maksimum (P_{max}) yang dapat ditahan benda uji serta nilai regangan yang terbaca pada alat *strain meter*.

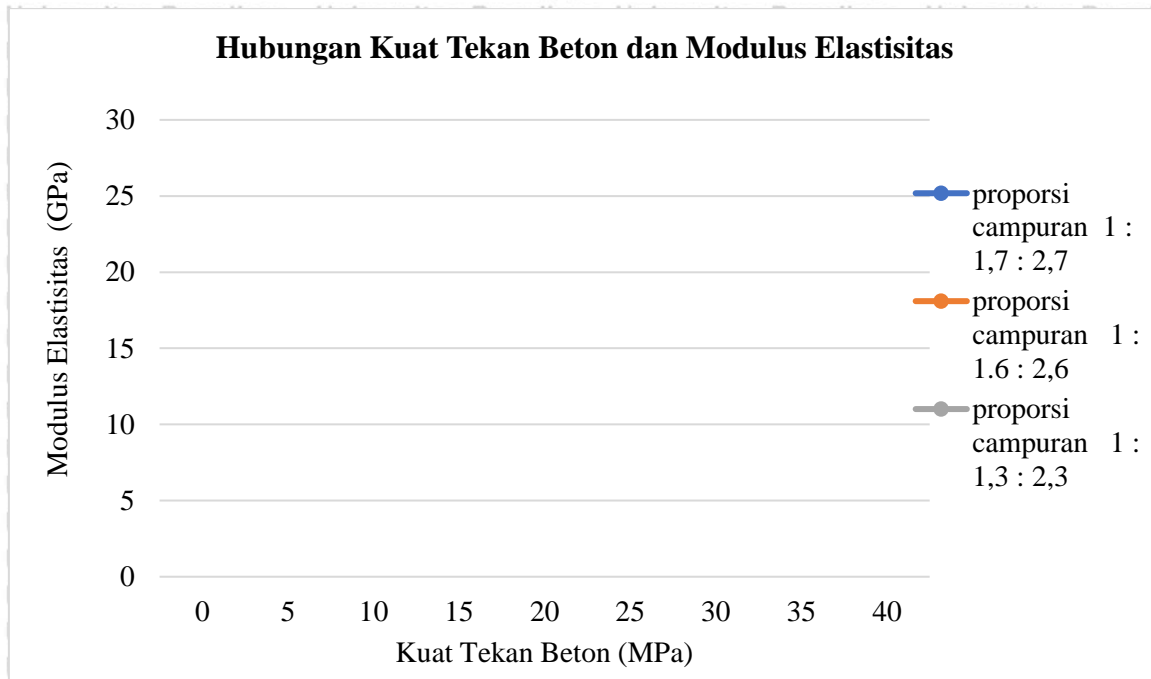
Dari data tersebut kemudian akan disusun grafik hubungan tegangan-regangan yang terjadi pada beton. Selain itu, data dari kedua metode tersebut juga akan dibuat tabel dan grafik untuk memperoleh korelasi antara modulus elastisitas statis dan dinamis pada beton.

Tabel 3. 2
Hasil Pengujian Modulus Elastisitas Statis

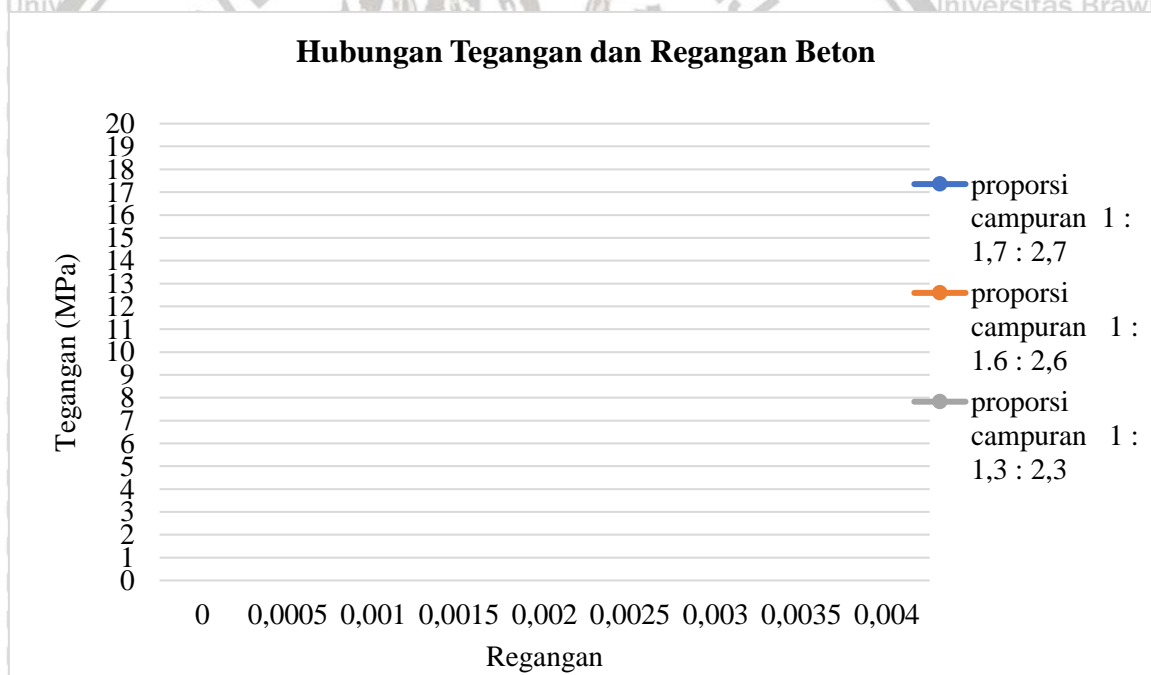
No	Proporsi Campuran	P max (N)	Tegangan (σ)	Regangan (ϵ)	Modulus Elastisitas (MPa)
1	1 : 1,7 : 2,7				
2	1 : 1,6 : 2,6				
3	1 : 1,3 : 2,3				

Tabel 3. 3
Hasil Pengujian Modulus Elastisitas Dinamis

No	Proporsi Campuran	Mutu Beton Aktual (Mpa)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Modulus Elastisitas (E) (MPa)
1	1 : 1,7 : 2,7				
2	1 : 1,6 : 2,6				
3	1 : 1,3 : 2,3				



Gambar 3. 10 Grafik Hubungan antara Mutu Beton dengan Modulus Elastisitas



Gambar 3. 11 Grafik Hubungan antara Tegangan dan Regangan Beton

3.10. Hipotesis

Berdasarkan tinjauan Pustaka, harapan yang nantinya didapatkan dalam penelitian ini ialah sebagai berikut:

1. Variasi proporsi campuran beton akan memberikan kuat tekan beton yang berbeda, sehingga nilai modulus elastisitasnya juga berbeda. Semakin tinggi kuat tekan beton maka semakin tinggi pula modulus elastisitasnya.
2. Modulus elastisitas dinamis yang didapatkan akan lebih besar dari modulus elastisitas statis.



BAB IV

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1. Pembuatan Benda Uji

4.1.1. Perencanaan Campuran Benda Uji

Penelitian ini dengan 3 benda uji berupa balok berukuran 20cm x 20cm x 70cm. Masing-masing balok beton mempunyai variasi proporsi campuran yang berbeda. Perencanaan campuran benda uji dilaksanakan menurut SNI-03-2834-2000 tentang Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal. Untuk 1 *batch* (1 kali campuran) dapat menghasilkan 1 balok dan 3 silinder berukuran 15cm x 30cm. Kebutuhan bahan pada setiap variasi proporsi campuran dapat dilihat di *Tabel 4.1*.

Tabel 4. 1
Kebutuhan Bahan untuk Campuran Pembuatan Benda Uji

Kode Benda Uji	Kebutuhan Material			
	Semen (kg)	Air (kg/m ³)	Pasir (kg)	Kerikil (kg)
BNA	27,24	9,97	36,53	62,30
BNB	24,51	9,84	38,62	63,06
BNC	23,57	9,75	40,05	62,66

4.1.2. Proses Pembuatan Benda Uji

Pembuatan benda uji beton dilakukan menggunakan bantuan alat *concrete mixer*. Kebutuhan material ditimbang sesuai dengan *Tabel 4-1* kemudian dimasukkan ke dalam *concrete mixer* hingga material tercampur seluruhnya. Pada waktu yang bersamaan mold silinder dan bekisting kayu disiapkan dan diolesi oli agar cetakan mudah dilepas dan tidak lengket. Selanjutnya dilakukan *slump test* pada beton segar guna mengetahui kelecakan beton tersebut. *Slump* yang digunakan antara 60–180mm. Adapun nilai *slump* pada penelitian ini ditampilkan dalam *Tabel 4.2*.

Tabel 4. 2
Hasil Pengujian Slump

Proporsi Campuran	Kode Benda Uji	Nilai Slump (cm)
1 : 1,3 : 2,3	BNA	11,8
1 : 1,6 : 2,6	BNB	12,5
1 : 1,7 : 2,7	BNC	12

Dari hasil pengujian *slump* pada Tabel 4-2 dapat diambil kesimpulan bahwa nilai *slump* campuran beton sudah memenuhi nilai *slump* rencana. Setelah lolos uji *slump*, beton dimasukkan ke dalam cetakan silinder dan bekisting kayu. Selagi menuangkan beton, dilakukan pemadatan menggunakan *vibrator* agar campuran merata dan seragam lalu dibiarkan hingga beton mengeras.



Gambar 4. 1 Pembuatan Benda Uji (a) Pengujian Slump, (b) Pemadatan Beton dengan Vibrator



Gambar 4. 2 (a) Benda Uji pada Bekisting Balok (b) Benda Uji pada Cetakan Silinder

4.1.3. Proses Curing

Setelah proses pengecoran, benda uji akan dibiarkan selama 24 jam kemudian bekisting dilepas dan dilakukan proses *curing*. Proses *curing* atau perawatan beton dilakukan dengan tujuan untuk mencegah terjadinya retak awal pada beton yang disebabkan panas *hidrasi* tinggi. Perawatan pada benda uji balok adalah dengan menyelimuti benda uji dengan karung goni basah serta setiap hari membasahinya secara terus-menerus menggunakan air selama 7 hari. Sedangkan benda uji silinder hanya direndam di dalam bak air.

4.2. Pengujian Kuat Tekan

4.2.1. Pengujian Kuat Tekan dengan CTM

Pengujian kuat tekan dilaksanakan pada benda uji silinder menggunakan alat *Compression Test Machine*. Pengujian ini memiliki tujuan yaitu mengetahui kemampuan benda uji silinder untuk menahan gaya tekan maksimum, yang dimanfaatkan dalam menghitung kuat tekan beton tersebut. Pengujian dilaksanakan setelah beton berumur 14 hari selanjutnya dikonversikan ke umur 28 hari. Adapun formula yang dipakai dalam menghitung kuat tekan ialah sebagai berikut.

$$f'c = \frac{P}{A} \quad (4-1)$$

dengan :

$f'c$: kuat tekan beton (N/mm^2)

P : beban aksial (N)

A : luas penampang benda uji (mm^2)

Contoh perhitungan :

Bend uji : BNA1

Beban maksimum : 481000 N

Umur beton : 14 hari (faktor konversi = 0,88)

Diameter : 150 mm

Luas : $A = \frac{1}{4} \pi D^2 = \frac{1}{4} \times \pi \times 150^2 = 17662,50 \text{ mm}^2$

Kuat Tekan : $f'c = \frac{P}{A} = \frac{481000 \text{ N}}{17662,5 \text{ mm}^2} = 27,2328 \text{ MPa}$

$f'c$ (28 hari) = $\frac{27,2328 \text{ MPa}}{0,88} = 30,946 \text{ MPa}$



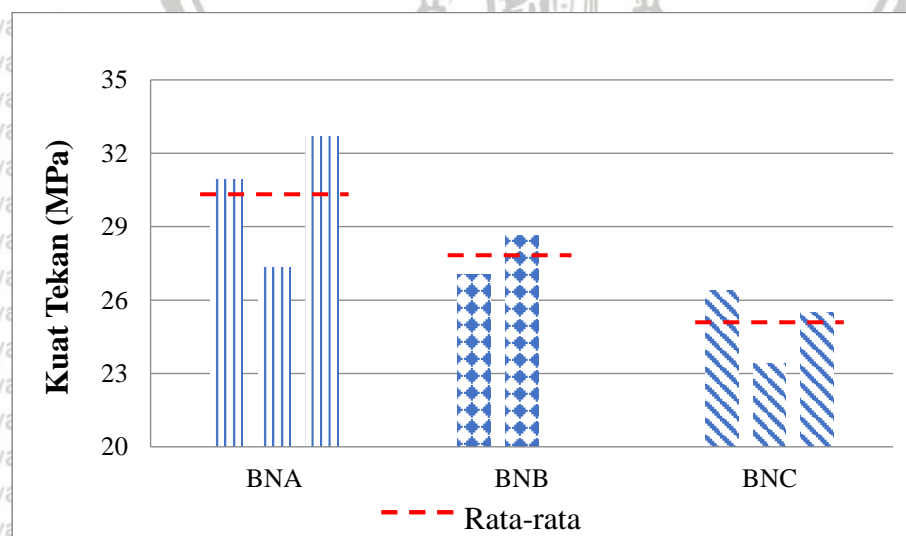
Gambar 4.3 Uji Tekan Silinder

Hasil dari pengujian kuat tekan dengan *Compression Test Machine* (CTM) terdapat di *Tabel 4.3*.

Tabel 4. 3
Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton dengan CTM

Proporsi Campuran	Kode Benda Uji	Umur Beton hari	Beban Maksimum (N)	Luas Penampang (mm^2)	f'_c (28 Hari) (MPa)	Rata-Rata f'_c (MPa)
1 : 1,3 : 2,3	BNA1	14	481000	17662,50	30,946	30,324
	BNA2	14	425000		27,343	
	BNA3	14	508000		32,684	
1 : 1,6 : 2,6	BNB1	15	425000	17662,50	27,0363	27,831
	BNB2	15	450000		28,6266	
1 : 1,7 : 2,7	BNC1	14	410000	17662,50	26,378	25,092
	BNC2	14	364000		23,419	
	BNC3	14	396000		25,478	

Pada pengujian kuat tekan aktual memberikan hasil yang bervariasi untuk masing-masing proporsi campuran. Dari *Tabel 4-2* yang tertera dapat diketahui bahwa rata-rata kuat tekan tertinggi yaitu pada beton dengan proporsi campuran 1:1,3:2,3 (BNA) sebesar 30,324 MPa dan terendah pada beton dengan proporsi campuran 1:1,7:2,7 (BNC) sebesar 25,092 MPa. Benda uji dengan proporsi 1:1,6:2,6 (BNB) memiliki nilai rata-rata kuat tekan di antara benda uji BNA dan BNC, yaitu sebesar 27,831 MPa. Hasil pengujian tersebut akan diinput untuk memperoleh grafik yang terdapat pada *Gambar 4.4*.



Gambar 4. 4 Hasil Kuat Tekan Beton dengan CTM

4.2.2. Pengujian Kuat Tekan dengan *Hammer Test*

Pengujian *Hammer* dilaksanakan pada benda uji balok menggunakan alat *Silver Schmidt Hammer* dari *PROCEQ*. Pengujian ini bertujuan untuk mendapatkan hasil berupa *rebound number*. Benturan antara ujung plunger dan permukaan beton akan menghasilkan *rebound number* dan memberikan pantulan kembali yang nilainya dapat terbaca oleh *rebound hammer* dalam menafsirkan kekuatan struktur beton dari sisi luar. Berikut merupakan datanya yang diolah menggunakan aplikasi *Hammer Link*.



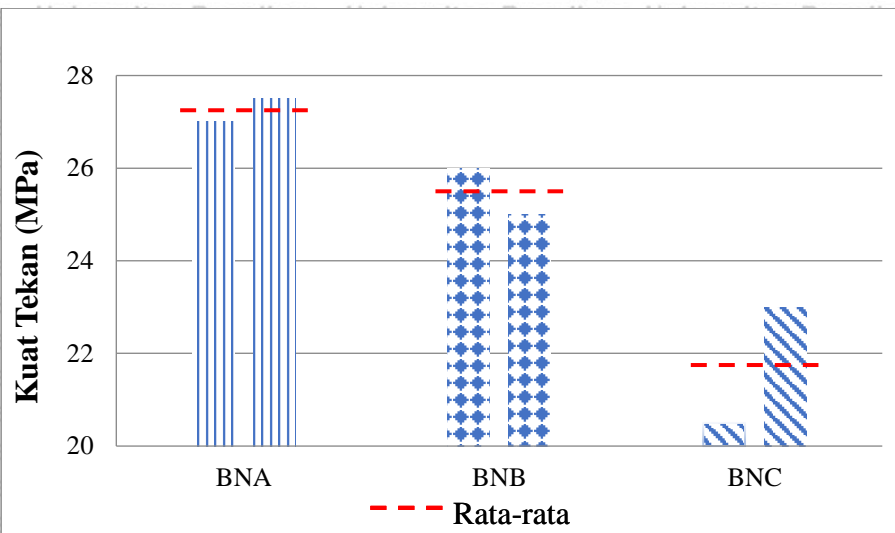
Gambar 4. 5 Pengujian Kuat Tekan *Hammer Test*

Tabel 4. 4

Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton dengan *Hammer Test*

Benda Uji	f'c (Mpa)	Rata-rata f'c (Mpa)
BNA 1 : 1,3 : 2,3	27,00 27,50	27,25
BNB 1 : 1,6 : 2,6	26,00 25,00	25,50
BNC 1 : 1,7 : 2,7	20,50 23,00	21,75

Pengujian *Hammer* pada benda uji dilakukan sebanyak 2 kali pada sisi yang berbeda. Nilai rata-rata kuat tekan tertinggi ialah pada beton dengan proporsi campuran 1:1,3:2,3 (BNA) sebesar 27,25 MPa, nilai rata-rata kuat tekan terendah yaitu pada beton dengan proporsi campuran 1:1,7:2,7 (BNC) sebesar 21,75 MPa, dan proporsi campuran 1:1,6:2,6 (BNB) memiliki nilai rata-rata kuat tekan di antara kedua benda uji tersebut sebesar 25,50 MPa.

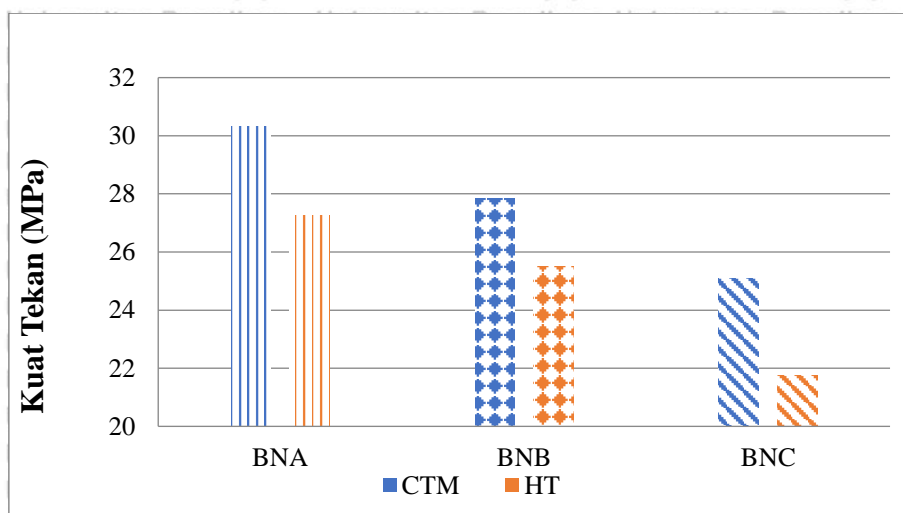


Gambar 4. 6 Hasil Kuat Tekan dengan Hammer Test

Berdasarkan pengujian yang dilakukan, terjadi perbedaan hasil kuat tekan dengan CTM (*Compression Test Machine*) dan kuat tekan dengan *hammer test* (HT), maka untuk mendapatkan nilai kuat tekan beton dibutuhkan adanya faktor pengali atau konstanta. Perbandingan hasil kuat tekan antara CTM dan HT disajikan pada *Tabel 4.5*, yang dapat dilihat bahwa perbandingan hasil kuat tekan HT terhadap CTM sebesar 86 – 92%, dan perbandingan hasil kuat tekan CTM terhadap HT sebesar 109-116%. *Gambar 4.7* bisa diketahui bahwa nilai kuat tekan CTM lebih tinggi dari kuat tekan HT, hal tersebut dikarenakan benda uji yang digunakan berbeda. Pengujian CTM dilakukan pada benda uji silinder dan HT pada benda uji balok. Walaupun pada proporsi dan satu *batch* pengecoran yang sama, namun jika proses pemadatan tidak baik maka akan mempengaruhi kuat tekan dari beton tersebut. Dalam hal ini mungkin terjadi benda uji silinder lebih seragam dari benda uji balok.

Tabel 4. 5
Perbandingan Hasil Kuat Tekan antara CTM dan HT

Benda Uji	Rata-Rata f'c CTM	Rata-Rata f'c HT	Persentase HT terhadap CTM	Persentase CTM terhadap HT
BNA	30,32448	27,25	89,86%	111,28%
BNB	27,83145	25,50	91,62%	109,14%
BNC	25,09168	21,75	86,68%	115,36%

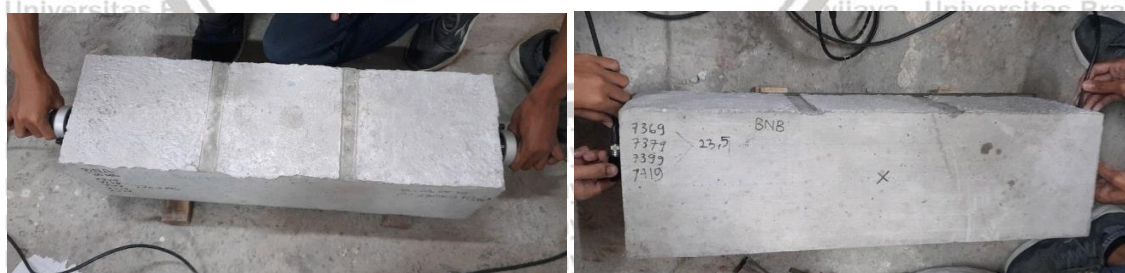


Gambar 4. 7 Hasil Pengujian Kuat Tekan

4.3. Pengujian Modulus Elastisitas

4.3.1. Modulus Elastisitas Dinamis

Pengujian modulus elastisitas dinamis pada benda uji balok dilaksanakan setelah beton berumur 28 hari dengan bantuan alat PUNDIT PL-200 menggunakan metode langsung (*direct method*). Pada penelitian ini digunakan 2 *transducer*, yaitu *transducer* standar dengan frekuensi 54 kHz dan *S-Wave transducer* dengan frekuensi 250 kHz. Kedua *transducer* tersebut diletakkan pada permukaan beton dan saling berhadapan dengan jarak 70 cm. Sebelum pengujian dilakukan, benda uji ditimbang terlebih dahulu untuk mendapatkan massanya kemudian dibagi dengan volume, sehingga akan diperoleh massa jenis dari benda uji tersebut. Massa jenis dan juga jarak akan diinput ke dalam layar PUNDIT.



(a) (b)

Gambar 4. 8 Pelaksanaan Pengujian Modulus Elastisitas dengan (a) Transducer P-wave (b) Transducer S-wave

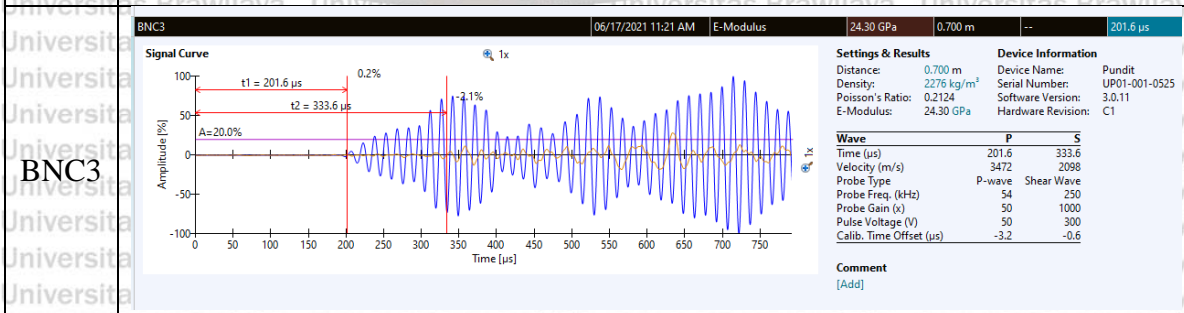
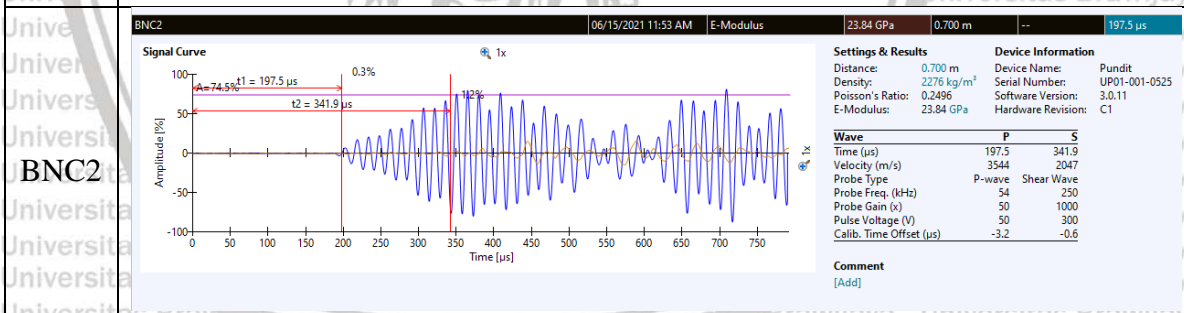
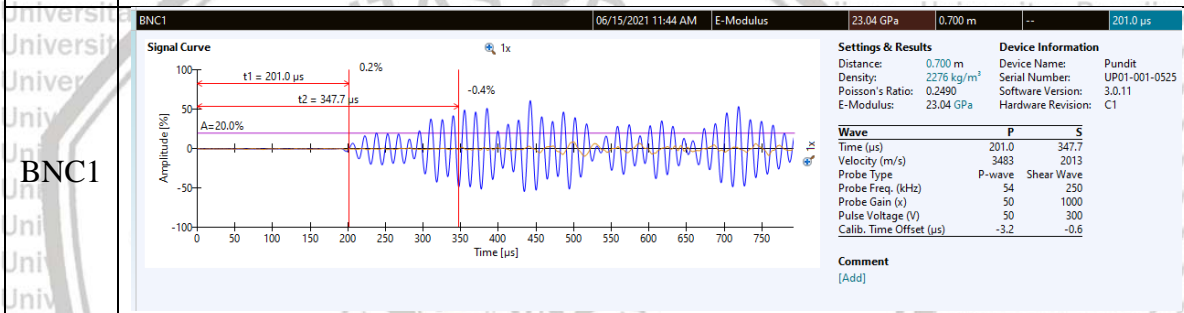
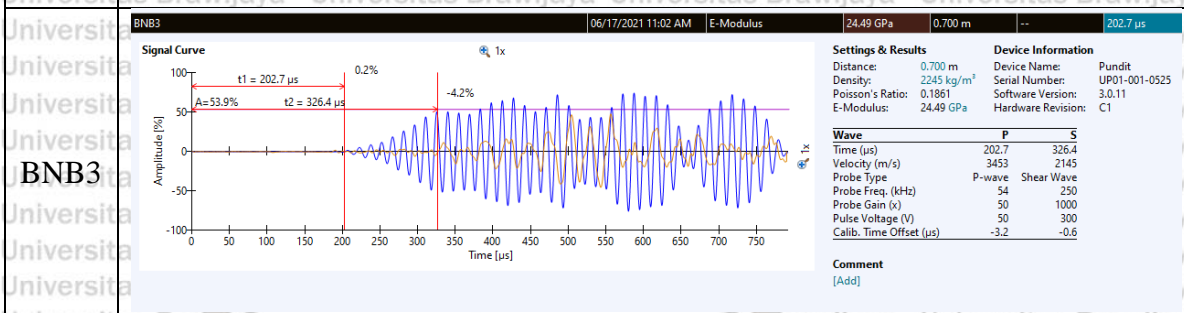
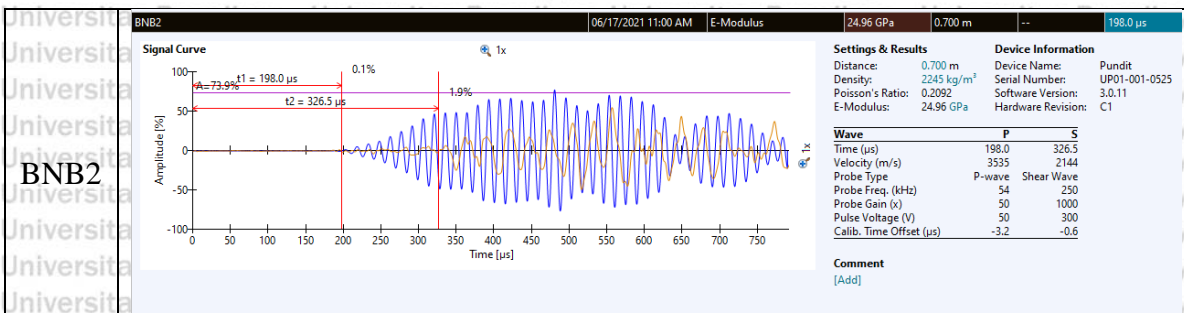
Terdapat 3 benda uji balok beton dengan proporsi campuran yang berbeda. Setiap benda uji dilakukan sebanyak 3 kali pengujian. Dari setiap *waveform* akan didapatkan dua

parameter gelombang dengan warna yang berbeda yaitu waktu transmisi P-wave (biru) dan S-wave (orange) seperti yang terdapat pada Tabel 4.6.

Tabel 4. 6 Hasil Modulus Elastisitas Dinamis pada Aplikasi PL-Link

Benda Uji	Waveform
BNA1	
BNA2	
BNA3	
BNB1	



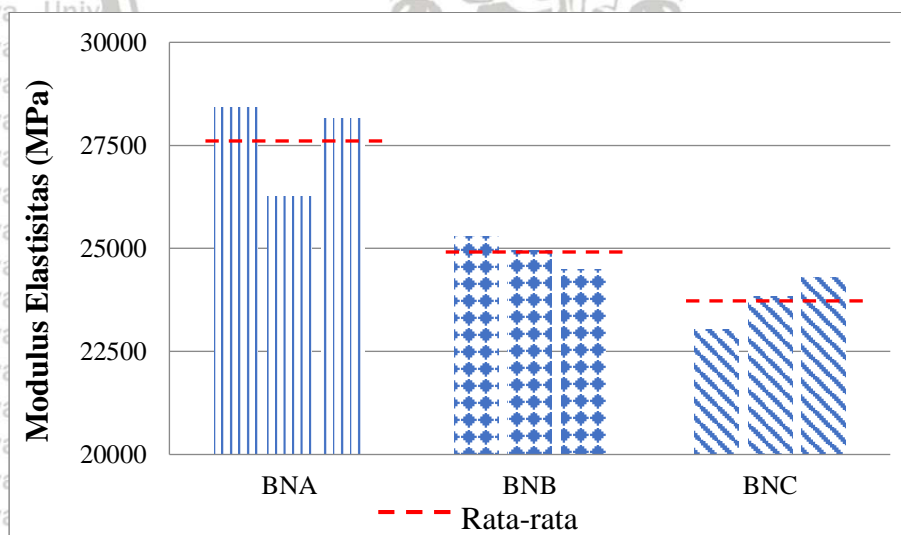


Dari beberapa data yang diperoleh pada *Tabel 4-6* seperti waktu transmisi, cepat rambat gelombang juga rasio poisson selanjutnya akan dianalisis oleh aplikasi PL-Link untuk mendapatkan modulus elastisitas dinamis. Hasil pengujian modulus elastisitas dinamis yang langsung didapatkan dari aplikasi PL-Link ditampilkan pada *Tabel 4.7*.

Tabel 4. 7
Hasil Modulus Elastisitas Dinamis Aktual

Benda Uji	Poisson's Ratio	Modulus Elastisitas Dinamis		Rata-rata (Mpa)
		(GPa)	(MPa)	
BNA (1 : 1,3 : 2,3)	0,1913	28,42	28420	27606,67
	0,2128	26,26	26260	
	0,198	28,14	28140	
BNB (1 : 1,6 : 2,6)	0,1611	25,29	25290	24913,33
	0,2092	24,96	24960	
	0,1861	24,49	24490	
BNC (1 : 1,7 : 2,7)	0,2490	23,04	23040	23726,67
	0,2496	23,84	23840	
	0,2124	24,3	24300	

Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai modulus elastisitas dinamis di antara 23040 MPa sampai dengan 28420 MPa. Dapat dilihat dari *Tabel 4.7* bahwa rata-rata nilai modulus elastisitas dinamis ketiga benda uji tersebut berbeda-beda.



Gambar 4. 9 Nilai Modulus Elastisitas Dinamis dari Pembacaan Alat PUNDIT PL-200

Pada penelitian ini modulus elastisitas dinamis juga dihitung secara teori dengan menggunakan rumus sebagai berikut : (PROCEQ)

$$v = \frac{L}{t} \quad (4-2)$$

$$v = \frac{v_p^2 - 2v_s^2}{2(v_p^2 - v_s^2)} \quad (4-3)$$

$$E = 2G(1 + \nu) \quad (4-4)$$

$$G = \rho \times v_s^2 \quad (4-5)$$

$$\rho = m/V \quad (4-6)$$

dimana :

v : kecepatan (m/s) E : Modulus elastisitas dinamis (GPa)

L : Jarak *transducer* (m) G : Modulus geser

t : waktu transmisi (s) ρ : Rapat massa (kg/m³)

v_p : *P-wave velocity* (m/s) m : massa (kg)

v_s : *S-wave velocity* (m/s) V : Volume (m³)

ν : *Poisson's ratio*

Contoh perhitungan :

Benda uji : BNA pengujian ke-2

Jarak *transducer* = 0,7 m

Waktu tempuh gelombang P (t_1) = 195,1 μ s

Cepat rambat gelombang P (v_p) = $\frac{0,7}{195,1} = 0,0035879 \text{ m}/\mu\text{s} = 3587,90 \text{ m/s}$

Waktu tempuh gelombang S (t_1) = 323 μ s

Cepat rambat gelombang P (v_p) = $\frac{0,7}{323} = 0,00216718 \text{ m}/\mu\text{s} = 2167,18 \text{ m/s}$

Poisson's ratio (ν) = $\frac{3587,90^2 - 2 \times 2167,18^2}{2(3587,90^2 - 2 \times 2167,18^2)} = 0,2128$

Massa (m) = 64,55 kg

Volume (V) = $0,2 \times 0,2 \times 0,7 = 0,028 \text{ m}^3$

Rapat massa (ρ) = $\frac{64,55}{0,028} = 2305 \text{ kg/m}^3$

Modulus elastisitas dinamis (E_d) = $2G(1 + \nu)$

= $2 \times \rho \times v_s^2 (1 + \nu)$

= $2 \times 2305 \times 2167,18^2 (1 + 0,2128)$

= 26,26 GPa

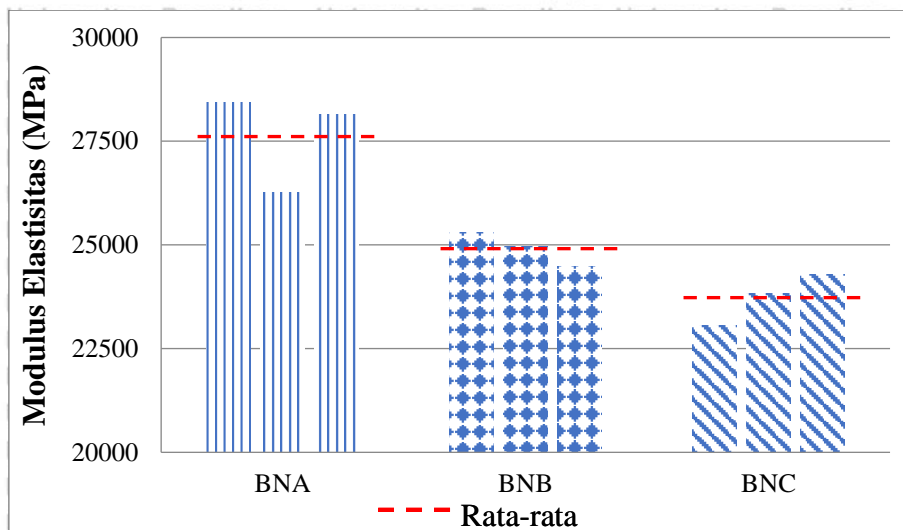
Hasil nilai modulus elastisitas dinamis yang didapatkan dengan menggunakan teori dari manual PROCEQ disajikan pada *Tabel 4-8*.

Tabel 4. 8

Hasil Modulus Elastisitas Dinamis Teoritis

Benda Uji	t1 (μ s)	Vp (m/s)	t2 (μ s)	Vs (m/s)	Poisson's Ratio	Massa (kg)	Volume (m ³)	Rapat Massa (kg/m ³)	Modulus Elastisitas Dinamis		Rata-rata Modulus Elastisitas (Mpa)
									(GPa)	(MPa)	
BNA (1 : 1,3 : 2,3)	190,1	3682,27	307,7	2274,94	0,1913	64,55	0,028	2305	28,43	28428,057	27612,02
	195,1	3587,90	323	2167,18	0,2128				26,26	26263,019	
	190,3	3678,40	310,1	2257,34	0,1980				28,14	28144,971	
BNB (1 : 1,6 : 2,6)	202	3465,35	317,8	2202,62	0,1611	62,85	0,028	2245	25,29	25288,247	24910,02
	198	3535,35	326,5	2143,95	0,2092				24,95	24951,192	
	202,7	3453,38	326,4	2144,61	0,1861				24,49	24490,630	
BNC (1 : 1,7 : 2,7)	201	3482,59	347,6	2013,81	0,2488	63,72	0,028	2276	23,05	23050,836	23728,90
	197,5	3544,30	341,9	2047,38	0,2496				23,84	23840,660	
	201,6	3472,22	333,6	2098,32	0,2124				24,30	24295,203	

Berdasarkan *Tabel 4.8*, dapat diketahui bahwa modulus elastisitas dinamis didasarkan pada cepat rambat gelombang P dan gelombang S, dimana cepat rambat tersebut dipengaruhi oleh waktu tempuh *transducer receiver* untuk menerima gelombang yang dikirim oleh *transducer transmitter*. Pada pengujian ini didapatkan waktu tempuh gelombang P sekitar 190 μ s sampai dengan 203 μ s. Perbedaan waktu gelombang yang tidak terlalu jauh membuat cepat rambat gelombang P dari ketiga benda uji hampir sama yaitu sekitar 3400 m/s sampai dengan 3700 m/s. Sedangkan untuk waktu tempuh gelombang S semakin naik dari benda uji BNA hingga BNC, dimana waktu tempuhnya sekitar 307 μ s sampai dengan 350 μ s. Nilai waktu tempuh yang tinggi ini berbanding terbalik dengan cepat rambat gelombang S yaitu sekitar 2000 m/s sampai dengan 2300 m/s. Kedua cepat rambat diolah untuk menentukan *poisson's ratio* dan modulus elastisitas dinamisnya. Benda uji BNA memiliki rata-rata modulus elastisitas sebesar 27612,02 MPa, benda uji BNB sebesar 24904,60 MPa, dan benda uji BNC sebesar 23728,90 MPa.



Gambar 4.10 Nilai Modulus Elastisitas Dinamis secara Teoritis

Kedua data yang didapatkan dari pembacaan langsung dari PL-Link dengan secara teoritis memiliki perbedaan hasil yang tidak terlalu signifikan. Persentase nilai modulus elastisitas dinamis tersebut disajikan pada Tabel 4.9.

Tabel 4.9

Persentase Selisih Hasil Modulus Elastisitas Dinamis Aktual dan Teoritis

Benda Uji	Modulus Elastisitas (Mpa)		Persentase Selisih
	Aktual	Teoritis	
BNA (1 : 1,3 : 2,3)	28420	28428,057	0,028%
	26260	26263,019	0,011%
	28140	28144,971	0,018%
BNB (1 : 1,6 : 2,6)	25290	25288,247	0,007%
	24960	24951,192	0,035%
	24490	24490,630	0,003%
BNC (1 : 1,7 : 2,7)	23040	23050,836	0,047%
	23840	23840,660	0,003%
	24300	24295,203	0,020%

Berdasarkan perbandingan nilai modulus elastisitas dinamis yang dihasilkan pada layar PUNDIT PL-200 memiliki nilai yang sama dengan nilai modulus elastisitas dinamis yang dihasilkan secara teori. Bahkan selisihnya hanya di antara 0,003% - 0,047%.

4.3.2. Modulus Elastisitas Statis

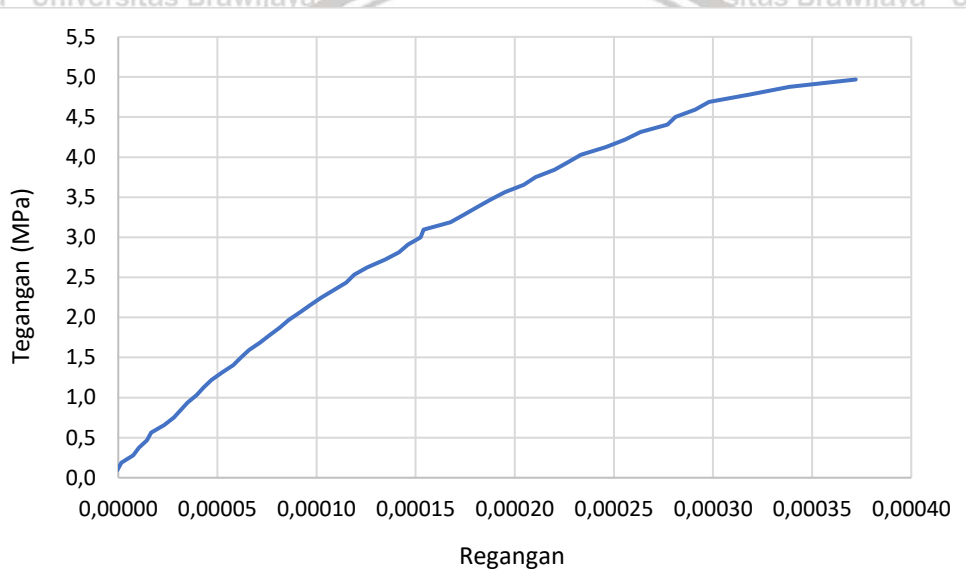
4.3.2.1. Perhitungan Modulus Elastisitas Statis berdasarkan Uji Kuat Lentur

Pengujian kuat lentur dilaksanakan pada benda uji balok menggunakan *loading frame* dengan kekuatan 10 ton. Pengujian dilaksanakan setelah beton berumur 28 hari. Pengujian ini akan diperoleh data nilai beban maksimum (P_{max}) yang dapat ditahan oleh benda uji

serta nilai regangannya. Kedua hasilnya akan dibuat kurva hubungan tegangan-regangan untuk memperhitungkan nilai modulus elastisitas statis.



Gambar 4. 11 Pengujian Kuat Lentur (a) Perletakan Benda Uji (b) Benda Uji Hancur



Gambar 4. 12 Contoh Grafik Hubungan Tegangan dan Regangan

Adapun cara menghitung modulus elastisitas statis yaitu menggunakan rumus sesuai ASTM C-469 sebagai berikut:

$$\sigma = \frac{PLy}{4I} \quad (4-7)$$

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (4-8)$$

Keterangan :

E : Modulus elastisitas (N/mm²)

σ_2 : 40% Tegangan runtuh (N/mm² atau MPa)

σ_1 : Tegangan pada regangan ε_1 (N/mm² atau MPa)

ε_2 : Regangan yang terjadi saat σ_2

ε_1 : Regangan sebesar 0.00005

- P : Beban maksimum (N)
 L : Jarak antar tumpuan (mm)
 y : Jarak garis netral ke serat terluar (mm)
 I : Momen inersia (mm⁴)

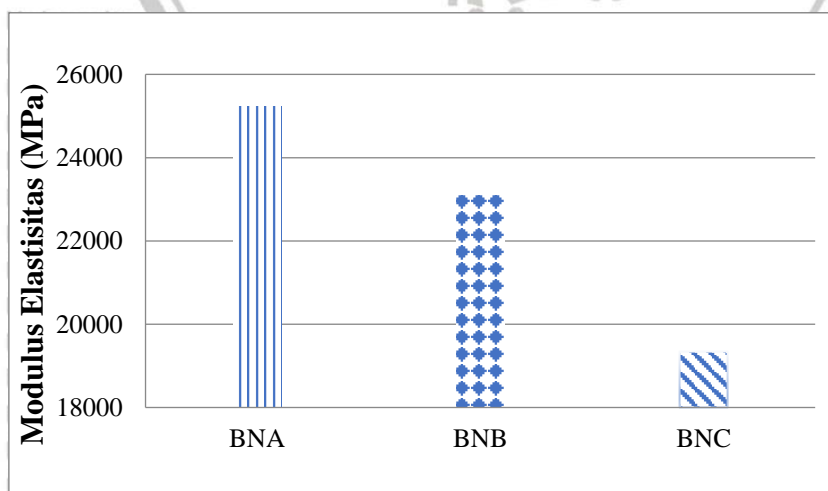
Adapun hasil nilai modulus elastisitas statis yang diperoleh dari pengujian kuat lentur terdapat di *Tabel 4.10*.

Tabel 4. 10

Hasil Modulus Elastisitas Statis berdasarkan Uji Kuat Lentur

Benda Uji	P maks (N)	σ maks (MPa)	σ_2 (MPa)	σ_1 (MPa)	ϵ_2	Modulus Elastisitas (MPa)
BNA (1 : 1,3 : 2,3)	55000	5,15625	2,0625	1,40625	0,000076	25240,385
BNB (1 : 1,6 : 2,6)	53000	4,96875	1,9875	1,28125	0,0000806	23080,0654
BNC (1 : 1,7 : 2,7)	53000	4,96875	1,9875	1,26989	0,0000871	19342,6856

Pada pengujian ini dapat diketahui bahwa besarnya nilai modulus elastisitas statis hampir sama dengan modulus elastisitas dinamis, yaitu semakin rendah dari BNA sampai BNC. Dari *Tabel 4.10* terlihat bahwa nilai beban maksimum yang diterima BNB dan BNC sama, namun modulus elastisitasnya berbeda, yaitu modulus elastisitas BNB sebesar 23080,0654 MPa sedangkan BNC sebesar 19342,6856 MPa. Hal ini dapat disebabkan karena proporsi campuran yang berbeda walaupun dengan umur serta kekuatan yang sama. Benda uji BNA memiliki nilai modulus elastisitas tertinggi yaitu 25240,385 MPa, nilai tersebut sesuai dengan kekuatan benda uji BNA dalam menahan beban yang tinggi.



Gambar 4. 13 Nilai Modulus Elastisitas Statis dari Pengujian Kuat Lentur

4.3.2.2. Perhitungan Modulus Elastisitas Statis berdasarkan SNI-2847-2019

Perhitungan modulus elastisitas statis juga terdapat dalam SNI-2847-2019 yang terdiri dari 2 rumus sebagai berikut.

(a) Beton dengan berat isi (w_c) antara 1400kg/m^3 hingga 2560kg/m^3 , nilai modulus elastisitas statis beton bisa dicari dengan formula :

$$E_c = w_c^{1,5} \cdot 0,043 \cdot \sqrt{f'_c} \quad (4-9)$$

dengan :

w_c : berat isi beton (kg/m^3)

f'_c : mutu beton (Mpa)

E_c : modulus elastisitas (Mpa)

Perhitungan ini didasarkan pada berat isi dan kuat tekan benda uji silinder dari pengujian dengan menggunakan *Compression Test Machine* (CTM) dan benda uji balok menggunakan *Hammer Test* (HT). Berikut merupakan hasil pengujian modulus elastisitas statis dengan menggunakan rumus tersebut.

Tabel 4. 11

Nilai Modulus Elastisitas Statis berdasarkan Berat Isi dan Kuat Tekan CTM

Proporsi Campuran	Kode Benda Uji	Berat	Volume	Berat Isi	f'_c	Modulus Elastisitas	Rata-rata Modulus Elastisitas	
		kg	m^3	kg/m^3				
1 : 1,3 : 2,3	BNA1	12,49	0,0053	2355,9647	30,9	27354,372	26750,534	
	BNA2	12,44		2346,5333	27,3	25558,513		
	BNA3	12,26		2312,5803	32,7	27338,716		
1 : 1,6 : 2,6	BNB2	11,82		2229,5839	27,0	23538,434		
	BNB3	11,98		2259,7644	28,6	24714,303		
	BNC1	12,22		2305,0351	26,4	24440,455		
1 : 1,7 : 2,7	BNC2	12,19		2299,3763	23,4	22943,877		23615,292
	BNC3	12,03		2269,1958	25,5	23461,544		

Tabel 4. 12

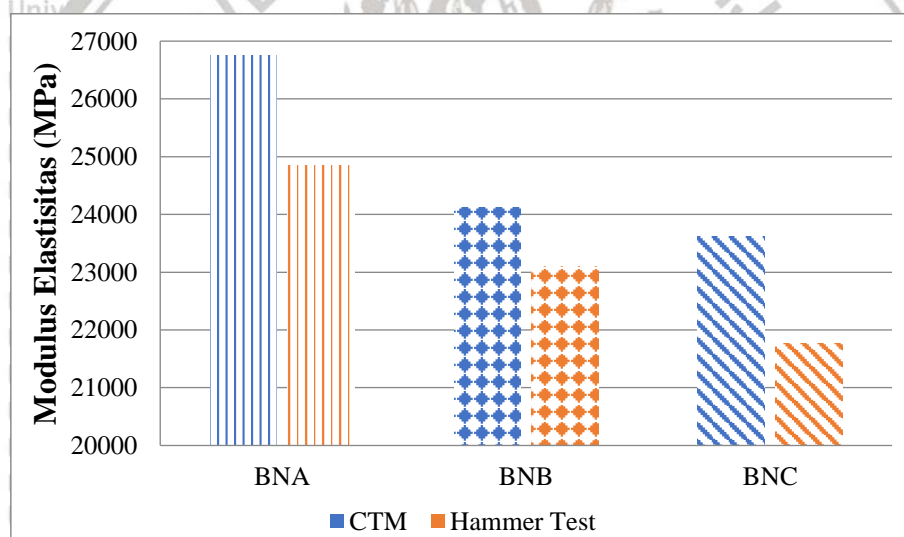
Nilai Modulus Elastisitas Statis berdasarkan Berat Isi dan Kuat Tekan HT

Proporsi Campuran	Kode Benda Uji	Berat	Volume	Berat Isi	f'_c	Modulus Elastisitas	Rata-rata Modulus Elastisitas
		kg	m^3	kg/m^3			
1 : 1,3 : 2,3	BNA	64,55	0,028	2305,36	27,0	24731,910	24845,885
					27,5	24959,859	
1 : 1,6 : 2,6	BNB	62,85	0,028	2244,64	26,0	23317,179	23090,777
					25,0	22864,375	
1 : 1,7 : 2,7	BNC	63,73	0,028	2276,07	20,5	21140,936	21766,940
					23,0	22392,945	

Dari Tabel 4.11 dan 4.12 dapat diketahui bahwa nilai modulus elastisitas statisnya sangat berbeda. Perbedaan tersebut akan diolah untuk mengetahui selisih dari keduanya. Pada Tabel 4.13 didapatkan persentase selisih nilai rata-rata modulus elastisitas statis berdasarkan SNI-2847-2019 (a) dengan kuat tekan CTM dan HT. Terlihat bahwa selisihnya mencapai 4 – 7,9%, hal ini disebabkan karena kuat tekan serta berat isi dari benda uji silinder dan benda uji balok berbeda walaupun pada proporsi campuran yang sama dan dalam satu *batch* pengecoran.

Tabel 4. 13
Persentase Selisih Nilai Modulus Elastisitas Statis berdasarkan SNI-2847-2019 (a)

Benda Uji	SNI-2847-2019	SNI-2847-2019	Persentase Selisih
	(a) CTM	(a) HT	
	Mpa	Mpa	
BNA 1 : 1,3 : 2,3	26750,534	24845,885	7,120%
BNB 1 : 1,6 : 2,6	24126,368	23090,777	4,292%
BNC 1 : 1,7 : 2,7	23615,292	21766,940	7,827%



Gambar 4. 14 Nilai Modulus Elastisitas Statis berdasarkan SNI-2847-2019 (a)

(b) Beton normal, nilai modulus elastisitas statis beton dapat dicari dengan formula :

$$E_c = 4700 \cdot \sqrt{f_c} \quad (4-10)$$

dengan :

f_c : mutu beton (Mpa)

E_c : modulus elastisitas (Mpa)

Adapun hasil pengujian modulus elastisitas statis dengan menggunakan rumus di atas ditampilkan pada *Tabel 4.14*.

Tabel 4. 14
Nilai Modulus Elastisitas Statis berdasarkan Kuat Tekan CTM

Proporsi Campuran	Kode Benda Uji	f_c Mpa	Modulus Elastisitas Mpa	Rata-rata Modulus Elastisitas Mpa
1 : 1,3 : 2,3	BNA1	30,9	26145,862	25864,102
	BNA2	27,3	24576,775	
	BNA3	32,7	26869,667	
1 : 1,6 : 2,6	BNB2	27,0	24438,314	24792,565
	BNB3	28,6	25146,817	
	BNC1	26,4	24139,172	
1 : 1,7 : 2,7	BNC2	23,4	22744,748	23535,793
	BNC3	25,5	23723,460	

Tabel 4. 15
Nilai Modulus Elastisitas Statis berdasarkan Kuat Tekan HT

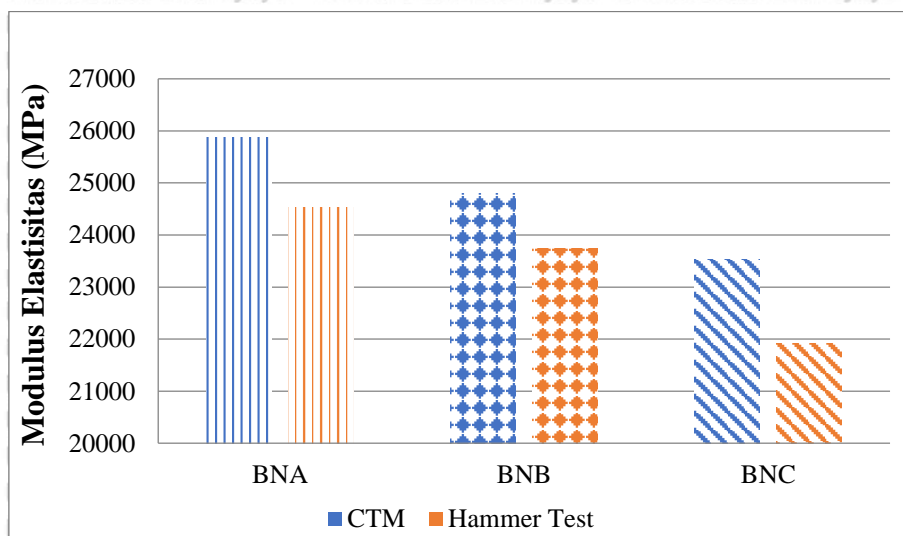
Proporsi Campuran	Kode Benda Uji	f_c Mpa	Modulus Elastisitas Mpa	Rata-rata Modulus Elastisitas Mpa
1 : 1,3 : 2,3	BNA	27,0	24421,916	24534,462
		27,5	24647,008	
1 : 1,6 : 2,6	BNB	26,0	23965,392	23732,696
		25,0	23500,000	
1 : 1,7 : 2,7	BNC	20,5	21280,155	21910,282
		23,0	22540,408	

Nilai modulus elastisitas statis dengan rumus (4-10) juga memiliki perbedaan antara hasil dari CTM dan HT. Perhitungan ini hanya didasarkan pada kuat tekan beton saja, dimana untuk kuat tekan CTM dari masing-masing benda uji lebih tinggi daripada kuat tekan HT. Sehingga nilai modulus elastisitas statis dengan kuat tekan CTM untuk masing-masing benda uji juga lebih tinggi dibandingkan modulus elastisitas statis dengan kuat tekan HT.

Selisih pada perhitungan dengan rumus ini mencapai 4-7% lebih rendah dibandingkan rumus SNI-2847-2019 (a). Persentase selisih nilai rata-rata modulus elastisitas statis berdasarkan SNI-2847-2019 (b) dengan kuat tekan CTM dan HT dapat ditampilkan pada *Tabel 4.16*.

Tabel 4. 16
 Persentase Selisih Nilai Modulus Elastisitas Statis berdasarkan SNI-2847-2019 (b)

Benda Uji	SNI-2847-2019		Persentase Selisih
	(b) CTM Mpa	(b) HT Mpa	
BNA 1 : 1,3 : 2,3	25864,102	24534,462	5,141%
BNB 1 : 1,6 : 2,6	24792,565	23732,696	4,275%
BNC 1 : 1,7 : 2,7	23535,793	21910,282	6,907%



Gambar 4. 15 Nilai Modulus Elastisitas Statis berdasarkan SNI-2847-2019 (b)

4.4. Hubungan antara Proporsi Campuran Beton dengan Modulus Elastisitas

Pembahasan pada sub-bab sebelumnya menunjukkan bahwa dari variasi proporsi campuran yang digunakan menghasilkan kuat tekan yang berbeda-beda, baik dengan pengujian dengan *Compression Test Machine* (CTM) maupun *Hammer Test* (HT). Berikut merupakan hubungan antara modulus elastisitas dengan kuat tekan.

Tabel 4. 17
 Nilai Modulus Elastisitas Dinamis dan Statis

Benda Uji	Modulus Elastisitas Dinamis (Mpa)	Modulus Elastisitas Statis (Mpa)				Uji Kuat Lentur
		SNI-2847-2019 (a)		SNI-2847-2019 (b)		
		CTM	HT	CTM	HT	
BNA 1 : 1,3 : 2,3	27612,016	26750,534	24845,885	25864,102	24534,462	25240,385
BNB 1 : 1,6 : 2,6	24910,023	24126,368	23090,777	24792,565	23732,696	23080,065
BNC 1 : 1,7 : 2,7	23728,900	23615,292	21766,940	23535,793	21910,282	19342,686

Keterangan :

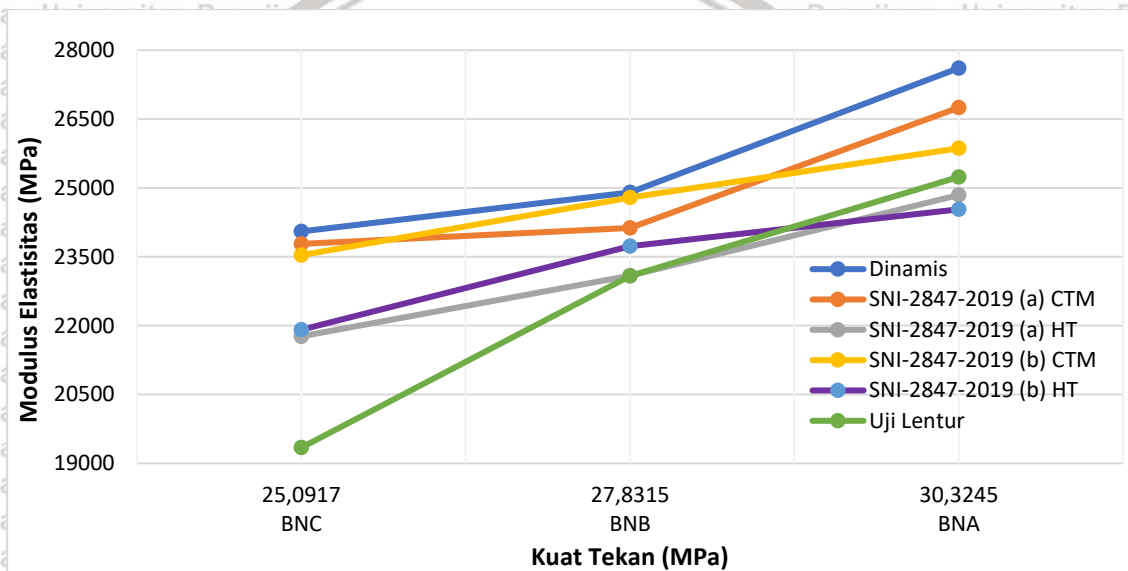
SNI-2847-2019 (a) : $E_c = w_c^{1,5} \cdot 0,043 \cdot \sqrt{f_c}$

SNI-2847-2019 (b) : $E_c = 4700 \cdot \sqrt{f_c}$

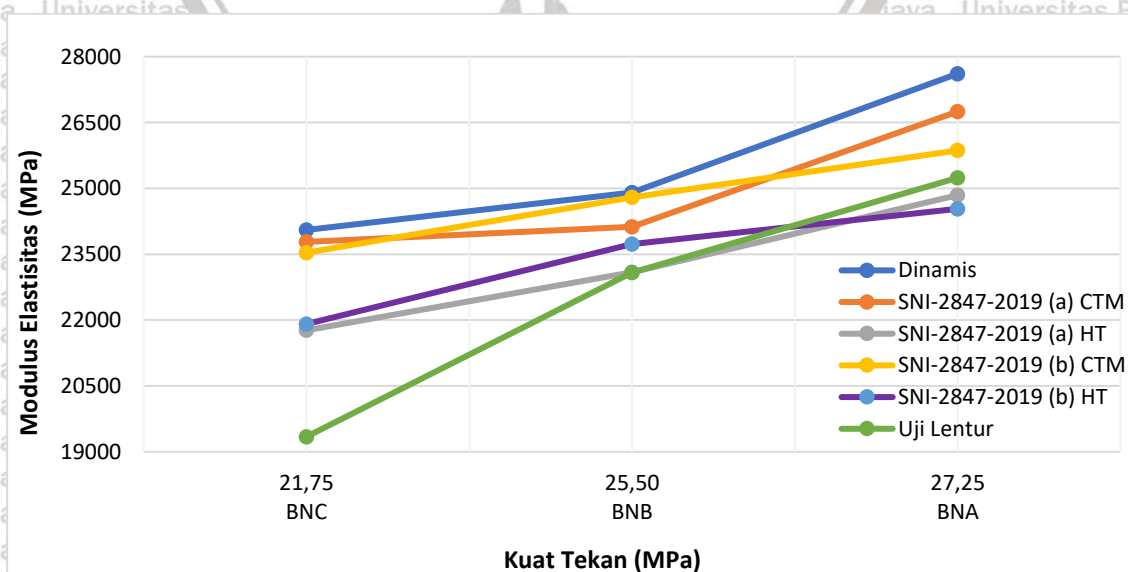
CTM : Kuat tekan dari pengujian *Compression Test Machine*

HT : Kuat tekan dari pengujian *Hammer Test*

Modulus elastisitas pada *Tabel 4.17* merupakan perhitungan dengan berbagai cara baik secara dinamis maupun statis. Dapat dilihat bahwa nilai modulus elastisitas berbeda-beda untuk setiap proporsi campuran. Modulus elastisitas suatu bahan sangat erat hubungannya dengan kekuatan bahan dalam menerima beban. Modulus elastisitas beton yang tinggi menunjukkan kekuatan beton untuk menahan beban yang besar.



Gambar 4. 16 Grafik Hubungan Modulus Elastisitas dengan Kuat Tekan CTM



Gambar 4. 17 Grafik Hubungan Modulus Elastisitas dengan Kuat Tekan HT

Dari *Gambar 4.17* dan *4.18* terlihat jelas bahwa semakin tinggi kuat tekan dari beton maka semakin tinggi pula nilai modulus elastisitasnya. Pada pengujian ini, nilai modulus elastisitas tertinggi hingga terendah berturut-turut adalah BNA sekitar 24500 – 27700 MPa, BNB sekitar 23000 – 25000 MPa, dan BNC sekitar 19300 – 23800 MPa.

4.5. Hubungan antara Modulus Elastisitas Dinamis dan Statis

Modulus elastisitas dinamis diperoleh dari pengujian NDT sedangkan modulus elastisitas statis diperoleh dari pengujian DT. Untuk mengetahui hubungan antara keduanya maka dilakukan analisis korelasi. Pada penelitian ini digunakan analisis korelasi linier sederhana sebab hanya terdapat dua variabel. Derajat hubungan antara kedua variabel tersebut dinyatakan dalam koefisien korelasi (r) dan besarnya pengaruh nilai suatu variabel (variabel X) terhadap naik/turunnya nilai variabel lainnya (variabel Y) dapat dilihat dari koefisien determinasinya (R^2).

4.5.1. Modulus Elastisitas Dinamis dengan Modulus Elastisitas Statis berdasarkan Uji Kuat Lentur

Uji Kuat Lentur

Dari data-data yang didapatkan, kemudian rata-rata nilai modulus elastisitas untuk setiap benda uji dicari korelasi antara modulus elastisitas dinamis (E_d) dengan modulus elastisitas statis (E_c) berdasarkan uji kuat lentur. Perbandingan antar keduanya disajikan di *Tabel 4.18*.

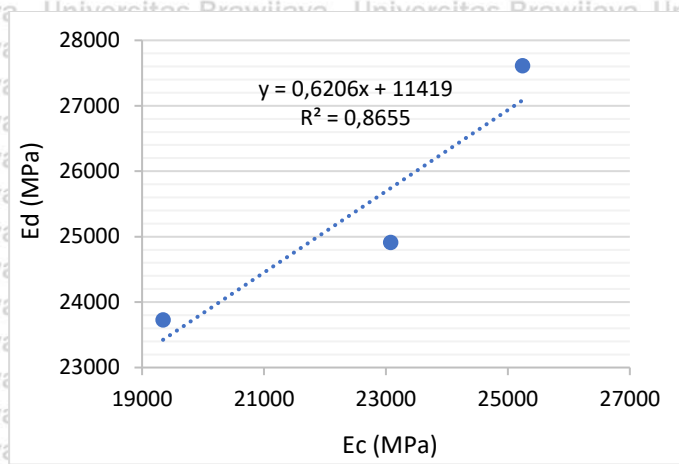
Tabel 4. 18

Nilai Modulus Elastisitas Dinamis dan Statis berdasarkan Uji Kuat Lentur

Benda Uji	Modulus Elastisitas Dinamis Mpa	Modulus Elastisitas Statis Mpa	Persentase Selisih	Koefisien Korelasi (r)
BNA 1 : 1,3 : 2,3	27612,016	25240,385	8,589%	0,9303
BNB 1 : 1,6 : 2,6	24910,023	23080,065	7,346%	
BNC 1 : 1,7 : 2,7	23728,900	19342,686	18,485%	

Nilai modulus elastisitas dinamis yang ditentukan dari pengukuran cepat rambat gelombang lebih tinggi dari nilai modulus elastisitas statis yang didasarkan atas perbandingan ketahanan beton dalam menahan beban terhadap deformasinya. Selisih antara kedua hasil tersebut terpaut cukup jauh sebesar 7,3% - 18,5% dengan koefisien korelasi sebesar 0,9303 yang menyatakan hubungan keeratannya sangat kuat. Pada *Gambar 4.18* didapatkan hubungan antara nilai modulus elastisitas dinamis dan statis berdasarkan uji kuat lentur. Dari gambar tersebut diperoleh korelasi positif yang ditunjukkan oleh garis lurus yang

condong ke kanan dan koefisien determinasi R^2 sebesar 0,8655 artinya modulus elastisitas dinamis 86,55% ditentukan oleh modulus elastisitas statis berdasarkan uji kuat lentur, dan sisanya ditentukan oleh faktor lain. Persamaan antara modulus elastisitas dinamis dan statis berdasarkan uji kuat lentur adalah $E_d = 0,6206 E_c + 11419$.



Gambar 4.18 Hubungan antara Modulus Elastisitas Dinamis dengan Modulus Elastisitas Statis berdasarkan Uji Kuat Lentur

4.5.2. Modulus Elastisitas Dinamis dengan Modulus Elastisitas Statis berdasarkan SNI-2847-2019 (a) CTM

Dari data-data yang didapatkan, kemudian rata-rata nilai modulus elastisitas untuk setiap benda uji dicari korelasi antara modulus elastisitas dinamis (E_d) dengan modulus elastisitas statis (E_c) berdasarkan SNI-2847-2019 (a) dengan kuat tekan Compression Test Machine (CTM). Perbandingan antara kedua hasil tersebut disajikan di *Tabel 4.19*.

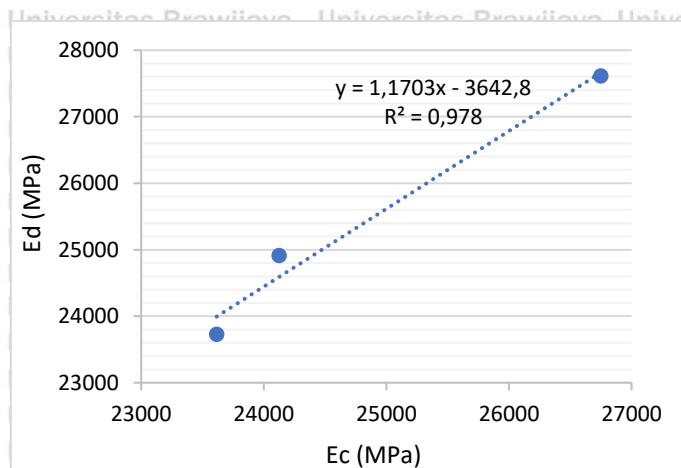
Tabel 4.19

Nilai Modulus Elastisitas Dinamis dan Statis berdasarkan SNI-2847-2019 (a) CTM

Benda Uji	Modulus Elastisitas Dinamis	Modulus Elastisitas Statis	Persentase Selisih	Koefisien Korelasi (r)
	Mpa	Mpa		
BNA 1 : 1,3 : 2,3	27612,016	26750,534	3,120%	0,9890
BNB 1 : 1,6 : 2,6	24910,023	24126,368	3,146%	
BNC 1 : 1,7 : 2,7	23728,900	23615,292	0,479%	

Nilai modulus elastisitas dinamis yang ditentukan dari pengukuran cepat rambat gelombang lebih tinggi dari nilai modulus elastisitas statis yang didasarkan atas perhitungan menggunakan rumus yang terdapat dalam SNI-2847-2019 ($E_c = w_c^{1,5} \cdot 0,043 \cdot \sqrt{f_c}$) dengan berat isi dan kuat tekan CTM benda uji silinder. Selisih antara kedua hasil tersebut hanya sebesar 0,5% - 3,15%. Kasus ini sering terjadi karena sifat elastis suatu bangunan yang telah berdiri tidak dapat diukur secara langsung tanpa merusak struktur tersebut, sehingga nilai modulus elastisitas statis disimpulkan dari kuat tekan dari sampel silinder. Koefisien korelasi

antara keduanya sebesar 0,9890 yang menyatakan hubungan keeratannya sangat kuat. Pada Gambar 4.19 didapatkan hubungan antara nilai modulus elastisitas dinamis dan statis berdasarkan SNI-2847-2019 (a) CTM. Dari gambar tersebut diperoleh korelasi positif yang ditunjukkan oleh garis lurus yang condong ke kanan dan koefisien determinasi R^2 sebesar 0,978 artinya modulus elastisitas dinamis 97,8% ditentukan oleh modulus elastisitas statis berdasarkan SNI-2847-2019 (a) CTM, dan sisanya ditentukan oleh faktor lain. Persamaan antara modulus elastisitas dinamis dan statis berdasarkan SNI-2847-2019 (a) CTM adalah $E_d = 1,1703 E_c - 3642,8$.



Gambar 4. 19 Hubungan antara Modulus Elastisitas Dinamis dengan Modulus Elastisitas Statis berdasarkan SNI-2847-2019 (a) CTM

4.5.3. Modulus Elastisitas Dinamis dengan Modulus Elastisitas Statis berdasarkan SNI-2847-2019 (a) HT

Dari data-data yang didapatkan, kemudian rata-rata nilai modulus elastisitas untuk setiap benda uji dicari korelasi antara modulus elastisitas dinamis (E_d) dengan modulus elastisitas statis (E_c) berdasarkan SNI-2847-2019 (a) dengan kuat tekan hammer test (HT). Perbandingan antara kedua hasil tersebut disajikan di Tabel 4.20.

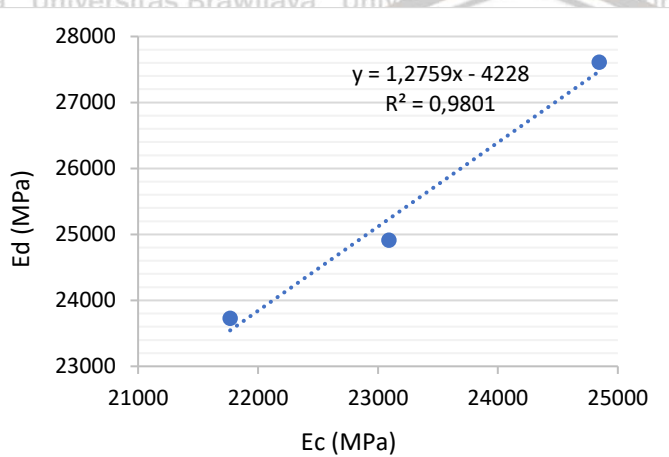
Tabel 4. 20

Nilai Modulus Elastisitas Dinamis dan Statis berdasarkan SNI-2847-2019 (a) HT

Benda Uji	Modulus Elastisitas Dinamis Mpa	Modulus Elastisitas Statis Mpa	Persentase Selisih	Koefisien Korelasi (r)
BNA 1 : 1,3 : 2,3	27612,016	24845,885	10,018%	0,990
BNB 1 : 1,6 : 2,6	24910,023	23090,777	7,303%	
BNC 1 : 1,7 : 2,7	23728,900	21766,940	8,268%	

Nilai modulus elastisitas dinamis yang ditentukan dari pengukuran cepat rambat gelombang lebih tinggi dari nilai modulus elastisitas statis yang didasarkan atas perhitungan

menggunakan rumus yang terdapat dalam SNI-2847-2019 ($E_c = w_c^{1,5} \cdot 0,043 \cdot \sqrt{f'_c}$) dengan berat isi dan kuat tekan dari pengujian *Hammer* benda uji balok. Selisih antara kedua hasil tersebut terpaut cukup jauh yaitu sebesar 7,3% - 10% dengan koefisien korelasi sebesar 0,990 yang menyatakan hubungan keeratannya sangat kuat. Pada *Gambar 4.20* didapatkan hubungan antara nilai modulus elastisitas dinamis dan statis berdasarkan SNI-2847-2019 (a) HT. Dari gambar tersebut diperoleh korelasi positif yang ditunjukkan oleh garis lurus yang condong ke kanan dan koefisien determinasi R^2 sebesar 0,9801 artinya modulus elastisitas dinamis 98,01% ditentukan oleh modulus elastisitas statis berdasarkan SNI-2847-2019 (a) HT, dan sisanya ditentukan oleh faktor lain. Persamaan antara modulus elastisitas dinamis dan statis berdasarkan SNI-2847-2019 (a) HT adalah $E_d = 1,2759 E_c - 4228$.



Gambar 4. 20 Hubungan antara Modulus Elastisitas Dinamis dengan Modulus Elastisitas Statis berdasarkan SNI-2847-2019 (a) HT

4.5.4. Modulus Elastisitas Dinamis dengan Modulus Elastisitas Statis berdasarkan SNI-2847-2019 (b) CTM

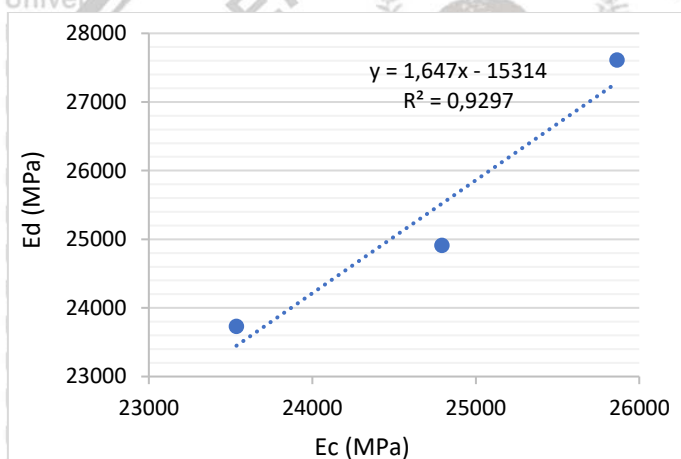
Dari data-data yang didapatkan, kemudian rata-rata nilai modulus elastisitas untuk setiap benda uji dicari korelasi antara modulus elastisitas dinamis (E_d) dengan modulus elastisitas statis (E_c) berdasarkan SNI-2847-2019 (b) dengan kuat tekan Compression Test Machine (CTM). Perbandingan antara kedua hasil tersebut disajikan pada *Tabel 4.21*.

Tabel 4. 21

Nilai Modulus Elastisitas Dinamis dan Statis berdasarkan SNI-2847-2019 (b) CTM

Benda Uji	Modulus Elastisitas Dinamis Mpa	Modulus Elastisitas Statis Mpa	Persentase Selisih	Koefisien Korelasi (r)
BNA 1 : 1,3 : 2,3	27612,016	25864,102	6,330%	
BNB 1 : 1,6 : 2,6	24910,023	24792,565	0,472%	0,9642
BNC 1 : 1,7 : 2,7	23728,900	23535,793	0,814%	

Nilai modulus elastisitas dinamis yang ditentukan dari pengukuran cepat rambat gelombang lebih tinggi dari modulus elastisitas statis yang didasarkan atas perhitungan menggunakan rumus yang terdapat dalam SNI-2847-2019 ($E_c = 4700 \cdot \sqrt{f'_c}$) dengan kuat tekan CTM benda uji silinder. Selisih antara kedua hasil tersebut hanya sebesar 0,4% - 6,3%. Kasus ini juga sering terjadi, nilai modulus elastisitas statis disimpulkan dari perhitungan teori tersebut dengan menggunakan kuat tekan dari sampel silinder. Koefisien korelasi antar keduanya sebesar 0,9642 yang menyatakan hubungan keeratannya sangat kuat. Pada Gambar 4.21 didapatkan hubungan antara nilai modulus elastisitas dinamis dan statis berdasarkan SNI-2847-2019 (b) CTM. Dari gambar tersebut diperoleh korelasi positif yang ditunjukkan oleh garis lurus yang condong ke kanan dan koefisien determinasi R^2 sebesar 0,9297 artinya modulus elastisitas dinamis 92,97% ditentukan oleh modulus elastisitas statis berdasarkan SNI-2847-2019 (b) CTM, dan sisanya ditentukan oleh faktor lain. Persamaan antara modulus elastisitas dinamis dan statis berdasarkan SNI-2847-2019 (b) CTM adalah $E_d = 1,647 E_c - 15314$.



Gambar 4. 21 Hubungan antara Modulus Elastisitas Dinamis dengan Modulus Elastisitas Statis berdasarkan SNI-2847-2019 (b) CTM

4.5.5. Modulus Elastisitas Dinamis dengan Modulus Elastisitas Statis berdasarkan SNI-2847-2019 (b) HT

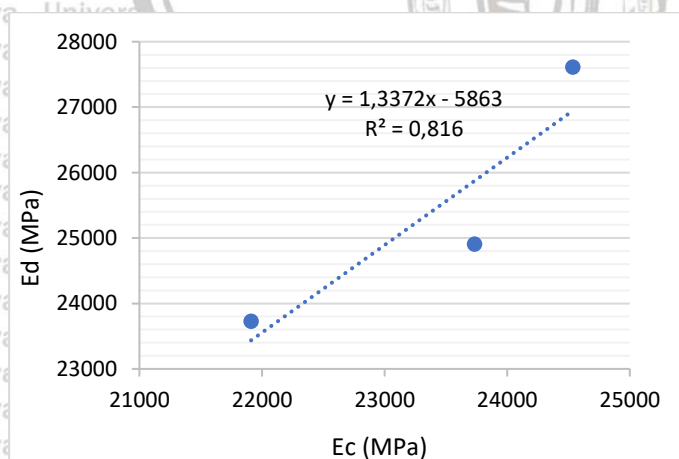
Dari data-data yang didapatkan, kemudian rata-rata nilai modulus elastisitas untuk setiap benda uji dicari korelasi antara modulus elastisitas dinamis (E_d) dengan modulus elastisitas statis (E_c) berdasarkan SNI-2847-2019 (b) dengan kuat tekan hammer test (HT). Perbandingan antara kedua hasil tersebut disajikan di Tabel 4.22.

Tabel 4. 22

Nilai Modulus Elastisitas Dinamis dan Statis berdasarkan SNI-2847-2019 (b) HT

Benda Uji	Modulus Elastisitas	Modulus	Persentase	Koefisien
	Dinamis	Elastisitas Statis		
	Mpa	Mpa	Selisih	Korelasi (r)
BNA 1 : 1,3 : 2,3	27612,016	24534,462	11,146%	0,9034
BNB 1 : 1,6 : 2,6	24910,023	23732,696	4,726%	
BNC 1 : 1,7 : 2,7	23728,900	21910,282	7,664%	

Nilai modulus elastisitas dinamis yang ditentukan dari pengukuran cepat rambat gelombang lebih tinggi dari nilai modulus elastisitas statis yang didasarkan atas perhitungan menggunakan rumus yang terdapat dalam SNI-2847-2019 ($E_c = 4700 \cdot \sqrt{f_c}$) dengan kuat tekan dari pengujian *Hammer* benda uji balok. Selisih antara kedua hasil tersebut terpaut cukup jauh yaitu sebesar 4,7% - 11,1% dengan koefisien korelasi sebesar 0,9034 yang menyatakan hubungan keeratannya sangat kuat. Pada *Gambar 4.22* didapatkan hubungan antara nilai modulus elastisitas dinamis dan statis berdasarkan SNI-2847-2019 (b) HT. Dari gambar tersebut diperoleh korelasi positif yang ditunjukkan oleh garis lurus yang condong ke kanan dan koefisien determinasi R^2 sebesar 0,816 artinya modulus elastisitas dinamis 81,6% ditentukan oleh modulus elastisitas statis berdasarkan SNI-2847-2019 (b) HT, dan sisanya ditentukan oleh faktor lain. Persamaan antara modulus elastisitas dinamis dan statis berdasarkan SNI-2847-2019 (b) HT adalah $E_d = 1,3372 E_c - 5863$.



Gambar 4. 22 Hubungan antara Modulus Elastisitas Dinamis dengan Modulus Elastisitas Statis berdasarkan SNI-2847-2019 (b) HT

4.5.6. Gabungan Hubungan Modulus Elastisitas Dinamis dan Statis

Setelah mendapatkan korelasi nilai modulus elastisitas dinamis dan statis, kemudian data-data tersebut digabungkan. Dari hubungan nilai modulus elastisitas dinamis dan statis

didapatkan persamaan yaitu $E_d = a \times E_c + b$. Gabungan persamaan tersebut disajikan pada Tabel 4.23.

Tabel 4. 23

Persamaan Hubungan Modulus Elastisitas Dinamis dan Modulus Elastisitas Statis

Modulus Elastisitas Statis	Persamaan	r	R ²
Uji Kuat Lentur	$E_d = 0,6206 E_c + 11419$	0,9303	0,8655
SNI-2847-2019 (a) CTM	$E_d = 1,1703 E_c - 3642,8$	0,9890	0,978
SNI-2847-2019 (a) HT	$E_d = 1,2759 E_c - 4228$	0,9900	0,9801
SNI-2847-2019 (b) CTM	$E_d = 1,647 E_c - 15314$	0,9642	0,9297
SNI-2847-2019 (b) HT	$E_d = 1,3372 E_c - 5863$	0,9034	0,816

Pada penelitian ini diperoleh nilai modulus elastisitas dinamis yang diperoleh dari pengujian NDT lebih besar hingga 18,5% dari modulus elastisitas statis. Hal ini dikarenakan perhitungan modulus elastisitas dinamis ditentukan dari pengukuran cepat rambat gelombang. Nilai cepat rambat gelombang tersebut dipengaruhi oleh homogenitas beton (Lee *et.al*,2017). Penelitian ini memiliki kesesuaian hasil dengan studi yang dilakukan oleh Rahmayanti,N (2018) dan Lee *et.al* (2017). Rahmayanti,N (2018) melakukan pengujian pengaruh penggunaan limbah abu sekam padi dan *viscocrete* 1003 terhadap kualitas beton normal dengan UPV *test*, dimana salah satu kualitas yang diuji adalah modulus elastisitas. Modulus elastisitas dinamis yang dihasilkan lebih besar 39%-45% daripada modulus elastisitas statis. Sedangkan Lee *et.al* (2017) melakukan evaluasi modulus elastisitas dinamis beton menggunakan pengukuran kecepatan gelombang geser. Lee *et.al* melakukan 4 metode untuk mencari nilai modulus elastisitas dinamis, yaitu menggunakan cepat rambat *S-wave* ($E_{d,s}$), cepat rambat *P-Wave* ($E_{d,p}$), frekuensi resonansi longitudinal ($E_{d,LR}$), dan frekuensi resonansi transversal ($E_{d,TR}$). Dari keempat nilai modulus elastisitas dinamis tersebut menunjukkan hasil yang lebih besar dari modulus elastisitas statis. Rasio antara modulus elastisitas statis dan dinamis antara lain rata-rata $E_c / E_{d,LR}$ (atau $E_c / E_{d,TR}$) adalah 0,72, rata-rata $E_c / E_{d,p}$ adalah 0,56, rata-rata $E_c / E_{d,s}$ adalah 0,87.

BAB V

PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan pada bab sebelumnya, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Dari ketiga benda uji dengan variasi proporsi campuran menghasilkan nilai kuat tekan yang berbeda. Pengujian kuat tekan dilakukan dengan bantuan alat *Compression Test Machine* (CTM) dan *Rebound Hammer*. Hasil dari kedua pengujian tersebut menunjukkan bahwa benda uji BNA dengan proporsi campuran 1 : 1,3 : 2,3 mempunyai kuat tekan tertinggi dibandingkan benda uji yang lain. Untuk benda uji BNB dengan proporsi campuran 1 : 1,6 : 2,6 mempunyai kuat tekan di antara benda uji BNA dan BNC. Sedangkan benda uji BNC dengan proporsi 1 : 1,7 : 2,7 memiliki kuat tekan terendah. Setelah dilakukan pengujian kuat tekan, dilanjutkan pengujian modulus elastisitas dengan menggunakan metode *Non Destructive Test* (NDT). Dengan variasi proporsi campuran tersebut juga menghasilkan nilai modulus elastisitas yang berbeda. Nilai modulus elastisitas menggunakan metode *Non Destructive Test* (NDT) dari tertinggi hingga terendah secara berturut-turut ialah benda uji BNA sebesar 27612,016 MPa, BNB sebesar 24910,023 MPa, dan BNC sebesar 23728,9 MPa. Hasil tersebut menunjukkan adanya pengaruh variasi proporsi campuran beton terhadap modulus elastisitas dengan menggunakan metode *Non Destructive Test* (NDT). Hal ini juga membuktikan hipotesis awal bahwa semakin tinggi kuat tekan beton maka semakin tinggi pula modulus elastisitasnya.
2. Dari hasil analisis korelasi, didapatkan persamaan hubungan antara nilai modulus elastisitas dinamis yang didapatkan dari pengujian NDT dan modulus elastisitas statis. Modulus elastisitas statis dalam penelitian ini diperoleh dari pengujian kuat lentur benda uji balok, dan juga menggunakan rumus yang tercantum dalam SNI-2847-2019 berdasarkan berat isi dan kuat tekan hasil dari CTM dan *Hammer Test*. Nilai koefisien korelasi (r) yang dihasilkan dari kelima hubungan tersebut sangat kuat yaitu 0,9034 – 0,99 dan nilai koefisien determinasinya (R^2) yaitu 0,816-0,9801 yang menggambarkan adanya hubungan erat antar keduanya. Pada penelitian ini diperoleh nilai modulus dinamis lebih besar hingga 18,5% dari modulus elastisitas statis. Hal ini dikarenakan

modulus elastisitas dinamis ditentukan dari pengukuran cepat rambat gelombang, dimana cepat rambat gelombang tersebut dipengaruhi oleh homogenitas beton.

5.2. Saran

Selesainya dilaksanakan penelitian di laboratorium serta mengolah data hasil pengujian, terdapat beberapa saran yang dapat digunakan penelitian selanjutnya, yaitu :

1. Perlu adanya penambahan jumlah benda uji pada masing-masing proporsi campuran agar dapat memperkecil peluang terjadinya data yang menyimpang.
2. Diperlukan kestabilan *transducer* dan banyaknya *gel* yang digunakan pada saat pengujian agar cepat rambat gelombang dapat terbaca dengan baik.
3. Perlu dilakukan pengujian *non destructive test* (NDT) pada benda uji silinder agar data yang didapatkan lebih banyak.
4. Perlu dilakukan pemasangan *strain gauge* yang benar agar regangan yang dihasilkan juga baik, serta sebelum pengujian berlangsung sebaiknya memastikan terlebih dahulu nilai regangan awal yang terlihat pada alat *strain meter*.
5. Dapat dilakukan penelitian pengaruh variasi agregat pada proporsi campuran yang sama terhadap modulus elastisitas beton.

DAFTAR PUSTAKA

- ASTM C 469-02. *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*. United States : Association of Standard Testing Materials.
- Carillo, J., Ramirez, J. & Lizarazo Marriaga, J. 2019. *Modulus of elasticity and Poisson's ratio of fiber-reinforced concrete in Colombia from ultrasonic pulse velocities*. *Journal of Building Engineering* 23 (2019) 18-26.
- Carino, N.J. & Malhora, V.M. 2004. *Handbook On Nondestructive Testing of Concrete*. Boca Raton: RCR Press.
- Departemen Pekerjaan Umum. 2019. *SNI 03-2847 Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Fitri, Fatimah Azzahra., Arifi, Eva. & Simatupang, Roland Martin. (2018). *Analisis Modulus Elastisitas Beton dengan menggunakan Alat PUNDIT PL-200*. *Jurnal Mahasiswa Jurusan Teknik Sipil Universitas Brawijaya*. Malang: Universitas Brawijaya.
- Lee, B.J., Kee, S.H., Oh, T. & Kim. Y.Y. 2017. *Evaluating the Dynamic Elastic Modulus of Concrete using Shear-Wave Velocity Measurements*. Hindawi: *Advances in Materials Science and Engineering* Vol.17
- PROCEQ. 2014. *Pundit PL-200 and PE Ultrasonic Training*. Switzerland: Proceq.
- PROCEQ. 2015. *Pundit Operating Instructions*. Switzerland: Proceq.
- Rahmayanti, Novi. 2018. *Pengaruh Penggunaan Limbah Abu Sekam Padi dan Viscocrete 1003 terhadap Kualitas Beton Normal dengan UPV Test*. *Teras Jurnal*. Yogyakarta: Universitas Islam Indonesia
- Sugiyono. 2006. *Metode Penelitian Pendidikan Kuantitatif, Kualitatif dan R&D*. Bandung: Alfabeta



Universitas Brawijaya Universitas Brawijaya Universitas Brawijaya Universitas Brawijaya Universitas Brawijaya

(halaman ini sengaja dikosongkan)



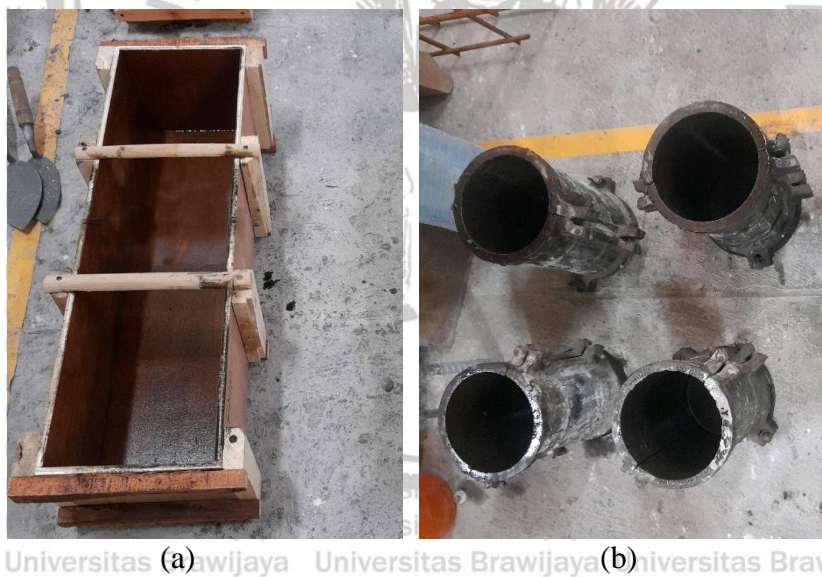
Universitas Brawijaya Universitas Brawijaya Universitas Brawijaya Universitas Brawijaya Universitas Brawijaya

LAMPIRAN

Lampiran 1 Pembuatan Benda Uji



Gambar 1. Persiapan benda uji dengan menimbang bahan campuran beton (a) Kerikil; (b) Pasir (c) Semen



Gambar 2. Persiapan bekisting / cetakan dengan mengolesi oli pada bagian dalam (a) Balok (b) Silinder



(a) (b)

Gambar 3. (a) Pengadukan beton menggunakan *concrete mixer*; (b) Pengujian *slump*



(a) (b)

Gambar 4. Pemasakan beton (a) Benda uji balok dengan *vibrator* (b) Benda uji silinder dengan tongkat penusuk



(a) (b)

Gambar 5. Benda uji pada (a) bekisting balok (b) cetakan silinder



Gambar 6. Pelepasan bekisting setelah beton berumur 24 jam



(a)

(b)

Gambar 7. Perawatan benda uji (a) balok (b) silinder

Lampiran 2 Pengujian Kuat Tekan



(a)

(b)

Gambar 8. Persiapan pengujian kuat tekan (a) menimbang benda uji silinder (b) *caping* benda uji silinder



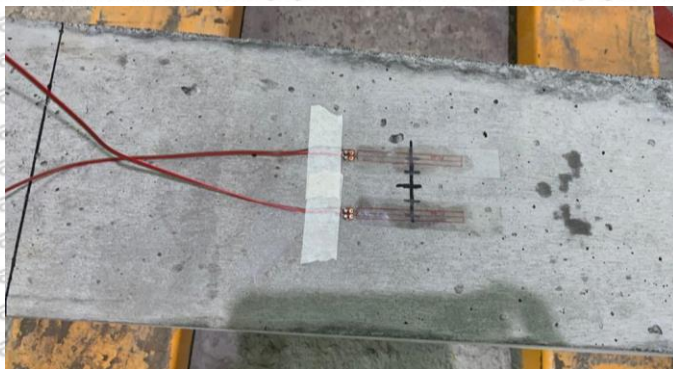
Gambar 9. Pengujian kuat tekan menggunakan (a) *Rebound Schmidt Hammer* pada benda uji balok (b) *Compression Test Machine* (CTM) pada benda uji silinder

Lampiran 3 Pengujian Modulus Elastisitas Dinamis



Gambar 10. Pengujian modulus elastisitas dinamis menggunakan *transducer* (a) *P-wave* (b) *S-wave*

Lampiran 4 Pengujian Kuat Lentur



Gambar 11. Pemasangan *strain gauge* beton pada benda uji balok



Gambar 21. Peletakan benda uji pada tumpuan yang telah disiapkan



Gambar 21. Kondisi balok saat menerima beban maksimum

Lampiran 5 Tabel Modulus Elastisitas Statis berdasarkan Uji Kuat Lentur

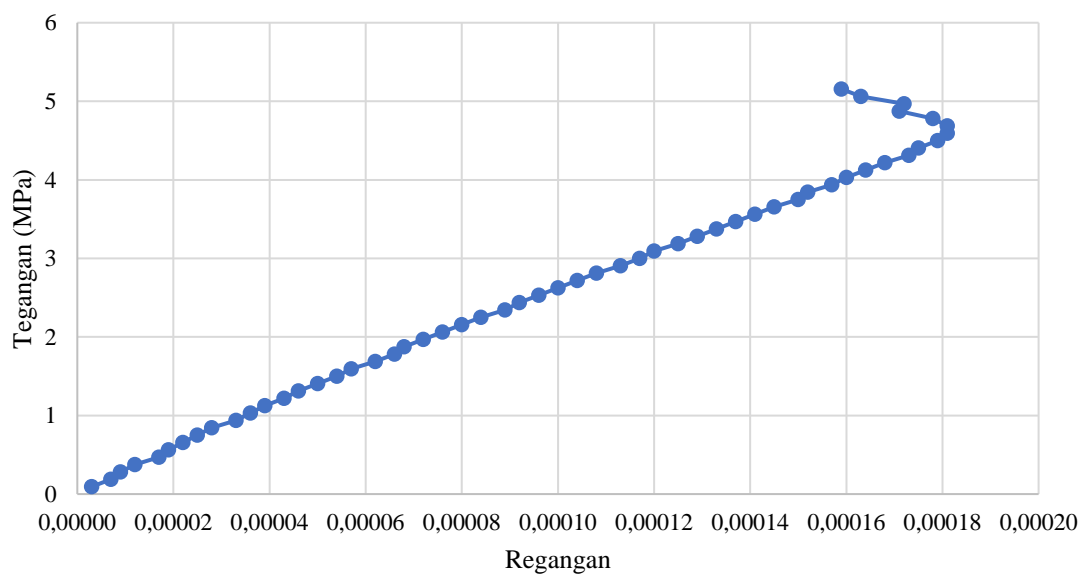
a. Benda Uji BNA

b =	200	mm
h =	200	mm
L =	500	mm
I =	133333333,3	mm ⁴
y =	100	mm

Beban (N)	Tegangan (MPa)		Regangan	σ/ϵ (Mpa)
	PLy/4I			
1000	0,09375		0,000003	31250
2000	0,1875		0,000007	26785,71429
3000	0,28125		0,000009	31250
4000	0,375		0,000012	31250
5000	0,46875		0,000017	27573,52941
6000	0,5625		0,000019	29605,26316
7000	0,65625		0,000022	29829,54545
8000	0,75		0,000025	30000
9000	0,84375		0,000028	30133,92857
10000	0,9375		0,000033	28409,09091
11000	1,03125		0,000036	28645,83333
12000	1,125		0,000039	28846,15385
13000	1,21875		0,000043	28343,02326
14000	1,3125		0,000046	28532,6087
15000	1,40625		0,000050	28125
16000	1,5		0,000054	27777,77778
17000	1,59375		0,000057	27960,52632
18000	1,6875		0,000062	27217,74194
19000	1,78125		0,000066	26988,63636
20000	1,875		0,000068	27573,52941
21000	1,96875		0,000072	27343,75
22000	2,0625		0,000076	27138,15789
23000	2,15625		0,000080	26953,125
24000	2,25		0,000084	26785,71429
25000	2,34375		0,000089	26334,26966
26000	2,4375		0,000092	26494,56522
27000	2,53125		0,000096	26367,1875
28000	2,625		0,000100	26250
29000	2,71875		0,000104	26141,82692
30000	2,8125		0,000108	26041,66667
31000	2,90625		0,000113	25719,02655
32000	3		0,000117	25641,02564

33000	3,09375	0,000120	25781,25
34000	3,1875	0,000125	25500
35000	3,28125	0,000129	25436,04651
36000	3,375	0,000133	25375,93985
37000	3,46875	0,000137	25319,34307
38000	3,5625	0,000141	25265,95745
39000	3,65625	0,000145	25215,51724
40000	3,75	0,000150	25000
41000	3,84375	0,000152	25287,82895
42000	3,9375	0,000157	25079,61783
43000	4,03125	0,000160	25195,3125
44000	4,125	0,000164	25152,43902
45000	4,21875	0,000168	25111,60714
46000	4,3125	0,000173	24927,74566
47000	4,40625	0,000175	25178,57143
48000	4,5	0,000179	25139,6648
49000	4,59375	0,000181	25379,83425
50000	4,6875	0,000181	25897,79006
51000	4,78125	0,000178	26860,95506
52000	4,875	0,000171	28508,77193
53000	4,96875	0,000172	28888,0814
54000	5,0625	0,000163	31058,28221
55000	5,15625	0,000159	32429,24528

Grafik Hubungan Tegangan dan Regangan



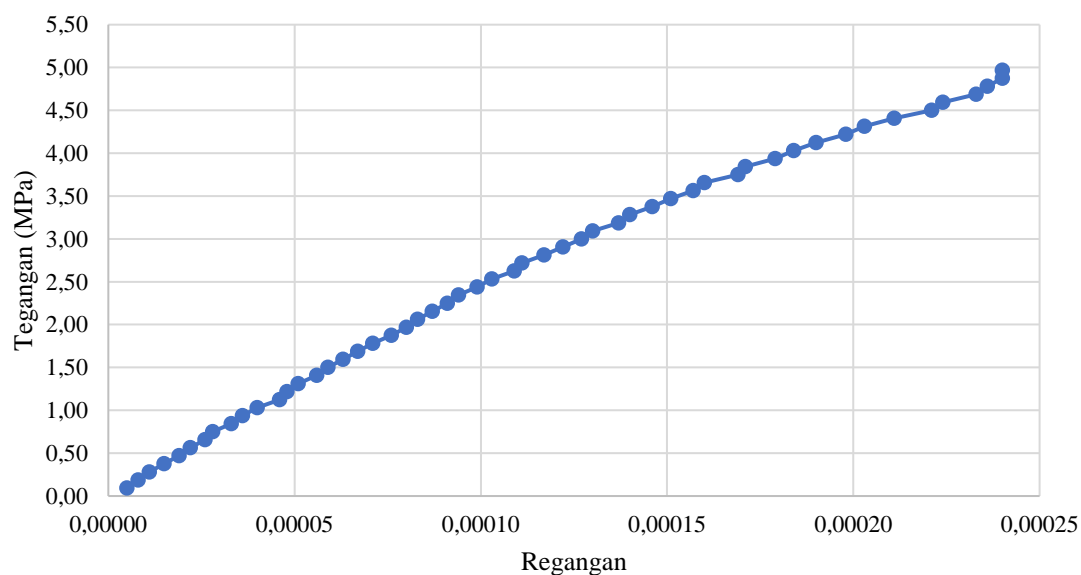
b. Benda Uji BNB

b	=	200	mm
h	=	200	mm
L	=	500	mm
I	=	133333333,3	mm ⁴
y	=	100	mm

Beban (N)	Tegangan (MPa)	Regangan	σ/ϵ (Mpa)
	PLy/4I		
1000	0,09375	0,000005	18750
2000	0,1875	0,000008	23437,5
3000	0,28125	0,000011	25568,18182
4000	0,375	0,000015	25000
5000	0,46875	0,000019	24671,05263
6000	0,5625	0,000022	25568,18182
7000	0,65625	0,000026	25240,38462
8000	0,75	0,000028	26785,71429
9000	0,84375	0,000033	25568,18182
10000	0,9375	0,000036	26041,66667
11000	1,03125	0,000040	25781,25
12000	1,125	0,000046	24456,52174
13000	1,21875	0,000048	25390,625
14000	1,3125	0,000051	25735,29412
15000	1,40625	0,000056	25111,60714
16000	1,5	0,000059	25423,72881
17000	1,59375	0,000063	25297,61905
18000	1,6875	0,000067	25186,56716
19000	1,78125	0,000071	25088,02817
20000	1,875	0,000076	24671,05263
21000	1,96875	0,000080	24609,375
22000	2,0625	0,000083	24849,39759
23000	2,15625	0,000087	24784,48276
24000	2,25	0,000091	24725,27473
25000	2,34375	0,000094	24933,51064
26000	2,4375	0,000099	24621,21212
27000	2,53125	0,000103	24575,24272
28000	2,625	0,000109	24082,56881
29000	2,71875	0,000111	24493,24324
30000	2,8125	0,000117	24038,46154
31000	2,90625	0,000122	23821,72131
32000	3	0,000127	23622,04724
33000	3,09375	0,000130	23798,07692

34000	3,1875	0,000137	23266,42336
35000	3,28125	0,000140	23437,5
36000	3,375	0,000146	23116,43836
37000	3,46875	0,000151	22971,8543
38000	3,5625	0,000157	22691,0828
39000	3,65625	0,000160	22851,5625
40000	3,75	0,000169	22189,34911
41000	3,84375	0,000171	22478,07018
42000	3,9375	0,000179	21997,2067
43000	4,03125	0,000184	21908,96739
44000	4,125	0,000190	21710,52632
45000	4,21875	0,000198	21306,81818
46000	4,3125	0,000203	21243,84236
47000	4,40625	0,000211	20882,70142
48000	4,5	0,000221	20361,99095
49000	4,59375	0,000224	20507,8125
50000	4,6875	0,000233	20118,02575
51000	4,78125	0,000236	20259,5339
52000	4,875	0,000240	20312,5
53000	4,96875	0,000240	20703,125

Grafik Hubungan Tegangan dan Regangan



c. Benda Uji BNC

b	=	200	mm
h	=	200	mm
L	=	500	mm
I	=	133333333,3	mm ⁴
y	=	100	mm

Beban (N)	Tegangan (MPa)	Regangan	σ/ϵ (Mpa)
	PLy/4I		
1000	0,09375	-0,00000050	-187500
2000	0,1875	0,00000150	125000
3000	0,28125	0,00000750	37500
4000	0,375	0,00001050	35714,28571
5000	0,46875	0,00001450	32327,58621
6000	0,5625	0,00001650	34090,90909
7000	0,65625	0,00002300	28532,6087
8000	0,75	0,00002800	26785,71429
9000	0,84375	0,00003150	26785,71429
10000	0,9375	0,00003500	26785,71429
11000	1,03125	0,00003950	26107,59494
12000	1,125	0,00004300	26162,7907
13000	1,21875	0,00004700	25930,85106
14000	1,3125	0,00005250	25000
15000	1,40625	0,00005800	24245,68966
16000	1,5	0,00006200	24193,54839
17000	1,59375	0,00006600	24147,72727
18000	1,6875	0,00007150	23601,3986
19000	1,78125	0,00007650	23284,31373
20000	1,875	0,00008150	23006,13497
21000	1,96875	0,00008600	22892,44186
22000	2,0625	0,00009150	22540,98361
23000	2,15625	0,00009700	22229,38144
24000	2,25	0,00010250	21951,21951
25000	2,34375	0,00010900	21502,29358
26000	2,4375	0,00011500	21195,65217
27000	2,53125	0,00011900	21271,0084
28000	2,625	0,00012550	20916,33466
29000	2,71875	0,00013450	20213,75465
30000	2,8125	0,00014150	19876,32509
31000	2,90625	0,00014600	19905,82192
32000	3	0,00015250	19672,13115
33000	3,09375	0,00015400	20089,28571

34000	3,1875	0,00016750	19029,85075
35000	3,28125	0,00017450	18803,72493
36000	3,375	0,00018100	18646,40884
37000	3,46875	0,00018750	18500
38000	3,5625	0,00019500	18269,23077
39000	3,65625	0,00020450	17878,97311
40000	3,75	0,00021050	17814,72684
41000	3,84375	0,00022000	17471,59091
42000	3,9375	0,00022700	17345,81498
43000	4,03125	0,00023350	17264,45396
44000	4,125	0,00024600	16768,29268
45000	4,21875	0,00025550	16511,74168
46000	4,3125	0,00026350	16366,22391
47000	4,40625	0,00027700	15907,03971
48000	4,5	0,00028100	16014,23488
49000	4,59375	0,00029100	15786,08247
50000	4,6875	0,00029800	15729,86577
51000	4,78125	0,00031850	15011,77394
52000	4,875	0,00033850	14401,77253
53000	4,96875	0,00037200	13356,85484

Grafik Hubungan Tegangan dan Regangan

