

BAB II

STUDI PUSTAKA

2.1. Pendahuluan

Pada bab ini akan dibahas lebih lanjut mengenai beton ringan (*lightweight concrete*). Selain itu akan dibahas juga mengenai penelitian – penelitian panel *sandwich* yang pernah dilakukan oleh sejumlah peneliti, sehingga akan diperoleh gambaran yang jelas tentang perkembangan panel *sandwich*. Aksi komposit pada struktur panel pracetak *sandwich* beton dapat tercapai apabila kondisi ikatan anatar lapisan panel beton terjadi dengan sempurna. Ikatan di antara lapisan – lapisan panel pracetak komposit harus mampu menahan gaya geser horizontal yang terjadi di antara lapisan panel, sehingga aksi panel secara satu kesatuan dapat tercapai. Untuk mengikat lapisan satu dengan lapisan lainnya diperlukan konektor untuk menyediakan kapasitas geser, sehingga lapisan – lapisan beton tersebut berperilaku komposit penuh.

2.2. Asumsi Dasar

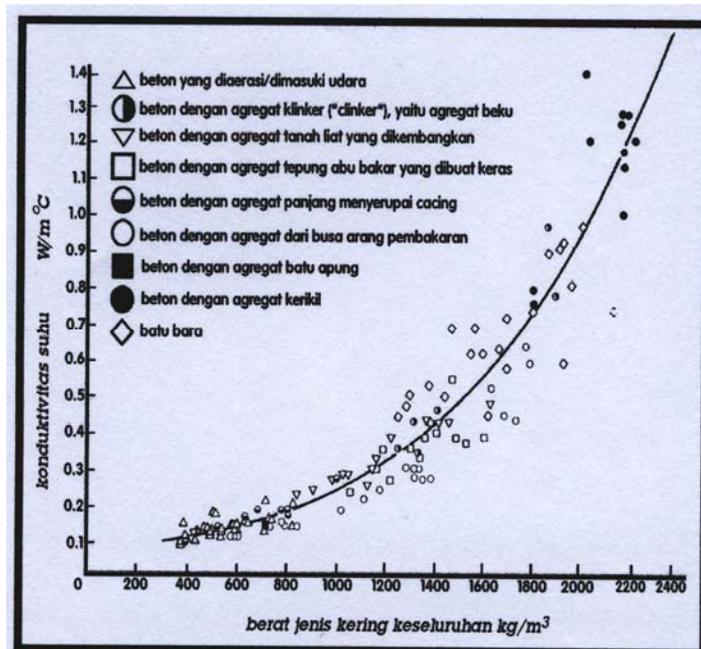
Sifat lentur balok dianalisis dengan memperhatikan karakteristik beban deformasi balok pada kondisi leleh (*yield*) dan kondisi batas (*ultimate*). Karakteristik beban deformasi terutama tergantung hubungan momen kelengkungan penampang. Analisis momen kelengkungan berdasarkan asumsi dasar sifat bahan dan komponen struktur, yaitu :

1. Terjadi lekatan yang baik antar baja tulangan dengan beton sehingga perubahan regangan pada baja dan beton dianggap sama
2. Sifat tegangan – regangan bahan diketahui dan diasumsikan untuk digunakan dalam analisis
3. Bidang – bidang penampang melintang tetap rata sebelum dan sesudah berdeformasi, sehingga regangan terdistribusi linier sepanjang tinggi balok (azas Navier).
4. Gaya tarik dan gaya tekan yang bekerja pada penampang harus dalam keseimbangan.

5. Analisis dilakukan dengan mengasumsikan dua tahap perilaku :
 Pertama, balok adalah elastis dan tidak retak. Kedua, balok dalam keadaan retak dan sifat bahan yang sesungguhnya digunakan untuk menganalisis respon penampang retak. Setelah beton retak, gaya tarik beton diabaikan.
6. Momen batas sesuai dengan adanya regangan pada beton yang menyebabkan kehancuran.
7. Kehancuran dianalisis adalah akibat lentur.

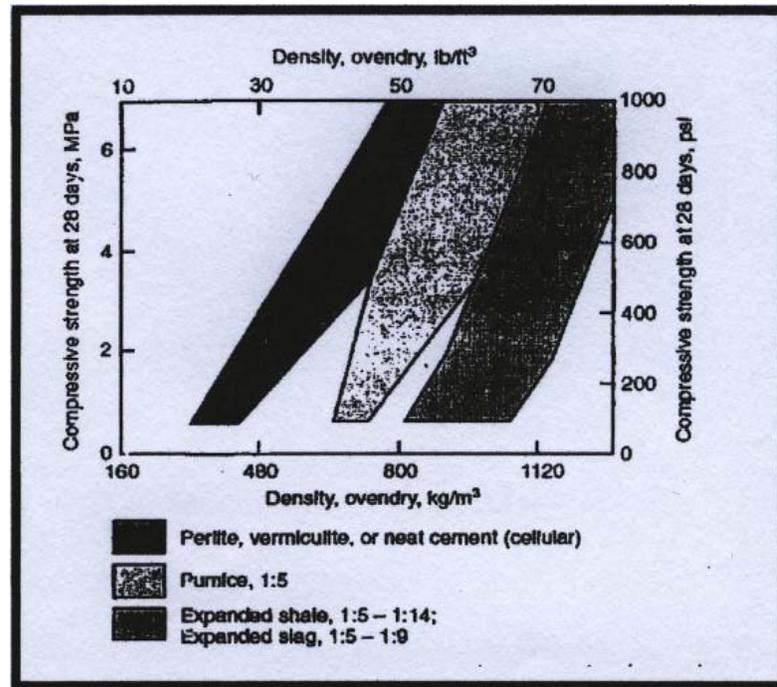
2.3. Beton Ringan (*lightweight concrete*)

Menurut Murdock L.J. dan Brook K.M., dalam Bahan dan Praktek Beton, ada banyak cara yang dilakukan untuk menghasilkan beton ringan, tetapi ini semua tergantung adanya rongga udara dalam agregat atau pembentukan rongga udara dalam pasta semen dengan menambahkan beberapa bahan yang menyebabkan busa, dan pada beberapa jenis beton ringan, kedua cara tersebut dapat dikombinasikan. Beton ringan juga tidak hanya diperhitungkan karena memiliki berat yang ringan, tetapi juga karena isolasi suhu yang tinggi dibandingkan beton biasa. Umumnya pengurangan kepadatan diikuti oleh kenaikan isolasi suhu (Grafik 2.1.), meskipun tentu saja diikuti pula oleh penurunan kekuatan (Grafik 2.2.).



(Sumber : Bahan dan Praktek Beton, Murdock & Brook, 1991)

Grafik.2.1. Hubungan antara kepadatan dan konduktivitas panas beton ringan



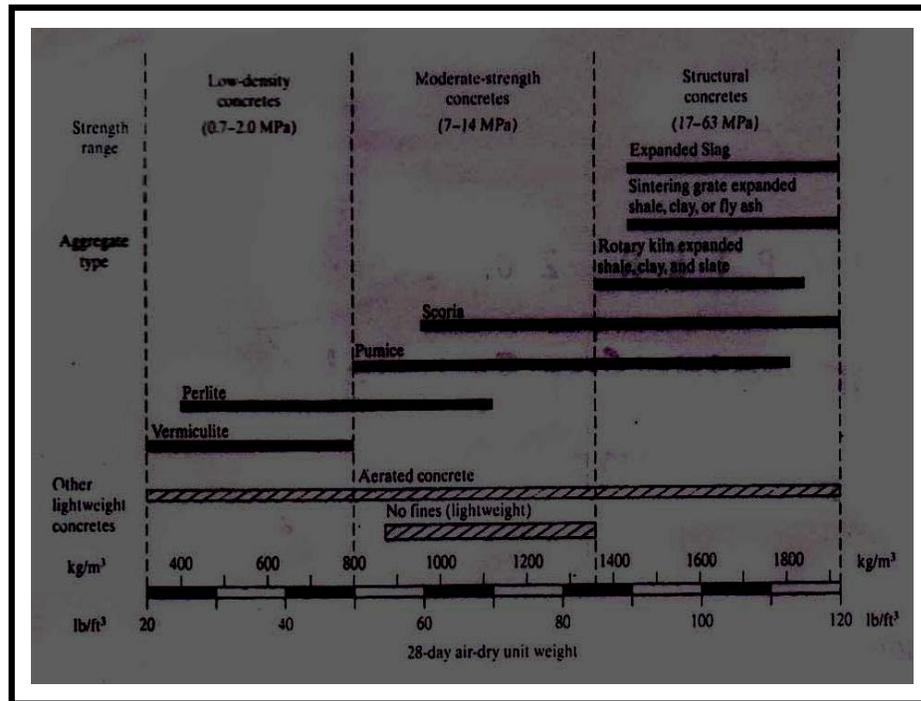
(Sumber : ASTM International STP 169 D, Lamond & Pielert, 1996)

Grafik.2.2. Hubungan antara kepadatan dan kekuatan beton ringan pada umur 28 hari

Menurut Mindes, 2003, beton ringan (*lightweight concrete*) dapat dibedakan menjadi dua, yaitu :

1. *Structural lightweight concrete* digunakan untuk tujuan structural
 2. *Ultra lightweight concrete* digunakan untuk tujuan non-struktural
- ACI Committee 213 mengklasifikasikan LWC berdasarkan kekuatan dan beratnya (lihat Gambar 2.1.), yaitu :

1. *Low Density Concrete*
2. *Low Strength Concrete*, digunakan sebagai peredam.
3. *Moderate Lightweight Concrete*, digunakan sebagai concrete block serta bentuk lain yang memiliki kekuatan yang cukup besar.
4. *Structural Lightweight Concrete*



(Sumber : ACI Committee 213, 2001)

Gambar.2.1. Klasifikasi Beton Ringan

Di bawah ini akan dijelaskan macam – macam beton ringan berdasarkan bahan pembentuknya :

1. Beton Ringan dengan Agregat Ringan

Berat jenis beton dengan agregat ringan yang kering udara sangat bervariasi, tergantung pada pemilihan agregatnya, apakah menggunakan pasir alam atau agregat pecah yang ringan dan halus. Batas maksimum dari berat jenis beton ringan adalah 1850 kg/m³ walau kadang – kadang dapat melebihi. Pada umumnya berat jenis yang lebih ringan dapat dicapai jika berat beton diperkecil yang berpengaruh pada menurunnya kekuatan beton tersebut.

Dalam kasus beton yang menggunakan agregat ringan ada dua cara yang dilakukan untuk memperoleh kekuatan yang lebih tinggi, yang pertama adalah dengan sedikit memperbanyak kadar semen dalam campuran, dan yang kedua adalah dengan mempergunakan pasir alam sebagai ganti butiran halus yang ringan. Kuat tarik dan geser beton ringan dengan agregat ringan lebih kecil daripada dengan agregat alamiah yang sama kuat desaknya. Reduksi kuat tarik ini dapat mencapai 30%. Modulus elastis beton ringan

adalah sekitar 0.5 sampai 0.75 kali dari nilai modulus beton dengan agregat alamiah pada kuat desak yang sama berkisar antara 7 sampai 21 kN/mm². Oleh karena itu nilai deformasi elastis, penyusutan dan rayapan beton ringan ini menjadi lebih besar.

Pada penelitian sebelumnya digunakan *fly ash* sebagai pengganti batu pecah (agregat kasar). Kuat tekan yang dihasilkan dari beton ringan jenis ini dapat dilihat pada tabel di bawah ini :

Tabel. 2.1 Kuat tekan beton ringan

Jenis beton	sampel	Kuat tekan (Mpa)		
		25	35	45
Beton ringan	Sampel 1	14,147	13,581	14,147
	Sampel 2	11,318	14,147	15,279
	Sampel 3	10,186	13,015	15,279
Rata — rata		11,884	13,581	14,902

(Sumber : TA , Riamasruri N & Wuryan S,2005)

2. Beton Ringan dengan “*Clinker*” dan “*Breeze*”

Agregat yang dikenal dengan nama “*clinker*” dan “*breeze*” telah digunakan selama bertahun – tahun dalam memproduksi blok dan plat untuk partisi dalam dan tembok interior lainnya. *Clinker* adalah bahan yang dibakar sempurna dan massanya mengeras dan berinti serta terisi sedikit bahan yang mudah terbakar, sedang *breeze* adalah bahan residu yang kurang keras dan kurang baik pembakarannya, dan oleh karenanya berisi bahan yang mudah terbakar. Sumber utama dari agregat *clinker* adalah stasiun pembangkit listrik. Spesifikasi terhadap batasan kandungan yang mudah terbakar bervariasi menurut letak dimana beton tersebut akan digunakan. Spesifikasi tersebut diberikan dalam BS 1165 : 1966 sebagai berikut :

1. Kelas A1

Batasan kandungan bahan yang mudah terbakar tidak lebih dari 10%. Tujuan umum : beton tak bertulang. Agregat *clinker* dan *breeze* sangat tidak cocok untuk beton bertulang karena sifat

porositas dan penyerapannya, sehingga keadaannya selalu lebih basah daripada keadaan sekitarnya. Kandungan belerangnya juga merupakan faktor yang mempercepat terjadinya korosi pada tulangan yang tertanam di beton.

2. Kelas A2

Batasan kandungan bahan yang mudah terbakar tidak lebih dari 20%. Tujuan umum : pekerjaan interior yang tidak mengalami keadaan basah dan dicor ditempat

3. Kelas A3

Batasan kandungan bahan yang mudah terbakar tidak lebih dari 25%. Tujuan umum : blok pracetak.

3. Beton Ringan dengan Batu Apung

Batu apung merupakan agregat alamiah yang ringan serta umum penggunaannya. Beton ringan yang menggunakan batu apung memiliki berat jenis antara 720 – 1440 kg/m³ dan kuat tekan 2 – 14 kN/mm².

4. Beton Ringan dengan Busa Arang (*Foamed Slag*)

Busa arang dibuat dengan pemadaman arang dari dapur letus yang diproduksi oleh pabrik besi kasar. Agregat busa arang harus memenuhi BS 877 : Part 2 : 1973. Busa arang dapat dianggap memuaskan jika memenuhi persyaratan sebagai berikut :

1. Bebas dari kontaminasi oleh bahan – bahan yang tidak bersih maupun arang yang dingin di udara bebas.
2. Bebas dari kotoran yang mudah menguap seperti sisa arang atau batu bara
3. Bebas dari kotoran sulfat yang ada.

5. Beton Ringan dengan Bahan yang Mengembang

Tanah liat dan batu tulis yang terjadi secara alamiah dapat dipergunakan untuk menghasilkan bahan yang berpori ringan dengan pola permukaan yang berbentuk sel – sel dengan penanganan yang memadai dan pemanasan sampai pada suhu sekitar 100°C - 1200°C. Bahan dengan

karakteristik serupa dapat pula diperoleh dari tepung abu baker atau *fly ash* yaitu residu dari pembakaran tepung batu bara pada stasiun pembangkit tenaga. Setelah dipecah dan disaring menurut ukuran yang dikehendaki, bahan yang diproses ini membentuk agregat ringan. Agregat tanah liat dikembangkan di Inggris yang diproduksi dengan nama dagang "*Leca*" (*Lightweight Expanded Clay Agregate*). Agregat ini dibuat dengan menggunakan tanah liat biru yang khusus jenisnya, yang segera mengembang jika dipanaskan. Bahan yang dihasilkan terdiri atas butiran bulat yang ringan, keras, dengan suatu kulit padat dan bagian dalam yang keropos. Sedang agregat yang diproduksi dari *fly ash* dikenal dengan nama "*Lytag*". Karena agregat ringan ini sangat tidak kedap air, maka penyerapan airnya pun besar sehingga mempunyai pengaruh yang cukup besar terhadap isolasi suhu, penyusutan, dan rayapan pada beton yang dihasilkan dengan agregat ini.

6. Beton Ringan Tanpa Butiran Halus

Beton tanpa butiran halus ini dibuat hanya dari campuran semen dan agregat kasar. Agregat halus dihilangkan agar meninggalkan suatu rongga yang merata ke seluruh masa.

7. Beton Ringan dari Adukan Semen yang Dicampuri Udara

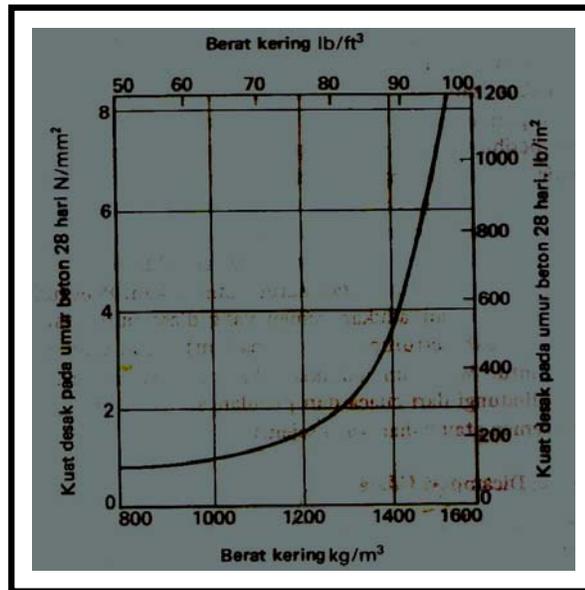
Beton ringan yang dibuat dari adukan semen yang dicampuri udara dibuat dengan memasukkan udara atau gas yang dibentuk secara khusus kedalam bubur semen sehingga setelah mengeras beton yang dihasilkan berpori atau memiliki pola struktur sel. Bubur ini biasanya terdiri atas campuran semen dan bahan silika seperti pasir dan tepung abu bakar.

Ada dua cara utama dalam pembentukan beton jenis ini, yaitu :

1. Penambahan bubuk aluminium atau seng yang dikombinasikan dengan kapur dalam semen untuk membangkitkan gas hidrogen. Dalam proses ini aluminium atau bubuk yang ditambahkan pada bubur semen selama pencampurannya, kuantitas logam yang dihaluskan sekitar 0.1% sampai 0.2% dari berat semen. Dalam beberapa menit gas hidrogen mulai terjadi secara perlahan dan

bubur semen akan naik. Proses pengembangan bubur ini terjadi selama sekitar satu jam. Bubur kemudian mengeras membentuk suatu bahan yang terdiri dari sejumlah besar gelembung yang tertutup lubangnya dan dikelilingi oleh adukan semen yang mengeras. Berat jenis dari beton yang dihasilkan tergantung pada kuantitas bubuk metal yang digunakan, suhu dan waktu pabrikasinya. Berat jenis dari beton jenis ini adalah $550 - 950 \text{ kg/m}^3$.

2. Mempergunakan bahan yang menimbulkan busa seperti “*resin soap*” atau damar sabun. Bahan untuk membuat busa ini dicampur dengan semen, pasir, dan air, serta proses pemasukan udaranya dicapai dengan cara memutarnya dalam alat campur yang berkekuatan tinggi, atau diputar sehingga keluar busanya dengan mempergunakan udara yang bertekanan memanfaatkan alat penghasil buih. Kemudian buih ini dicampurkan ke dalam bubr semen dengan mesin pencampur beton (*pan mixer*). Cara ini menghasilkan beton ringan dengan berat jenis yang lebih rata jika pembentukan buihnya dikontrol dengan hati – hati. Berat jenis dari beton ringan jenis ini dapat dibuat serendah mungkin misalnya 320 kg/m^3 , tetapi tidak memiliki kekuatan yang bagus dan hanya akan dipergunakan sebagai isolator dalam keadaan kering. Beton ringan jenis ini memiliki penyusutan kering yang tinggi. Hubungan antara kuat desak dan berat jenis untuk jenis beton ringan yang dibuat dari adukan semen yang dicampuri udara dapat dilihat pada Grafik 2.3.



(Sumber : Bahan dan Praktek Beton, Murdock & Brook, 1991)

Grafik.2.3. Hubungan kuat desak dan berat jenis untuk adukan semen yang dicampuri udara

Berat beton aerasi secara substansial lebih ringan daripada beton normal dengan kepadatan mulai dari 320 – 1920 kg/m³ (20 – 120 lb/ft³). Beton aerasi dengan kepadatan tidak melebihi 800 kg/m³, sering disebut sebagai beton isolasi (*insulating concrete*). Beton ini mempunyai sifat isolator yang baik dan sebagian besar digunakan sebagai material nonstructural untuk isolasi panas dan suara, dek atap, tanggul kebakaran (*firewalls*), dan bahan pelapis saluran panas bawah tanah (*underground thermal conduit linings*).

Tipe dan sifat – sifat dari beton ringan dari berbagai metode pembuatannya dapat dilihat pada tabel 2.2.

Tabel. 2.2 Tipe dan sifat berbagai jenis beton ringan

Tipe beton ringan	Berat jenis di udara (kg/m^3)	kuat desak (N/mm^2)	Penyusutan kering (%)	Konduktivitas suhu ($\text{W/m}^\circ\text{C}$)	Mudah atau tidak untuk dikerjakan	Kuat atau tidak bila dipaku atau disekrup
Tepung abu bakar yang dikeraskan (<i>Lytag</i>)	1360-1760 ¹	14.0-42.0 ¹	0.04-0.07	0.32-0.91	Mudah	memuaskan
Batu tulis atau tanah liat yang dikembangkan (<i>Agli & Leca</i>)	1360-1840 ¹	14.0-42.0 ¹	0.04-0.07	0.24-0.91	Mudah	memuaskan
Busa arang (<i>Foamed Slag</i>)	1680-2080 ¹	10.5-42.0 ¹	0.03-0.07	0.24-0.93	Mudah	memuaskan
Batu apung	720-1440	2.0-14.0	0.04-0.08	0.21-0.60	Mudah	memuaskan
<i>Clinker</i> (butiran yang mengeras)	1040-1520	2.0-7.0	0.04-0.08	0.35-0.67	Mudah	memuaskan
Adukan semen yang dicampur udara (<i>aeraed</i>)	400-960	1.4-4.9	0.05-0.18	0.10-0.22	Mudah	memuaskan
Beton tanpa butiran halus a. Agregat kerikil 1 : 8 (agregat : semen) menurut volumenya	1600-1840	3.5-11.0	0.02-0.03	0.65-0.80	Sukar	Diperlukan blok yang dipasang pada betonnya
b. Beton ringan 1 : 6 (agregat : semen) menurut volumenya		2.4-3.1	Tergantung pada agregat yang digunakan	Tergantung pada agregat yang digunakan	Mudah	
Beton padat yang berisi kerikil atau batu pecah ²	2240-2480	14.0-70.0	0.03-0.05	1.40-1.80	Mudah	Baik bila disumbat

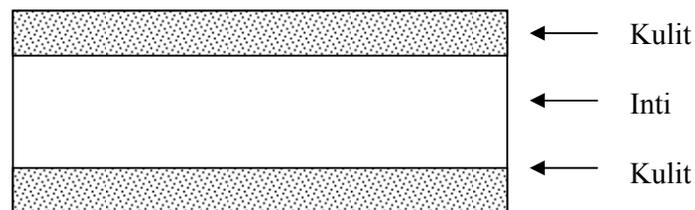
Keterangan :

1. Kekuatan dan kepadatan yang lebih tinggi diperoleh dengan mengganti butiran halus yang ringan dengan pasir alam
2. Tipe dan sifat campuran beton padat diberikan disini agar dapat dijadikan sebagai pembanding

2.4. Panel Komposit Sandwich

Material komposit ideal untuk aplikasi – aplikasi struktur dimana rasio kekuatan – berat dan rasio kekakuan – berat disyaratkan. Kata “komposit” pada material komposit menjelaskan bahwa dua atau lebih material digabungkan pada skala makroskopik untuk membentuk sebuah material yang bermanfaat. Keuntungan komposit adalah pada umumnya material komposit memperlihatkan kualitas terbaik dari setiap material pembentuknya, dan sering menunjukkan sifat baru yang tidak dimiliki material – material lain. Menurut Jones R.M. (1975), bahan struktur *sandwich* merupakan gabungan keunggulan kekakuan dan kekuatan dari lapisan beton kulit dengan massa dari lapisan beton inti yang lebih rendah. Hasilnya adalah suatu struktur yang lebih ringan tetapi kuat dan kaku.

Menurut para ahli sejarah di bidang konstruksi *sandwich*, prinsip konstruksi panel tulisannya " *An Account on the Construction of the Britannia and Conway Tubular Bridges* " (Allen, 1969). Allen mendefinisikan konstruksi panel *sandwich* bahwa panel *sandwich* merupakan panel yang terdiri atas dua lapisan tipis, kaku dan kuat dari material padat yang dipisahkan oleh satu lapisan tebal yang terbuat dari material dengan berat jenis yang rendah, yang memiliki kekakuan dan kekuatan yang lebih rendah dari lapisan pengapitnya. Dua lapisan tipis yang terdapat pada struktur *sandwich* ini disebut dengan lapisan kulit, dan satu lapisan tengah disebut dengan lapisan inti (lihat Gambar 2.2.).



Gambar. 2.2 Struktur beton *sandwich*

Pada kebanyakan kasus (Corden, 1990), sebuah panel *sandwich* yang efisien didapat bila berat dari lapisan inti hampir ekuivalen dengan jumlah kedua lapisan kulitnya. Beberapa kriteria dasar perencanaan panel *sandwich* (Allen, 1969, Corden, 1990, Einea, et. al., 1991, dan Van Straalen, 1998):

1. Lapisan kulit harus cukup tebal untuk dapat menahan tarik, tekan, dan tegangan geser yang disebabkan oleh beban rencana pada bidang $x - y$ struktur *sandwich*;
2. Lapisan kulit juga harus dapat menahan beban lentur, yaitu beban tarik pada satu lapisan kulit dan beban tekan pada lapisan kulit lainnya;
3. Material lapisan kulit dapat terbuat dari material isotropik ataupun anisotropik. Masing - masing lapisan kulit pada umumnya terdiri dari material yang sama. Propertis utama material lapisan kulit adalah modulus elastisitas, kekuatan tarik dan tekan serta Poisson's rasio;
4. Lapisan inti harus cukup kaku pada arah tegak lurus lapisan kulit sehingga jarak antara lapisan dapat tetap;
5. Lapisan inti harus mempunyai kekuatan tekan yang memadai untuk menahan kehancuran yang disebabkan oleh beban - beban rencana yang bekerja tegak lurus permukaan panel atau tegangan tekan akibat lentur;
6. Lapisan inti harus cukup kaku terhadap geser, sehingga saat panel melentur lapisan - lapisan kulit tidak mengalami pergeseran satu sama lain. Bila pergeseran antara lapisan terjadi maka efek komposit *sandwich* hilang, karena lapisan - lapisan tersebut berdiri sendiri;
7. Lapisan inti harus cukup kaku sehingga lapisan - lapisan kulit tetap datar dalam menerima beban lentur, bila tidak kaku maka memungkinkan terjadinya tekuk.

Bila material lapisan inti memenuhi persyaratan kekakuan di atas, maka diharapkan terjadi kontribusi terhadap kekakuan lentur panel secara menyeluruh (*Allen, 1969*). Pada umumnya material panel *sandwich* memperlihatkan sifat - sifat baik berikut (*Jung, 2002; Davies, 2001; Bitzer, 1997*) :

1. Material mempunyai rasio kekakuan - berat dan kekuatan - berat yang tinggi;
2. Dengan berat yang ringan dan prapabrikasi, maka waktu konstruksi menjadi singkat;
3. Dengan berat yang ringan mempunyai kapasitas *load bearing* yang tinggi;
4. Insulator thermal yang sangat baik;

5. Permukaan lapisan kulit mempunyai ketahanan yang memadai terhadap lingkungan yang agresif;
6. Tahan lama dengan biaya perawatan yang murah

Pada awalnya, struktur komposit *sandwich* panel digunakan pada konstruksi pesawat terbang militer. Penggunaan material komposit pada kerangka pesawat terbang dapat menghemat berat material sampai 35%. Akhir - akhir ini penggunaan elemen struktur komposit *sandwich* sudah banyak digunakan pada berbagai komponen *automotive*, *aerospace*, dan konstruksi bangunan. Beberapa jenis *sandwich* panel yang sudah diteliti dan banyak digunakan, antara lain *expanded plastic core*, *honeycomb core*, dan *corrugated core*, dimana lapisan kulit merupakan material seperti lapisan tipis aluminium, lapisan tipis baja, semen asbes, *glass-reinforced plastic*, *plywood*, *glass-reinforced cement*, *harboard*, dan *ferro-cement*; sedangkan lapisan inti terbuat dari material seperti kayu balsa dan lembaran kertas tertentu yang dilem dalam jumlah besar.

Pada tahun 1988, Wade, *et. al.* meneliti komposit konektor *glass-fiber* untuk dinding *sandwich* beton - insulator. Hasil penelitiannya menjelaskan secara detail mengenai *structural and energy performance panel* dengan konektor *glass-fiber*.

Setahun kemudian, para peneliti di *University of Oklahoma* (1989) melakukan penelitian eksperimental terhadap panel *sandwich* untuk mengetahui perilaku panel komposit *sandwich*. Penelitian dilakukan terhadap pengujian geser dan pengujian lentur panel *sandwich*. Panel *sandwich* dengan tebal 200 mm, panjang 5,0 m, dan lebar 2,4 m terdiri dari lapisan kulit yang merupakan lapisan beton normal, dan lapisan inti yang merupakan insulator. Pengujian geser dilakukan dengan memberikan gaya geser pada bidang ketebalan dari lapisan beton untuk mengetahui kapasitas geser konektor dan kontribusi insulator terhadap interaksi geser diantara lapisan beton. Pada pengujian lentur, panel dibebani *out-of-plane transversal load* untuk mengetahui kapasitas lentur panel.

PCI Design Handbook (1985), *Architectural Precast Concrete* (1989), *Manual for Structural Design of Architectural Precast Concrete* (1997), menyajikan ketentuan ketebalan lapisan beton sebagai lapisan kulit dari panel *sandwich*. Minimum ketebalan lapisan structural beton pada panel *sandwich* adalah 50 mm untuk beton pratekan, dan 76 mm untuk beton non - pratekan. Tetapi *Insteel Construction System, Inc.* (1985) pada literatur informasi produksinya menjelaskan bahwa ketebalan 19 mm telah digunakan sebagai ketebalan lapisan beton sebagai lapisan kulit dari panel *sandwich*. Pada studi ini digunakan ketebalan minimum lapisan kulit panel *sandwich* beton setebal 30 mm.

Einea, *et. al.* (1991) menulis *State of-the Art-of Precast Concrete Sandwich Panels*. Tulisan tersebut menyajikan sistem panel pracetak beton *sandwich* yang banyak digunakan di Amerika Utara dan Eropa sebagai elemen struktur dan thermal yang efisien untuk dinding eksterior gedung - gedung rendah (*low rise buildings*). Unsur - unsur utama panel *sandwich* dan teori analisis untuk pengaruh perubahan volume dijelaskan. Panel *sandwich* beton yang dijelaskan disini merupakan panel *sandwich* yang terdiri dari lapisan kulit terbuat dari beton, dan lapisan inti merupakan insulator, serta konektor untuk menghubungkan lapisan kulit dan lapisan inti.

Selanjutnya, Einea (1992) pada disertasinya menjelaskan hasil penelitiannya mengenai struktur dan efisiensi panas pada system panel *sandwich* beton pracetak. Seperti pada umumnya panel *sandwich* beton, maka panel *sandwich* yang diteliti Einea juga merupakan panel *sandwich* yang terdiri dari lapisan kulit terbuat dari beton, dan lapisan inti merupakan insulator. Sedangkan sebagai konektor untuk menghubungkan lapisan kulit dan lapisan inti, Einea menggunakan fiber *reinforced plastic (FRP)*.

K. M. Rao (1992) menganalisa beban tekuk pelat *sandwich* dengan bahan bagian kulit yang bersifat anisotropik. Ia mengembangkan teori deformasi kecil pelat orthotropik ke dalam masalah pelat *sandwich* yang lapisan kulitnya dari bahan anisotropik. Ia mendemostrasikan pengaruh kopel regangan dan geseran pada stabilitas pelat *sandwich* semacam ini.

Solomon, *et.al.* (1996) meneliti jenis lain panel komposit *sandwich* dengan tujuan untuk mengurangi berat sendiri pelat lantai jembatan, dimana panel komposit *sandwich* tersebut terdiri dari lapisan kulit merupakan lapisan baja dan lapisan inti merupakan lapisan beton.

Pada tahun 1997 di *University of Nebraska*, Salmon *et. al.* melakukan penelitian eksperimental dengan skala penuh terhadap panel beton pracetak *sandwich*, seperti yang dilakukan di *University of Oklahoma* pada tahun 1989. Tetapi pada penelitiannya, Salmon *et. al.* menggunakan *fiber reinforced plastic(FRP) connectors* sebagai penghubung lapisan beton dan lapisan insulator. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan *fiber reinforced plastic(FRP) connectors* dapat meningkatkan efisiensi panas panel dibandingkan bila konektor terbuat dari bahan yang mengandung besi.

Beberapa penelitian telah dilakukan terhadap struktur komposit hybrid pelat yang terdiri dari lapisan beton pracetak yang kemudian dilapisi beton dengan jenis yang sama, yang di cor di tempat pada saat konstruksi. Aksi komposit disini bertujuan antara lain untuk meningkatkan kapasitas beban, kekakuan, ketahanan terhadap api, dan mempermudah *handling*, serta keuntungan secara ekonomi (CEB-FIP, 1998).

2.4.1. Ikatan Antara Beton Lapisan Kulit dan Lapisan Inti

Bentuk atau jenis keruntuhan panel *sandwich* tidak hanya tergantung dari kondisi beban dan tumpuan, tetapi juga tergantung dari sifat – sifat unsur pokok dan sifat ikatan antara lapisan beton.

Pada konstruksi komposit, pengikatan antara lapisan kulit dan inti dapat dilakukan dengan lem (*chemical bond*), penggarukan (*screeding*) atau dengan menggunakan konektor (*mechanical connector*). Ikatan antara lapisan kulit dengan lapisan inti berguna untuk menjaga elemen struktur *sandwich* tetap menyatu dan meneruskan beban antara lapisan kulit dan inti. *Addhesive* dan pengelasan seringkali digunakan untuk pengikatan. Jenis ikatan yang digunakan tergantung kepada permintaan struktur dan lingkungan dimana elemen dibuat dan digunakan. Propertis ikatan yang utama adalah kekuatan pada arah tank dan geser.

Menurut Oehler, DJ dan Bradford, M.A. (1995), ikatan antara lapisan -lapisan pada struktur *sandwich* tersebut harus direncanakan agar dapat menahan gaya - gaya geser horisontal pada permukaan (*interfaces*) lapisan kulit dan inti. Selain itu, ikatan juga harus direncanakan untuk dapat menahan perpisahan antar lapisan pada struktur *sandwich* sehingga kurvatur yang terjadi pada elemen lapisan kulit dan inti sama. Oleh karena itu ikatan permukaan antar lapisan harus dapat menahan tidak hanya gaya - gaya tarik normal terhadap permukaan lapisan kulit dan inti, tetapi juga gaya - gaya geser paralel terhadap lapisan kulit dan inti.

Deformasi, distribusi tegangan, dan model keruntuhan struktur komposit *sandwich* tergantung dan perilaku ikatan antara lapisan kulit dan inti. Pada umumnya digunakan konektor mekanis yang ditanam melintang pada kedua lapisan dan direncanakan untuk mentransfer gaya - gaya geser longitudinal. Konektor tersebut memiliki komponen yang direncanakan untuk menahan gaya - gaya tarik normal sehingga dapat menghindari perpisahan pada permukaan lapisan kulit dan inti.

2.5. Struktur Balok Komposit

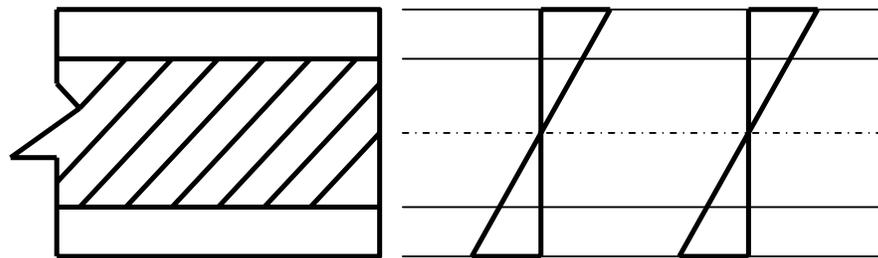
Perilaku mekanis balok *sandwich* dibawah beban eksternal dan aksi lainnya sangatlah kompleks. Sifat – sifat secara global harus direncanakan dan diuji sebagai kesatuan panel komposit, maupun diuji untuk setiap lapisannya.

Selain itu ikatan antara lamina harus diketahui, karena keruntuhan panel komposit *sandwich* bisa terjadi dengan beberapa proses, antara lain :

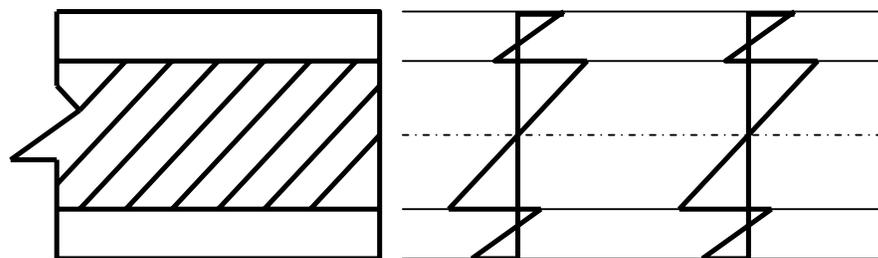
- Kegagalan lapisan tahanan luar yang diakibatkan oleh tarik, tekan, atau tekuk;
- Kegagalan lapisan internal dikarenakan geser;
- Geser yang terjadi di sepanjang permukaan antar lapisan;
- Keruntuhan local atau bermacam tipe kerusakan lain.

Bila struktur komposit diberi beban lentur pada tingkat beban layan (*service load*), maka ada tiga kemungkinan aksi komposit balok yang akan terjadi, yaitu :

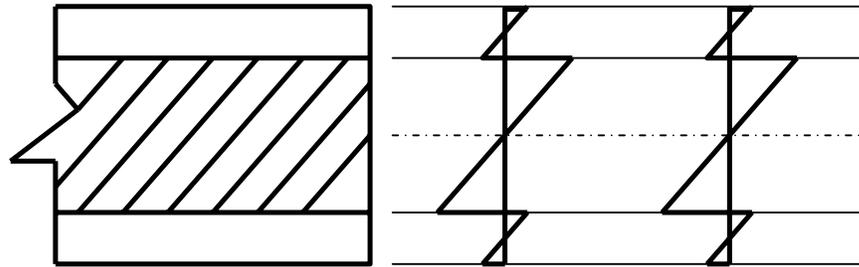
- Komposit penuh, jika lapisan - lapisan komposit dihubungkan sedemikian rupa satu dengan yang lain sehingga struktur komposit tersebut dapat menahan beban yang bekerja sebagai struktur yang monolit. Penghubung (*konektor*) harus dapat menyalurkan seluruh gaya geser longitudinal sehingga menghasilkan distribusi tegangan lentur yang kontinu pada penampang balok. (Gambar. 2.3a)
- Komposit sebagian, yaitu jika connector yang menghubungkan lapisan - lapisan komposit tersebut menyalurkan hanya sebagian gaya geser longitudinal yang terjadi pada balok. (Gambar. 2.3b)
- Tidak komposit, yaitu bila tidak terjadi ikatan sama sekali antara lapisan - lapisan komposit tersebut. Artinya lapisan beton normal dan lapisan beton ringan bereaksi terhadap beban lentur yang bekerja secara terpisah satu sama lain (*independently*) pada balok. (Gambar. 2.3c)



Gambar 2.3a. Beton sandwich komposit penuh



Gambar 2.3b. Beton sandwich komposit sebagian



Gambar 2.3c. Beton sandwich tidak komposit

2.6. Daktilitas

Daktilitas adalah kemampuan suatu struktur atau unsur struktur untuk menahan respon inelastik yang dominan sambil mempertahankan sebagian besar dari kekuatan awalnya dalam memikul beban. Daktilitas pada balok merupakan perbandingan antar deformasi batas dan deformasi leleh. Deformasi yang terjadi dapat berupa regangan kelengkungan, lendutan translasi dan lendutan rotasi, yaitu :

1. Daktilitas Regangan

Adalah perbandingan antara regangan maksimum dan regangan leleh pada balok yang dibebani aksial tekan / tarik.

$$\mu\varepsilon = \frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_y}$$

2. Daktilitas Kelengkungan

Adalah perbandingan antar sudut kelengkungan (putaran sudut per unit panjang) maksimum dengan sudut kelengkungan leleh dari suatu elemen struktur akibat momen lentur.

$$\mu\varphi = \frac{\varphi_u}{\varphi_y}$$

3. Daktilitas Perpindahan

Adalah perbandingan struktur maksimum terhadap perpindahan struktur pada saat leleh.

$$\mu\delta = \frac{\delta_u}{\delta_y}$$

4. Daktilitas Rotasi

Adalah perbandingan sudut maksimum terhadap putaran sudut pada saat leleh.

$$\mu\theta = \frac{\theta_u}{\theta_y}$$

Konsep desain struktur beton tahan gempa menurut SK SNI'91 dibedakan atas tiga tingkat struktur, yaitu :

1. Tingkat daktilitas 1, struktur direncanakan agar tetap berperilaku elastis saat terjadi gempa kuat, dengan $\mu = 1$.
2. Tingkat daktilitas 2, struktur direncanakan sedemikian rupa sehingga berperilaku inelastis terhadap beban gempa tanpa mengalami getas, dengan $\mu = 2$.
3. Tingkat daktilitas 3, struktur direncanakan terhadap beban gempa kuat sedemikian rupa struktur mampu menjamin terbentuknya sendi plastis dengan kapasitas pemancaran energi yang diperlukan, $\mu = 4$

Maka berdasarkan SK SNI 1991 dapat disimpulkan bahwa struktur balok dikatakan sangat daktail, apabila faktor daktilitas penampang maupun struktur lebih besar dari empat ($\mu = 4$).

2.7. Jenis Retak

Pada dasarnya ada tiga jenis keretakan pada balok, (Gilbert, 1990), adalah :

- Retak lentur (flexural crack), terjadi di daerah yang mempunyai harga momen lentur yang lebih besar dan gaya geser kecil. Arah retak terjadi hampir tegak lurus pada sumbu balok.
- Retak geser (flexural shear crack), terjadi pada bagian balok yang sebelumnya telah terjadi keretakan lentur. Retak geser lentur merupakan perambatan retak miring dari retak lentur yang sudah terjadi sebelumnya.

- Retak geser pada bagian balok (web shear crack), yaitu keretakan miring yang terjadi pada daerah garis netral penampang dimana gaya geser maksimum dan tegangan aksial sangat kecil.

2.8. Jenis Keruntuhan

Tipe keruntuhan balok sangat tergantung pada kelangsingan balok. Kelangsingan balok dinyatakan dengan a/d (untuk beban terpusat), dimana a adalah panjang geser (shear span), yaitu jarak antara titik pembebanan ke tumpuan.

Keruntuhan suatu balok dapat terjadi menurut salah satu dari tiga ragam keruntuhan ini, (Nawy, 1996) :

- Keruntuhan lentur (*flexural failure*), yaitu keruntuhan yang terjadi pada balok dengan $a/d > 5.5$, dimana arah retak vertikalnya ditengah bentang sepanjang kira - kira $1/3$ bentang. Retak halus vertikal mulai terbentuk di tengah bentang pada tingkat beban t 50% dari beban keruntuhan lentur. Dengan meningkatnya beban, retak menyebar di daerah tengah bentang, retak awal mulai melebar dan merambat ke arah garis netral dan lendutan meningkat. Jika penulangan memanjang balok under - reinforced, keruntuhan terjadi secara daktil yang diawali oleh lelehnya tulangan lentur.
- Keruntuhan tank diagonal (*diagonal tension failure*), yaitu keruntuhan yang terjadi segera setelah keretakan miring tanpa peringatan yang cukup, yang terjadi karena kuat tank diagonal lebih kecil dari kuat lentur. Keruntuhan terjadi pada balok dengan rasio a/d sekitar 2.5 - 5.5. Keretakan dimulai dengan terbentuknya retak lentur vertikal di tengah bentang, yang meningkat akibat menyebarnya beban ke daerah dengan momen lebih kecil dan gaya geser besar, sehingga terjadi keretakan lentur geser. Dengan meningkatnya gaya geser, retak akan melebar dan merambat sampai ke sisi balok sehingga balok runtuh. Keruntuhan bersifat getas dan lendutan yang terjadi relatif kecil.
- Keruntuhan geser tekan (*shear compression failure*), yaitu keruntuhan yang terjadi setelah retak lentur geser terjadi, kemudian retak merambat ke belakang sepanjang tulangan lentur. Keretakan ini akan melepaskan lekatan tulangan memanjang dan balok akan berkelakuan seperti busur dua sendi, yang diakhiri dengan hancurnya beton tekan di sisi atas balok. Keruntuhan ini terjadi pada

balok dengan rasio a/d antara 1.0 - 2.5. Keruntuhan relatif kurang getas karena terjadi redistribusi tegangan, tapi secara umum masih tergolong keruntuhan getas dengan peringatan batas.