

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini memaparkan teori-teori yang mendasari penelitian yang akan dilakukan. Beberapa teori yang akan diuraikan antara lain mengenai komposit secara umum, komponen penyusun komposit, serat alam, resin epoksi, keramik teknik hand lay up untuk pabrikan komposit, rompi tahan peluru dan tinjauan balistik secara umum.

2.1 KOMPOSIT

Komposit adalah gabungan dari dua komponen atau lebih yang memberikan sifat kaku [3]. Komposit mempunyai kelebihan akan daya tahan terhadap lingkungan korosif, rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi, sifat mekanik, insulasi listrik yang baik serta dapat dibuat dalam berbagai bentuk. Disamping kelebihan, kekurangan komposit adalah tidak dapat digunakan pada temperatur $>400^{\circ}\text{F}$. Kekakuan tidak terlalu tinggi dibandingkan dengan logam dan harga bahan baku yang relatif tinggi [4].

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Rahadi (1993), bahwa laju pemanasan yang optimum pada komposit akan menghasilkan ikatan-ikatan segmen polimer yang baik dan kuat. Pemanasan yang melebihi batas temperatur dan waktu curing optimum akan membuat komposit mengalami kerusakan pada ikatan molekulnya. Pada saat curing, jika diberikan tekanan yang lebih besar dapat menyebabkan sifat-sifat mekanisnya, diantaranya kuat tarik dan modulus flexural [5].

Panggabean M, (1996), meneliti bahwa matriks pada material komposit antara lain berfungsi untuk mendistribusikan beban pada serat-serat penguat. Oleh karena itu adanya cacat seperti *void*, retak pada matrik akan mempengaruhi fungsi matrik sebagai pendistribusi beban, misalnya terjadi pada konsentrasi tegangan disekitar cacat yang menurunkan sifat mekanik baik statis maupun dinamis dari material komposit. Kerusakan pada material komposit serat gelas-poliester merupakan kombinasi dari retak matrik, lepasnya ikatan serat dengan matrik, delaminasi dan serat putus [6].

Karena keuntungan dari komposit yang ringan, kaku dan kuat, maka komposit banyak digunakan dalam aplikasi kehidupan sehari-hari. Beberapa pertimbangan didalam memilih komposit, alasan menggunakan dan aplikasinya, seperti dalam Tabel 2.1 berikut ini [7]:

Tabel 2.1 Pertimbangan Pemilihan Komposit

Alasan Digunakan	Material yang Dipilih	Aplikasi
Ringan, kaku, kuat	Boron, semua karbon/ grafit, dan beberapa jenis aramid	Peralatan militer
Tidak mempunyai nilai ekspansi termal	Kanon/Grafit, yang mempunyai nilai modulus yang sangat tinggi	Untuk perlatan luar angkasa, contohnya sensor optik pada satelit
Tahan terhadap perubahan lingkungan	Fiber glass, vinyl ester, bisphenol A.	Untuk tangki dan sistim perpipaan, tahan korosi dalam industri kima.

Sumber: Harper, 2002

2.1.1 Komponen Penyusun Komposit

Komponen penyusun komposit terbagi atas dua bagian besar, yaitu *reinforcement* (penguat) dan matriks.

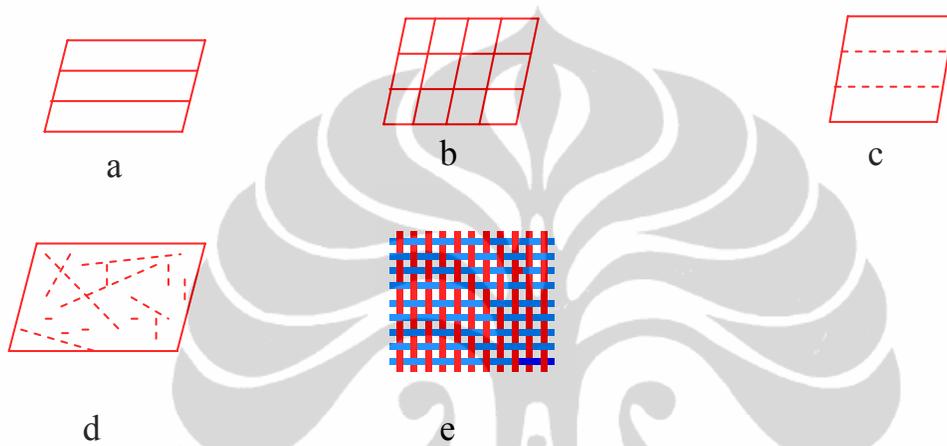
a. *Reinforcement* (penguat). *Reinforcement* berfungsi sebagai penguat atau kerangka dari suatu komposit. Biasanya *reinforcement* ini berupa *fiber*, maupun logam, yang memiliki fase diskontinyu. Berikut ini adalah beberapa *reinforcement* yang paling banyak digunakan : *Glass fiber*, Asbestos, kertas, katun atau linen, *Organic Fiber*, Polyethylene, Aramid dan lain-lain.

b. Matriks (pengisi). Matriks berfungsi untuk menjaga *reinforcement* agar tetap pada tempatnya di dalam struktur, membantu distribusi beban, melindungi *filament* di dalam struktur, mengendalikan sifat elektrik dan kimia dari komposit, serta membawa regangan interlaminar. Matriks yang paling umum dipakai adalah logam, keramik dan polimer, baik polimer termoset, maupun polimer termoplastik.

2.1.2 Orientasi Serat dalam Komposit

Komposit lembaran merupakan material yang tersusun atas lapisan-lapisan yang terikat satu sama lain. Setiap lapisan terdiri dari banyak serat yang terendam di dalam matrik. Jika serat panjang (*continous fibre*), dipergunakan

untuk membuat lapisan (*lamina*), serat tersebut dapat diorientasikan pada satu arah (*unidirectional orientation*) Gambar 2.2 (a), atau pada dua arah (*bidirectional orientation*) Gambar 2.2 (b). Lapisan juga dapat dikonstruksikan dengan menggunakan serat pendek (*discontinuous fibre*) baik pada satu arah Gambar 2.2 (c) maupun secara acak, Gambar 2.2 (d). Beberapa lapisan yang ditumpuk satu sama lain untuk mendapatkan ketebalan tertentu akan membentuk lembaran (*laminata*), dimana variasi lapisan dalam lembaran dapat terdiri dari serat searah maupun berbeda arah, Gambar 2.2 (e). Dasar pembuatan lapisan adalah rata susunan dari serat *unidirectional* atau serat *woven* dalam matrik. Dua jenis lapisan dasar sepanjang prinsip material adalah paralel dan tegak lurus kepada arah serat seperti gambar 2.2 (f) dibawah ini [8].



Gambar 2.1 Susunan dasar pembentukan komposit lembaran (a) Serat panjang searah (b) Serat panjang dua arah (c) Serat pendek searah (d) Serat pendek acak (e) Woven fiber

2.1.3 Serat (*fiber*)

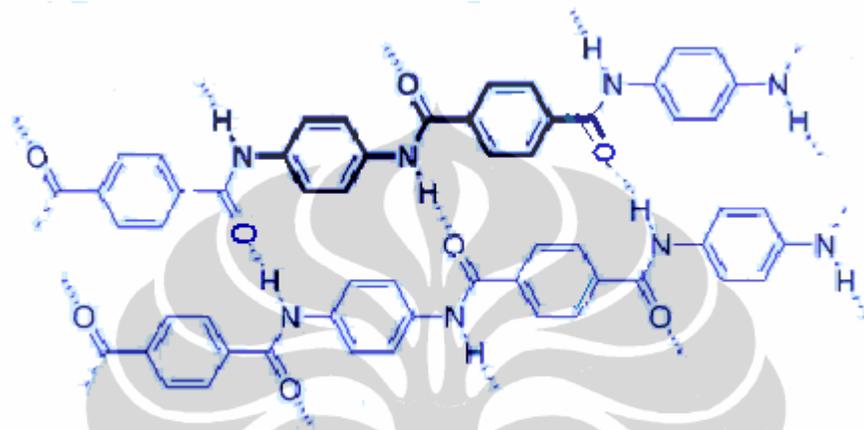
Serat sebagai bahan komposit dapat terdiri dari serat sintesis maupun serat alam. Adapun serat sintesis dan serat alam yang umum digunakan dijelaskan pada bagian berikut.

2.1.3.1 Serat Sintesis

Kevlar merupakan serat sintetis dengan nama kimia *poly paraphenylene terephthalamide*, termasuk senyawa poliamida aromatic. Kevlar merupakan

merek dagang fiber sintetik hasil temuan Stephanie Kwolek's seorang peneliti yang bekerja pada *DuPont Company* kelahiran Pennsylvania, Amerika Serikat pada 31 Juli 1923. Pada awalnya perusahaan dupont menciptakan kevlar®29 sebagai bahan anti peluru yang tersembunyi. Harga Kevlar cukup mahal karena proses produksinya menggunakan sulfat dengan konsentrasi yang tinggi. Asam sulfat dengan konsentrasi yang tinggi dibutuhkan untuk menjaga agar larutan polymer tidak larut selama proses sintesa dan pemintalan [9].

Setiap bagian monomer Kevlar terdiri dari 14 atom karbon, 2 atom nitrogen, 2 atom oksigen dan 10 atom hydrogen seperti dalam gambar 2.3 dibawah ini [10].



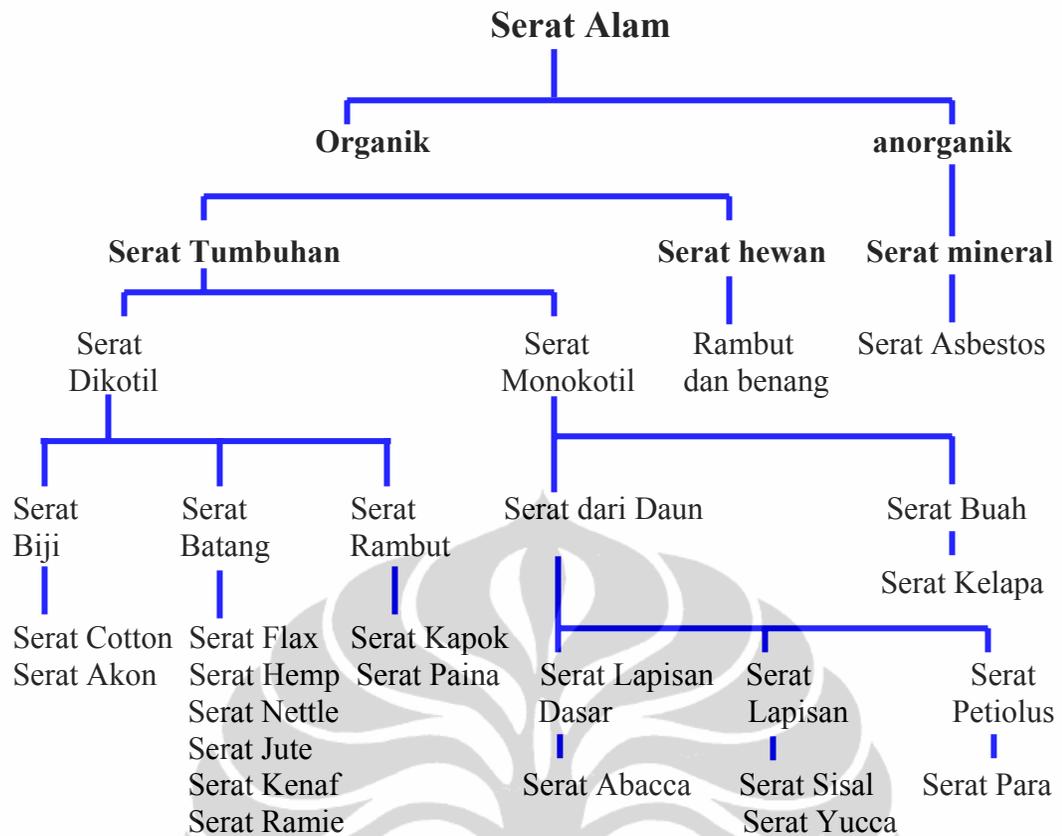
Gambar 2.2 Struktur Kimia Kevlar

2.1.3.2 Serat Alam Abacca

Serat alam juga memiliki kelebihan yaitu sifat “*Biodegradable*” atau material yang dapat terdegradasi oleh aktivitas biologis, dengan kelebihan tersebut, material menjadi ramah lingkungan. Adapun kelebihan serat alam yang lain adalah sifat non-abrasif serat alam terhadap alat-alat pemrosesan, sehingga relatif lebih aman. Selain itu, serat alam juga tidak mengandung partikel-partikel halus yang dapat membahayakan kesehatan (iritasi kulit). Hal ini sangat bertolak belakang dengan sifat serat glass (sintetik) yang sangat abrasif, baik terhadap kulit maupun terhadap peralatan proses. Namun kelemahan serat alam adalah tidak dapat beroperasi pada suhu tinggi.

Di alam, berbagai jenis serat alam banyak ditemukan, baik dari serat non organik (asbestos), maupun serat organik (serat hewan dan tumbuhan). Namun serat tumbuhan adalah jenis serat yang sangat banyak dikembangkan, seperti

jenis serat : rami, jute, flex, kenaf, sisal dan serat abacca. Klasifikasi umum serat alam dapat dilihat dalam Gambar 2.3 berikut ini:



Gambar 2.3 Kalasifikasi serat alam

Serat alam memiliki sifat mekanika yang sangat beragam, hal ini diakibatkan oleh kandungan selulosa, lignin dan pektin tiap-tiap serat berbeda. Cotton memiliki kandungan selulosa (85-90%) relatif lebih tinggi dibandingkan dengan serat alam lainnya, sementara kandungan ligninnya tidak ada, namun kandungan pektinnya hanya 0-1 %, sisanya adalah senyawa lain. Sedangkan serat abacca kandungan selulosanya 60%, lignin 12-13% dan pektin 1%. Kandungan kimia beberapa serat alam dapat dilihat dalam Tabel 2.2 berikut ini [11].

Tabel 2.2. Kandungan Kimia Serat Alam.

Jenis Serat	Kandungan Selulosa (%)	Kandungan Lignin (%)	Kandungan Pektin (%)
Flax	65-85	1-4	5-12
Hemp	60-77	3-10	5-14
Jute	45-63	12-25	4-10
Kenaf	45-57	8-13	3-5
Sisal	50-64	-	-
Abaca	60	12-13	1
Coir	30	40-45	-
Cotton	85-90	-	0-1

Sumber: Brother, Netherland, 2003 Leyte State University

Dari kandungan kimia serat alam yang berbeda ini, maka dapat dilihat sifat mekanis mekanis serat abacca dibandingkan dengan serat yang lain, seperti dalam Tabel 2.3 berikut ini.

Tabel 2.3. Sifat Mekanis Serat Alam.

Properti	Serat						
	flax	Hemp	Jute	Ramie	Sisal	Abaca	E-glass
Density (g/cm ³)	1.4	1.48	1.46	1.5	1.33	1.5	2.55
Tensile strength (Mpa)	800-1500	550-900	400-800	500	600-700	980	2400
E-modulus (Gpa)	60-80	70	30-Oct	44	38	22.4	73
Specific (E/density)	26-46	47	21-Jul	29	29	33.6	29
Elongation at failure (%)	1.2-1.6	1.6	1.8	2	3-Feb	2.9	3

Sumber: Brother, Netherland, 2003 Leyte State University

Pohon pisang abacca (*Musa textilis nee*) adalah tumbuhan keluarga pisang yang berasal dari Philippina. Tanaman abacca tumbuh subur di daerah tropis termasuk kawasan Indonesia dengan ketinggian 30- 1000 m dpl, dan curah hujan

minimal 2000 mm. Gambar Pisang Abacca adalah seperti dalam gambar 2.4 berikut ini:



Gambar 2.4 Pisang Abacca

Abacca merupakan tanaman pisang serat yang banyak digunakan sebagai bahan baku tekstil, bahan baku kerajinan dan kertas. Seratnya mempunyai sifat fisik yang kuat dan tahan lembab dan air asin sehingga baik digunakan sebagai bahan pembuat tali kapal laut, karena kuat, mengapung diatas air, dan tahan garam.

Batang abacca yang ditebang seluruh pelepah daunnya harus dipotong yang tersisa tinggal batangnya. Batang pisang yang ditebang selanjutnya dilakukan pemisahan pada setiap lapisan/pelepah batang. Pelepah batang disertai (*stripping*) dengan menggunakan pisau penyerat maupun menggunakan mesin penyerat (*spindle stripping*), kemudian dikeringkan dengan memanfaatkan panas sinar matahari. Gambaran secara umum proses pembuatan serat abaca dari pohon pisang abaca adalah seperti gambar 2.5 berikut ini [12]:



Gambar 2.5 Proses Pembuatan Serat Pisang Abacca

2.1.4 Resin

Resin adalah suatu material yang berbentuk cairan pada suhu ruang, atau dapat pula berupa material padatan yang akan meleleh pada suhu di atas 200 oC. Pada dasarnya resin adalah matriks, sehingga memiliki fungsi yang sama dengan matriks. Resin dapat dibagi menjadi dua bagian besar :

1. Resin Termoset

Resin termoset adalah resin yang akan mengeras jika dipanaskan, namun jika dipanaskan lebih lanjut tidak akan melunak, atau dengan kata lain proses pengerasannya *irreversible* [9]. Beberapa contoh resin termoset antara lain resin phenolic, polimer melamin, resin epoksi, polyester, silicon, dan poliamyde.

2. Resin Termoplastik

Resin termoplastik adalah resin yang melunak jika dipanaskan dan akan mengeras jika didinginkan, atau dapat dikatakan bahwa proses pengerasannya bersifat *reversible*. Resin termoplastik memberikan sifat-sifat yang lebih unggul daripada resin termoset, karena memiliki kekuatan lentur yang lebih baik, ketahanan terhadap cracking yang lebih tinggi, dan lebih mudah dibentuk tanpa katalis. Namun resin tipe ini sulit dikombinasikan dengan *reinforcement* karena viskositas dan kekakuannya yang tinggi. Contoh resin termoplastik antara lain polysulfone, polyphenylene sulfide, polyetherketone, polyamideimide, polybutylene terephthalate, nylon 6 dan polypropylene

a. Resin Polyester

Resin polyester mempunyai harga yang murah, mudah digunakan dan sifat versalitasnya. Selain itu polyester mempunyai daya tahan terhadap impak, tahan terhadap segala cuaca, transparan dan efek permukaan yang baik. Kerugian dari penggunaan resin polyester adalah daya rekat yang kurang baik dan sifat inhibisi dari udara dan filler.

Jenis hardener pada sistim curing untuk resin polyester kebanyakan adalah peroksida seperti benzoil peroksida atau peroksida metil etil keton yang lebih dikenal dengan nama MEKPO. Sedangkan filler yang banyak digunakan adalah kalsium karbonat karena harganya yang murah dan kemampuannya yang tinggi dalam kekuatan terhadap tekanan.

b. Resin Epoksi

Resin epoksi termasuk kedalam golongan *thermosetting*, sehingga dalam pencetakan perlu diperhatikan:

1. Mempunyai penyusutan yang kecil pada pengawetan
2. Dapat diukur dalam temperatur kamar dalam waktu yang optimal
3. Memiliki viskositas yang rendah disesuaikan dengan material penyangga.
4. Memiliki kelengketan yang baik dengan material penyangga mempunyai sifat baik dari bahan yang diawetkan.

Resin epoksi mengandung struktur epoksi atau oxirene. Resin ini berbentuk cairan kental atau hampir padat, yang digunakan untuk material ketika hendak dikeraskan. Resin epoksi jika direaksikan dengan hardener yang akan membentuk polimer *crosslink*. Hardener untuk sistim curing pada temperatur ruang dengan resin epoksi pada umumnya adalah senyawa polyamida yang terdiri dari dua atau lebih grup amina. Curing time sistim epoksi bergantung pada kereaktifan atom hidrogen dalam senyawa amina.

Reaksi curing pada sistim resin epoksi secara eksotermis, berarti dilepaskan sejumlah kalor pada proses curing berlangsung. Laju kecepatan proses curing bergantung pada proses curing bergantung pada temperatur ruangan tempat proses curing berlangsung. Untuk kenaikan temperatur setiap 10 °C, maka laju kecepatan curing akan menjadi dua kali lebih cepat, sedangkan untuk penurunan temperaturnya dengan besar yang sama maka laju kecepatan curing akan turun menjadi setengah dari laju kecepatan curing sebelumnya. Epoksi memiliki ketahanan korosi yang lebih baik dari pada polyester pada keadaan basah, namun tidak tahan terhadap asam. Epoksi memiliki sifat mekanik, listrik, kestabilan dimensi dan penahan panas yang baik.

Perbandingan beberapa sifat resin termoset adalah seperti digambarkan dalam Tabel 2.4 berikut ini

Tabel 2.4 Perbandingan Sifat Resin

	Epoksi	Polyester
Density (Mg/m^3)	1.1-1.4	1.1-1.5
Young's modulus (GNm^{-2})	3-6	2-4.5
Tensile strength (MNm^{-2})	35-100	40-90
Poisson's ratio	0.38-0.4	0.37-0.39
Compressive strength (MNm^{-2})	100-200	90-250
Shrinkage on curing (%)	1-2	4-8
Water absorption 24 h to 20°C (%)	0.1-0.4	0.1-0.3

Sumber : Hull D., *An Introduction to Composite Material*, 1981.

2.1.5 Proses Pabrikasi Komposit.

Material komposit dapat diproduksi dengan berbagai macam metode proses pabrikasi, disesuaikan dengan jenis matriks penyusun komposit dan bentuk material komposit yang diinginkan sesuai aplikasi selanjutnya.

2.1.5.1 Proses *Open Molding* (pencetakan terbuka)

a. **Proses hand lay up.** Proses ini dilakukan dalam kondisi dingin dan dengan memanfaatkan ketrampilan tangan. Serat bahan komposit ditata sedemikian rupa mengikuti bentuk cetakan atau *mandril*, kemudian dituangkan resin sebagai pengikat antara satu lapisan serat dengan lapisan yang lain. Demikian seterusnya, sehingga sesuai dengan ukuran dan bentuk yang telah ditentukan.

b. **Chopped Laminate Process.** Proses ini menggunakan alat pemotong fiber yang biasanya serat panjang membentuk serat menjadi lebih pendek.

c. **Proses *Filament Winding*.** Proses ini melalui metoda proses yang memanfaatkan sistem gulungan benang pada sebuah sumbu putar. Serat komposit dibuat dalam bentuk benang digulung pada sebuah *mandril* yang berbentuk sesuai dengan bentuk rancangan benda teknik, misalnya berbentuk tabung, kemudian resin yang berfungsi sebagai matrik dituangkan bersamaan dengan proses penggulungan serat tersebut, sehingga keduanya merekat dan saling mengikat antara satu lapisan gulungan dengan gulungan berikutnya, sampai membentuk benda teknik yang direncanakan.

2.1.5.2 Proses Close Molding (pencetakan tertutup)

a. Compression molding. Pada metode ini menggunakan cetakan yang ditekan tinggi sampai 1000 psi. Diawali dengan mengalirkan resin dan reinforcement dengan viskositas yang tinggi dalam cetakan pada suhu 330-400°F, kemudian mold ditutup dan terjadi penekanan pada material komposit.

b. Pultrusion. Pada metode ini pembentukan material komposit yang menggabungkan antara resin dan fiber berlangsung secara kontinyu. Proses ini digunakan pada pabrikasi komposit yang berpenampang tetap, seperti *rods* dan *bar section*

c. Resin transfer molding (RTM). Pada proses ini resin ditransfer atau diinjeksikan kedalam suatu tempat yang berisi fiber glass reinforcement. Reinforcement diletakkan diantara dua permukaan cetakan. Pasangan cetakan kemudian ditutup diberi klem, lalu resin berviskositas rendah diinjeksikan pada tekanan 50-100 psi.

d. Vacuum bag molding. Pada metode ini bertujuan untuk meningkatkan sifat mekanik dengan cara meminimalisasi jumlah udara yang terperangkap dalam proses pembuatannya.

e. Vacuum infusion processing. Metode ini adalah variasi dari vacuum bag molding dimana resin yang dituang dalam ruang hampa masuk kedalam cetakan dan membentuk laminasi. Setelah cetakan dipenuhi resin kemudian dilapisi dengan fiber reinforcement, kemudian resin diinfusi kembali kedalam cetakan untuk menyempurnakan sistem laminasi komposit [13].

2.2 KERAMIK

Keramik adalah bahan padat yang dibentuk dengan membakar, kadang dengan membakar dan ditekan, terdiri dari paling sedikit satu logam dan *nonmetallic elemental solid* (NMESs), paduan paling sedikit elemen non logam padat, atau paduan paling sedikit dua elemen nonlogam padat [14]. Magnesia atau MgO, adalah keramik karena disusun logam Mg, terikat dengan nonlogam O₂. Silika juga keramik jika kombinasi NMES dan non metal, dan TiC dan ZrB₂ juga merupakan keramik, karena kombinasi logam (Ti,Zr) dan NMESs (C,B)

2.2.1 Bahan Baku

Dalam industri pembuatan keramik, bahan baku yang umum digunakan adalah: Alumina, felspar, silika dan penambahan aditif. Beberapa jenis bahan baku tersebut, seperti penjabaran berikut ini [15].

A. Alumina

Alumina adalah istilah kimia yang khas untuk menyatakan oksida aluminium Al_2O_3 . Bahan alumina sangat berlimpah di alam, umumnya dalam bentuk hidroksida tidak murni atau hidrat, misalnya batuan bauksit dan laterit, kandungan alumina sangat tinggi. Sebagian besar alumina diperoleh dari bauksit yang dimurnikan dengan proses bayer untuk memisahkan kandungan oksidasi pengotor, seperti Fe_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 , dan sebagainya. Dengan cara ini dapat dicapai kemurnian nominal 99,5% Al_2O_3 dan sisanya sebagian besar berupa Na_2O dan CaO .

Bentuk alumina yang paling umum adalah korondum α Al_2O_3 dengan bangun kristal rombohedral dan γ Al_2O_3 yang mempunyai struktur spinel. Bentuk lainnya adalah aluminat, $Na_2O \cdot 11Al_2O_3$, meskipun bukan oksida murni, tetapi disebut sebagai γ alumina. Korondum sangat keras (angka 9 dalam skala Moh's) dan pada temperatur tinggi tahan terhadap serangan asam dan alkali.

Dibandingkan dengan keramik jenis lain, keramik alumina memiliki beberapa sifat yang lebih unggul, misalnya kekuatan, kekerasan, ketahanan terhadap pukulan, ketahanan terhadap kejutan suhu dan lain-lain. Sifat-sifat yang diinginkan dari keramik alumina untuk berbagai keperluan dapat diperoleh dengan mengatur kandungan alumina dan temperatur pembakarannya.

B. Felspar

Felspar dalam proses pembuatan barang keramik berfungsi sebagai bahan pelebur (*flux material*), maksudnya adalah untuk menurunkan titik lebur barang keramik yang dibakar, pada saat pembakaran berlangsung, setelah tercapai titik leburnya maka felspar mencair menjadi fase gelas, dan partikel-partikel lempung direkat satu sama lain sehingga apabila fase gelas tersebut membeku, terbentuk barang keramik yang kuat dan keras.

Felspar dalam perdagangan apabila kandungan Na_2O nya sebesar 7% atau lebih maka disebut soda felspar atau natrium felspar, jika kandungan K_2O nya

sebesar 10% atau lebih disebut potash felspar atau kalium felspar. Yang termasuk jenis natrium felspar antara lain albite ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), dan yang termasuk Kalium Felspar antara lain ortoklas (KAlSi_3O_8). Felspar banyak ditemui pada batuan pegmatit yang berasosiasi dengan kuarsa, juga terdapat pada batuan granit [16].

C. Silika

Diperkirakan kandungan silika (SiO_2) pada lapisan terluar kulit bumi tidak kurang dari 59%, sebagian besar diantaranya dalam bentuk perpaduan dengan berbagai oksida basa yang dikenal sebagai silikat. Kristal silikat terdiri dari rangkaian sel satuan tetrahedral yang dibangun oleh satu atom Si dan empat atom O, biasanya dalam bentuk elektrovalen. Karena tetrahedral tersebut dapat dirangkai dengan berbagai cara, maka terjadi bentuk kristal yang berbeda. Berdasarkan bentuk kristalnya silikat dapat dibedakan dalam 3 jenis utama yaitu kuarsa, kristobalit, dan tridimit.

Pada kristal kuarsa, ikatan atom Si-O-Si dari tetrahedral yang berdekatan dihubungkan dalam arah melingkar dan membentuk spiral, sehingga struktur kuarsa terdiri dari rantai-rantai spiral tersebut.

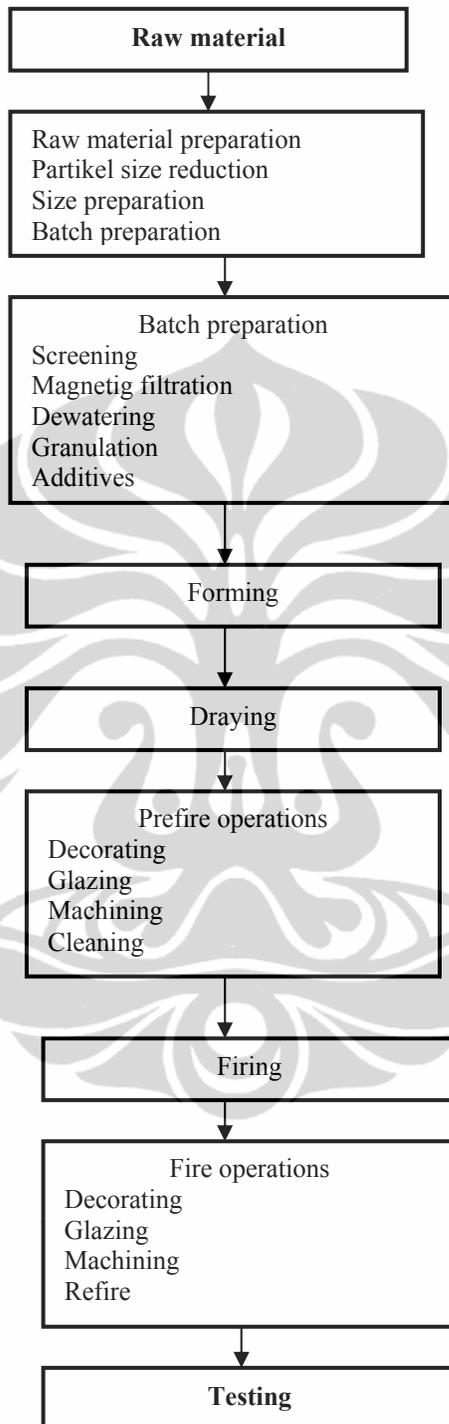
Struktur Kristobalit sama dengan struktur tridimit. Disini rangkaian tetrahedral membentuk cincin-cincin datar, setiap cincin terdiri dari 6 atom Si dan 6 atom O, tetapi karena bidang cincin sedikit terdistorsi, maka tidak semua atom Si terletak sebidang. Struktur kristobalit dan tridimit merupakan susunan dari rantai-rantai cincin-cincin tersebut, perbedaannya adalah distorsi bidang cincin pada kristobalit lebih besar dibandingkan distorsi bidang cincin tridimit [17].

D. Additif

Fungsi dari aditif ini adalah untuk memperbaiki mutu porselin, sehingga pada suhu relatif rendah akan mempunyai kuat mekanik yang cukup tinggi serta kenampakan yang lebih baik dibanding tipe porselin sebelumnya. Zirkon digunakan dalam pembuatan porselin, karena zirkon dapat mengkatalis fase kristal mulit, dan meningkatkan dari struktur ikatan dari fase gelas dan fase mekanik yang tinggi sehingga menurunkan kejut suhu dan menghindari retak-retak pada saat dibakar, dan meningkatkan derajat putih dari bodi [18].

2.2.2 Proses Pabrikasi Keramik

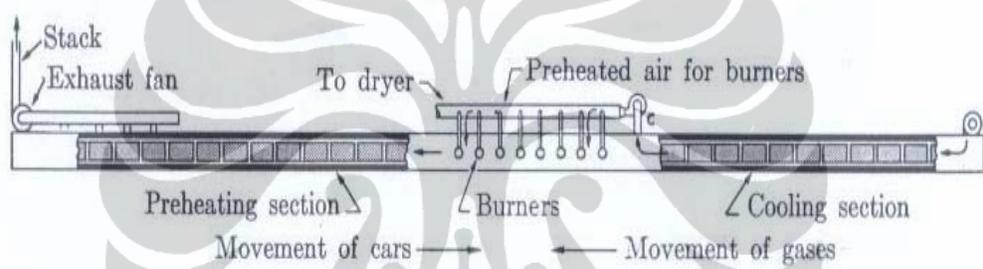
Produk keramik dapat diproduksi dalam berbagai ukuran, komposisi bahan, temperatur pembakaran dan bermacam-macam bentuk produk. Beberapa proses yang dilakukan untuk pembuatan keramik yaitu: penyiapan bahan mentah, proses pembentukan, proses pembakaran dan peralatan produk. Proses pembuatan keramik secara umum adalah seperti diagram alir dibawah ini [15]:



Gambar 2.6 Proses pabrikasi keramik

Sistim pembakaran (sintering) bahan dan produk keramik, yaitu dibakar dalam berbagai tanur yang dirancang untuk dioperasikan secara kontinyu. Sintering adalah istilah yang digunakan untuk menggambarkan kondisi produk selama pembakaran, kondisi ini menunjukkan bahwa produk, partikel-partikel telah saling bergabung, bersama-sama membentuk agregat yang lebih kuat. Alat pembakaran bertahap disebut juga pembakaran periodik, biasanya berbentuk *shuttle* (kotak-kotak yang disusun berjajar dan bertingkat) atau berbentuk elevator. Alat pembakaran elevator digunakan untuk barang-barang-produk dengan massa relatif ringan. Isolasi panas dinaikkan untuk penataan produk dan isolasi diturunkan untuk *cooling*. Alat pembakaran menggunakan kereta luncur dan tungku berjalan digunakan untuk volume produksi tinggi dan siklus pembakaran pendek sekitar 30 menit.

Gambar secara umum untuk proses pembakaran keramik dalam industri keramik dengan menggunakan alat pembakaran elevator seperti Gambar 2.7 berikut ini [19]:



Gambar 2.7 Proses pembakaran keramik

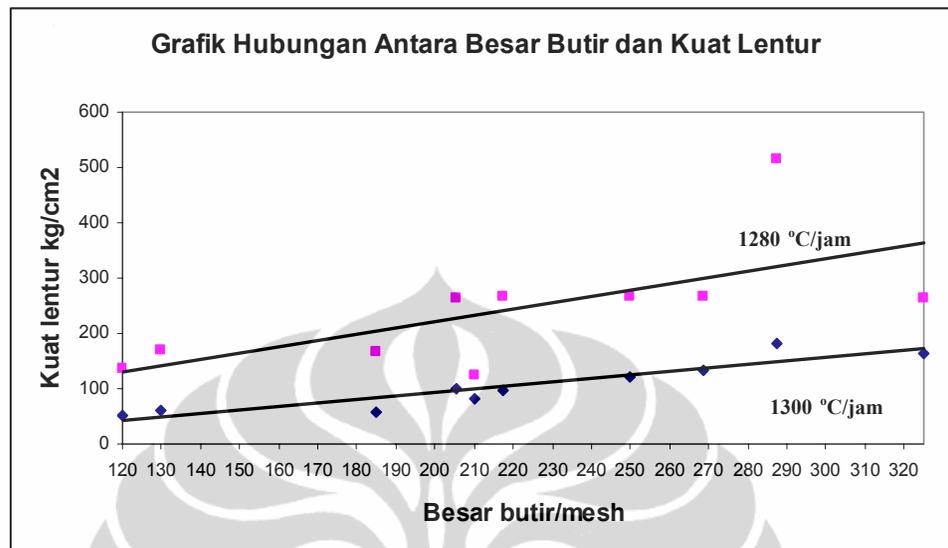
Panas pada pembakaran umumnya dihasilkan dari pembakaran gas alam, bahan bakar minyak atau listrik. Panas yang memancar dapat meningkatkan temperatur secara merata pada seluruh ruangan.

2.2.3 SIFAT MEKANIK KERAMIK

Pada umumnya sifat bahan badan keramik porselin yang dihasilkan tergantung pada keadaan bahan baku yang digunakan, pembentukan dan pembakarannya. Faktor bahan baku mempunyai peranan penting terhadap produk akhir, sifat-sifatnya ditentukan oleh perbedaan ukuran butir, morfologi, komposisi dan kereaktifannya. Bahan baku yang mempunyai ukuran butir tunggal yang

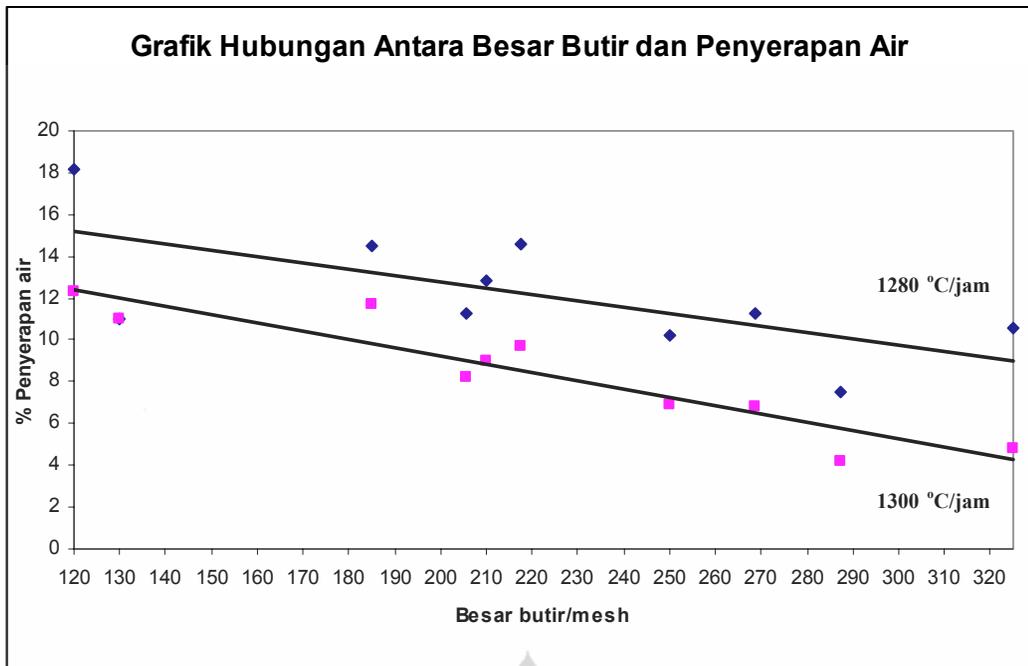
homogen, tidak akan menghasilkan sistim pemadatan yang baik (*poor packing*) dibandingkan dengan serbuk yang mempunyai variasi ukuran butir. Hal ini disebabkan jumlah cacat (luas total pori-pori) pada badan keramik dengan butiran tunggal akan lebih besar dan akibatnya kerapatan maksimum sulit dicapai [20].

Berdasarkan penelitian dari Suhandi dan Soesilowati, bahwa pengaruh tingkat kehalusan batir akan meningkatkan kuat mekanik (kuat lentur) keramik, seperti dalam Gambar 2.8.

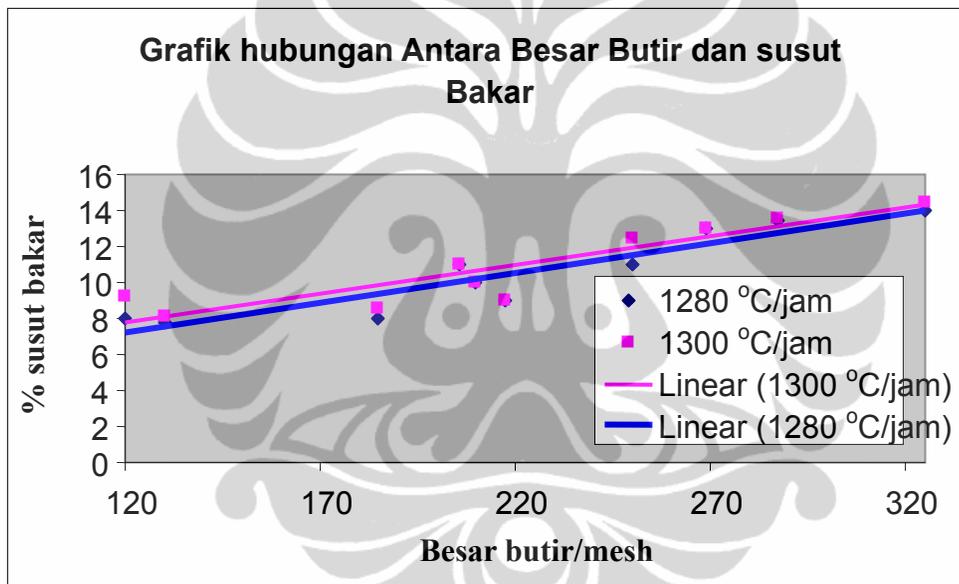


Gambar 2.8 Grafik hubungan besar butir dan kuat lentur

Harga peresapan air (porositas) menurun dengan makin meningkatnya ukuran butir (Gambar 2.9). Sedangkan susut bakar meningkat dengan meningkatnya kehalusan butir, hasilnya seperti pada gambar Gambar 2.10



Gambar 2.9 Grafik hubungan besar butir dan penyerapan air



Gambar 2.10 Grafik hubungan besar butir dan susut bakar

2.3 ROMPI TAHAN PELURU (*BODY ARMOR*)

Seiring dengan perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi saat ini, merupakan suatu terobosan maju dalam peradaban manusia. Penelitian dan pengembangan bahan-bahan canggih seperti polimer, keramik, logam, komposit yang mutakhir mendapat perhatian yang sangat besar. Keramik mula-mula dikembangkan di Amerika Serikat sekitar tahun 1960 untuk rompi tahan peluru

dan kursi tentara di dalam Helikopter. Pada saat sekarang, perkembangan dari keramik untuk perangkat militer terus berkembang. Disamping keramik sebagai bahan baku untuk rompi tahan peluru, kevlar dan spektra adalah merupakan bahan untuk backing material.

2.3.1 Negara-Negara Pembuat Rompi Tahan Peluru

Beberapa negara pembuat rompi tahan peluru diantaranya adalah:

1. Israel

Spesifikasi rompi tahan peluru yang diproduksi oleh Kata Ltd di Israel yang menggunakan plate keramik, dimana sifat mekaniknya bila dibandingkan dengan alumina-silika adalah seperti Tabel 2.5 berikut ini [21]:

Tabel 2.5. Spesifikasi Ultra Light Hard Plate dibandingkan dengan Alumina

Sifat	Satuan	Ultra lightweight Alumina-Silika	Alumina PTEX-200	Alumina PTEX-300	Alumina PTEX-ULTRA
Densitas minimum	g/cm	2,96-3,07	3,78	3,81	3,89
Ukuran butir	Micron	1	3	3	3
Porositas	%	0	0	0	0
Modulus Young	GPa	150	250	275	
Kekerasan (Hv10)	PGa	1300-1500	1250	1350	1560
Bending strength	MPa	150-200	290	310	340

Sumber: Israel, KATA ltd.

2. Amerika

Berdasarkan Gobain Ceramics, beberapa bahan yang dibuat untuk membuat rompi tahan peluru dan beberapa sifat fisiknya adalah seperti dalam Tabel 2.6 berikut ini [22]:

Tabel 2.6 Jenis Sifat Fisika Buatan Amerika

Physical Properties	Units	Silit® SKD Reaction Bonded	Norbide Hot Pressed	T196 Al ₂ O ₃	T198 Al ₂ O ₃	TZ3 Alumina Zirconia	Saphikon Sapphire
Composition		SiSiC	B ₄ C	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ ZrO ₂	Al ₂ O ₃
Density	g/cm ³	3.05	2.51	3.75	3.80	4.00	3.97
Hardness	kg/mm ²	N/A	2800	2000	N/A	N/A	2200
Flexural Strength	MPa x 10 ⁶ lb/in ²	250	425	300	320	320	760-1035 110-150
Modulus Elasticity	GPa x 10 ⁶ lb/in ²	300-380	440	300	380	340	435

Sumber: Goban Ceramic,.Niagara

3. Belanda. Tipe rompi tahan peluru yang diproduksi oleh Belanda adalah rompi peluru level IV.

Data teknisnya adalah:

a. Bagian depan:

- Dynema : 34 lapis
- Keramik: 300 x 250 x 15 mm, berat 3,43 kg

b. Bagian belakang :

- Dynema:34 layer

c. Berat rompi total : 5,92 kg.

4. Korea Selatan. Tipe rompi tahan peluru yang diproduksi adalah rompi peluru level IV bahan balistik kevlar.

Data teknisnya adalah:

a. Bagian depan:

- Kevlar : 32 lapis
- Keramik: 294 x 248 x 13 mm, berat 3,0 kg

b. Bagian belakang :

- Dynema:32 layer
- Keramik: 294 x 248 x 13 mm, berat 3,0 kg

c. Berat rompi total : 6 kg.

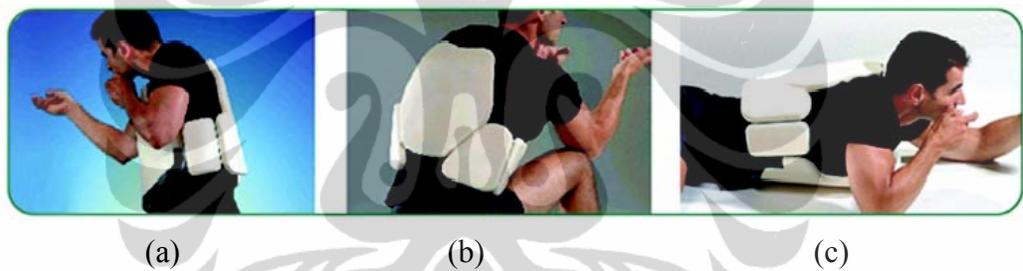
Untuk rompi taktis bagi rompi tahan peluru untuk militer dan polisi tipe IIA maksimal beratnya adalah 3,2 kg dan tipe II maksimal 3,5 kg. Dimana ketentuan rompi tersesebut seperti dalam Tabel 2.7 berikut ini [1].

Tabel 2.7. Ketentuan Rompi Taktis Tahan Peluru untuk Militer dan Polisi

Tipe rompi	IIA	II	IIIA	III	IV
Berat (kg)	3,2	3,5	3,8	4,1	5,2

Persyaratan rompi taktis yang ergonomis dikembangkan adalah rompi yang terdiri dari ciri-ciri berikut:

- Dapat menahan peluru kecepatan tinggi seperti: 7.62x39 PS M43 (AK-47), 6.62 x 51 NATO Ball, 5.56x45 M193
- Mempunyai kemampuan dalam menahan serangan beruntun (*multi hit*).
- Tidak membatasi gerak senjata sewaktu dipakai berdiri, jongkok dan merayap. (Gambar 2.11.)



Gambar 2.11 Gerakan saat memakai rompi. (a) berdiri, (b) jongkok, (c) Merayap

- Nyaman dipakai sewaktu berlari dan berjalan.
- Disain yang ergonomis yaitu rompi yang fleksibel untuk pemakai selama keadaan perang dan juga pengaman ekstra untuk Ginjal.(Gambar. 2.12)



(a)



(b)

Gambar 2.12 (a) Rompi tanpa cover, (b) Rompi Saat dipakai

- Tahan air.
- Rompi yang ultra ringan dengan menggunakan material tahan peluru yang maju [21].

2.3.2 Tipe Rompi Tahan Peluru

Menurut standar *National Institute of Justice, USA*, rompi anti peluru dikelompokkan dalam tujuh tipe didasarkan pada kemampuannya menahan peluru dari senjata. Dimana kekuatan serangan balistik dari peluru dipengaruhi oleh bentuk, kaliber dan kecepatan peluru. Adapun ketujuh tipe tersebut adalah seperti dalam Tabel 2.8 berikut ini [23].

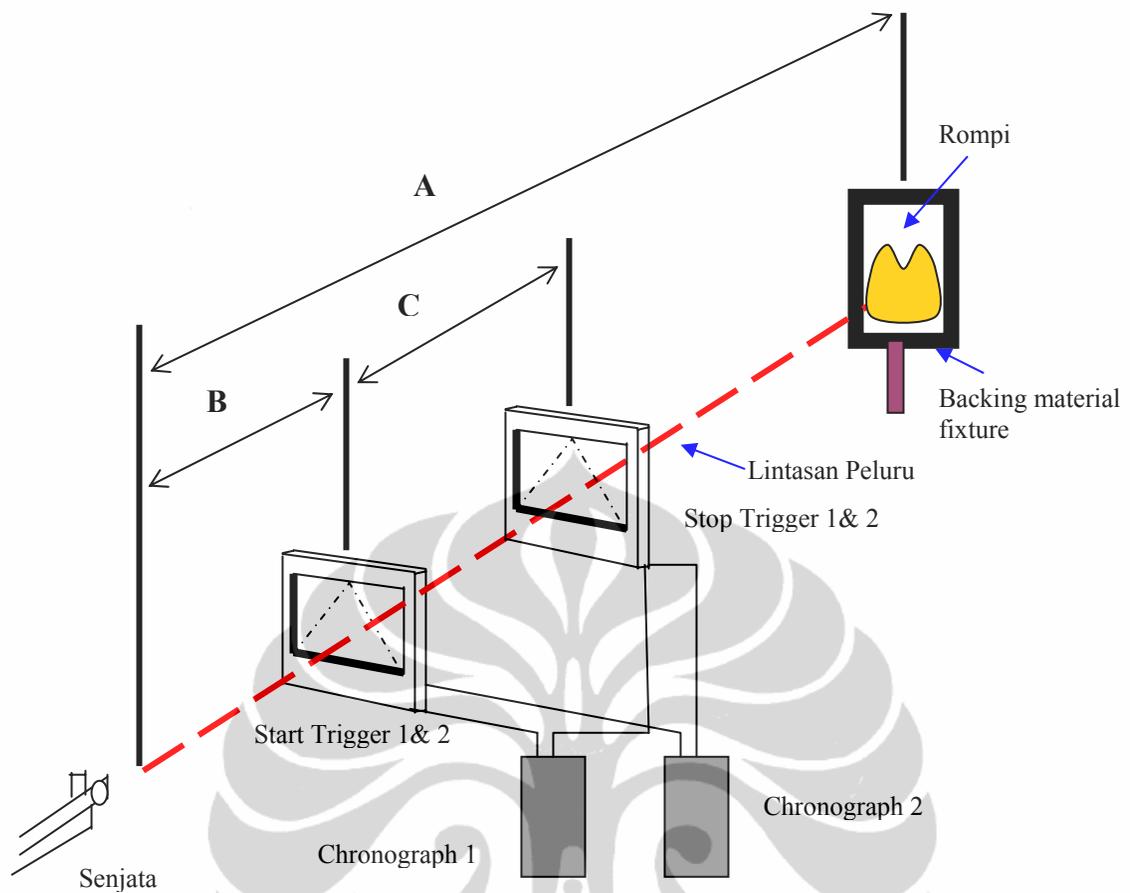
Tabel 2.8. Tipe Rompi Tahan Peluru

Tipe Rompi	Varibel Uji		
	Uji Amunisi	Massa Minimum Peluru	Kecepatan Minimum Peluru
I	.38 Special Round Nose	10,2 g 158 gr	259 m/s (850 ft/s)
	.22 Long Rifle High Velocity	2,6 g 40 gr	320 m/s (1050 ft/s)
IIA	.357 Magnum Jacketed Soft Point	10,2 g 158 gr	381m/s (1250 ft/s)
	9 mm Full Metal Jacketed	8,0 g 124 gr	332m/s (1090 ft/s)
II	.357 Magnum Jacketed Soft Point	10,2 g 158 gr	425 m/s (1395 ft/s)
	9 mm Full Metal Jacketed	8,0 g 124 gr	358 m/s (1175 ft/s)
IIIA	.44 Magnum Lead Semi-Wadcutter	15,55 g 240 gr	426 m/s (1400 ft/s)
	9 mm Full Metal Jacketed	8,0 g 124 gr	426 m/s (1400 ft/s)
III	7.62 mm (308 Winchester) Full Metal Jacketed	9,7 g 150 gr	838 m/s (2750 ft/s)
IV	30-60 Armor Piercing	10,8 g 166 gr	868 m/s (2850 ft/s)
Tipe Khusus	Spesifikasi dari pengguna		

Sumber : NIJ 100-98, 1998

Dalam pengujian rompi tahan peluru, sudut penembakan antara laras senjata dengan sasaran adalah 0°. Hasil yang diharapkan bahwa kedalaman deformasi maksimum adalah 44 mm (1,73 in).

Sementara untuk susunan peralatan dalam pengujian balistik untuk rompi tahan peluru didasarkan pada NIJ Standard-0101.03. Rangkaian peralatan dalam pengujian balistik adalah seperti Gambar 2.13.



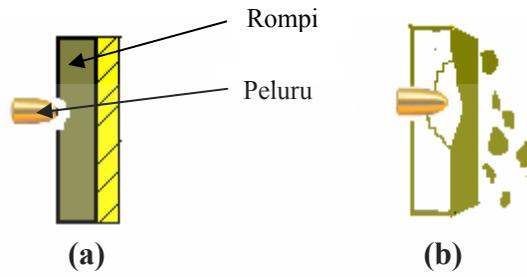
Gambar 2.13 Susunan peralatan uji balistik

Standar jarak dan tipe senjata:

- A- 5m untuk tipe I, II-A, II dan II-A; 15m untuk tipe III dan IV.
- B- 2m minimum untuk tipe I, II,A, II, dan III-A; 12m munimum untuk tipe III dan IV
- C- Sekitar $1,5m \pm 6mm$.

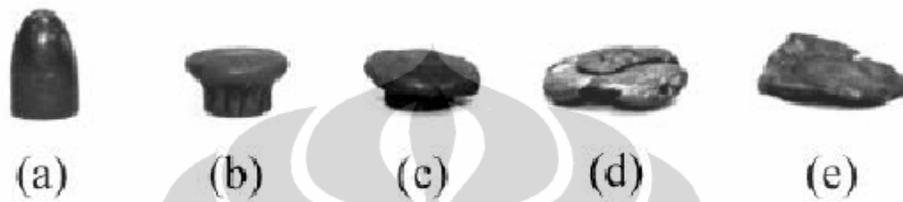
2.3.3 Cara Kerja Baju Tahan Peluru

Ketika peluru menerjang baju tahan peluru, peluru tertangkap didalam jaring serat mengabsorpsi dan mendispersi energi dari benturan (Gambar 2.14), menyebabkan peluru akan terdeformasi kebentuk pesek/cendawan (*mushroom*) .



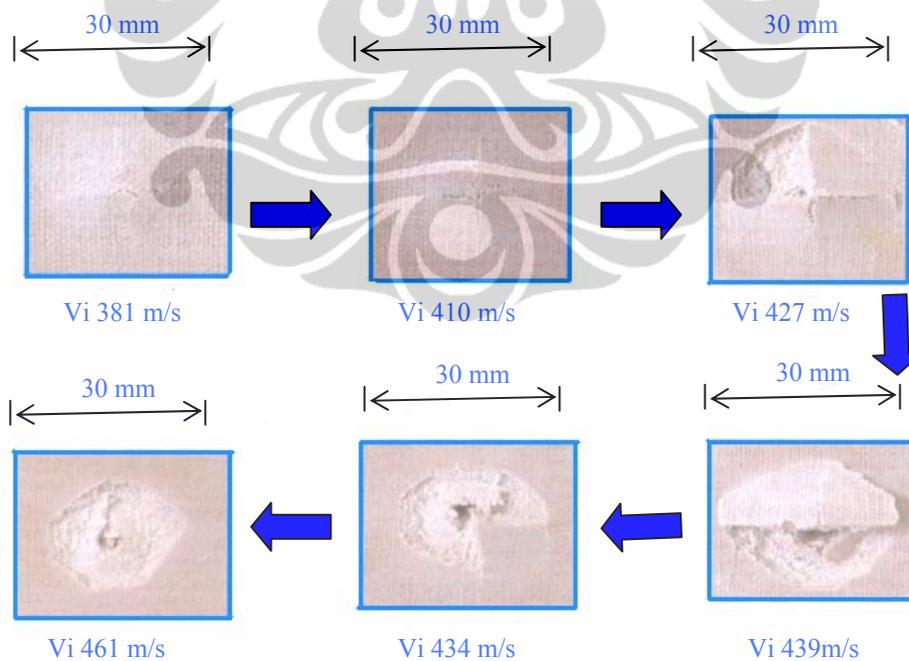
Gambar 2.14 Mekanisme kerja rompi tahan peluru, (a) saat peluru menghantam rompi, (b) setelah peluru menghantam

Deformasi proyektil yang signifikan diteliti ketika mencoba specimen grafit. Deformasi akan semakin signifikan jika digunakan kecepatan proyektil yang lebih besar, dibawah lapisan pertama tingkat penetrasi; (a) 0 ft/sec (b) 605 ft/sec (c) 665 ft/sec (d) 781 ft/sec (e) 833 ft/sec



Gambar 2.15 Bentuk Deformasi Proyektil

Beberapa mode kerusakan pada komposit dari hemp setelah diuji dengan balistik, menunjukkan bahwa semakin tinggi kecepatan proyektil, maka mode kerusakan akan semakin besar seperti Gambar 2.16.



Gambar 2.16 Mode kerusakan setelah uji balistik pada komposit dari hemp

2.4 BALISTIK

Balistik adalah suatu ilmu yang mempelajari tentang perjalanan peluru (*proyektil*) ketika ditembakkan dari suatu senjata. Perjalanan tersebut meliputi perjalanan di dalam laras senjata (*internal ballistics*), perjalanan di udara hingga menyentuh target (*external ballistics*), dan perjalanan melalui target jika terjadi penetrasi (*Terminal Ballistics*).

2.4.1 Internal Ballistics

Internal balistik adalah perjalanan peluru di dalam laras senapan. Peluru terdiri atas dua bagian, yaitu selongsong peluru yang berisi amunisi dan peluru itu sendiri. Pelatuk yang ditekan menghasilkan percikan api yang membakar amunisi [24]. Amunisi yang terbakar menghasilkan gas, yang dapat mencapai tekanan 40000 psi (pada pistol) atau 70000 psi (pada senapan). Proses pembakaran dalam senjata api seperti dalam gambar 2.17 berikut ini.



Gambar 2.17. Proses penembakan pada senjata. Berurutan dari atas: Peluru masuk kedalam kamar peluru, Pena pemukul memukul penggalak primer, gas panas menekan peluru keluar dari senjata, peluru keluar dari senjata dengan tekanan gas.

2.4.2 External Ballistics

External ballistics adalah perjalanan peluru sejak keluar dari laras hingga mengenai target. Ada beberapa persamaan yang digunakan untuk menggambarkan *external ballistics* :

1. Energi Kinetik (EK)

$$EK = 0,5 MV^2 \quad (2.1)$$

2. *Kinetic pulse* (KP)

Besaran ini menunjukkan tingkat besarnya volume kawah yang dapat terbentuk jika target terkena peluru.

$$KP = EK \times P \quad (2.2)$$

Dimana :

$$P = M \times V$$

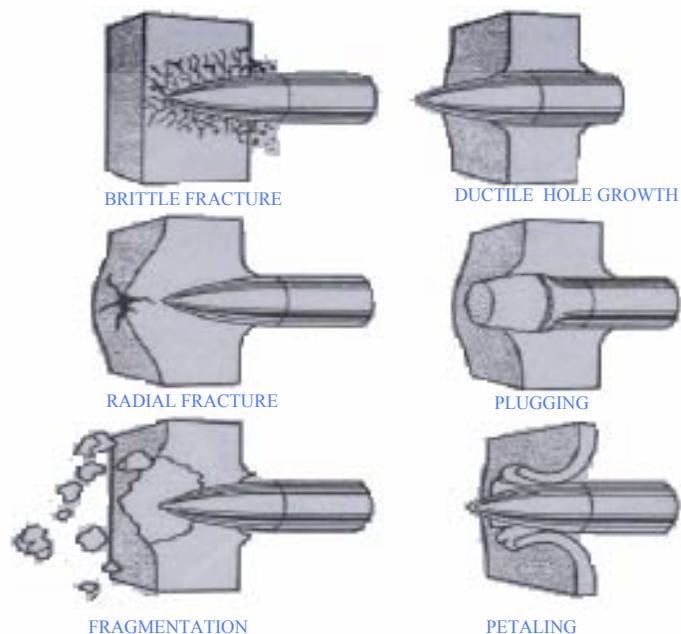
Peluru tidak melaju dalam jalur yang lurus hingga ke target, namun keberadaan efek rotasi menjaga peluru agar tetap berjalan pada sumbu yang lurus. Sepanjang perjalanannya, peluru akan menghadapi hambatan udara.

2.4.3 Terminal Ballistics

Peluru merusak targetnya karena energi kinetik yang dimilikinya. Ada tiga cara proses perusakan target [2] :

1. Mengoyak dan menghancurkan. Hal ini dilakukan oleh peluru berkecepatan rendah dari pistol, dengan kecepatan kurang dari 1000 ft/s. Proses pengoyakan dikenal sebagai peristiwa penetrasi.
2. Melubangi. Hal ini dihasilkan oleh peluru yang berkecepatan di atas 1000 ft/s. Hal ini disebut juga sebagai perforasi.
3. Gelombang kejut yang menekan medium udara, namun hanya terjadi dalam beberapa mikrosekon.

Beberapa jenis kerusakan pada target yang terkena proyektil, berbagai kerusakan tersebut seperti pada Gambar 2.18 di bawah ini [25]:



Gambar 2.18 Berbagai kerusakan akibat tumbukan proyektil

Tipe *plugging* dihasilkan oleh proyektil tumpul dengan hidung hemispherical pada kecepatan mendekati balistik limit. Lubang yang dihasilkan memiliki diameter hampir sama dengan diameter proyektil. Kerusakan radial biasanya terjadi pada material keramik, tidak menghasilkan lubang seperti *plugging*, dan merupakan hasil perforasi proyektil berujung tajam. Kerusakan *petaling* dihasilkan dari radial dan *circumferential stress* setelah terjadinya gelombang kejut awal. Kerusakan ini diperoleh dari proyektil berujung ogiv atau *conical* pada kecepatan rendah, atau dari proyektil tumpul dengan kecepatan mendekati balistik limit. Kerusakan tipe *fracture* dihasilkan dari gelombang kejut awal yang melebihi batas kekuatan material yang biasanya berdensitas rendah. Kerusakan *radial fracture* menunjukkan adanya retakan di bagian belakang target, ketika terjadi penetrasi proyektil. Kerusakan tipe *brittle fracture* adalah terbentuknya retakan-retakan pada target yang tertumbuk proyektil. Pada kerusakan tipe fragmentasi, target yang terkena proyektil akan terlepas menjadi bagian-bagian yang lebih kecil.

Ketika suatu material terkena proyektil maka energi *impactnya* akan terdisipasi di suatu area yang kecil. Stress yang ditimbulkan akibat benturan akan menggeser material di sekitar proyektil dan terbentuk suatu lubang dengan diameter lebih besar daripada diameter peluru. Mekanisme ini disebut sebagai *shear plug*.

Besarnya energi peluru yang terserap oleh target dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$E \text{ absorbed} = 0,5 M (V_{in}^2 - V_{out}^2) \quad (2.3)$$

Kecepatan ini dapat diukur dengan alat pencatat kecepatan atau *chronograph*, namun dapat juga ditentukan melalui persamaan empirik, yaitu melalui penentuan besaran V_{50} . V_{50} adalah suatu besaran yang menyatakan kecepatan peluru dimana terdapat 50% kemungkinan dapat menembus target. Besaran ini juga dikenal sebagai *ballistic velocity limit* (VL). Besaran ini diperoleh dengan menghitung rata-rata dari kecepatan peluru yang mampu menembus target dan kecepatan yang tidak mampu menembus target.

Jonas A Zukas, dkk mengembangkan suatu persamaan untuk mengukur besaran V_{50} ini, yaitu

$$VL = \sqrt{\alpha \left[\frac{L}{D} \right]^c} \sqrt{f(z) \frac{D^3}{M}} (m/s) \quad (2.4)$$

Dimana
$$z = \frac{T(\sec \theta)^{0.75}}{D} \quad (2.5)$$

Dan
$$f(z) = z + e^{-z} - 1 \quad (2.6)$$

Jika penembakan dilakukan tegak lurus dengan target, maka $\theta = 0^\circ$ dan $\sec 0^\circ = 1$. Parameter c diperoleh dari data base yang dikembangkan oleh Lambert, yaitu bernilai 0.3. Namun besaran α spesifik untuk setiap material target. Dari VL ini dapat ditentukan besarnya V_r (V_{out}) dengan persamaan :

$$V_r = 0 \text{ jika } V_s \text{ antara } 0 \text{ sampai dengan } VL \quad (2.7)$$

$$V_r = a (V_s^p - VL^p)^{1/p}, \text{ jika } V_s > VL \quad (2.8)$$

Dimana:

$$a = M / (M + (M^3/3)) \quad (2.9)$$

$$p = 2 + (z/3) \quad (2.10)$$

$$M^3 = \rho \cdot \mu \cdot D^3 \cdot z / 4 \quad (2.11)$$