

BAB IV

PENGOLAHAN DATA

IV.1 UJI BANDING

Uji banding dilakukan di laboratorium PERTAMINA dan laboratorium Polimer Departemen Teknik Metalurgi dan Material FTUI. Sampel yang digunakan dalam uji banding ini adalah film plastik BOPP. Kemudian dari hasil uji tarik di kedua laboratorium, data kuat tarik saat putus dan perpanjangan saat putus dianalisis. Grafik hasil pengujian banding di Lab. PERTAMINA dan Lab. DMM FTUI dapat dilihat pada Lampiran 7. Sedangkan data hasil uji yang telah diolah disajikan pada Tabel 4.1, 4.2, 4.3 dan 4.4.

Tabel 4.1. Hasil uji tarik di Lab. DMM FTUI dengan sampel searah mesin
(*machine direction*)

No	Ketebalan Minimum (μm)	Kuat tarik		Elongasi saat putus
		F . Kg	Kg/mm ²	ϵ (%)
1	21	3,604	17,162	133,892
2	20	3,515	17,577	124,643
3	21	3,600	17,145	134,845
4	20	3,432	17,159	122,146
5	20	3,455	17,273	127,951
6	20	3,243	16,213	114,071
7	21	3,485	16,595	122,568
8	21	3,546	16,887	121,476
9	22	3,859	17,542	126,002
	Rata-rata	3,527	17,061	125,288
	Deviasi	0,156	0,413	6,064

Tabel 4.2. Hasil uji tarik di Lab. Pemanding dengan sampel searah mesin
(*machine direction*)

No	Ketebalan Minimum (μm)	Kuat tarik		Elongasi saat putus
		F . Kg	Kg/mm ²	ϵ (%)
1	20	3,498	17,490	124,440
2	20	3,332	16,660	118,380
3	20	3,487	17,435	132,500
4	20	3,195	15,975	103,240
5	21	3,711	17,671	141,400
6	20	3,440	17,200	133,100
7	20	3,463	17,315	130,000
8	20	3,574	17,870	143,940
9	20	3,326	16,630	121,100
	Rata-rata	3,447	17,138	127,567
	Deviasi	0,142	0,568	11,776

Tabel 4.3. Hasil uji tarik di Lab. DMM FTUI dengan sampel tegak lurus arah mesin (*transverse direction*)

No	Ketebalan Minimum (μm)	Kuat tarik		Elongasi saat putus
		F . Kg	Kg/mm ²	ϵ (%)
1	22	5,180	23,548	73,798
2	22	4,945	22,478	71,988
3	22	4,765	21,659	61,427
4	22	4,819	21,903	62,735
5	23	5,219	22,693	72,005
6	21	4,754	22,637	57,252
7	22	5,033	22,875	62,731
8	22	4,946	22,482	67,717
9	21	4,721	22,482	58,803
	Rata-rata	4,931	22,529	65,384
	Deviasi	0,174	0,511	5,801

Tabel 4.4. Hasil uji tarik di Lab. Pemanding dengan sampel tegak lurus arah mesin (*transverse direction*)

No	Ketebalan Minimum (μm)	Kuat tarik		Elongasi saat putus
		F . Kg	Kg/mm ²	ϵ (%)
1	22	5,157	23,441	78,200
2	22	5,082	23,100	71,260
3	22	4,907	22,305	58,900
4	22	4,776	21,709	59,740
5	21	4,974	23,686	64,040
6	22	4,985	22,659	71,860
7	22	4,805	21,841	57,540
8	22	5,066	23,027	67,760
9	22	4,789	21,768	60,600
	Rata-rata	4,949	22,615	65,544
	Deviasi	0,131	0,705	6,719

IV.2 UJI DENGAN VARIASI KONDISI PENGUJIAN

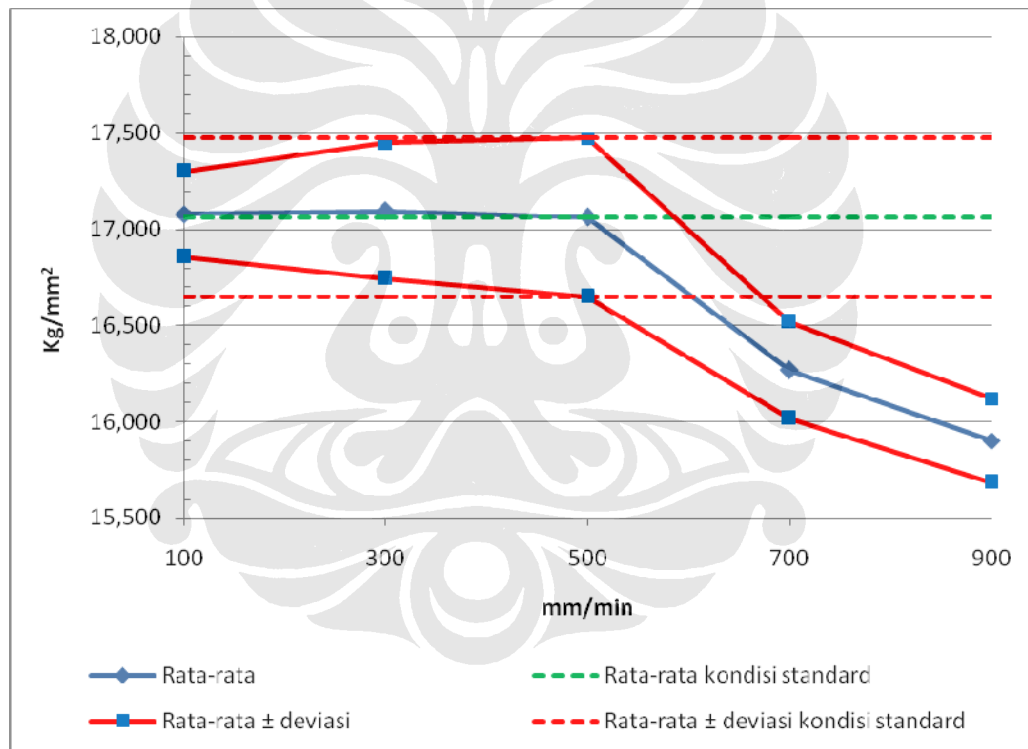
Setelah proses dan analisis uji banding selesai, dilakukan uji tarik dengan variasi kondisi pengujian di laboratorium Polimer Departemen Teknik Metalurgi dan Material FTUI dengan variabel kecepatan tarik dan lebar sampel. Grafik beban-regangan hasil uji tarik dengan variasi kondisi pengujian disajikan pada Lampiran 9 dan data seluruh hasil uji disajikan pada Lampiran 10. Seluruh hasil uji dibandingkan dengan kondisi standard dengan kecepatan tarik 500 mm/min dan lebar sampel 10 mm. Hal tersebut dilakukan karena pada saat uji banding, kondisi pengujian yang digunakan yaitu pada kecepatan tarik 500 mm/min dan lebar 10 mm sehingga seluruh hasil uji dapat dibandingkan dengan pengujian kondisi yang sudah dibandingkan dengan laboratorium terakreditasi. Hasil uji tarik dengan variasi kondisi pengujian dapat disajikan pada Sub Bab IV.2.1, IV.2.2 dan IV.2.3.

IV.2.1 Lebar sampel 10 mm dengan variasi kecepatan tarik

IV.2.1.1 Data kuat tarik saat putus

Tabel 4.5. Hasil uji kuat tarik saat putus (dalam satuan Kg/mm²)

Kecepatan tarik	Kuat tarik rata-rata δ	Standard deviasi s	Kuat tarik maksimum ($\delta + s$)	Kuat tarik minimum ($\delta - s$)
100	17,078	0,213	17,300	16,856
300	17,095	0,283	17,447	16,743
500	17,061	0,413	17,474	16,648
700	16,267	0,251	16,517	16,016
900	15,902	0,218	16,120	15,684

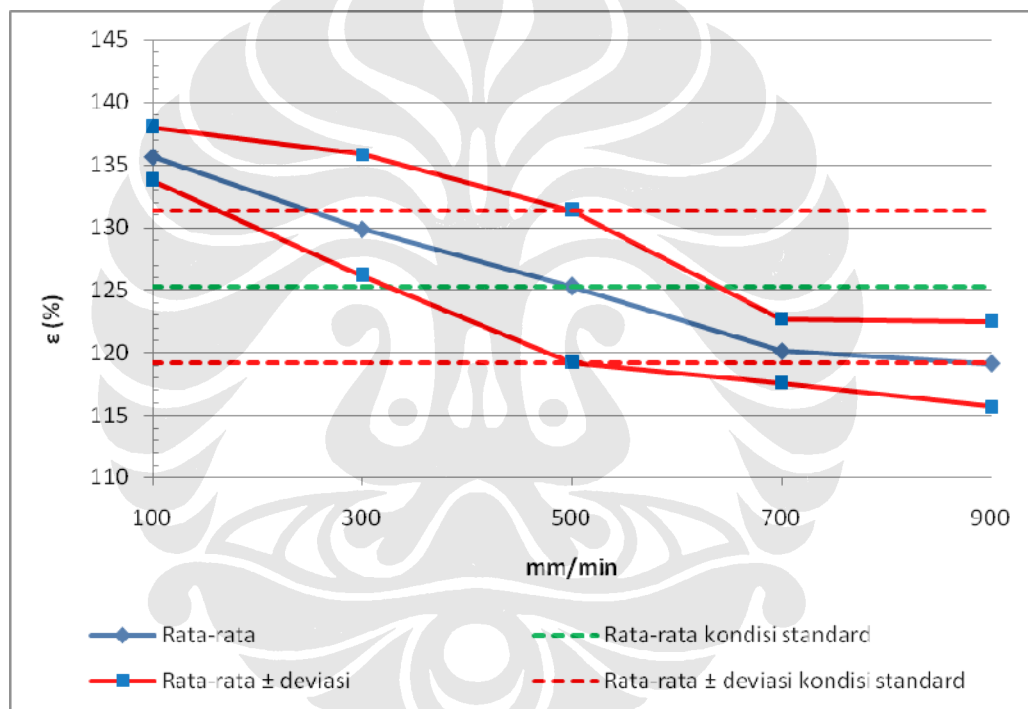


Gambar 4.1. Grafik kuat tarik saat putus dengan lebar sampel 10 mm versus kecepatan tarik.

IV.2.1.2 Data perpanjangan saat putus

Tabel 4.6. Hasil uji perpanjangan saat putus (dalam satuan %)

Kecepatan tarik	Elongasi rata-rata ϵ	Standard deviasi S	Elongasi maksimum ($\epsilon + S$)	Elongasi minimum ($\epsilon - S$)
100	135,893	1,843	138,015	133,771
300	130,992	3,319	135,826	126,158
500	125,288	2,574	131,353	119,224
700	120,118	2,574	122,692	117,544
900	119,087	3,409	122,496	115,679



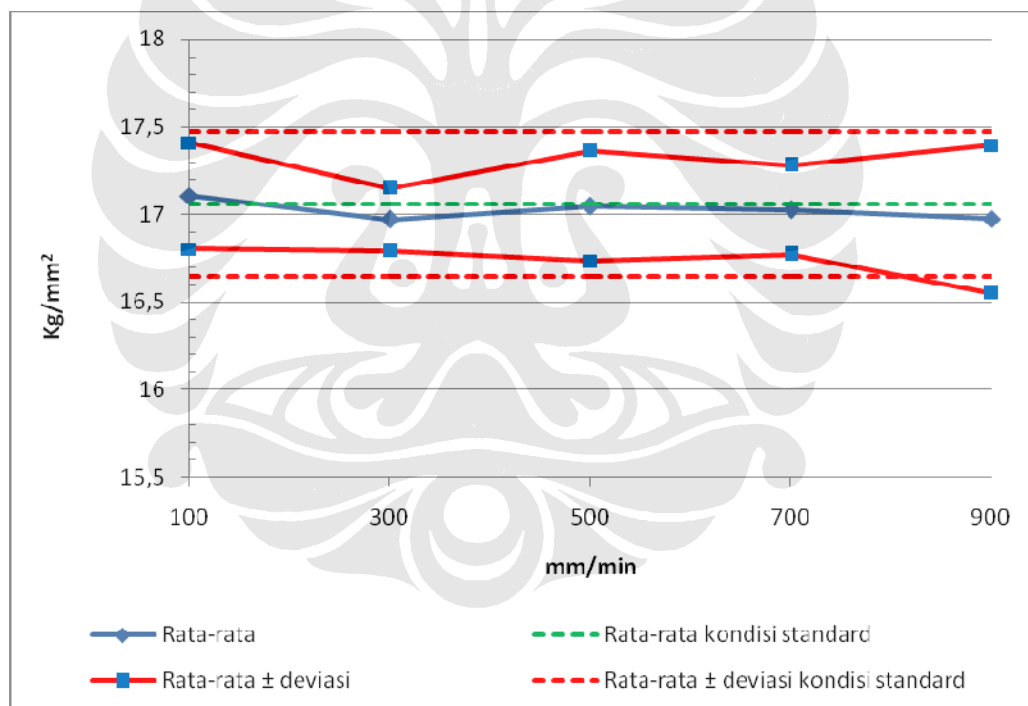
Gambar 4.2. Grafik perpanjangan saat putus dengan lebar sampel 10 mm versus kecepatan tarik.

IV.2.2 Lebar sampel 17,5 mm dengan variasi kecepatan tarik

IV.2.2.1 Data kuat tarik saat putus

Tabel 4.7. Hasil uji kuat tarik saat putus (dalam satuan Kg/mm²)

Kecepatan tarik	Kuat tarik rata-rata δ	Standard deviasi S	Kuat tarik maksimum ($\delta + S$)	Kuat tarik minimum ($\delta - S$)
100	17,105	0,302	17,407	16,803
300	16,971	0,179	17,150	16,793
500	17,048	0,315	17,363	16,733
700	17,026	0,255	17,280	16,771
900	16,973	0,423	17,395	16,550

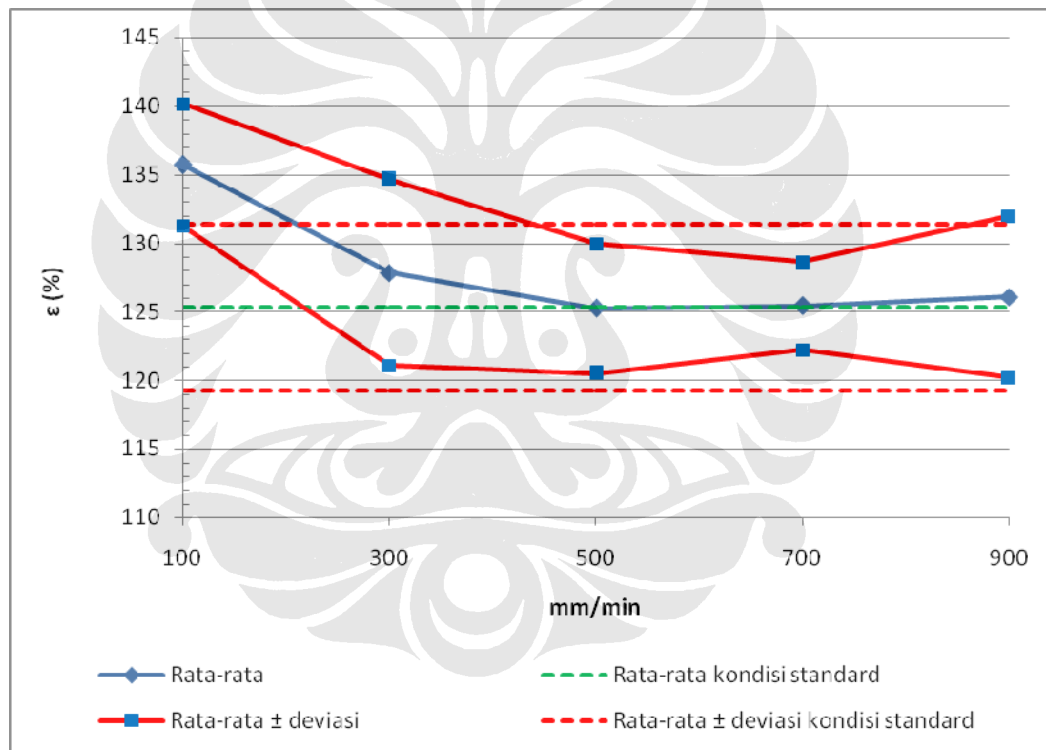


Gambar 4.3. Grafik kuat tarik saat putus dengan lebar sampel 17,5 mm versus kecepatan tarik.

IV.2.2.2 Data perpanjangan saat putus

Tabel 4.8. Hasil uji elongasi saat putus (dalam satuan persen)

Kecepatan tarik	Elongasi rata-rata ϵ	Standard deviasi S	Elongasi maksimum ($\epsilon + S$)	Elongasi minimum ($\epsilon - S$)
100	135,703	4,453	140,156	131,250
300	127,859	6,786	134,644	121,073
500	125,232	4,733	129,965	120,499
700	125,418	3,221	128,639	122,197
900	126,070	5,884	131,954	120,186



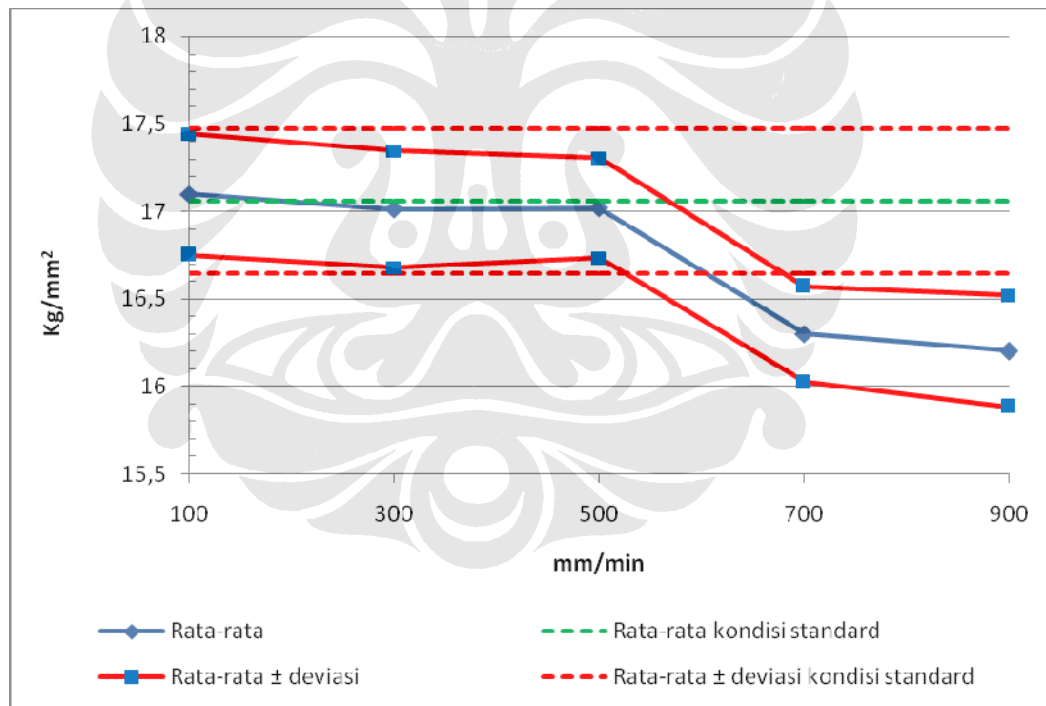
Gambar 4.4. Grafik perpanjangan saat putus dengan lebar sampel 17,5 mm versus kecepatan tarik.

IV.2.3 Lebar sampel 25 mm dengan variasi kecepatan tarik

IV.2.3.1 Data kuat tarik saat putus

Tabel 4.9. Hasil uji kuat tarik saat putus (dalam satuan Kg/mm²)

Kecepatan tarik	Kuat tarik rata-rata δ	Standard deviasi S	Kuat tarik maksimum ($\delta + S$)	Kuat tarik minimum ($\delta - S$)
100	17,098	0,346	17,443	16,752
300	17,012	0,333	17,345	16,678
500	17,020	0,286	17,305	16,734
700	16,301	0,271	16,572	16,030
900	16,203	0,319	16,522	15,883

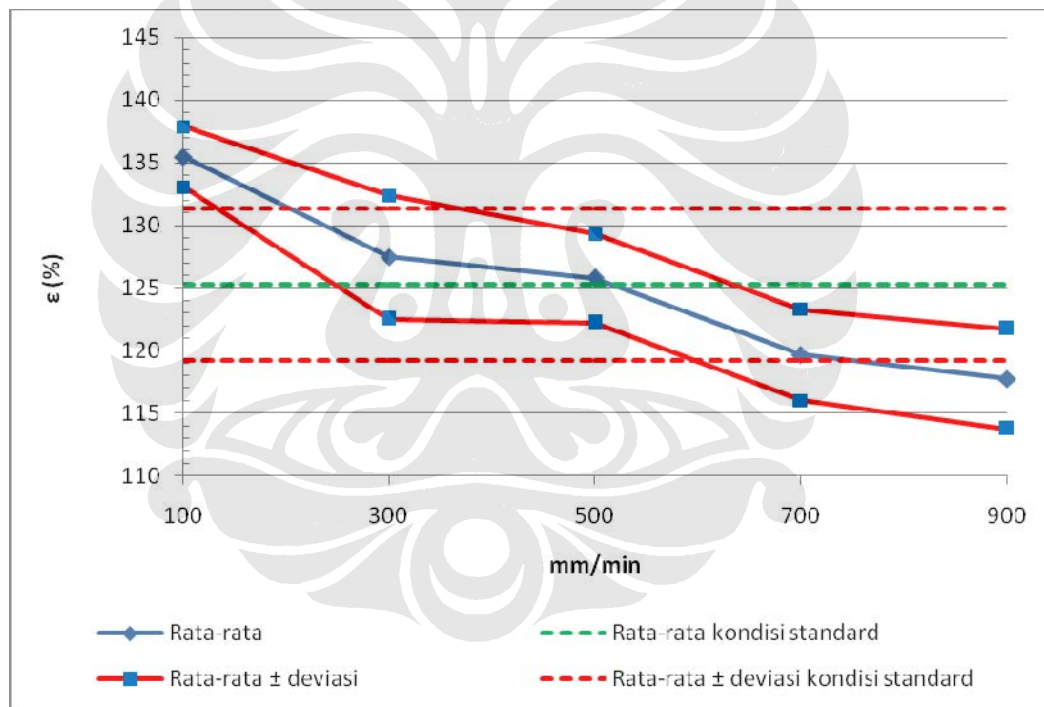


Gambar 4.5. Grafik kuat tarik saat putus dengan lebar sampel 25 mm versus kecepatan tarik.

IV.2.3.2 Data perpanjangan saat putus

Tabel 4.10. Hasil uji perpanjangan saat putus (dalam satuan %)

Kecepatan tarik	Elongasi rata-rata ϵ	Standard deviasi S	Elongasi maksimum ($\epsilon + S$)	Elongasi minimum ($\epsilon - S$)
100	135,474	2,412	137,886	133,063
300	127,450	4,945	132,394	122,505
500	125,768	3,541	129,310	122,227
700	119,656	3,638	123,294	116,018
900	117,728	3,985	121,713	113,743



Gambar 4.6. Grafik perpanjangan saat putus dengan lebar sampel 25 mm versus kecepatan tarik.

BAB V

PEMBAHASAN

V.1 UJI BANDING

Mesin Uji tarik *LFPlus* yang dibeli tahun 2002 milik Departemen Teknik Metalurgi dan Material FTUI, belum pernah digunakan dan diaktifkan. Mesin uji *LFPlus* juga memiliki penjepit (*grip*) berbentuk silinder, sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 5.1. *Grip* berbentuk silinder ini mengakibatkan terbentuk cacat akibat tekanan pada daerah penjepit (*grip area*) ketika pemasangan sampel film plastik BOPP. Untuk menghindari hal tersebut persiapan sampel menggunakan bantuan *cloth tape* seperti yang sudah dijelaskan pada Bab III.



Gambar 5.1. Penjepit sampel di Lab. PERTAMINA (kiri) dan di Lab. DMM FTUI (kanan).

Metoda persiapan sampel dan keakuratan mesin uji tarik *LFPlus* ini menjadi landasan dilaksanakannya uji banding. Uji banding (*cross-check testing*) dilakukan sebelum mesin uji ini dipakai untuk keperluan pengujian. Uji banding bertujuan membandingkan pengujian di laboratorium Polimer Departemen Teknik Metalurgi dan Material FTUI dengan laboratorium yang telah terakreditasi, dalam hal ini adalah laboratorium PT PERTAMINA yang memiliki mesin uji tarik Instron dan telah terakreditasi Juni 2004. Hasil akhir yang pada pengujian banding ini membuktikan apakah mesin uji tarik *LFPlus* Lab. DMM FTUI layak

digunakan. Metoda pendekatan sangat sederhana, yaitu membandingkan hasil uji pada Lab. PERTAMINA dengan Lab. DMM FTUI. Hasil data uji banding secara keseluruhan telah dipaparkan dalam Bab IV.1, sedangkan rangkuman hasil pengujian dapat dilihat dari Tabel 5.1 dan Tabel 5.2.

Tabel 5.1. Hasil uji banding kuat tarik saat putus (dalam satuan Kg/mm²)

Arah sampel	Laboratorium	Kuat tarik rata-rata δ	Standard deviasi S	Kuat tarik maksimum ($\delta + S$)	Kuat tarik minimum ($\delta - S$)
TD	PERTAMINA	22,615	0,705	23,320	21,910
	DMM	22,529	0,511	23,040	22,017
MD	PERTAMINA	17,138	0,568	17,707	16,570
	DMM	17,061	0,413	17,474	16,648

Tabel 5.2. Hasil uji banding perpanjangan saat putus (dalam satuan %)

Arah sampel	Laboratorium	Elongasi rata-rata ϵ	Standard deviasi S	Elongasi maksimum ($\epsilon + S$)	Elongasi minimum ($\epsilon - S$)
TD	PERTAMINA	65,544	6,719	72,263	58,826
	DMM	65,384	5,801	71,185	59,583
MD	PERTAMINA	127,567	11,776	139,343	115,791
	DMM	125,288	6,064	131,353	119,224

Dari hasil pengujian tersebut, dapat dilihat bahwa perbandingan rata-rata uji kuat tarik TD (*Transverse Direction*) pada laboratorium DMM dengan PERTAMINA adalah 99,617 %, sedangkan perpanjangan 99,755 %. Untuk MD (*Machine Direction*) perbandingan kuat tarik 99,549 %, sedangkan perpanjangan 98,214 %. Sehingga, persentase selisih dari hasil uji tarik film plastik BOPP di kedua laboratorium kurang dari 2 %.

Standard deviasi pada perpanjangan dapat dikatakan cukup signifikan. Hal ini wajar dalam sampel film plastik. Proses produksi yang melibatkan energi panas pada setiap bagian proses menyebabkan ketidakseragaman struktur dan sifat mekanik seperti dijelaskan pada Bab II. Pada kuat tarik putus arah mesin (*machine direction*), hasil uji dengan alat LFPlus mempunyai deviasi 0,413. Maka nilai maksimum kuat tarik putus dengan alat LFPlus adalah 17,474 kg/mm² dan

minimum 16,648 kg/mm². Sedangkan dengan mesin Instron milik Lab. PERTAMINA mempunyai deviasi kuat tarik saat putus sebesar 0,568. Maka nilai maksimum kuat tarik putus dengan alat Instron adalah 17,707 kg/mm² dan minimum 16,570 kg/mm². Dari data tersebut, dapat disimpulkan bahwa nilai deviasi laboratorium Polimer DMM FTUI lebih kecil pada kuat tarik saat putus dengan sampel searah mesin. Namun tidak hanya pada hasil kuat tarik saat putus dengan sampel searah mesin, nilai deviasi perpanjangan maupun kuat tarik saat putus dengan sampel arah tegak lurus mesin (*transverse direction*) dengan alat LFPlus milik Lab. Polimer DMM FTUI mempunyai nilai lebih kecil daripada Lab. PERTAMINA. Sehingga nilai maksimum dan minimum seluruh hasil uji tarik dengan sampel film plastik BOPP yang dilakukan di Lab. DMM FTUI masuk dalam range nilai hasil uji tarik di laboratorium PT PERTAMINA.

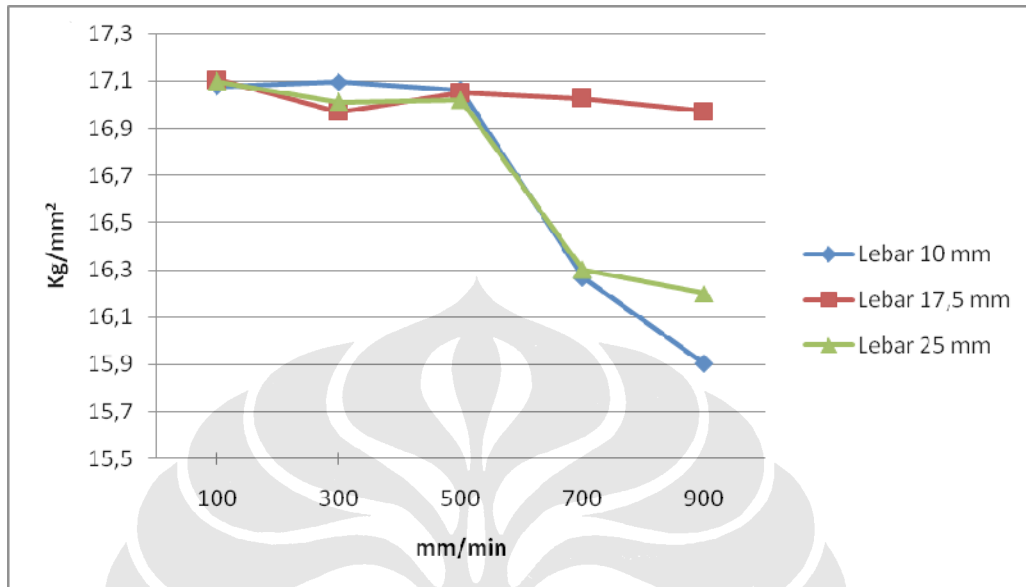
Tabel 5.3. Perbandingan hasil uji tarik film plastik BOPP

Arah sampel	Variabel	Perbandingan (Lab DMM/Lab PERTAMINA)* 100 %	Persentase selisih ((Lab DMM/Lab PERTAMINA) - 1)* 100 %
TD	Kuat tarik (Kg/mm ²)	99,617	0,383
	Elongasi (%)	99,755	0,245
MD	Kuat tarik (Kg/mm ²)	99,549	0,451
	Elongasi (%)	98,214	1,786

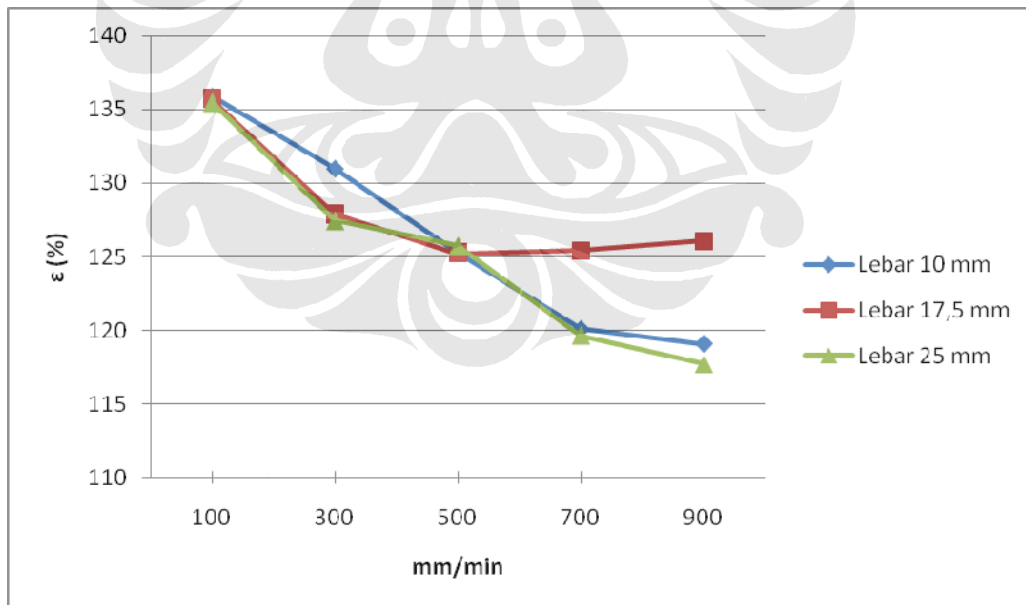
Persentase selisih < 2 %, seperti disajikan pada Tabel 5.3, membuktikan bahwa hasil uji tarik film plastik dengan mesin uji LFPlus milik Departemen Teknik Metalurgi dan Material FTUI mendekati hasil uji laboratorium PT PERTAMINA yang telah terakreditasi dan nilai deviasi yang lebih kecil membuktikan mesin uji LFPlus milik Departemen Teknik Metalurgi dan Material FTUI mempunyai sifat mampu produksi ulang (*reproducibility*). Maka dapat disimpulkan mesin uji LFPlus milik Departemen Teknik Metalurgi dan Material FTUI dan metoda persiapan film plastik seperti yang telah dijelaskan pada Bab III layak digunakan untuk pengujian tarik film ataupun lembaran (*sheet*).

V.2 UJI DENGAN VARIASI KONDISI PENGUJIAN

V.2.1 Kuat tarik dan perpanjangan saat putus



Gambar 5.2. Grafik rata-rata kuat tarik saat putus dengan variasi lebar sampel versus kecepatan tarik.



Gambar 5.3. Grafik rata-rata perpanjangan saat putus dengan variasi lebar sampel versus kecepatan tarik.

Pada Gambar 5.2 memperlihatkan kuat tarik saat putus film plastik BOPP dengan lebar sampel 10 mm mengalami penurunan pada kecepatan tarik di atas 500 mm/min, sedangkan turun pada kecepatan tarik 700 dan 900 mm/min. Penurunan kuat tarik saat putus ini cukup drastis. Pada kecepatan tarik 700 mm/min, kuat tarik saat putus berada pada 16,267 kg/mm² sedangkan pada kecepatan tarik 900 mm/min berada pada 15,902 kg/mm². Pada kecepatan 100 mm/min sampai 500 mm/min nilai kuat tarik saat putus cenderung stabil dan seluruh nilai kuat tarik saat putus masuk dalam range kondisi standard (kecepatan tarik 500 mm/min dan lebar sampel 10 mm) seperti pada Gambar 4.1. Kondisi ini berbeda dengan hasil perpanjangan saat putus. Secara umum, hasil perpanjangan saat putus dengan lebar sampel 10 mm turun. Pada Gambar 4.2 dapat disimpulkan bahwa hanya pada kecepatan tarik 500 mm/min yang masuk dalam range kondisi standard.

Pada hasil kuat tarik saat putus dengan lebar sampel 17,5 mm cenderung stabil dan seluruhnya masuk dalam range kondisi standard, kecuali pada kecepatan tarik 900 mm/min. Dari Gambar 4.3 dapat dilihat bahwa kecepatan tarik 900 mm/min nilai minimum kuat tarik saat putus melewati range dari kondisi standard. Seperti pada lebar sampel 10 mm, nilai perpanjangan saat putus pada kecepatan tarik di bawah 500 mm/min sangat tinggi, sedangkan di atas kecepatan tarik 500 mm/min cenderung stabil. Dengan melihat nilai kuat tarik dan perpanjangan saat putus, nilai hasil uji dengan lebar sampel 17,5 mm yang masuk pada range kondisi standard adalah pada kecepatan tarik 500 mm/min dan 700 mm/min.

Hasil berbeda diperlihatkan pada hasil uji dengan lebar sampel 25 mm. Kuat tarik saat putus pada lebar sampel 25 mm kecepatan tarik di bawah 500 mm/min cenderung stabil, dan mendekati nilai hasil kuat tarik saat putus dengan lebar sampel 17,5 mm. Namun di atas kecepatan tarik 500 mm/min, nilai kuat tarik saat putus turun menyerupai nilai kuat tarik saat putus pada lebar sampel 10 mm. Pada kecepatan tarik 700 mm/min, nilai kuat tarik saat putus berada pada 16,301 kg/mm² dan pada kecepatan tarik 900 mm/min mempunyai nilai 16,203 kg/mm². Sama seperti pada lebar sampel 10 mm dan 17,5 mm, perpanjangan saat putus di bawah kecepatan tarik 500 mm/min tinggi tetapi kemudian turun secara

perlahan sesuai dengan nilai kuat tarik saat putus. Secara keseluruhan, hasil uji pada lebar 25 mm yang masuk dalam range kondisi standard adalah 500 mm/min saja.

Variasi hasil uji tarik ini dapat diakibatkan oleh cacat pada film plastik BOPP yang sulit dihindari. Pada proses pembuatan film plastik, perbedaan kecepatan rol menghasilkan ketebalan yang tipis. Namun, hal tersebut dapat menyebabkan cacat goresan akibat kontak dengan permukaan rol.^[10] Cacat goresan ini dapat dilihat seperti garis sepanjang arah mesin (*machine direction*). Cacat goresan ini sulit dihilangkan dan selalu ada pada produk film plastik. Akibat adanya cacat pada permukaan film plastik dapat menurunkan kekuatan tarik. Pada saat kecepatan tarik meningkat, efek dari cacat ini meningkat pula. Namun, penambahan lebar sampel dapat mengurangi efek dari cacat sampel.^[11] Sampel lebar 17,5 mm seperti pada Gambar 5.2, kuat tarik cenderung stabil dan tidak mengalami penurunan. Sedangkan pada sampel dengan lebar 10 mm terjadi penurunan yang signifikan. Hal ini karena efek cacat berkurang akibat penambahan lebar sampel. Sedangkan pada kecepatan tarik di atas 500 mm/min, seharusnya sampel dengan lebar sampel 25 mm tetap stabil sama seperti lebar sampel 17,5 mm tetapi spesifikasi penjepit (*grip*) mesin uji LFPlus tidak mendukung. Sampel yang terlalu lebar menyebabkan kerutan di tengah sampel sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 5.4, sehingga tegangan beban terkonsentrasi di pinggiran sampel. Kerutan ini diakibatkan gengaman grip yang berbentuk silinder tidak maksimal. Pada kecepatan tarik di atas 500 mm/min efek tersebut meningkat sehingga menyebabkan penurunan kekuatan tarik.



Gambar 5.4. Kerutan pada sampel (lingkaran merah).

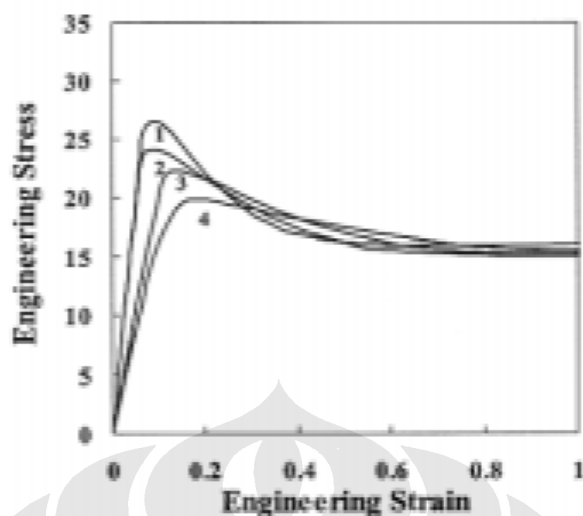
Pada Gambar 5.3 memperlihatkan perpanjangan saat putus pada lebar sampel 10 mm, 17,5 mm dan 25 mm juga cenderung turun, kecuali lebar sampel 17,5 mm pada kecepatan tarik 500 mm/min sampai 900 mm/min. Perpanjangan saat putus kecepatan tarik di bawah 500 mm/min cenderung tinggi karena pada daerah penjepit (*grip area*) terjadi slip antara *cloth tape* dengan permukaan plastik sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 5.5. Sedangkan perpanjangan saat putus pada kecepatan tarik di atas 500 mm/min cenderung rendah karena mengikuti nilai dari kuat tarik saat putus. Semakin tinggi nilai kuat tarik saat putus, semakin tinggi pula persentase perpanjangannya, begitu pula sebaliknya. Seperti pada pembahasan sebelumnya, adanya cacat pada sampel film plastik BOPP akan memberikan efek negatif jika kecepatan tarik yang tinggi, sehingga nilai kuat tarik saat putus menjadi rendah. Oleh karena itu, nilai perpanjangan saat putus juga rendah.



Gambar 5.5. Slip antara *cloth tape* dengan permukaan plastik.

Gambar 5.2 dan 5.3 menunjukkan bahwa hasil uji tarik pada kecepatan tarik 500 mm/min cenderung stabil untuk berbagai lebar sampel film plastik BOPP. Maka pengujian ini juga membuktikan bahwa ASTM D 882 sesuai karena pengujian pada kecepatan tarik 500 mm/min dapat digunakan untuk berbagai lebar sampel.

Hasil kuat tarik dan perpanjangan saat putus dengan lebar sampel 17,5 mm pada mesin uji *LFPlus* milik Departemen Teknik Metalurgi dan Material FTUI, memiliki hasil yang baik pada kecepatan tarik 500 mm/min dan 700 mm/min karena nilai maksimum dan minimum kuat tarik serta perpanjangan berada pada range kondisi standard (kecepatan tarik 500 mm/min, lebar sampel 10 mm), seperti pada Gambar 4.3 dan 4.4. Sehingga untuk meningkatkan produktifitas dapat menggunakan kecepatan tarik 700 mm/min dengan lebar sampel 17,5 mm. Sedangkan pada lebar sampel 10 mm dan 25 mm, hanya pada kecepatan tarik 500 mm/min saja yang masuk range kondisi standard.

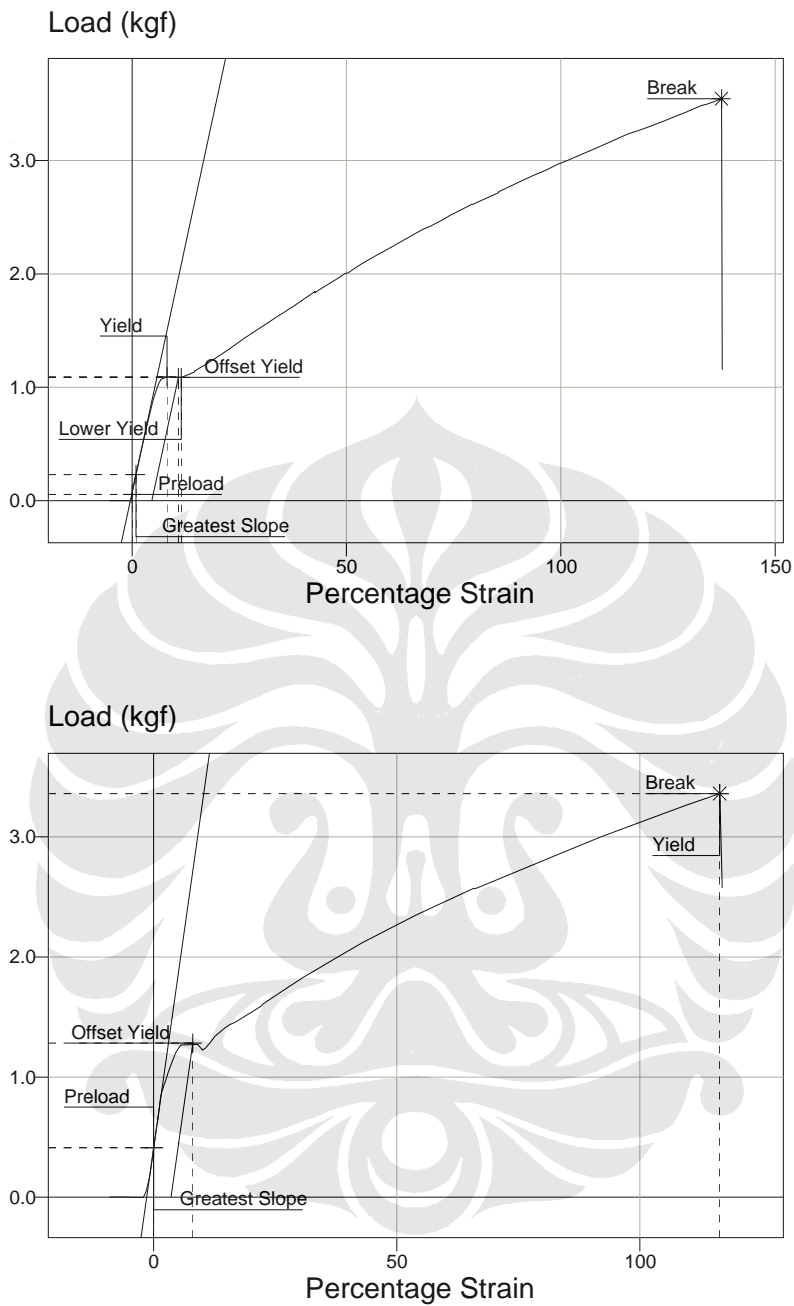


Gambar 5.6. Diagram tegangan-regangan PE dengan variasi kecepatan regangan, 1 - $\dot{\epsilon} = 0,33 \text{ s}^{-1}$, 2 - $\dot{\epsilon} = 0,033 \text{ s}^{-1}$, 3 - $\dot{\epsilon} = 0,0033 \text{ s}^{-1}$, 4 - $\dot{\epsilon} = 0,00033 \text{ s}^{-1}$.^[12]

Menurut literatur, semakin tinggi kecepatan regangan akan meningkat nilai kekuatan tarik maksimum tetapi perpanjangan saat putus berkurang sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 5.6. Namun pada penelitian ini, perbedaan kecepatan regangan setiap variasi kecepatan tarik cenderung kecil. Sehingga efek dari regangan tarik terhadap perubahan sifat tarik material dapat diabaikan.

V.2.2 Fenomena titik luluh (*yield point*)

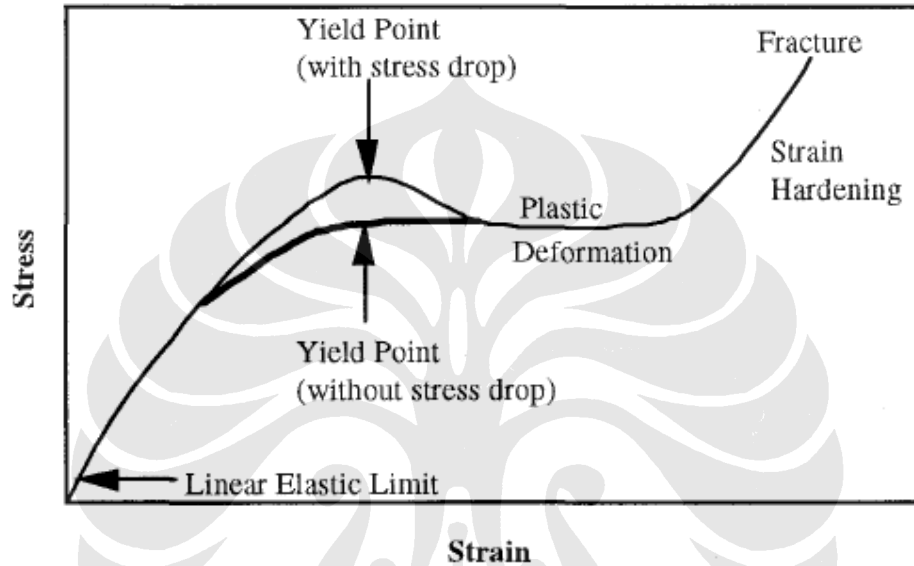
Fenomena luluh pada uji tarik film plastik BOPP pada mesin uji tarik LFPlus Lab. DMM FTUI, hanya terbaca otomatis dan terlihat jelas pada kecepatan tarik rendah yaitu 100 mm/min dan lebar yang pendek (10 mm dan 17,5 mm). Program **Nexygen** yang digunakan untuk menampilkan hasil uji tidak memperlihatkan titik luluh dengan benar pada kecepatan tarik di atas 100 mm/min, sehingga untuk menentukan titik luluh harus dengan cara manual. Membaca titik luluh dengan manual dengan cara menentukan titik pertama di mana tidak ada penambahan beban ketika perpanjangan bertambah, kemudian menentukan nilai beban dengan bantuan skala.



Gambar 5.7. Grafik beban-perpajangan lebar 10 mm kecepatan tarik 100 mm/min No sampel.1 (atas) dan grafik beban-perpajangan lebar 10 mm kecepatan tarik 900 mm/min No sampel.1 (bawah).

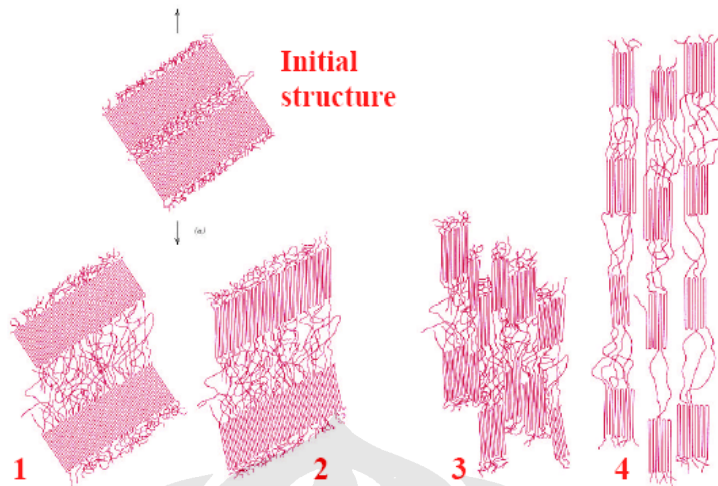
Pada kecepatan tarik 100 mm/min dan lebar sampel 10 mm seperti pada Gambar 5.7 (atas), film plastik BOPP memiliki titik luluh (*yield point*) dan titik

luluh bawah (*lower yield*). Fenomena titik luluh bawah disebabkan adanya beban yang turun (*post-yield stress drop*) seperti pada Gambar 5.8, adanya fenomena ini akibat dari perlakuan panas.^[13] *Post-yield stress drop* akan terlihat jelas pada kecepatan penarikan yang tinggi, seperti pada Gambar 5.7 (bawah). Fenomena ini terjadi pada katagori termoplastik yang ulet (*ductile thermoplastics*).

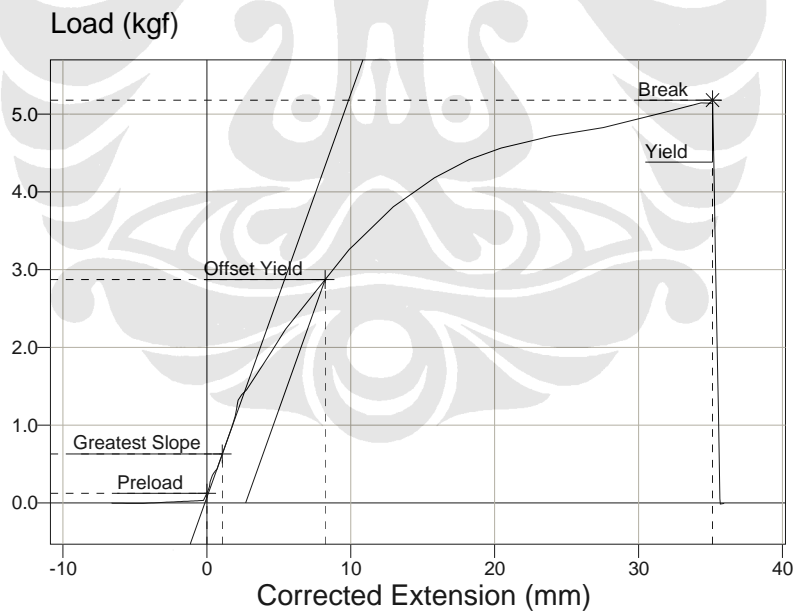


Gambar 5.8. Ilustrasi grafik tegangan-regangan termoplastik ulet (*ductile thermoplastics*).^[14]

Fenomena luluh pada polymer terjadi pada struktur amorf.^[15] Ketika penarikan rantai molekul terorientasi ke arah beban. Struktur yang pertama kali terorientasi adalah struktur amorf di dalam *spherulite*, pada saat inilah terjadi fenomena luluh. Ikatan molekul dalam struktur amorf rendah seiring dengan menurunnya sifat acak rantai, sehingga pada saat di mana keacakan pada rantai molekul masih tinggi sedangkan ikatan antar rantai molekul rendah beban yang terbaca tetap bahkan turun. Pada Gambar 5.9, fenomena luluh terjadi pada saat proses orientasi rantai dari 1 ke 2. Pada saat seluruh struktur telah terorientasi ke arah beban, tidak ada lagi perpanjangan dan terjadi kegagalan akibat tidak dapat menahan beban.



Gambar 5.9. Rantai molekul yang terorientasi akibat beban tarik. (1) terjadi perpanjangan struktur amorf (2) orientasi struktur amorf ke arah beban (3) pemisahan blok struktur kristalin (4) orientasi struktur rantai ke arah beban. [16]



Gambar 5.10. Grafik beban-perpanjangan arah TD kecepatan tarik 500 mm/min No sampel.1.

Pembahasan di atas menjelaskan mengapa pada arah TD (*Transverse Direction*) dengan rasio penarikan (*draw ratio*) delapan tidak ada fenomena luluh. Pada saat proses fabrikasi beban penarikan telah melampaui beban luluh material, sehingga seluruh struktur amorf telah terorientasi. Grafik beban-regangan tanpa adanya fenomena luluh, seperti Gambar 5.10, memperlihatkan sifat material yang rapuh (*brittle*).^[17]

