

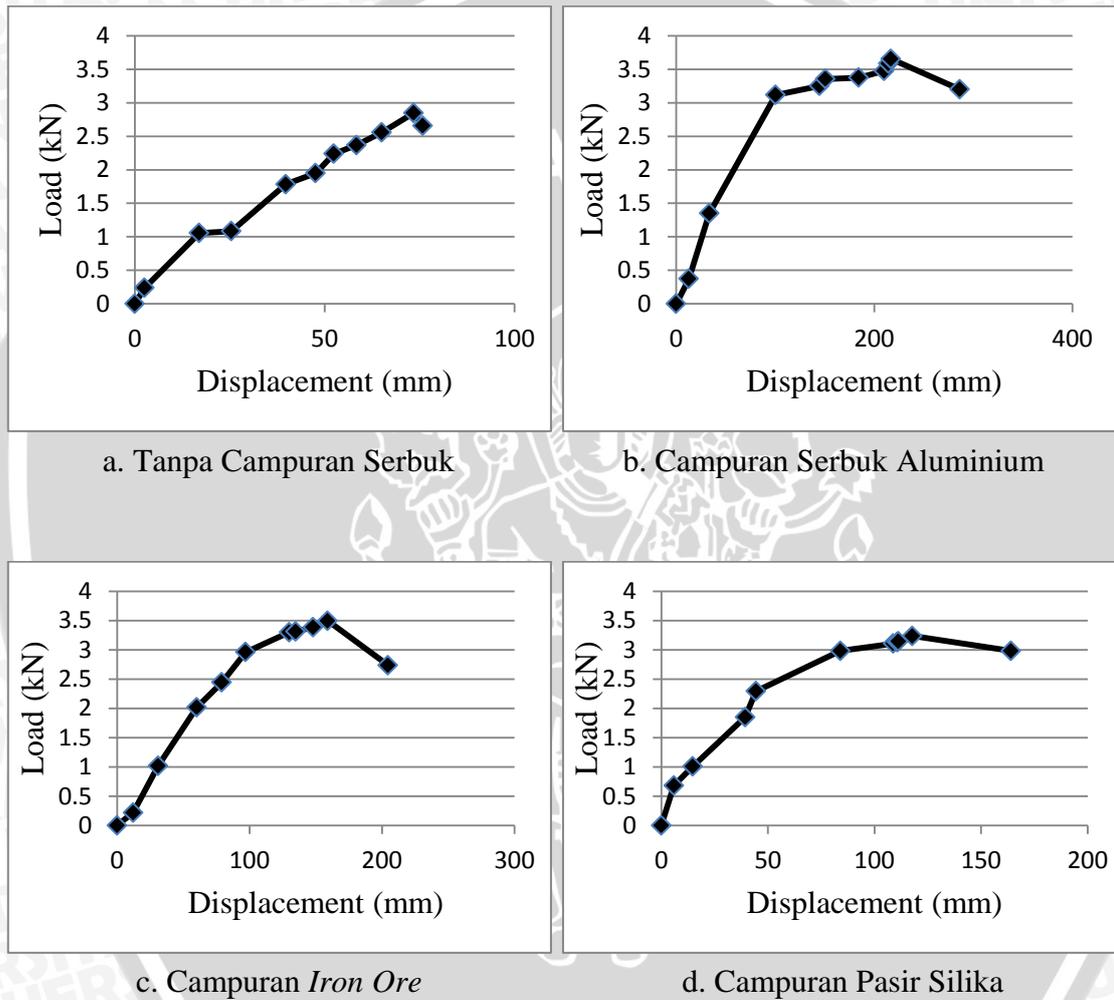
**BAB IV  
HASIL DAN PEMBAHASAN**

**4.1 Data Hasil Pengujian**

**4.1.1 Data Hasil Pengujian *Tearing***

- Terlampir

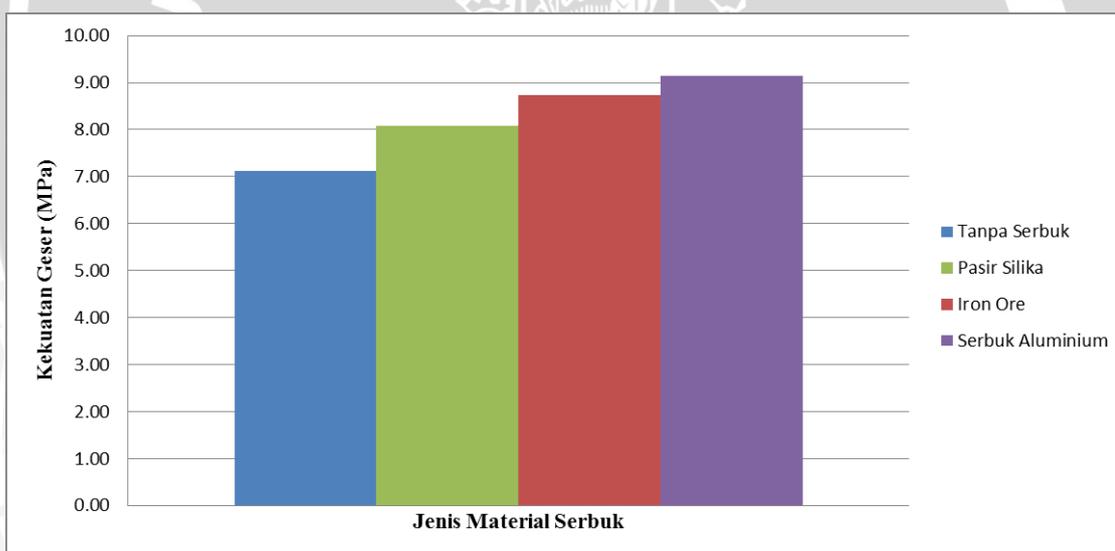
**a. Grafik Perbandingan *Load – Displacement* Pengujian *Tearing*.**



Gambar 4.1 Grafik *Load-Displacement* Pengujian *Tearing*. a) Tanpa Campuran Serbuk. b) Campuran Serbuk Aluminium. c) Campuran *Iron Ore*. d) Campuran Pasir Silika.

Gambar 4.1 diatas menunjukkan grafik hubungan antara *load* terhadap *displacement* pada pengujian *tearing*. Dari grafik dapat dilihat pada semua jenis *adhesive* baik yang tidak diberi campuran maupun diberikan campuran material serbuk memiliki kecenderungan yang sama yaitu *load* akan mengalami peningkatan seiring bertambahnya *displacement*. Selain itu kecenderungan lain dari grafik yaitu terjadi kenaikan *load* sampai titik tertentu, yang mana biasa disebut dengan *load* maksimum, kemudian terjadi penurunan yang cukup signifikan. *Load* maksimum dengan nilai tertinggi didapat oleh *adhesive* campuran serbuk aluminium sebesar 3,654 kN ditunjukkan pada gambar 4.1 b. Diteruskan oleh *adhesive* campuran *iron ore* sebesar 3,4945 kN ditunjukkan pada gambar 4.1 c, kemudian *adhesive* campuran pasir silika sebesar 3,2353 kN ditunjukkan pada gambar 4.1 d, dan yang terakhir adalah *adhesive* tanpa campuran sebesar 2,8465 kN ditunjukkan pada gambar 4.1 a.

#### b. Grafik Pengaruh Jenis Material Serbuk terhadap Kekuatan Geser

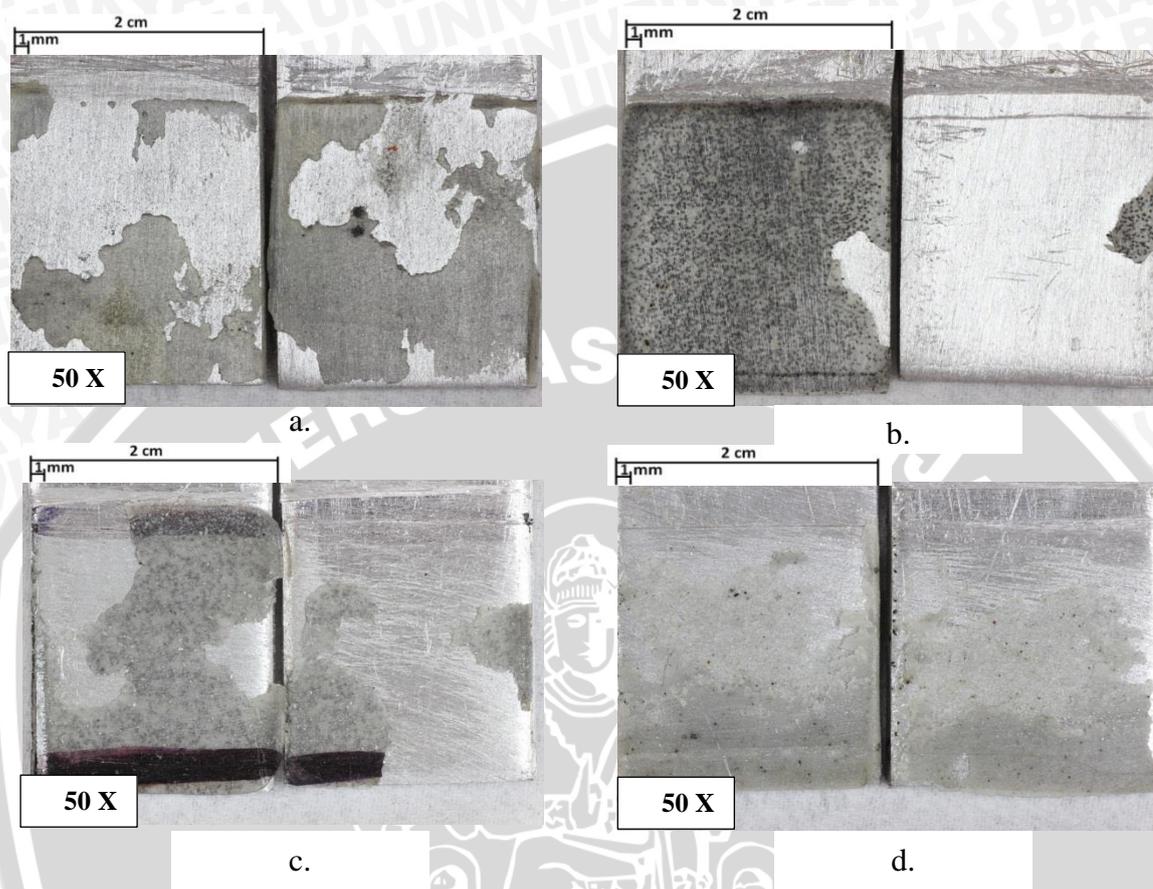


Gambar 4.2 Grafik Pengaruh Jenis Material Serbuk terhadap Kekuatan Geser.

Grafik diatas menunjukkan pengaruh jenis material serbuk terhadap kekuatan geser dari *epoxy adhesive layer*. Dari grafik didapat nilai urutan kekuatan geser *adhesive* dari yang paling besar menuju yang terkecil yaitu *adhesive* dengan campuran serbuk aluminium, *adhesive* campuran iron ore, *adhesive* campuran pasir silika, dan *adhesive* tanpa campuran. Untuk besar nilainya, campuran serbuk aluminium sebesar 9,14 MPa; campuran serbuk iron ore sebesar 8,74 MPa; campuran pasir silika sebesar 8,09 MPa; dan *adhesive* tanpa serbuk sebesar 7,12 MPa. Besar dari kekuatan geser ini

diambil dari beban maksimal setiap variasi pada grafik *load-displacement*, untuk perhitungannya dapat dilihat pada sub bab pembahasan.

#### 4.1.2 Distribusi Serbuk pada *Epoxy Adhesive Layer*



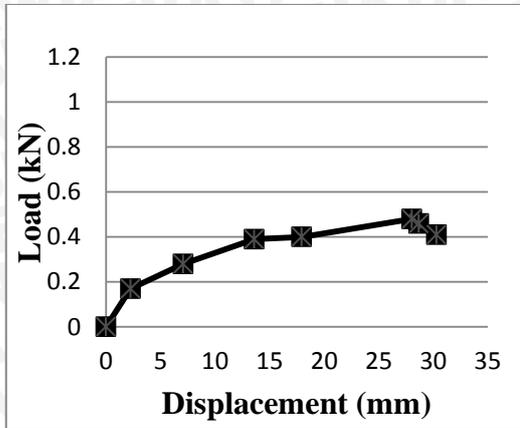
Gambar 4.3 Distribusi Sebaran Serbuk Spesimen Pengujian *Tearing*. a) Spesimen *Tearing* Tanpa Campuran. b) Spesimen *Tearing* Campuran *Iron Ore*. c) Spesimen *Tearing* Campuran Aluminium. d) Spesimen *Tearing* Campuran Pasir Silika.

Pada gambar 4.3 merupakan spesimen *tearing* yang sudah dilakukan pengujian kemudian dilakukan foto makro untuk melihat distribusi sebaran serbuknya. Distribusi sebaran serbuk pada masing-masing spesimen terbilang merata seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.3 b, c, dan d. Dari gambar terlihat material serbuk mengisi penuh permukaan lapisan *adhesive*.

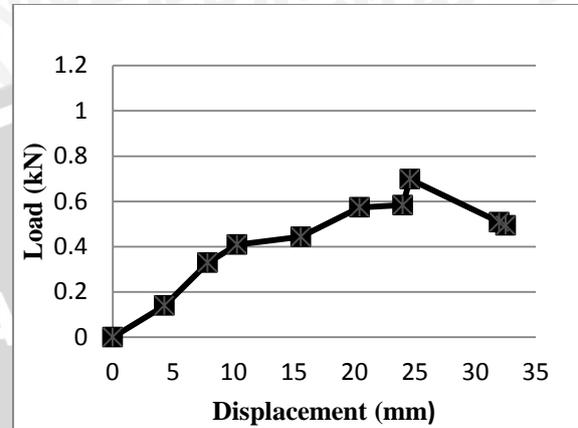
### 4.1.3 Data Hasil Pengujian *Peeling*

- Terlampir

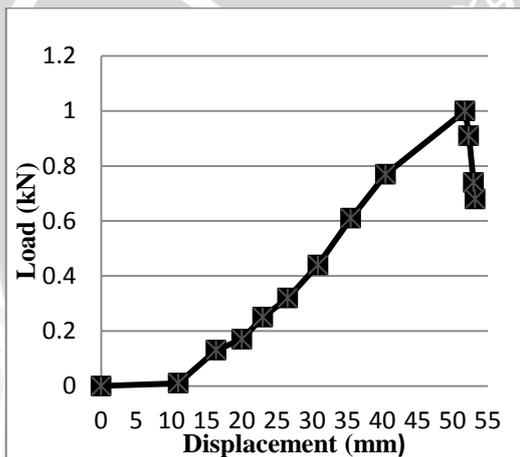
#### a. Grafik Perbandingan *Load – Displacement* Pengujian *Peeling*.



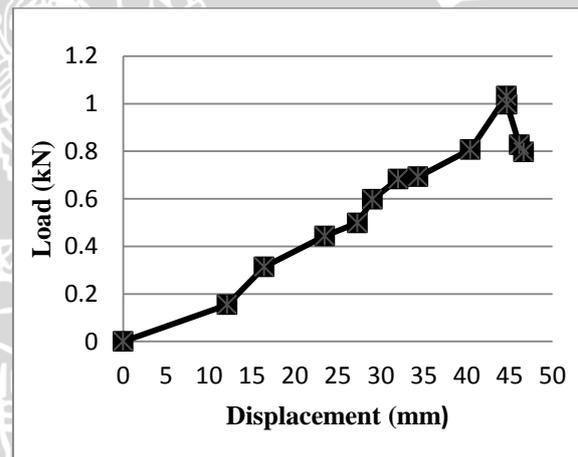
a. Tanpa Campuran Serbuk



b. Campuran Serbuk Aluminium



c. Campuran Iron Ore

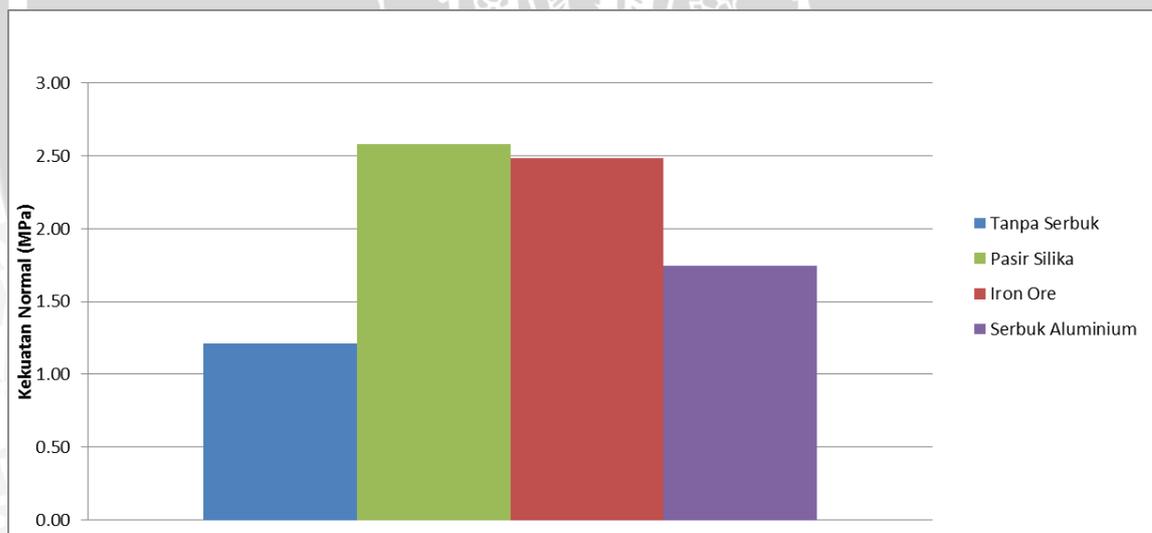


d. Campuran Pasir Silika

Gambar 4.4 Grafik *Load-Displacement* Pengujian *Peeling*. a) Tanpa Campuran Serbuk. b) Campuran Serbuk Aluminium. c) Campuran Iron Ore. d) Campuran Pasir Silika.

Gambar 4.4 diatas menunjukkan grafik hubungan antara *load* terhadap *displacement* pada pengujian *peeling*. Dari grafik dapat dilihat pada semua jenis *adhesive* baik yang tidak diberi campuran maupun diberikan campuran material serbuk memiliki kecenderungan yang sama yaitu *load* akan mengalami peningkatan seiring bertambahnya *displacement*. Selain itu kecenderungan lain dari grafik yaitu terjadi kenaikan *load* sampai titik tertentu, yang mana biasa disebut dengan *load* maksimum, kemudian terjadi penurunan yang cukup signifikan. *Load* maksimum dengan nilai tertinggi didapat oleh *adhesive* campuran pasir silika sebesar 1,0319 kN ditunjukkan pada gambar 4.4 d. Diteruskan oleh *adhesive* campuran iron ore sebesar 1 kN ditunjukkan pada gambar 4.4 c, kemudian *adhesive* campuran serbuk aluminium sebesar 0,6979 kN ditunjukkan pada gambar 4.4 b, dan yang terakhir adalah *adhesive* tanpa campuran sebesar 0,4835 kN ditunjukkan pada gambar 4.4 a.

#### b. Grafik Pengaruh Jenis Material Serbuk terhadap Kekuatan *Peel*

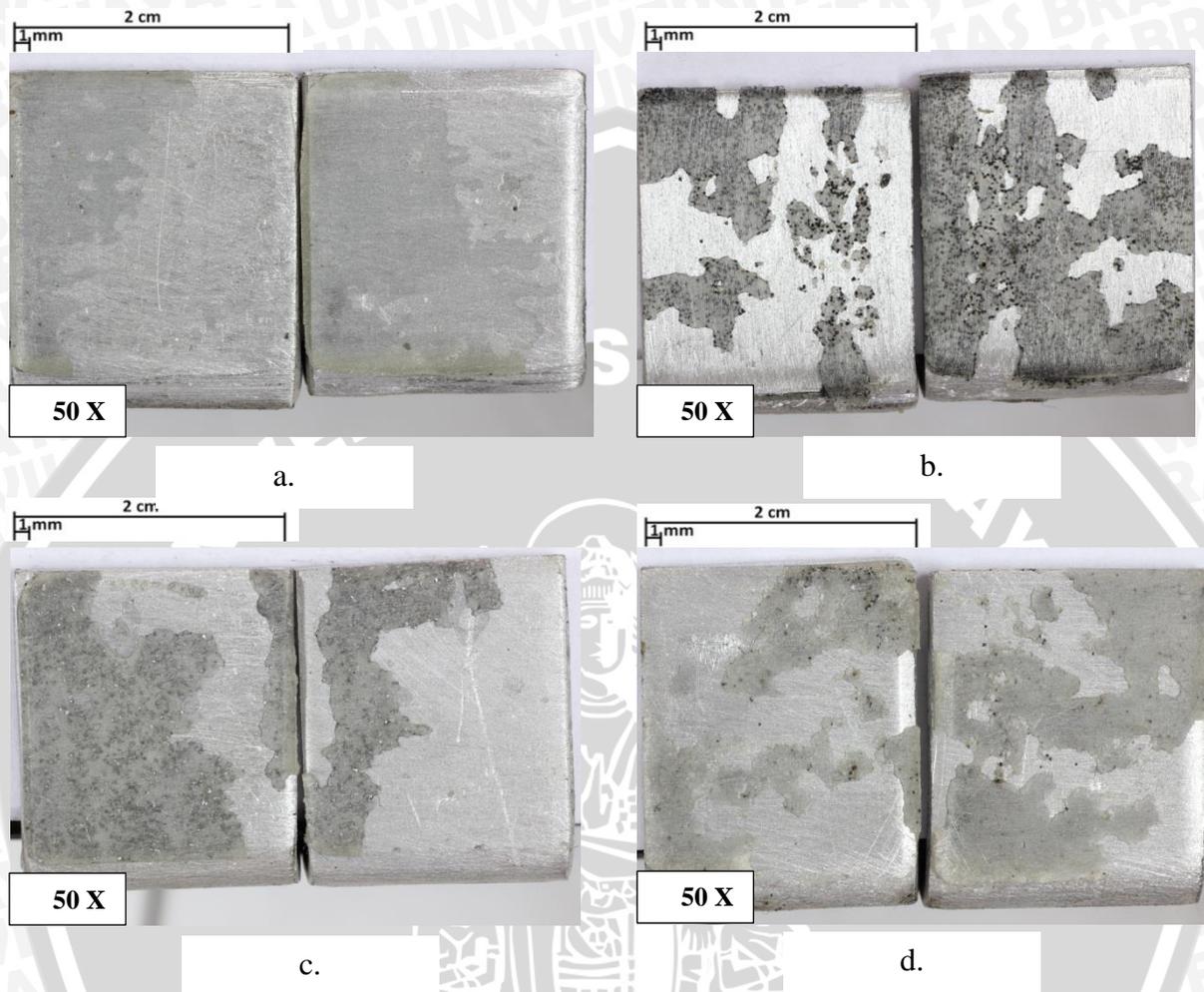


Gambar 4.5 Grafik Pengaruh Jenis Material Serbuk terhadap Kekuatan *Peel*.

Grafik diatas menunjukkan pengaruh jenis material serbuk terhadap kekuatan *peel* dari *epoxy adhesive layer*. Dari grafik didapat nilai urutan kekuatan *peel adhesive* dari yang paling besar menuju yang terkecil yaitu *adhesive* dengan campuran pasir silika, *adhesive* campuran iron ore, *adhesive* campuran serbuk aluminium, dan *adhesive* tanpa campuran. Untuk besar nilainya, campuran pasir silika sebesar 2,58 MPa; campuran serbuk iron ore sebesar 2,48 MPa; campuran serbuk aluminium sebesar 1,74 MPa; dan *adhesive* tanpa serbuk sebesar 1,21 MPa. Besar dari kekuatan geser ini diambil dari

beban maksimal setiap variasi pada grafik *load-displacement*, untuk perhitungannya dapat dilihat pada sub bab pembahasan.

#### 4.1.4 Distribusi Serbuk



Gambar 4.6 Distribusi Sebaran Serbuk Spesimen Pengujian *Peeling*. a) Spesimen *Peeling* Tanpa Campuran. b) Spesimen *Peeling* Campuran *Iron Ore*. c) Spesimen *Peeling* Campuran Aluminium. d) Spesimen *Peeling* Campuran Pasir Silika.

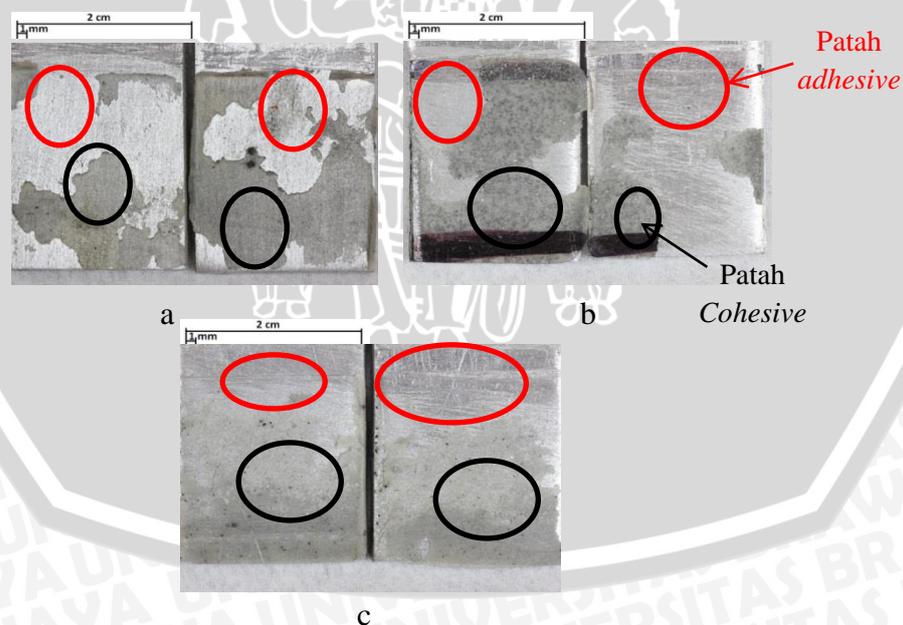
Pada gambar 4.6 merupakan spesimen *peeling* yang sudah dilakukan pengujian kemudian dilakukan foto makro untuk melihat distribusinya. Distribusi serbuk pada masing-masing spesimen terbilang merata seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.6 b, c, dan d. Dari gambar terlihat material serbuk mengisi penuh permukaan lapisan *adhesive*.

## 4.2 Pembahasan

### 4.2.1 Perilaku Perambatan Retak Pengujian *Tearing*

Dari gambar 4.1 sudah dituliskan tentang kecenderungan dari grafik *load-displacement* spesimen *tearing*. Dapat dilihat peningkatan *load* terjadi sampai titik tertentu kemudian terjadi penurunan yang cukup signifikan. Penurunan yang cukup signifikan dikarenakan *adhesive* sudah tidak mampu menahan beban lagi, yang mana besar *load* sebelum terjadi penurunan secara signifikan ini disebut *load* maksimum atau beban maksimum yang dapat diterima dari *adhesive*.

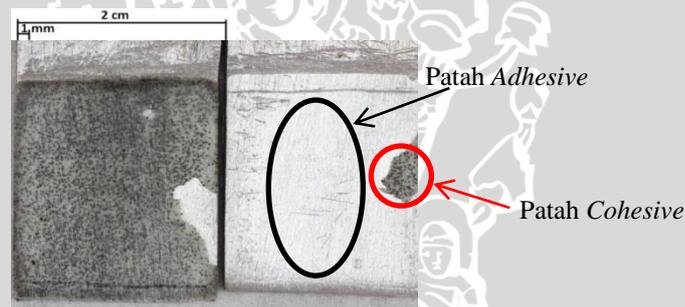
Pada gambar 4.1 a, b, dan d terdapat beberapa titik yang mengalami peningkatan yang tidak signifikan (ditandai dengan lingkaran hitam) ini disebabkan jenis patah yang terjadi pada *adhesive*. Patah yang terjadi pada saat grafik meningkat secara tidak signifikan adalah patah *cohesive*. Ini disebabkan karena gaya tarik menarik antara *adhesive* dengan *interface* lebih kuat dibanding gaya tarik menarik antar *adhesive* itu sendiri. Kemudian pada saat grafik mengalami peningkatan *load* yang signifikan adalah saat spesimen mengalami patah *adhesive*. Untuk lebih jelas dapat dilihat di tinjauan pustaka sub bab 2.9 Kegagalan pada *Adhesive Bonding*. dapat dilihat gambar di bawah.



Gambar 4.7 Jenis Patah pada Spesimen *Tearing* a) Spesimen *Tearing* Tanpa Campuran. b) Spesimen *Tearing* Campuran Aluminium. c) Spesimen *Tearing* Campuran Pasir Silika.

Pada gambar terlihat daerah berwarna lingkaran merah hitam adalah daerah yang tidak terdapat bekas lem pada *interface*-nya adalah jenis patah *adhesive* dan untuk daerah lingkaran berwarna hitam adalah daerah patah *cohesive*, dimana terdapat bekas lem pada *interface*-nya. Jadi untuk patah yang terjadi tidak hanya satu jenis saja melainkan terdapat dua jenis patah. Patah ini disebut patah campuran karena adanya patah *adhesive* dan *cohesive* pada satu sambungan lem. Patah ini berbeda jika dibandingkan dibandingkan dengan gambar 4.1 c dan foto makro 4.8.

Pada gambar 4.1 c gambar cenderung terus meningkat disebabkan minimnya terjadi patah *cohesive* pada spesimen *tearing* campuran *iron ore*. Hal ini didukung gambar 4.8. Hasil foto makro menunjukkan bekas lem (*adhesive*) hanya condong pada satu *interface* saja dan pada *interface* pasangannya hanya terdapat secuil bekas lem, hal ini ditunjukkan dengan lingkaran berwarna hitam dan merah pada gambar 4.8. Maka gambar 4.1 c dan gambar 4.8 menjelaskan bahwa patah *adhesive* lebih dominan pada spesimen *tearing* campuran *iron ore* dan hal ini memiliki kesesuaian antara grafik yang didapat dengan foto makro yang diambil.



Gambar 4.8 Jenis Patah pada Spesimen *Tearing* Campuran *Iron Ore*

Dari gambar 4.1 campuran *adhesive* dengan aluminium dapat menahan beban maksimum paling besar yaitu 3,654 kN. Berikutnya Iron Ore dengan besar *load* 3,495 kN dan campuran pasir silika sebesar 3,2353 kN. *Adhesive* tanpa campuran hanya mampu menahan beban maksimum 2,8465 kN. Dari beban maksimum ini nantinya akan didapatkan kekuatan geser dari masing-masing spesimen yang akan dibahas pada sub bab selanjutnya.

#### 4.2.2 Pengaruh Jenis Material Serbuk terhadap Kekuatan Geser *Epoxy Adhesive Layer*

Dari gambar 4.1 didapat beban maksimal tiap-tiap *adhesive*. Dari beban maksimal tiap *adhesive* diambil untuk dilakukan perhitungan kekuatan geser dari *adhesive*. Dengan menggunakan persamaan 2-2 yang mana contoh perhitungannya sebagai berikut :

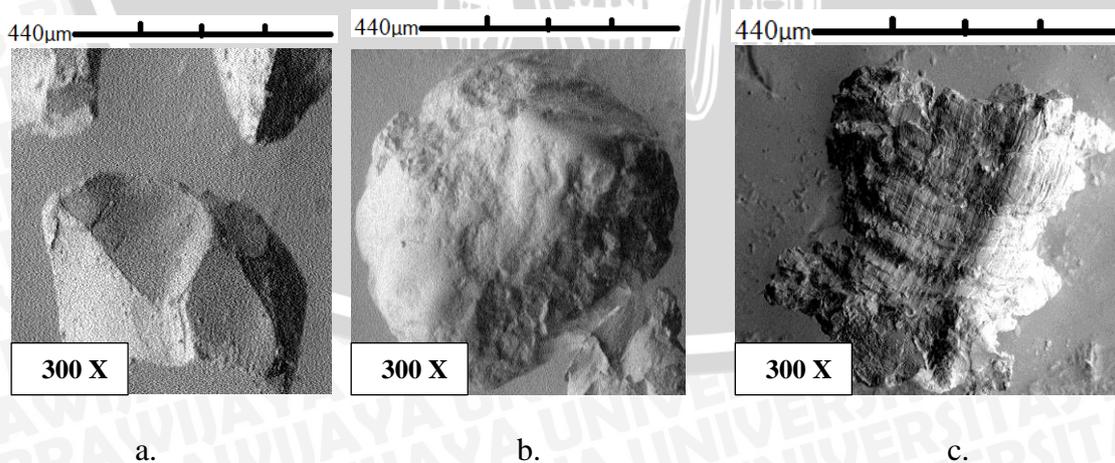
$$\tau = \frac{F}{A}$$

$$\tau = \frac{2846.5}{400}$$

$$\tau = 7.12 \text{ MPa}$$

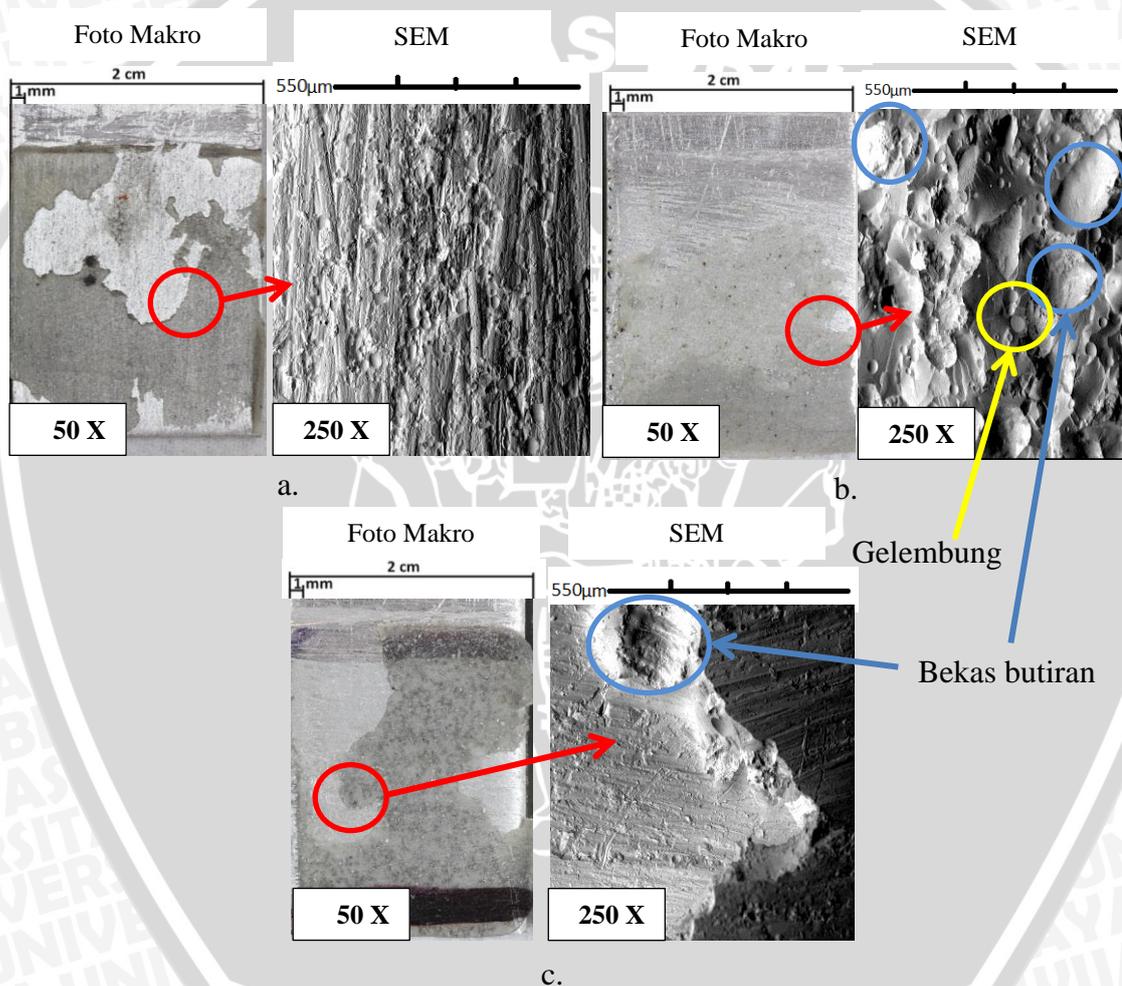
Sehingga didapat kekuatan geser sebesar 7.12 MPa (beban maksimal dikonversikan menjadi satuan newton, dikalikan 1000).

Dari perhitungan diatas menunjukkan bahwa beban maksimum (F) berbanding lurus dengan kekuatan geser sehingga semakin besar beban maksimum yang mampu diterima *adhesive* maka semakin besar kekuatan gesernya. Dalam pengujian *tearing* kekuatan geser yang paling besar adalah campuran aluminium sebesar 9,14 MPa. *Adhesive* tanpa campuran memiliki kekuatan yang paling kecil sebesar 7,12 MPa. Campuran iron ore menempati urutan kedua untuk kekuatan geser dan diikuti oleh campuran pasir silika. Hal yang menyebabkan jenis material serbuk memiliki pengaruh yang berbeda pada besar kekuatan geser kemungkinan besar disebabkan oleh adanya perbedaan bentuk dan karakteristik butiran tiap jenis material serbuk, seperti yang ditunjukkan pada foto SEM jenis butiran serbuk dibawah ini.



Gambar 4.9 Foto SEM Jenis Material Serbuk. a) *Iron Ore Powder*. b) Pasir Silika. c) Serbuk Aluminium.

Dari gambar 4.2 dapat dilihat bahwa material serbuk memiliki pengaruh dalam meningkatkan kekuatan geser dari *adhesive*, karena menyebabkan peningkatan kekuatan geser jika dibandingkan *adhesive* tanpa campuran material serbuk. Hal ini sesuai pada hipotesis yang tertulis pada tinjauan pustaka bahwa material serbuk akan memberikan pengaruh peningkatan kekuatan geser pada *epoxy adhesive layer*. Penyebab dari peningkatan kekuatan geser karena material serbuk menghalangi retak yang terjadi pada *adhesive* saat menahan beban maksimum. Sehingga rambatan retak harus melewati atau menghancurkan butiran yang bercampur dengan *adhesive*. Proses ini diperjelas oleh foto SEM sebagai berikut :



Gambar 4.10 Foto SEM Spesimen Pengujian *Tearing*. a) Patahan *Adhesive* Tanpa Campuran. b) Patahan *Adhesive* Campuran Pasir Silika. c) Patahan *Adhesive* Campuran Serbuk Aluminium.

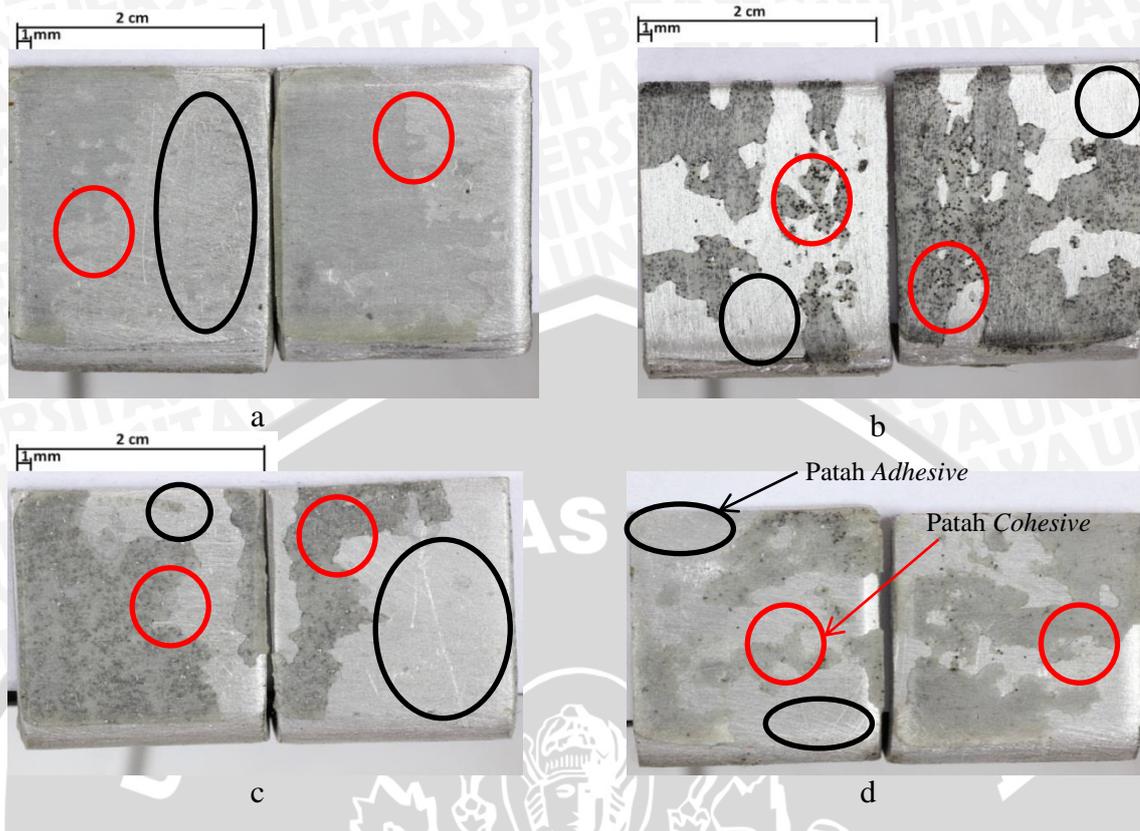
Pada gambar 4.10 a dan c patahan pada *adhesive* bercampur pasir silika dan *adhesive* bercampur serbuk aluminium terlihat bekas-bekas butiran (ditunjukkan lingkaran warna biru) yang mana butiran ini telah menghalangi retak saat *adhesive*

menerima beban geser. Hal inilah yang membuat kekuatan geser dari *adhesive* campuran material serbuk lebih kuat dibanding material serbuk tanpa campuran. Jika dibandingkan dengan gambar 4.10 b terlihat permukaan dari patahan *adhesive* rata tanpa adanya bekas butiran hanya ada bekas gaya geser. Dengan diperkuat adanya foto SEM patahan *adhesive* dapat disimpulkan material serbuk memberikan pengaruh pada peningkatan kekuatan geser pada *epoxy adhesive layer* dan jenis material serbuk yang memberikan peningkatan kekuatan geser paling tinggi adalah serbuk aluminium.

#### 4.2.3 Perilaku Perambatan Retak Pengujian *Peeling*

Dari gambar 4.4 sudah dituliskan tentang kecenderungan dari grafik *load-displacement* spesimen *peeling*. Dapat dilihat peningkatan *load* terjadi sampai titik tertentu kemudian terjadi penurunan yang cukup signifikan. Penurunan yang cukup signifikan dikarenakan *adhesive* sudah tidak mampu menahan beban lagi, yang mana besar *load* sebelum terjadi penurunan secara signifikan ini disebut *load* maksimum atau beban maksimum yang dapat diterima dari *adhesive*.

Pada gambar 4.4 a, b, c, dan d terdapat beberapa titik yang mengalami peningkatan yang tidak signifikan (ditandai dengan lingkaran hitam) ini disebabkan jenis patah yang terjadi pada *adhesive*. Patah yang terjadi pada saat grafik meningkat secara tidak signifikan adalah patah *cohesive*. Ini disebabkan karena gaya tarik menarik antara *adhesive* dengan *interface* lebih kuat dibanding gaya tarik menarik antar *adhesive* itu sendiri. Kemudian pada saat grafik mengalami peningkatan *load* yang signifikan adalah saat spesimen mengalami patah *adhesive*. Untuk lebih jelas dapat dilihat di tinjauan pustaka sub bab 2.9 Kegagalan pada *Adhesive Bonding*. dapat dilihat gambar di bawah.



Gambar 4.11 Jenis Patah pada Spesimen *Peeling* a) Spesimen *Peeling* Tanpa Campuran. b) Spesimen *Peeling Iron Ore*. c) Spesimen *Peeling* Campuran Aluminium. d) Spesimen *Peeling* Campuran Pasir Silika.

Pada gambar terlihat daerah berwarna lingkaran merah hitam adalah daerah yang tidak terdapat bekas lem pada *interface*-nya adalah jenis patah *adhesive* dan untuk daerah lingkaran berwarna hitam adalah daerah patah *cohesive*, dimana terdapat bekas lem pada *interface*-nya. Jadi untuk patah yang terjadi tidak hanya satu jenis saja melainkan terdapat dua jenis patah. Patah ini disebut patah campuran karena adanya patah *adhesive* dan *cohesive* pada satu sambungan lem.

Dari gambar 4.6 campuran *adhesive* dengan pasir silika dapat menahan beban maksimum paling besar yaitu 1,0319 kN. Berikutnya Iron Ore dengan besar *load* 1 kN dan campuran serbuk aluminium sebesar 0,6979 kN. *Adhesive* tanpa campuran hanya mampu menahan beban maksimum 0,4835 kN. Dari beban maksimum ini nantinya akan didapatkan kekuatan nromal dari masing-masing spesimen yang akan dibahas pada sub bab selanjutnya.

#### 4.2.4 Pengaruh Jenis Material Serbuk terhadap Kekuatan *Peel Epoxy Adhesive Layer*

Dari gambar 4.4 didapat beban maksimal tiap-tiap *adhesive*. Dari beban maksimal tiap *adhesive* diambil untuk dilakukan perhitungan kekuatan *peel* dari *adhesive*. dengan menggunakan persamaan 2-1 yang mana contoh perhitungannya sebagai berikut :

$$\sigma_t = \frac{P}{A}$$

$$\sigma_t = \frac{483.5}{400}$$

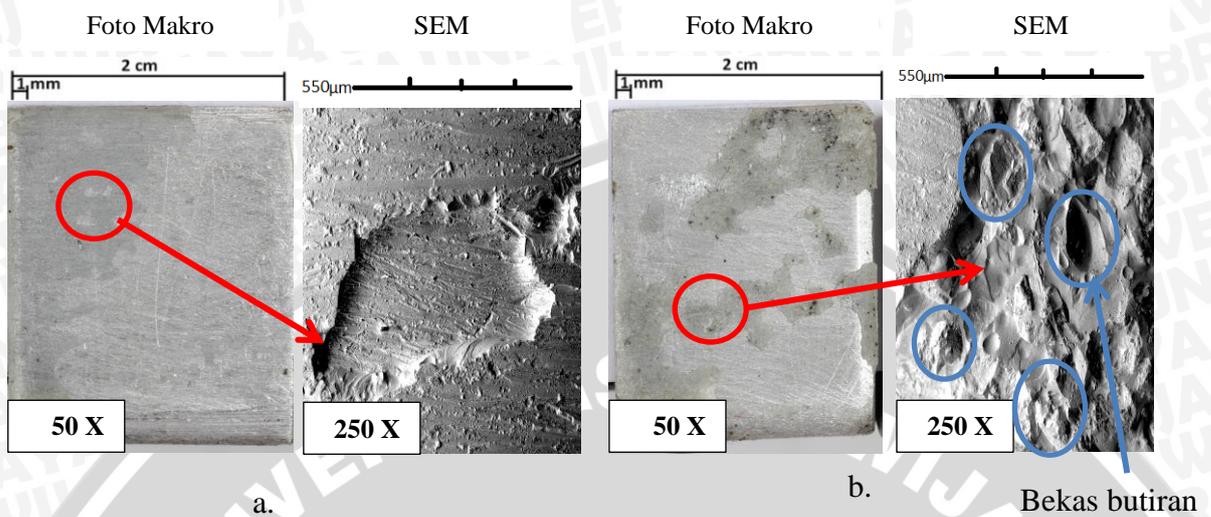
$$\sigma_t = 1.21 \text{ MPa}$$

Sehingga didapat kekuatan *peel* sebesar 1,21 MPa (beban maksimal dikonversikan menjadi satuan newton, dikalikan 1000).

Dari perhitungan diatas menunjukkan bahwa beban maksimum ( $\sigma_t$ ) berbanding lurus dengan kekuatan *peel* sehingga semakin besar beban maksimum yang mampu diterima *adhesive* maka semakin besar kekuatan *peel*nya. Dalam pengujian *peeling* kekuatan *peel* yang paling besar adalah campuran pasir silika sebesar 2,58 MPa. *Adhesive* tanpa campuran memiliki kekuatan yang paling kecil sebesar 1,21 MPa. Untuk perbandingan tiap jenis serbuknya beserta urutan kekuatan *peel* dapat dilihat pada gambar 4.5. Sama dengan hal yang dijelaskan pada sub sub bab 4.2.2 bahwa hal yang menyebabkan jenis material serbuk memiliki pengaruh yang berbeda pada besar kekuatan *peel* kemungkinan besar disebabkan oleh adanya perbedaan bentuk dan karakteristik butiran tiap jenis material serbuk, seperti yang ditunjukkan pada foto SEM jenis butiran serbuk gambar 4.9. Dari sini dapat ditarik kesimpulan bahwa jenis butiran pasir silika lebih cocok dalam meningkatkan kekuatan *peel* karena memiliki nilai kekuatan *peel* paling tinggi.

Dari gambar 4.5 dapat dilihat bahwa material serbuk memiliki pengaruh dalam meningkatkan kekuatan *peel* dari *adhesive*. Karena menyebabkan peningkatan kekuatan *peel* jika dibandingkan *adhesive* tanpa campuran material serbuk. Hal ini sesuai pada hipotesis yang tertulis pada tinjauan pustaka bahwa material serbuk akan memberikan pengaruh peningkatan kekuatan *peel* pada *epoxy adhesive layer*. Penyebab dari peningkatan kekuatan *peel* karena material serbuk menghalangi retak yang terjadi pada *adhesive* saat menahan beban maksimum. Sehingga rambatan retak harus melewati atau

menghancurkan butiran yang bercampur dengan *adhesive*. Proses ini diperjelas oleh foto SEM sebagai berikut :



Gambar 4.12 Foto SEM Spesimen Pengujian *Peeling*. a) Patahan *Adhesive* Tanpa Campuran. b) Patahan *Adhesive* Campuran Pasir Silika.

Pada gambar 4.12 b terlihat bekas-bekas butiran (ditunjukkan lingkaran warna biru) yang mana butiran ini telah menghalangi retakan saat *adhesive* menerima beban *peel*. Hal inilah yang membuat kekuatan *peel* dari *adhesive* campuran material serbuk lebih kuat dibanding material serbuk tanpa campuran. Jika dibandingkan dengan gambar 4.12 a terlihat permukaan dari patahan *adhesive* terlihat rata tanpa adanya bekas butiran hanya ada bekas gaya *peel*. Dengan diperkuat adanya foto SEM patahan *adhesive* dapat disimpulkan material serbuk memberikan pengaruh pada peningkatan kekuatan *peel* pada *epoxy adhesive layer* dan jenis material serbuk yang memberikan peningkatan kekuatan *peel* paling tinggi adalah pasir silika.