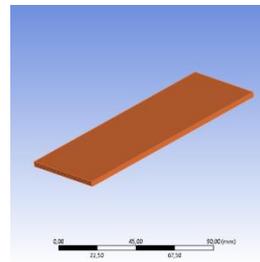
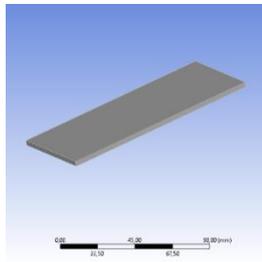


Bab IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

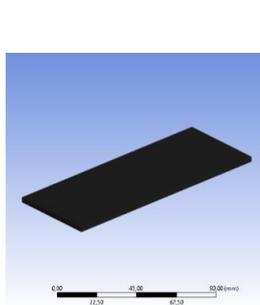
4.1 Hasil Penelitian

Penelitian ini didasari dari penelitian langsung oleh Khoirul Rifai yang menggunakan pelat dengan dua ukuran, yaitu 5 x 13 cm untuk tiga lapis dan 6 x 14 cm untuk empat lapis. Material pelat yang digunakan yaitu aluminium AA1100-O, tembaga *Electrolytic Tough Pitch* (ETP) C11000, dan timbal murni L50042 *sand cast*. Berikut Gambar 4.1 yang merupakan bentuk masing-masing spesimen, di mana spesimen simulasi dapat dilihat pada sisi kiri dan spesimen penelitian langsung [7] yang dapat dilihat pada sisi kanan.

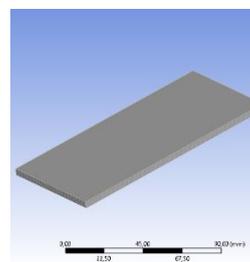


(a)

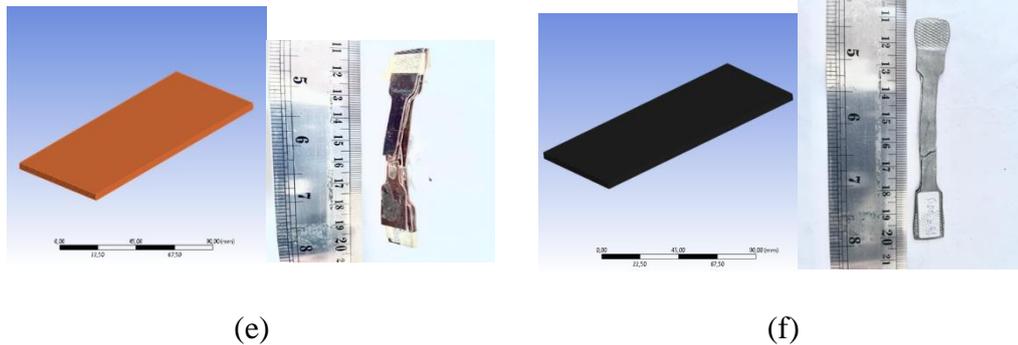
(b)



(c)



(d)



Gambar 4.1 Pelat Tiga Lapis Al (a), Cu (b), Pb (c), dan Empat Lapis Al (d), Cu (e), Pb (f)

Penelitian simulasi dimulai dengan melakukan proses *pre treatment* atau pemanasan terlebih dahulu dengan hasil temperatur dan *heat flux*. *Heat flux* pada pelat tiga lapis dan empat lapis memiliki perbedaan pada nilainya. Semakin tebal pelat, maka akan semakin kecil pula perpindahan panas atau nilai *heat flux* [59].

Setelah melakukan simulasi proses pemanasan atau *pre treatment*, maka selanjutnya adalah melakukan proses pencanaian dengan metode *Accumulative Roll Bonding* (ARB) sebanyak lima siklus atau lima kali pencanaian pada pelat tiga lapis dan empat lapis. Berikut merupakan tabel ubahan dimensi (aluminium Tabel 4.1; tembaga Tabel 4.2; dan timbal Tabel 4.3).

Tabel 4.1 Perubahan Dimensi Pelat Al

3 Lapis		4 Lapis	
Panjang (cm)	19,5	Panjang (cm)	26,5
Lebar (cm)	5	Lebar (cm)	6,34
Tebal (cm)	0,2	Tebal (cm)	0,2
Volume (cm ³)	19,5	Volume (cm ³)	33,602
C2 Panjang (cm)	18,71	C2 Panjang (cm)	25,81

	Lebar (cm)	5,21	Lebar (cm)	6,51
	Tebal (cm)	0,2	Tebal (cm)	0,2
	Volume (cm ³)	19,4958	Volume (cm ³)	33,6046
	Panjang (cm)	17,96	Panjang (cm)	26,13
C3	Lebar (cm)	5,43	Lebar (cm)	6,43
	Tebal (cm)	0,2	Tebal (cm)	0,2
	Volume (cm ³)	19,5046	Volume (cm ³)	33,6032
	Panjang (cm)	17,23	Panjang (cm)	24,74
C4	Lebar (cm)	5,66	Lebar (cm)	6,79
	Tebal (cm)	0,2	Tebal (cm)	0,2
	Volume (cm ³)	19,5044	Volume (cm ³)	33,5969
	Panjang (cm)	15,87	Panjang (cm)	16,19
C5	Lebar (cm)	5,85	Lebar (cm)	7,16
	Tebal (cm)	0,21	Tebal (cm)	0,29
	Volume (cm ³)	19,4963	Volume (cm ³)	33,6169

Tabel 4.2 Perubahan Dimensi Pelat Cu

		3 Lapis	4 Lapis		
C1	Panjang (cm)	19,12	Panjang (cm)	27,05	
	Lebar (cm)	5,1	Lebar (cm)	6,21	
	Tebal (cm)	0,2	Tebal (cm)	0,2	
	Volume (cm ³)	19,5024	Volume (cm ³)	33,5961	
C2	Panjang (cm)	18,29	C2	Panjang (cm)	26,21

	Lebar (cm)	5,33	Lebar (cm)	6,41
	Tebal (cm)	0,2	Tebal (cm)	0,2
	Volume (cm ³)	19,4971	Volume (cm ³)	33,6012
	Panjang (cm)	17,57	Panjang (cm)	25,34
C3	Lebar (cm)	5,55	Lebar (cm)	6,63
	Tebal (cm)	0,2	Tebal (cm)	0,2
	Volume (cm ³)	19,5027	Volume (cm ³)	33,6008
	Panjang (cm)	16,87	Panjang (cm)	24,49
C4	Lebar (cm)	5,78	Lebar (cm)	6,86
	Tebal (cm)	0,2	Tebal (cm)	0,2
	Volume (cm ³)	19,5017	Volume (cm ³)	33,6003
	Panjang (cm)	12,46	Panjang (cm)	21,54
C5	Lebar (cm)	6,02	Lebar (cm)	7,09
	Tebal (cm)	0,26	Tebal (cm)	0,22
	Volume (cm ³)	19,5024	Volume (cm ³)	33,5981

Tabel 4.3 Perubahan Dimensi Pelat Pb

		3 Lapis	4 Lapis	
C1	Panjang (cm)	19,19	Panjang (cm)	27,27
	Lebar (cm)	5,08	Lebar (cm)	6,16
	Tebal (cm)	0,2	Tebal (cm)	0,2
	Volume (cm ³)	19,497	Volume (cm ³)	33,5966
C2	Panjang (cm)	19,61	C2 Panjang (cm)	26,58

	Lebar (cm)	5,24	Lebar (cm)	6,32
	Tebal (cm)	0,2	Tebal (cm)	0,2
	Volume (cm ³)	20,5513	Volume (cm ³)	33,5971
	Panjang (cm)	18,05	Panjang (cm)	25,93
C3	Lebar (cm)	5,4	Lebar (cm)	6,48
	Tebal (cm)	0,2	Tebal (cm)	0,2
	Volume (cm ³)	19,494	Volume (cm ³)	33,6053
	Panjang (cm)	17,54	Panjang (cm)	25,3
C4	Lebar (cm)	5,56	Lebar (cm)	6,64
	Tebal (cm)	0,2	Tebal (cm)	0,2
	Volume (cm ³)	19,5045	Volume (cm ³)	33,5984
	Panjang (cm)	16,21	Panjang (cm)	22,46
C5	Lebar (cm)	5,73	Lebar (cm)	6,8
	Tebal (cm)	0,21	Tebal (cm)	0,22
	Volume (cm ³)	19,5055	Volume (cm ³)	33,6002

Setelah melakukan simulasi proses pencanaan, maka selanjutnya adalah melakukan pengujian simulasi radiasi menggunakan aplikasi ANSYS *High Frequency Structural Simulator* (HFSS), dimulai dengan menyiapkan desain CAD antenna *Substrate Integrated Waveguide* (SIW) *aperture* 5G berdasarkan literatur dari Bisharat, et al [58], memasukkan desain antenna SIW *aperture* 5G beserta pelat yang telah melalui proses pencanaan ke ANSYS HFSS, dan menyesuaikan *boundary condition* dari area radiasi dan mengamati simulasi pancaran radiasi.

4.2 Simulasi Proses *Pre Treatment*

Penelitian dimulai dengan melakukan pemanasan atau *pre treatment* dengan temperatur yang digunakan disesuaikan dengan titik anil pada material. Masing-masing titik anil material yaitu pada aluminium AA1100-O berada di temperatur sebesar 343°C, tembaga ETP C11000 berada di temperatur 371°C, dan timbal L50042 berada di temperatur 230°C [26].

Pre treatment bertujuan untuk menghindari kegagalan proses apabila digunakan dalam temperatur kamar. Pada temperatur kamar, sekitar 25-30°C, pelat lebih mudah mengalami kegagalan karena terjadi perambatan tegangan sehingga mengakibatkan fenomena retakan dan porositas [39]. Seperti yang dijelaskan, bahwa temperatur memiliki pengaruh penting pada hasil pencanaian, khususnya pada metode ARB. Pada simulasi pemanasan diketahui pula lajur perpindahan panas dari masing-masing material. Laju perpindahan panas disebut juga dengan *heat flux*. Laju perpindahan panas ini berpindah dari area yang lebih panas menuju ke area yang lebih dingin. Satuan dari laju perpindahan panas ini adalah W/m^2 . Namun, pada simulasi proses pemanasan ini menggunakan satuan W/mm^2 karena area yang digunakan adalah area pelat, di mana area tersebut tidaklah terlalu besar. Mengetahui laju perpindahan panas dapat mempermudah dalam menentukan prediksi pemerataan temperatur pada area pelat untuk mencapai titik anil dari material. Selain mengetahui laju perpindahan panas, waktu yang dibutuhkan untuk mencapai titik anil juga diperlukan. Hal ini dikarenakan simulasi menggunakan proses dalam *furnace* pada penelitian secara langsung. Simulasi pemanasan ini membutuhkan koefisien konveksi dan emisivitas. Hal ini disebabkan karena pada

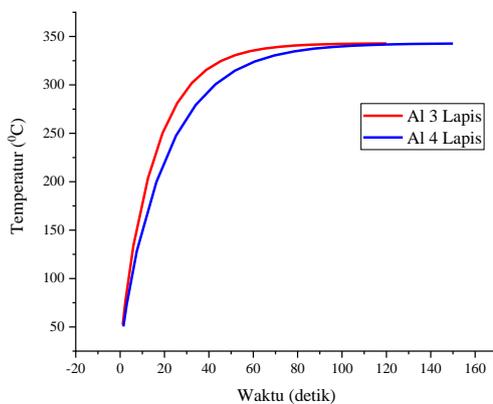
proses pemanasan dalam *furnace* terdapat aliran konveksi dan radiasi. Pada simulasi pemanasan ini menggunakan koefisien konveksi dan emisivitas yang berbeda-beda pada setiap material. Pada koefisien konveksi, perbedaan nilai disebabkan karena setiap material memiliki temperatur konduktivitas yang berbeda-beda. Selain itu, ukuran pelat antara tiga lapis dan empat lapis mempengaruhi perbedaan nilai koefisien konveksi pula. Nilai koefisien konveksi pada pelat aluminium tiga lapis yaitu sebesar $481 \text{ W/m}^2\cdot\text{°C}$ dan pada pelat aluminium empat lapis sebesar $466,2 \text{ W/m}^2\cdot\text{°C}$. Lalu untuk pelat tembaga tiga lapis memiliki koefisien konveksi sebesar $840 \text{ W/m}^2\cdot\text{°C}$ dan pelat tembaga empat lapis sebesar $814,8 \text{ W/m}^2\cdot\text{°C}$. Kemudian koefisien konveksi pada pelat timbal tiga lapis yaitu sebesar $75,83 \text{ W/m}^2\cdot\text{°C}$ dan pelat timbal empat lapis sebesar $73,5 \text{ W/m}^2\cdot\text{°C}$. Selain koefisien konveksi, pada simulasi dibutuhkan juga nilai emisivitas, di mana untuk pelat aluminium sebesar 0,05; pelat tembaga sebesar 0,07; dan pelat timbal sebesar 0,63. Emisivitas tidak dipengaruhi oleh ketebalan pelat dan luas permukaan dari pelat, hal ini dikarenakan rasio daya yang dipancarkan oleh partikel terhadap daya yang dipancarkan oleh partikel pemancar [39]. Berikut adalah tabel hasil temperatur dan *heat flux* yang dapat dilihat pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Hasil Temperatur dan *Heat Flux*

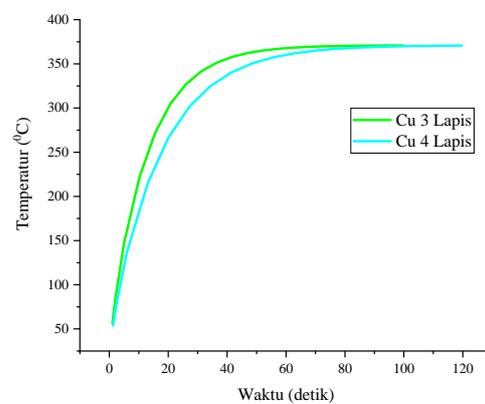
Material	Jumlah Lapisan	Temperatur (°C)	<i>Heat Flux</i> (W/mm²)
Al AA1100-O	3 Lapis	342,82	0,00849
	4 Lapis	342,7	0,0139

Cu ETP	3 Lapis	370,85	0,0121
C11000	4 Lapis	370,67	0,0263
Pb L50042	3 Lapis	229,67	0,00241
	4 Lapis	229,92	0,000582

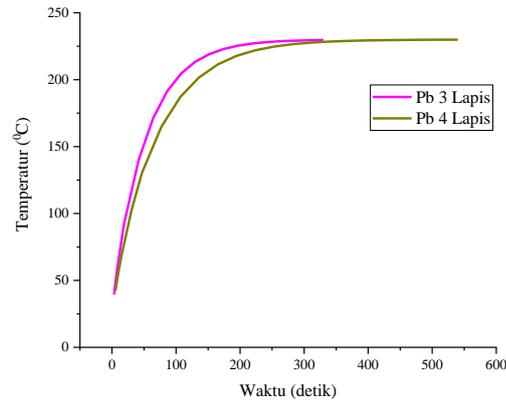
Hasil dari simulasi proses pemanasan pada waktu terhadap temperatur menunjukkan hasil yang berbeda-beda dari tiap material dan tiap lapisan. Pada pelat aluminium untuk mencapai titik anil, tiga lapis membutuhkan waktu sebanyak 120 detik (2 menit) dan empat lapis membutuhkan waktu sebesar 150 detik (2,5 menit). Lalu untuk pelat tembaga mencapai titik anilnya, tiga lapis membutuhkan waktu sebanyak 100 detik dan empat lapis membutuhkan waktu sebesar 120 detik (2 menit). Kemudian pelat timbal mencapai titik anilnya, tiga lapis membutuhkan waktu sebanyak 330 detik (5,5 menit) dan empat lapis membutuhkan waktu sebesar 540 detik (9 menit). Waktu yang telah ditentukan untuk mencapai titik anil menghasilkan temperatur pada setiap pelat. Hasil temperatur pelat tiga dan empat lapis pada waktu tertentu dapat dilihat pada kurva Gambar 4.2.



(a)



(b)

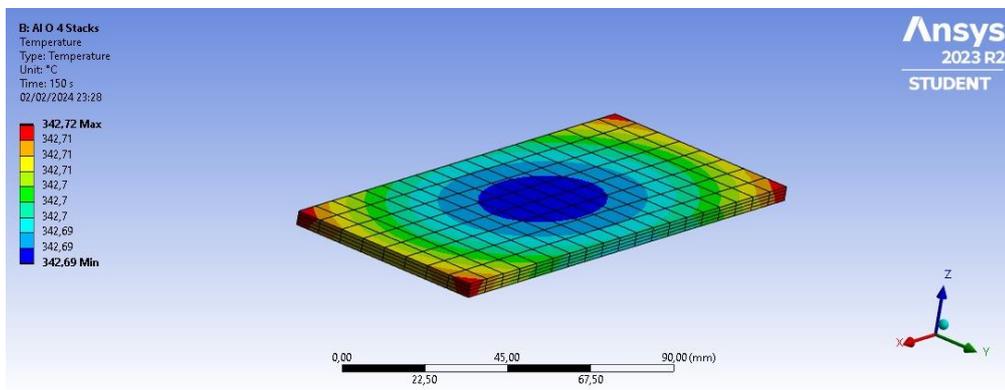


(c)

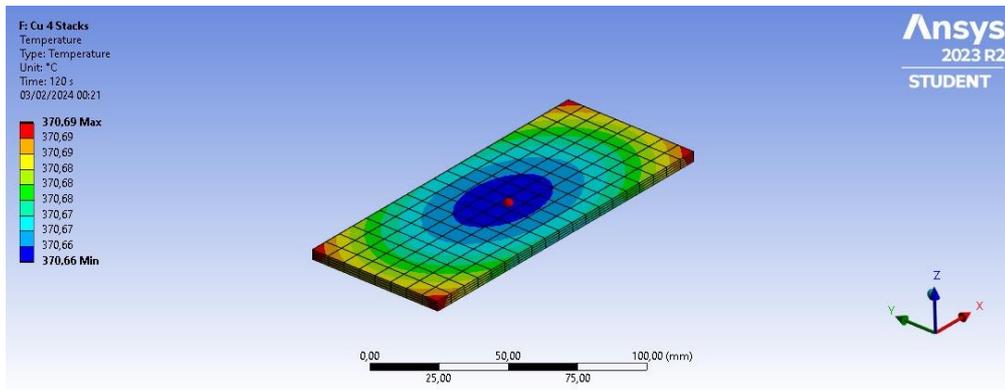
Gambar 4.2 Kurva Waktu Terhadap Temperatur pada Pelat Tiga dan Empat Lapis pada Al (a), Cu (b), dan Pb (c)

Dapat dilihat dari kurva di atas bahwa pelat timbal tiga lapis memiliki waktu terbanyak untuk mencapai hasil temperatur sebesar $229,67^{\circ}\text{C}$ dan timbal empat lapis menjadi pelat yang paling banyak membutuhkan waktu untuk mencapai hasil temperatur sebesar $229,92^{\circ}\text{C}$. Sementara itu, pelat tembaga tiga lapis memiliki waktu paling singkat di antara pelat tiga lapis lainnya untuk mencapai hasil temperatur sebesar $370,85^{\circ}\text{C}$; begitu pula tembaga empat lapis memiliki waktu paling singkat pula di antara pelat empat lapis lainnya untuk mencapai hasil temperatur sebesar $370,67^{\circ}\text{C}$. Terakhir yaitu pelat tiga lapis aluminium membutuhkan waktu ditengah-tengah untuk mencapai hasil temperatur sebesar $342,82^{\circ}\text{C}$; serta pelat empat lapis aluminium membutuhkan waktu di tengah untuk mencapai hasil temperatur sebesar $342,7^{\circ}\text{C}$. Selain kurva, gambaran hasil temperatur pada simulasi pelat tiga lapis tiap material dapat dilihat pada Gambar 4.3. di bawah ini.

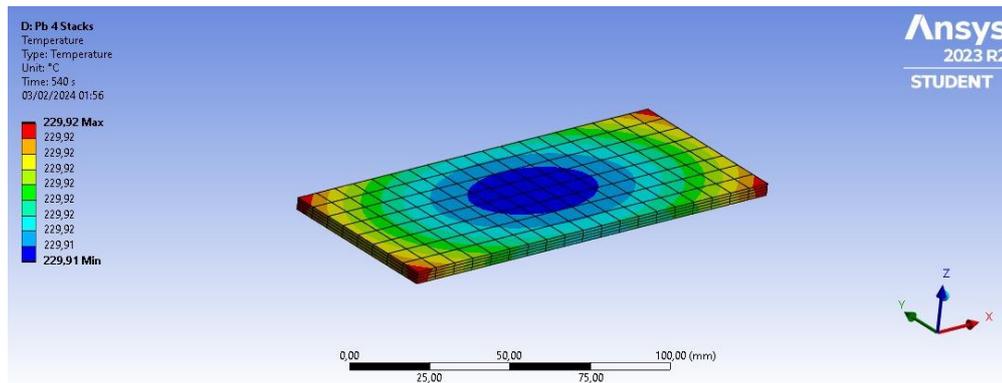
aluminium membutuhkan waktu sebanyak dua menit hingga mencapai titik anilnya. Lalu pelat tembaga membutuhkan waktu sebanyak 1 menit 40 detik hingga mencapai titik anilnya. Terakhir pelat timbal membutuhkan waktu sebanyak 5 menit 30 detik hingga mencapai titik anilnya. Selanjutnya gambaran hasil temperatur pada simulasi pelat empat lapis tiap material dapat dilihat pada Gambar 4.4 di bawah ini.



(a)



(b)

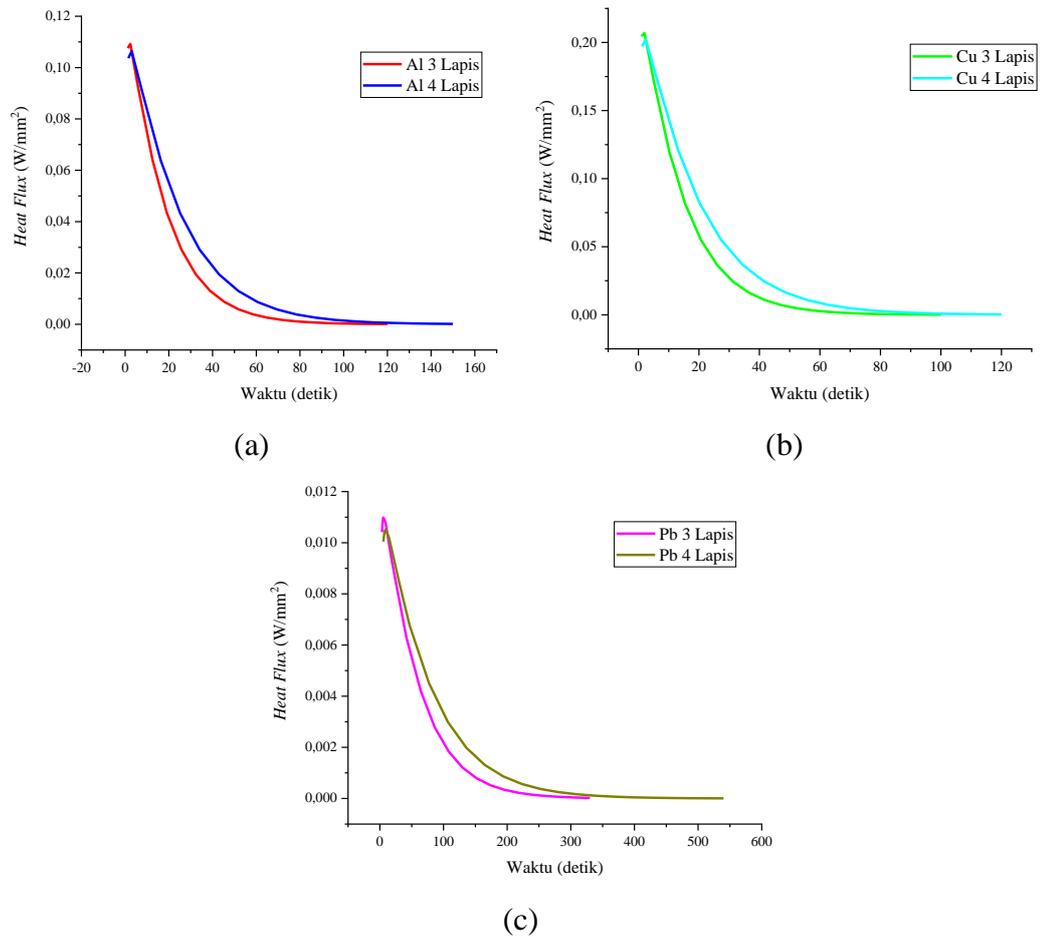


(c)

Gambar 4.4 Gambaran Hasil Temperatur Pelat Empat Lapis (a) Al (b) Cu (c) Pb

Pada gambaran hasil peningkatan temperatur, dapat dilihat bahwa peningkatan temperatur dimulai dari sudut juga pada pelat empat lapis. Gambaran peningkatan terjadi pada ketiga material pelat empat lapis yang disimulasikan. Pelat aluminium membutuhkan waktu sebanyak 2 menit 30 detik hingga mencapai titik anilnya. Lalu pelat tembaga membutuhkan waktu sebanyak 5 menit 30 detik hingga mencapai titik anilnya. Terakhir pelat timbal membutuhkan waktu sebanyak 9 menit hingga mencapai titik anilnya.

Setelah hasil temperatur oleh tiap lapisan dan material, dilanjutkan dengan hasil *heat flux*, di mana masing-masing material memiliki *heat flux* yang berbeda-beda karena kecepatan rambatan panas dapat dipengaruhi oleh volume pelat dan jenis material. Di antara pada pelat yang memiliki empat lapis membutuhkan *heat flux* yang lebih sedikit dikarenakan volume yang digunakan pada empat lapis lebih luas dibandingkan dengan pelat tiga lapis. Kurva waktu terhadap *heat flux* dapat dilihat pada Gambar 4.5.

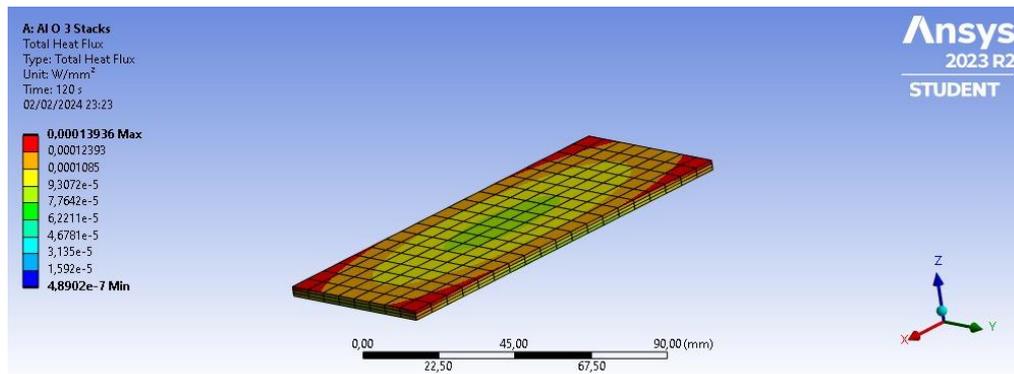


Gambar 4.5 Kurva Waktu Terhadap *Heat Flux* pada Pelat Tiga dan Empat Lapis pada Al (a), Cu (b), dan Pb (c)

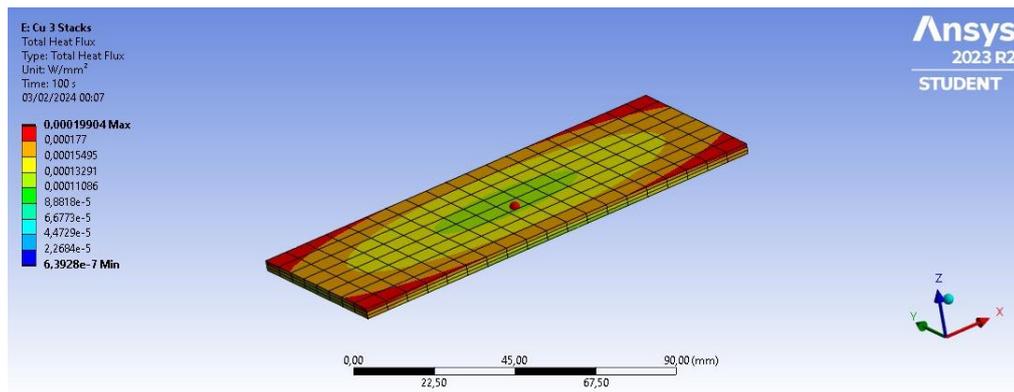
Dapat dilihat dari kurva di atas, bahwa pelat tiga lapis timbal memiliki waktu terbanyak yaitu 330 detik untuk mencapai hasil *heat flux* terendah dan pada timbal empat lapis membutuhkan waktu terbanyak yaitu 540 detik untuk mencapai hasil *heat flux* terendah. Sementara itu, pelat tembaga memiliki waktu paling singkat yaitu sebanyak 100 detik untuk mencapai hasil *heat flux* terendah dan pada tembaga empat lapis membutuhkan waktu paling singkat yaitu sebanyak 120 detik untuk mencapai hasil *heat flux* terendah. Terakhir yaitu pelat aluminium membutuhkan waktu ditengah-tengah yang tipis dibandingkan dengan pelat

tembaga yaitu sebanyak 120 detik untuk mencapai hasil *heat flux* terendah dan pada aluminium empat lapis membutuhkan waktu di tengah-tengah pula yang tipis dibandingkan dengan pelat tembaga yaitu sebanyak 150 detik untuk mencapai hasil *heat flux* terendah.

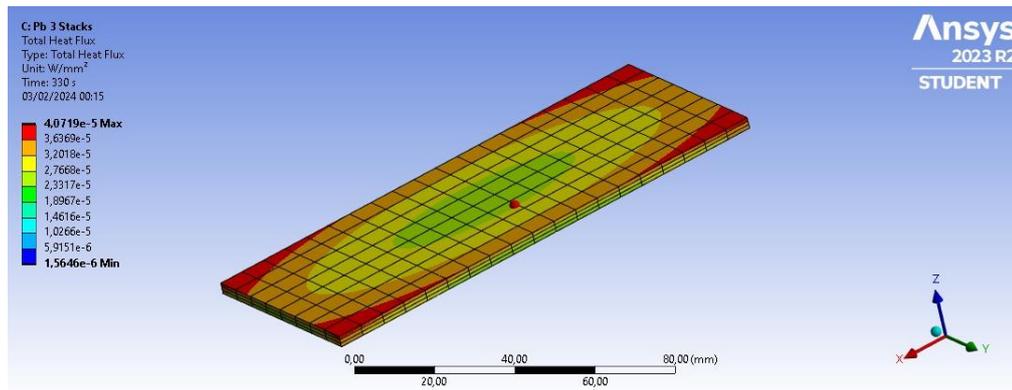
Perbedaan waktu yang terjadi pada nilai *heat flux* disebabkan pengaruh dari nilai koefisien konveksi yang berbeda pada variasi material, serta ketebalan pelat atau lapisannya juga berbeda. Selanjutnya merupakan gambaran hasil *heat flux* simulasi pada pelat tiga lapis dapat dilihat pada Gambar 4.6.



(a)



(b)



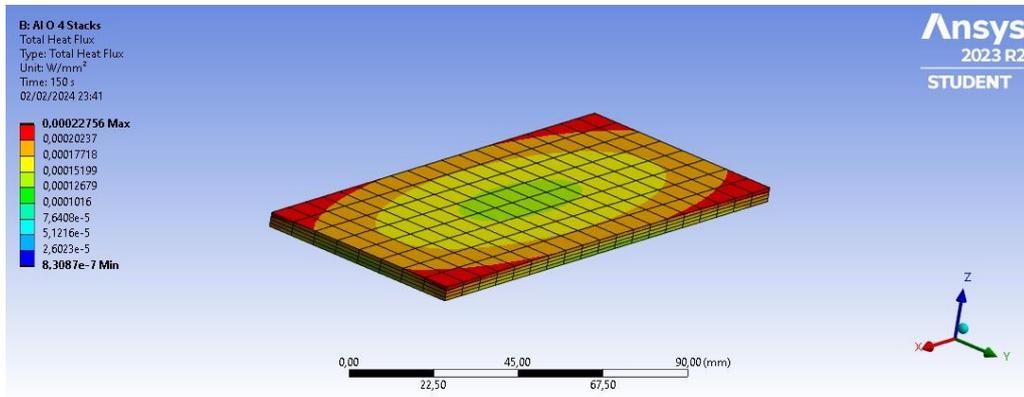
(c)

Gambar 4.6 Gambaran Hasil *Heat Flux* Pelat Tiga Lapis (a) Al (b) Cu (c) Pb

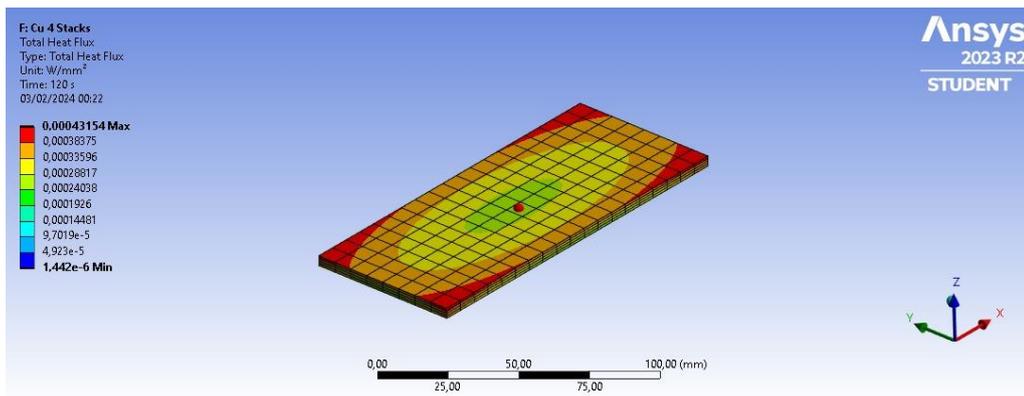
Pada gambar di atas adalah rambatan *heat flux* yang terjadi pada pelat tiga lapis. Gambaran di atas adalah total *heat flux* yang menampilkan rambatan panas per satuan luas yaitu mm^2 . Semakin kecil *heat flux* maka rambatan panas lebih sedikit akan menghasilkan temperatur yang lebih sedikit pula, di mana kecilnya *heat flux* memberikan hasil yang lebih baik. Namun semakin besar *heat flux*, maka yang terjadi pada rambatan panas dan temperatur terjadi sebaliknya. Dapat dilihat pula pada gambar di atas bahwa rambatan panas tertinggi ada di bagian ujung dari pelat, dengan masing-masing hasil rambatan pada pelat aluminium $0,00849 \text{ W/mm}^2$; pelat tembaga $0,0121 \text{ W/mm}^2$; dan pelat timbal $0,00241 \text{ W/mm}^2$.

Selanjutnya adalah gambaran hasil *heat flux* dari pelat empat lapis yang memiliki nilai lebih rendah dibandingkan dengan pelat tiga lapis. Gambaran tersebut merupakan total *heat flux*, di mana pada hasil ini menampilkan rambatan panas per satuan luas yaitu mm^2 . Karena pelat empat lapis memiliki nilai total *heat flux* yang lebih rendah dibandingkan dengan nilai total *heat flux* tiga lapis, maka

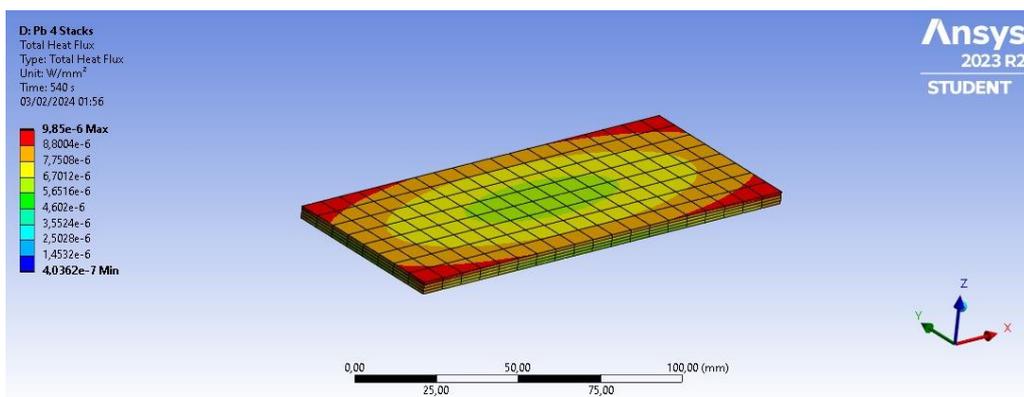
hasil total *heat flux* pelat empat lapis lebih baik dibandingkan tiga lapis. Gambaran hasil *heat flux* dari pelat empat lapis dapat dilihat pada Gambar 4.7.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.7 Gambaran Hasil *Heat Flux* Pelat Empat Lapis (a) Al (b) Cu (c) Pb

Dapat dilihat pada gambar di atas adalah rambatan *heat flux* yang terjadi pada pelat empat lapis, di mana gambaran di atas adalah total *heat flux*. Dapat dilihat pula pada gambar di atas bahwa rambatan panas tertinggi pada pelat empat lapis juga berada di bagian ujung dari pelat, dengan masing-masing hasil rambatan pada pelat aluminium mencapai $0,0139 \text{ W/mm}^2$; pelat tembaga mencapai $0,0263 \text{ W/mm}^2$; dan pelat timbal mencapai $0,000582 \text{ W/mm}^2$.

4.3 Simulasi Proses Pencanaian

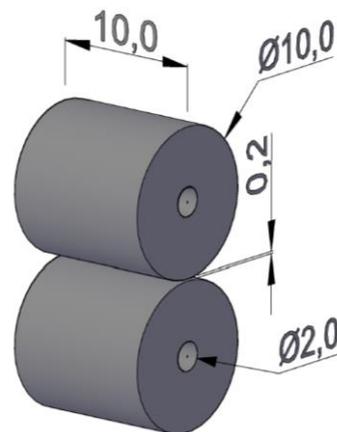
Setelah simulasi *pre treatment*, dilakukan dengan simulasi pencanaian dengan metode ARB. Pada metode ARB terdapat mekanisme penguatan berupa peningkatan dari regangan (*strain hardening*). Mekanisme ini terjadi karena proses pencanaian pada pelat terjadi deformasi secara plastis dan menghasilkan pelat yang lebih tipis serta menyebabkan penumpukan dislokasi [39]. Proses ARB digunakan karena pelat yang akan dilakukan pencanaian dapat memiliki tegangan yang lebih besar hingga dapat menghasilkan kekuatan hingga empat kali lebih besar pula dibandingkan melakukan proses pencanaian menggunakan *roll* konvensional [39]. Tujuan dilakukannya simulasi pencanaian yang dilakukan adalah untuk mendapatkan hasil tegangan dan regangan ekuivalen dengan variasi material dan lapisan pelat yang berbeda-beda. Selanjutnya hasil simulasi pencanaian ini akan dilakukan verifikasi terhadap penelitian yang dilakukan secara langsung. Variasi material yang digunakan adalah aluminium AA1100-O, tembaga ETP C11000, dan timbal L50042 dengan masing-masing material menggunakan pelat tiga dan empat

lapis yang telah dilakukan proses simulasi *pre treatment* atau pemanasan sebelumnya untuk mendapatkan hasil pencanaian yang lebih baik.

Proses simulasi pencanaian dimulai dengan membuat pelat dan dua *roller* dalam AutoCAD. Ukuran *roller* disesuaikan dengan alat *roll* yang digunakan pada penelitian secara langsung. Bentuk *roller* yang digunakan yaitu tabung pejal dengan ukuran diameter sebesar 10 cm dan tinggi sebesar 10 cm. Selanjutnya *roller* dibuat lubang tengah sebagai poros dengan ukuran diameter sebesar 2 cm. Setelah itu, jarak antara dua *roller* dibuat sebesar 2 mm, hal ini disesuaikan dengan persen reduksi yang digunakan yaitu sebesar 50%. Bentuk *roller* yang digunakan pada penelitian langsung [7] (a) dan secara simulasi (b) dapat dilihat pada Gambar 4.8.



(a)



(b)

Gambar 4.8 *Roller* Penelitian Langsung [7] (a) dan Simulasi (b) Dalam cm

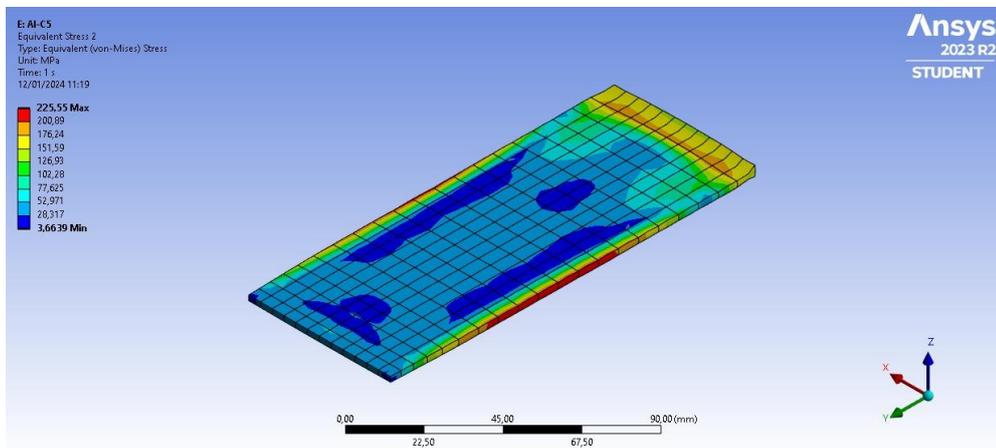
Setelah membuat desain *roller*, desain pelat dibuat juga dengan menggunakan ukuran sesuai dengan kategori lapisan pelat. Untuk pelat dengan tiga lapis menggunakan ukuran dengan panjang pelat 13 cm, lebar 5 cm, dan ketebalan satu lapis pelat 1 mm. Total volume yang didapat pada pelat tiga lapis yaitu sebesar 19,5 cm³. Lalu untuk pelat dengan empat lapis menggunakan ukuran dengan

panjang pelat 14 cm, lebar 6 cm, dan ketebalan satu lapis pelat 1 mm. Total volume yang didapat pada pelat empat lapis yaitu sebesar 33,6 cm³. Perbedaan ukuran pada pelat tiga lapis dan empat lapis dimaksudkan agar dapat mengontrol antar lapisan pelat, sehingga akan mengurangi delaminasi dengan meminimalkan konsentrasi tegangan dan mendorong ikatan yang lebih seragam [39].

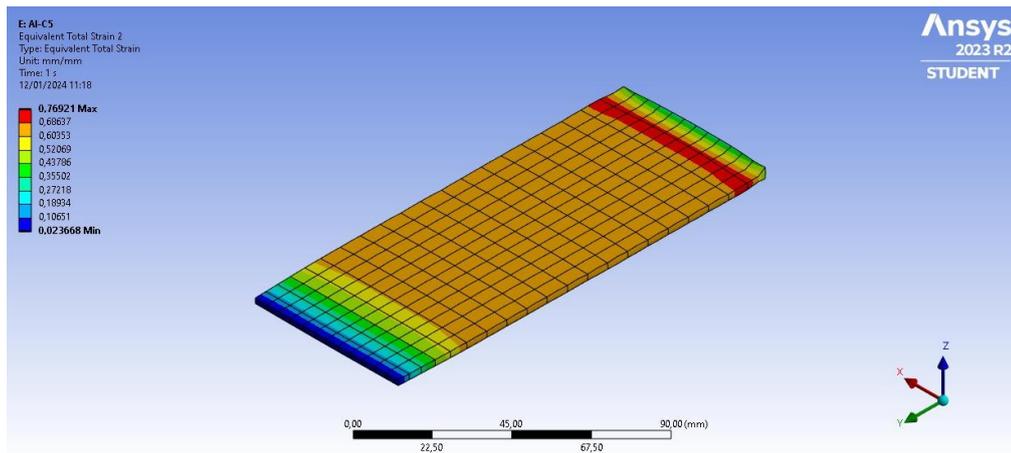
Selanjutnya desain proses pencanaian ini dimasukkan ke dalam ANSYS *Workbench*, tepatnya pada ANSYS *Design Modeler*. Kemudian proses pencanaian diteruskan ke ANSYS *Mechanical* untuk disimulasikan. Dalam ANSYS *Mechanical* diperlukan data material yang digunakan pada pelat, maka dari itu data masing-masing material pada tabel 2.2 (aluminium), tabel 2.3 (tembaga), dan tabel 2.6 (timbal) dimasukkan ke dalam *engineering data*. Kemudian pengaturan pada *meshing* dan *contact* disesuaikan agar simulasi dapat berjalan. Pada pengaturan *contact* diperlukan koefisien gesekan sebesar 0,2. Setelah itu pelat diberikan keterangan temperatur dari hasil *pre treatment* sesuai dengan material dan lapisannya masing-masing. Kemudian hasil tegangan dan regangan dicantumkan untuk mendapatkan hasilnya. Apabila tegangan semakin tinggi, maka akan memungkinkan terbentuknya *missing line* atau ikatan sempurna antar pelat yang dapat menimbulkan peningkatan kekuatan pada pelat [39]. Proses ARB yang dilakukan pada tiga lapis dan empat lapis sebanyak lima kali atau lima siklus. Pengaturan ARB sebanyak lima siklus diatur dalam ANSYS *Workbench*.

Proses ARB ini nantinya akan digunakan untuk penyerap atau absorb radiasi. Parameter yang dibutuhkan agar material tersebut dapat menyerap radiasi antara lain ketebalan yang menipis dan dapat berefek mengurangi *bandwidth*, serta

pengecilan ukuran sel [60], di mana dengan melakukan proses ARB didapatkan reduksi ketebalan sebesar 50% dan pengecilan ukuran nanostruktur [61]. Selain itu, hasil dari proses ARB diharapkan memberikan proteksi untuk *smartphone* dengan memiliki ketahanan, tekukan, dan bantingan yang dapat melindungi *smartphone*, namun dengan ukuran pelat yang lebih tipis. Berikut merupakan gambaran hasil *stress* dan *strain* dari proses pencanaian ARB pada material aluminium tiga lapis yang dapat dilihat pada Gambar 4.9.



(a)

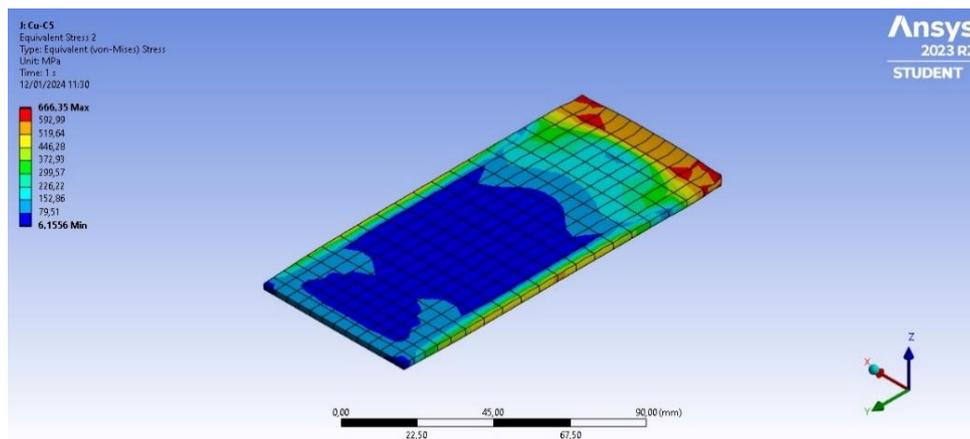


(b)

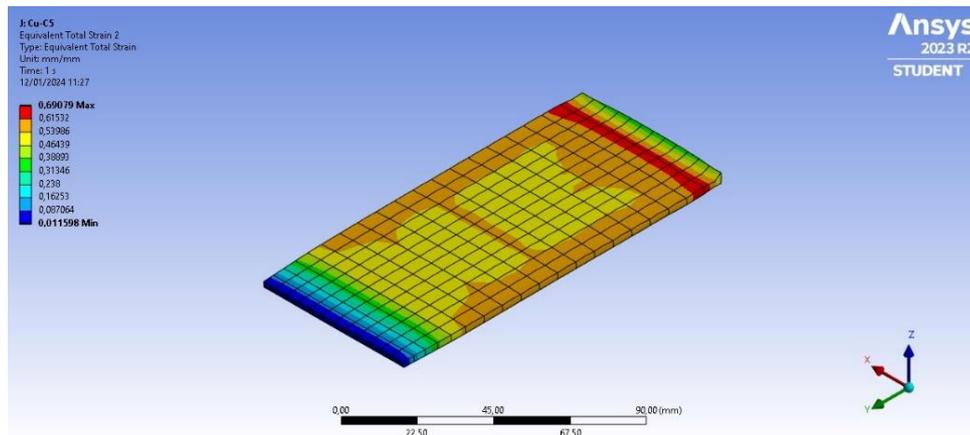
Gambar 4.9 Hasil Pencanaian Aluminium Tiga Lapis (a) *Stress* (b) *Strain*

Distribusi tegangan dapat dilihat pada gambar di atas, di mana tegangan terjadi secara merata dan meninggi ketika permukaan pelat mengenai *roller*. Dapat dilihat pula pada gambaran tegangan tersebut distribusi tegangan yang dihasilkan mencapai rata-rata sebesar 65,4 MPa. Sementara itu, tegangan maksimal yang didapatkan pada bagian belakang pelat sebesar 225,6 MPa.

Pada gambar di atas menunjukkan pula distribusi regangan yang menunjukkan hasil deformasi yang terjadi pada pelat selama simulasi. Gambaran pendistribusian regangan merata ke seluruh permukaan pelat. Namun bagian depan pelat distribusi regangan tidak besar karena bagian depan merupakan titik awal simulasi proses *rolling* dengan nilai minimal sebesar 0,024 mm/mm. Sementara itu, pada bagian belakang merupakan titik maksimal distribusi regangan yaitu sebesar 0,77 mm/mm. Rata-rata dari total pendistribusian regangan ini berkisar 0,55 mm/mm. Berikutnya adalah gambaran hasil *stress* dan *strain* dari proses pencanaian ARB pada material tembaga tiga lapis yang dapat dilihat pada Gambar 4.10.



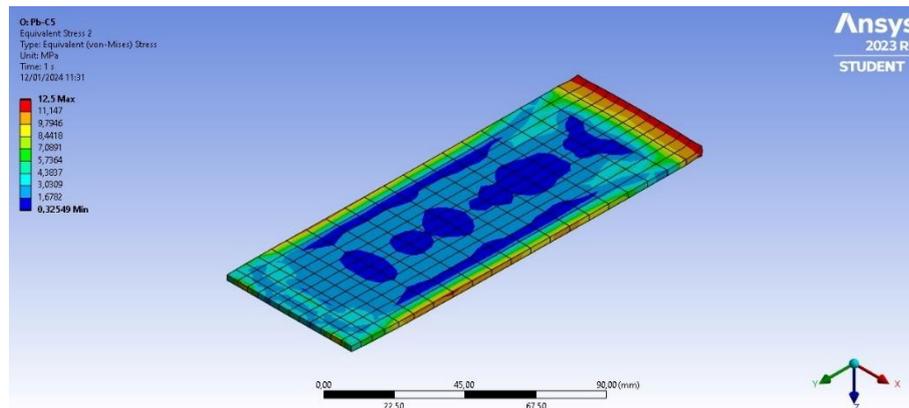
(a)



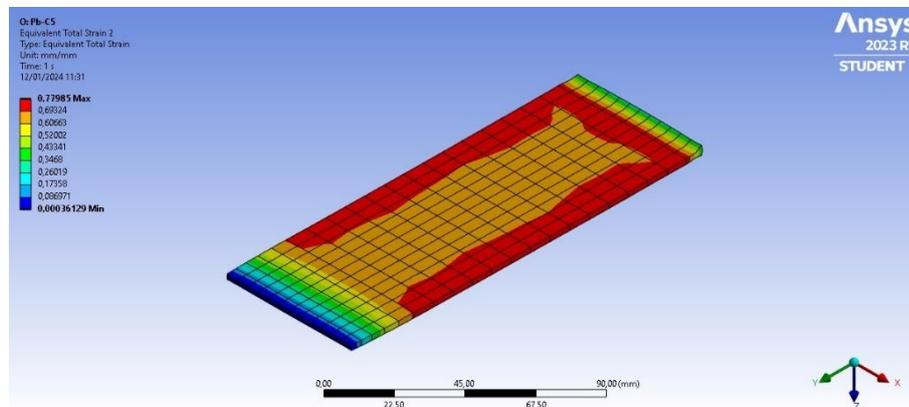
(b)

Gambar 4.10 Hasil Pencanaan Tembaga Tiga Lapis (a) *Stress* (b) *Strain*

Distribusi tegangan dapat dilihat pada gambar di atas, di mana tembaga yang bersifat getas memiliki distribusi tegangan paling tinggi. Hal ini dapat dilihat pada gambaran tersebut distribusi tegangan yang dihasilkan mencapai rata-rata sebesar 174,46 MPa. Tegangan maksimal yang didapatkan pada bagian belakang pelat 666,35 MPa. Pada gambar di atas pula menunjukkan distribusi regangan pada hasil simulasi tembaga tiga lapis. Gambaran pendistribusian regangan merata ke seluruh permukaan pelat. Namun pada bagian depan pelat distribusi regangan tidak besar dengan nilai minimal sebesar 0,012 mm/mm. Pada bagian belakang merupakan titik maksimal distribusi regangan sebesar 0,69 mm/mm. Rata-rata total pendistribusian regangan ini berkisar 0,47 mm/mm. Tembaga memiliki regangan paling kecil karena sifat tembaga sendiri yang lebih getas dibandingkan dengan aluminium dan timbal. Berikutnya adalah gambaran *stress* dan *strain* dari proses pencanaan ARB pada material timbal tiga lapis pada Gambar 4.11.



(a)



(b)

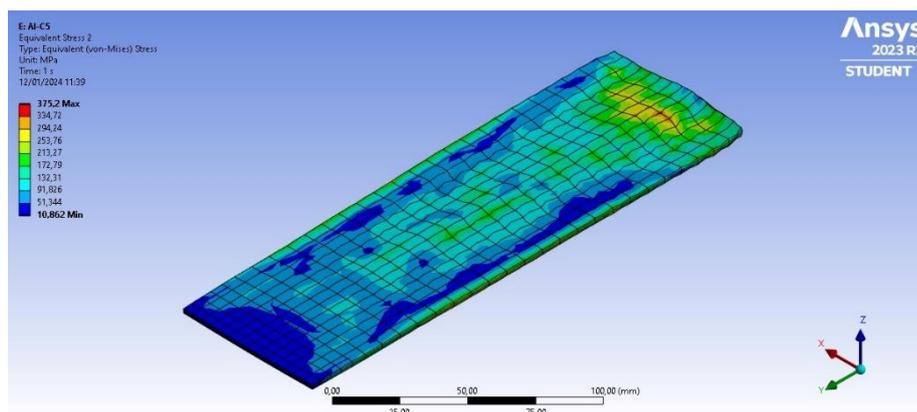
Gambar 4.11 Hasil Pencanaan Timbal Tiga Lapis (a) *Stress* (b) *Strain*

Distribusi tegangan dapat dilihat pada gambar di atas, di mana timbal yang bersifat ulet, sebaliknya memiliki distribusi tegangan paling rendah. Hal ini dapat dilihat pada citra tegangan tersebut distribusi tegangan yang dihasilkan mencapai rata-rata hanya sebesar 3,84 MPa. Sementara itu, tegangan maksimal yang didapatkan pada bagian belakang pelat sebesar 12,5 MPa.

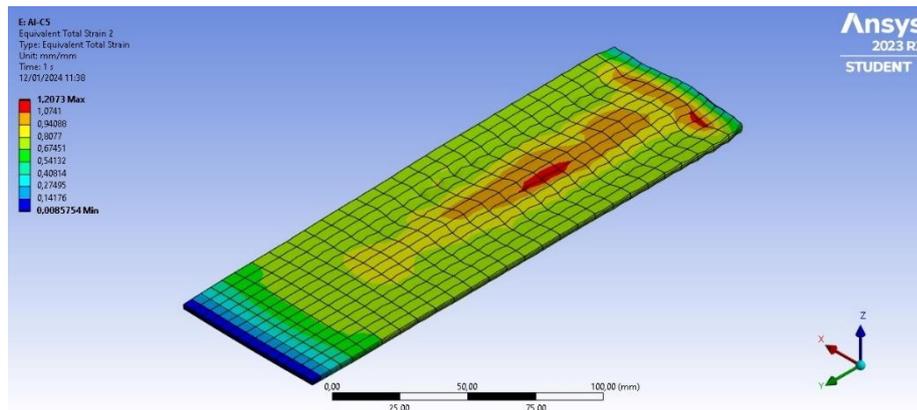
Pada gambar di atas menunjukkan distribusi regangan pada hasil simulasi timbal tiga lapis. Dapat dilihat bahwa gambaran pendistribusian regangan merata pula ke seluruh permukaan pelat. Namun pada bagian depan pelat distribusi

regangan tidak terlalu besar karena bagian depan merupakan titik awal dimulainya simulasi proses *rolling* dengan nilai minimal sebesar 0,00036 mm/mm. Sementara itu, pada bagian belakang merupakan titik maksimal distribusi regangan yaitu sebesar 0,78 mm/mm. Rata-rata dari total pendistribusian regangan ini berkisar 0,59 mm/mm. Timbal yang bersifat ulet ini memiliki regangan paling besar dibandingkan dengan aluminium dan timbal.

Dengan demikian hasil dari simulasi proses pencanaian dari material dengan tiga lapis pelat. Hasil tersebut apabila dibandingkan dengan simulasi proses pencanaian pada material dengan empat lapis pelat, masih lebih kecil. Hal ini disebabkan material dengan empat lapis membutuhkan upaya yang lebih besar dari *roller* untuk melakukan proses pencanaian dikarenakan ketebalan empat lapis lebih tebal dibandingkan dengan tiga lapis. Berikut merupakan gambaran hasil *stress* dan *strain* dari proses pencanaian ARB pada material aluminium empat lapis yang dapat dilihat pada Gambar 4.12.



(a)

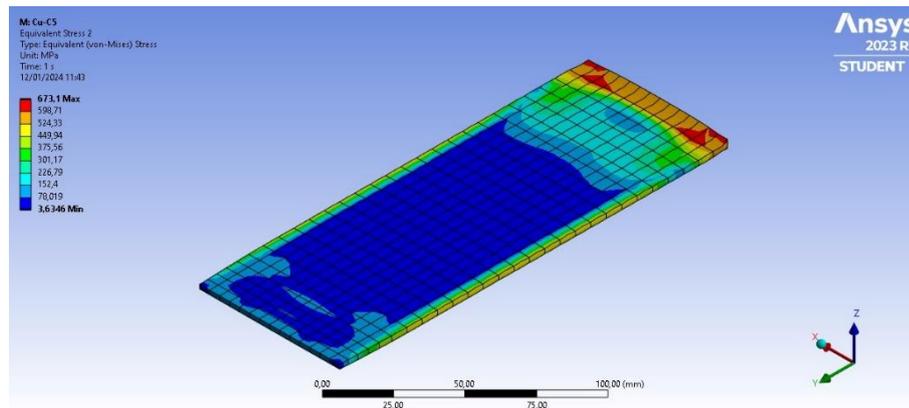


(b)

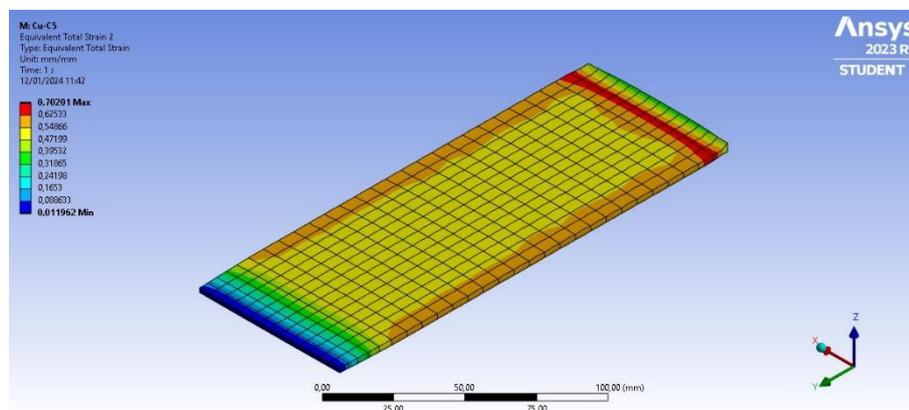
Gambar 4.12 Hasil Pencanaian Aluminium Empat Lapis (a) *Stress* (b) *Strain*

Distribusi tegangan dapat dilihat pada gambar di atas, di mana tegangan terjadi secara merata dan meninggi ketika permukaan pelat mengenai *roller*. Dapat dilihat pula pada gambaran tegangan tersebut distribusi tegangan yang dihasilkan mencapai rata-rata sebesar 93,8 MPa. Sementara itu, tegangan maksimal yang didapatkan pada bagian belakang pelat sebesar 375,2 MPa.

Pada gambar di atas terlihat distribusi regangan yang menunjukkan hasil deformasi yang terjadi pada pelat selama simulasi. Gambaran pendistribusian regangan merata ke seluruh permukaan pelat. Namun bagian depan pelat distribusi regangan tidak besar dengan nilai minimal sebesar 0,0085 mm/mm. Sementara itu, pada bagian belakang merupakan titik maksimal distribusi regangan sebesar 1,2 mm/mm. Rata-rata dari total pendistribusian regangan ini berkisar 0,68 mm/mm. Berikutnya adalah gambaran *stress* dan *strain* dari proses pencanaian ARB pada material tembaga empat lapis pada Gambar 4.13.



(a)

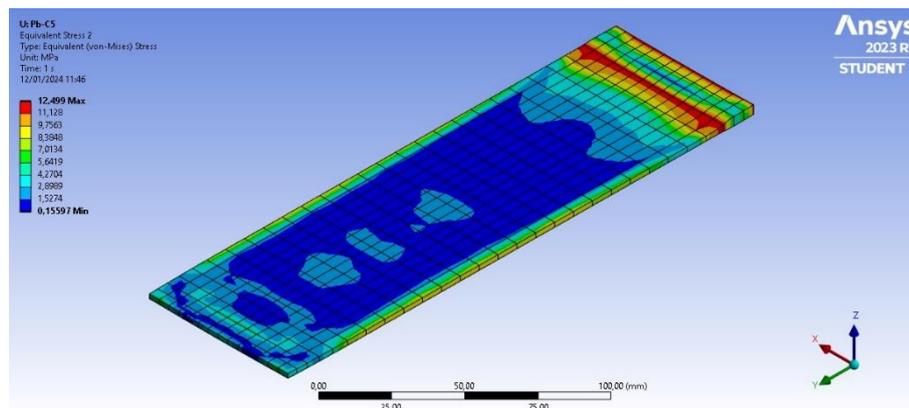


(b)

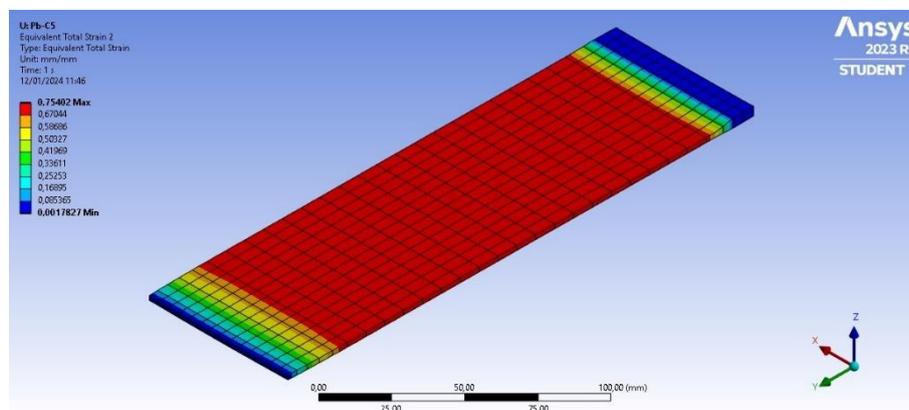
Gambar 4.13 Hasil Pencanaan Tembaga Empat Lapis (a) *Stress* (b) *Strain*

Gambar di atas merupakan hasil *stress* dan *strain* dari proses pencanaan ARB pada material tembaga empat lapis. Distribusi tegangan tembaga dinilai paling tinggi. Hal ini dapat dilihat pada gambaran tersebut distribusi tegangan yang dihasilkan mencapai rata-rata sebesar 149,48 MPa. Tegangan maksimal yang didapatkan pada bagian belakang pelat 673,1 MPa. Pada gambar di atas pula menunjukkan distribusi regangan pada hasil simulasi tembaga tiga lapis. Gambaran pendistribusian regangan merata ke seluruh permukaan pelat. Namun pada bagian

depan pelat distribusi regangan tidak besar dengan nilai minimal sebesar 0,012 mm/mm. Pada bagian belakang merupakan titik maksimal distribusi regangan sebesar 0,7 mm/mm. Rata-rata total pendistribusian regangan ini berkisar 0,49 mm/mm. Berikutnya adalah gambaran *stress* dan *strain* dari proses pencanaian ARB pada material timbal empat lapis pada Gambar 4.14.



(a)



(b)

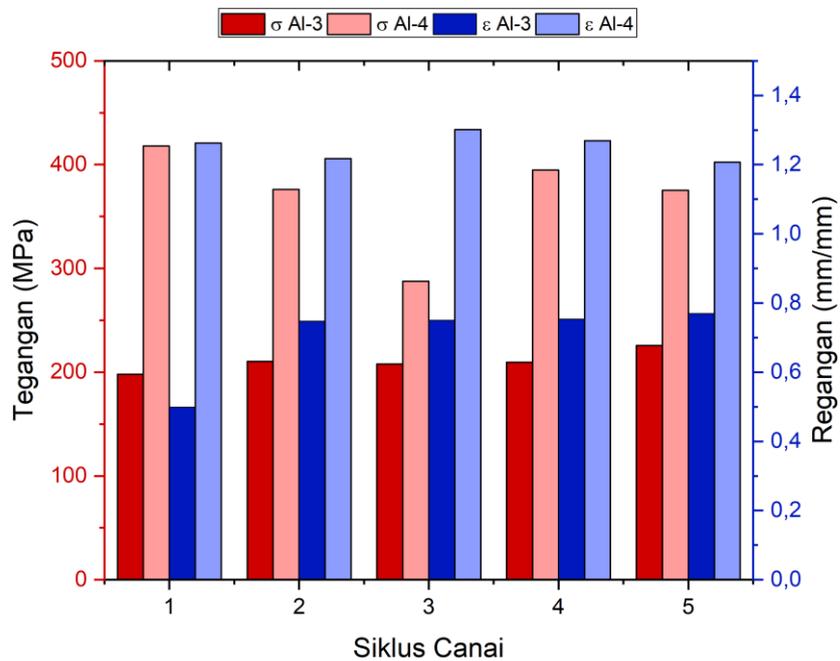
Gambar 4.14 Hasil Pencanaian Timbal Empat Lapis (a) *Stress* (b) *Strain*

Gambar di atas merupakan gambar 4.15 yaitu gambaran hasil *stress* dan *strain* dari proses pencanaian ARB pada material timbal empat lapis. Distribusi

tegangan dapat dilihat pada gambar di atas, di mana timbal yang bersifat ulet, sebaliknya memiliki distribusi tegangan paling rendah. Hal ini dapat dilihat pada gambaran tegangan tersebut distribusi tegangan yang dihasilkan mencapai rata-rata hanya sebesar 3,38 MPa. Sementara itu, tegangan maksimal yang didapatkan pada bagian belakang pelat sebesar 12,5 MPa.

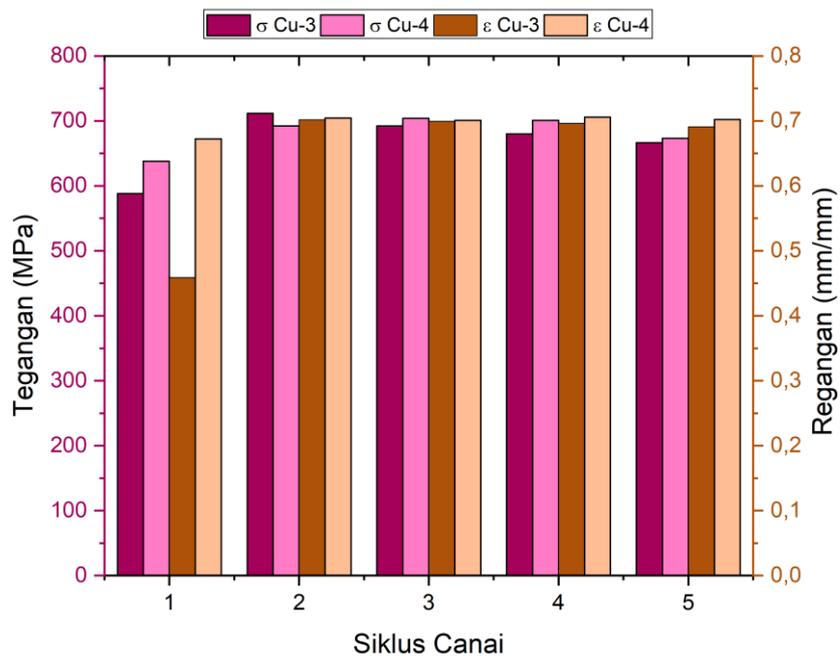
Pada gambar di atas menunjukkan distribusi regangan pada hasil simulasi timbal empat lapis. Dapat dilihat bahwa citra pendistribusian regangan merata pula ke seluruh permukaan pelat. Namun pada bagian depan pelat distribusi regangan tidak terlalu besar karena bagian depan merupakan titik awal dimulainya simulasi proses *rolling* dengan nilai minimal sebesar 0,002 mm/mm. Sementara itu, pada bagian belakang merupakan titik maksimal distribusi regangan yaitu sebesar 0,75 mm/mm. Rata-rata dari total pendistribusian regangan ini berkisar 0,59 mm/mm. Timbal yang bersifat ulet ini memiliki regangan paling besar dibandingkan dengan aluminium dan timbal.

Apabila dipresentasikan dalam bentuk kurva, dapat dibandingkan antara salah satu material dengan perbandingan antara tiga lapis dan empat lapis. Kurva tersebut menyajikan data-data hasil pencanaian berupa maksimum tegangan (*stress*) dan regangan (*strain*) dari masing-masing siklus pencanaian yang dilakukan sampai dengan lima siklus pada pelat tiga lapis dan pelat empat lapis. Berikut merupakan kurva tegangan dan regangan aluminium dari pelat tiga lapis dan pelat empat lapis yang dapat dilihat pada Gambar 4.15.



Gambar 4.15 Grafik Tegangan-Regangan Pelat Al 3 Lapis dan 4 Lapis

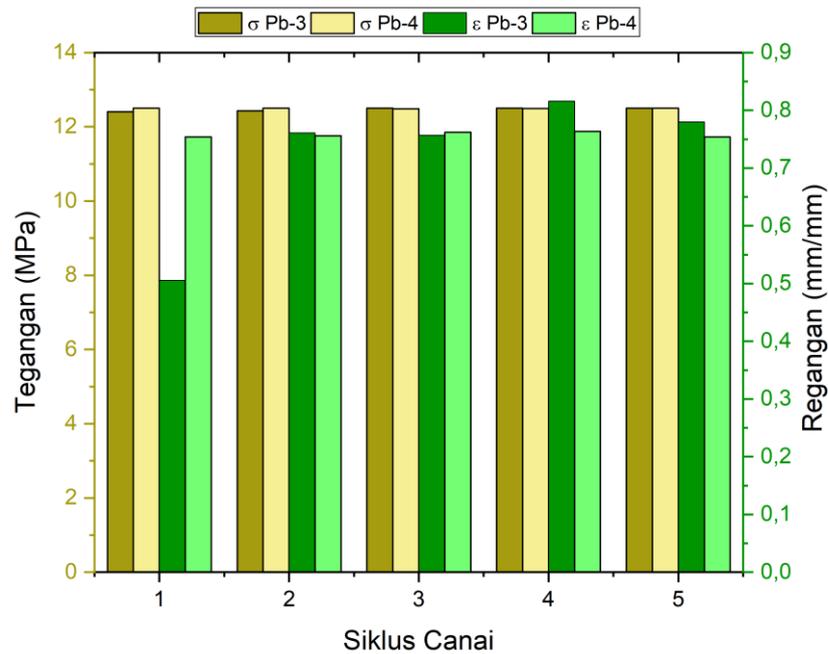
Dapat dilihat pada kurva di atas bahwa rata-rata tegangan dan regangan pelat aluminium empat lapis lebih tinggi dibandingkan dengan aluminium tiga lapis per siklus. Namun, pada empat lapis terjadi penurunan tegangan yang signifikan khususnya pada siklus ketiga, penurunan ini juga terjadi pada hasil regangan di mana sempat turun di siklus dua lalu naik kembali di siklus ketiga dan terjadi penurunan kembali hingga siklus kelima. Sementara itu, hasil tegangan regangan pada pelat aluminium tiga lapis cenderung meningkat, di mana pada tegangan terjadi peningkatan per siklusnya secara perlahan dan pada regangan sempat terjadi peningkatan yang tinggi dari siklus pertama ke dua. Berikutnya adalah kurva tegangan dan regangan tembaga dari pelat tiga lapis dan pelat empat lapis yang dapat dilihat pada Gambar 4.16.



Gambar 4.16 Grafik Tegangan-Regangan Pelat Cu 3 Lapis dan 4 Lapis

Dapat dilihat pada kurva di atas bahwa antara tegangan dan regangan terjadi penurunan dari pelat tembaga tiga lapis dan pelat tembaga empat lapis pada siklus tengah. Pada tegangan yang dihasilkan, pelat tiga lapis sempat mengalami kenaikan yang signifikan dari siklus satu ke dua, namun dari siklus kedua hingga kelima terjadi penurunan yang sedikit drastis. Hal ini berbeda dengan pelat empat lapis di mana siklus satu sampai tiga sempat mengalami kenaikan dan turun setelahnya hingga siklus lima. Sementara itu, pada regangan memiliki hasil naik dan turun, di mana pada pelat tiga lapis sempat terjadi kenaikan signifikan dari siklus satu sampai siklus dua dan terjadi naik turun per siklusnya. Pada hasil regangan empat lapis terjadi pula naik turun namun tidak begitu signifikan dan hasil akhir tersebut tetap melebihi dari hasil siklus awal. Berikutnya merupakan kurva tegangan dan

regangan timbal dari pelat tiga lapis dan pelat empat lapis yang dapat dilihat pada Gambar 4.17.



Gambar 4.17 Grafik Tegangan-Regangan Pelat Pb 3 Lapis dan 4 Lapis

Dapat dilihat pada kurva di atas bahwa pelat timbal tiga lapis memiliki hasil tegangan dan regangan yang cukup signifikan, berbeda dengan timbal empat lapis yang tidak signifikan alias cenderung stagnan. Pada hasil tegangan, didapatkan hasil yang signifikan dari siklus satu sampai tiga, namun setelahnya hingga siklus akhir memiliki hasil yang stagnan. Lalu pada hasil pelat empat lapis memiliki tegangan yang sempat turun pada siklus tiga dan naik kembali di siklus empat, namun hasil akhir siklus cenderung menurun dibandingkan hasil dari siklus pertama. Sementara itu, pada hasil regangan terjadi peningkatan yang signifikan pada pelat tiga lapis dimulai dari siklus satu ke siklus dua, namun cenderung

menurun pada siklus empat ke siklus lima meskipun hasil akhir tetap memiliki nilai regangan yang lebih dibandingkan siklus satu. Pada hasil regangan pelat empat cenderung stagnan atau hanya sedikit peningkatan dari siklus satu hingga empat dan pada siklus akhirnya terjadi penurunan yang memiliki kemiripan dengan hasil siklus pertama.

Hasil simulasi di atas selanjutnya dibandingkan dengan hasil penelitian secara langsung. Penelitian secara langsung ini dilakukan oleh Alumni Mahasiswa Teknik Metalurgi Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, atas nama Khoirul Rifai Sambilan pada salah satu tugas akhirnya. Pada hasil simulasi pencanaian selanjutnya akan dibandingkan dengan hasil pencanaian oleh Khoirul Rifai yang ada pada Tabel 4.5 di bawah ini.

Tabel 4.5 Data Hasil Pengujian Tarik Secara Penelitian Langsung [7]

Sampel	UTS (MPa)	Yield Strength (MPa)	Elongasi (%)
Aluminium 3 Lapis	80,497	75,43	71
Aluminium 4 Lapis	87,617	74,66	74
Tembaga 3 Lapis	211,35	149.84	78
Tembaga 4 Lapis	172,25	128,57	81

Timbal 3	7,680	5,493	63
Lapis			
Timbal 4	9,868	4,020	71
Lapis			

Metode yang digunakan untuk membandingkan antara hasil penelitian langsung dengan hasil penelitian simulasi yaitu metode % kenaikan. Nilai yang diambil dari hasil penelitian langsung oleh Khoirul Rifai, yaitu UTS (*Ultimate Tensile Strength*), dan nilai hasil simulasi yang diambil adalah tegangan ekivalen maksimal. Berikut tabel % kenaikan yang dapat dilihat pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 % Kenaikan dari UTS [7] dan *Max Stress*

Pelat	UTS [7] (MPa)	<i>Max Stress</i> (MPa)	% Kenaikan
Al-3	80,497	225,55	180%
Al-4	87,617	375,2	328%
Cu-3	211,35	666,35	215%
Cu-4	172,25	673,1	291%
Pb-3	7,68	12,5	63%
Pb-4	9,868	12,499	27%

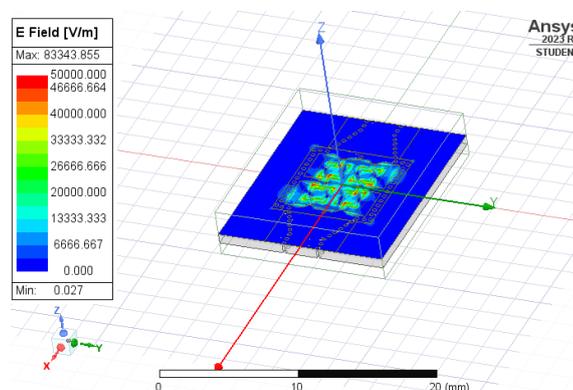
Perbedaan yang terjadi disebabkan oleh beberapa faktor, mengingat proses ARB adalah proses yang kompleks. Faktor penyebabnya adalah koefisien gesekan yang berbeda [40], persen reduksi yang berbeda [62], penggunaan temperatur pemanasan atau *pre treatment* [63], dan tidak adanya karakterisasi material sebelum melakukan penelitian.

4.4 Simulasi Proses Radiasi *Absorber*

Penelitian selanjutnya yaitu simulasi radiasi menggunakan *High Frequency Structural Simulator* (HFSS) yang berada dalam aplikasi ANSYS *Electronic Desktop*. Penelitian dimulai dengan menyiapkan desain CAD antenna SIW *aperture* 5G berdasarkan literatur dari Bisharat, et al [58] di AutoCAD. Lalu memasukkan desain antenna SIW *aperture* 5G beserta pelat yang telah melalui proses pencanaian ke ANSYS HFSS. Kemudian menyesuaikan *boundary condition* dari area radiasi dan mengamati simulasi pancaran radiasi. Terakhir adalah menghitung hasil pola radiasi dari antenna yang telah diberi pelat maupun tidak. Penelitian menggunakan tujuh variasi, yaitu yang pertama tanpa menggunakan pelat hasil proses ARB atau hanya antenna, aluminium tiga lapis dan empat lapis, tembaga tiga lapis dan empat lapis, serta timbal tiga lapis dan empat lapis.

Berdasarkan literatur, batas manusia dalam menangkap radiasi atau *Specific Absorption Rate* (SAR) adalah sebesar 1,6 W/kg, di mana apabila dalam *magnetic field* dengan satuan mikrottesla (μT) memiliki ambang batas aman sebesar 100 μT [64]. Material dapat menjadi *absorber* radiasi memiliki parameter tertentu, yaitu pertama adalah ketebalan yang menipis dan mengurangi *bandwidth*, dan yang kedua adalah ukuran sel yang mengecil [60]. Dikarenakan hasil dari pelat yang telah melakukan proses pencanaian metode ARB menghasilkan ketebalan yang mengecil dan ukuran sel yang mengecil pula, maka dua hal tersebut dapat disesuaikan dengan parameter yang dibutuhkan untuk membuat suatu material yang digunakan sebagai *absorber* radiasi. Material logam yang digunakan pun sesuai pula dengan peruntukannya sebagai *absorber* radiasi.

Sebelum pembahasan lebih lanjut mengenai material *absorber* radiasi, maka radiasi dari antenanya sendiri perlu diperhatikan agar dapat mengetahui berapa persen radiasi yang terserap dari material tersebut. Antena SIW *aperture* 5G merupakan antena planar *aperture* terpolarisasi sirkuler (CP) baru untuk aplikasi gelombang milimeter yang ramah biaya dengan frekuensi yang digunakan pada antena untuk simulasi ini yaitu sebesar 60 GHz. Antena diberikan ruangan sebagai *boundary* radiasi agar dapat diketahui pancaran radiasi yang didapatkan. Pada aplikasi HFSS, menggunakan *e field* atau medan listrik sebagai parameter radiasi yang disebarkan. Satuan medan listrik yang digunakan adalah V/m atau volt per meter. Kemudian satuan ini diubah menjadi mikrottesla (μT) di mana satuan ini merupakan satuan untuk medan magnet atau *magnetic field*. Berikut merupakan gambaran hasil simulasi radiasi antena yang dapat dilihat pada Gambar 4.18.

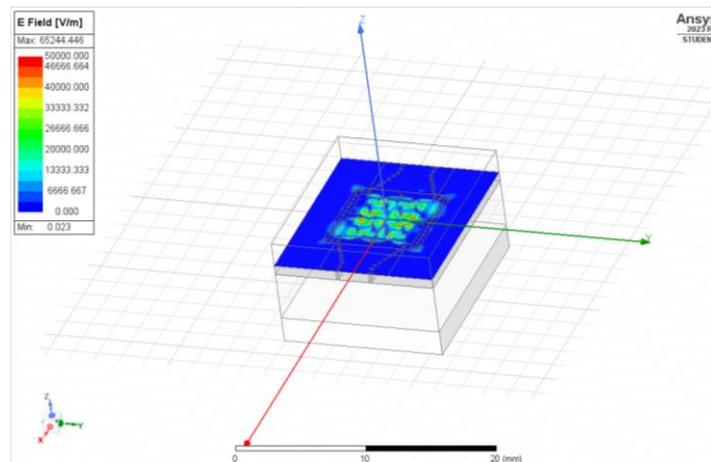


Gambar 4.18 Hasil Simulasi Antena

Dapat dilihat pada gambar di atas bahwa antena SIW *aperture* 5G memiliki radiasi tertinggi sekitar 83.343,855 V/m. Bagian dari antena yang memancarkan radiasi berasal dari tengah antena tersebut, yang mana bagian tersebut adalah permukaan berbahan dasar tembaga. Satuan hasil simulasi tersebut dirubah ke

dalam bentuk tesla dan menghasilkan 0,0002792 T. Satuan tesla (T) tersebut diubah ke mikrottesla (μT), dengan keterangan $1 \text{ T} = 1.000.000 \mu\text{T}$, maka hasil simulasi apabila diubah ke mikrottesla menjadi 279,2 μT .

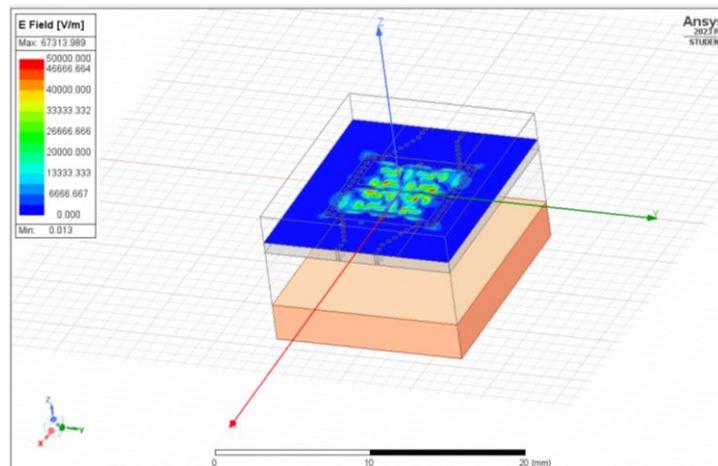
Setelah mengetahui besaran radiasi yang dipancarkan dari antenna, antenna tersebut barulah diberikan pelat material dan lapisannya untuk dilakukan penelitian tentang efek radiasi yang terjadi pada tiap material. Berikut merupakan gambaran hasil simulasi dengan menggunakan aluminium tiga lapis yang ada pada Gambar 4.19 di bawah ini.



Gambar 4.19 Hasil Simulasi Radiasi dengan Aluminium Tiga Lapis

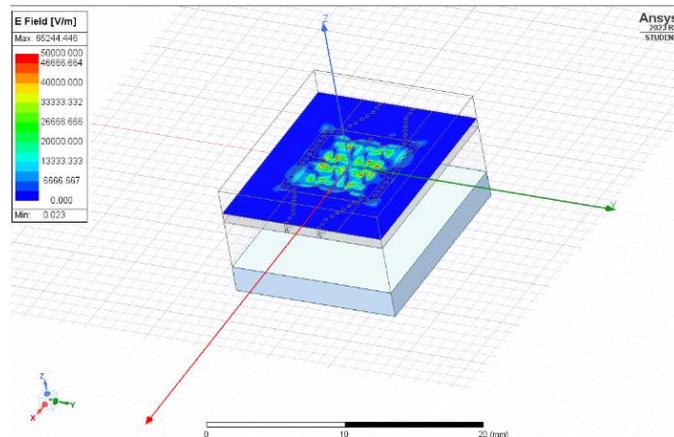
Pada gambar di atas, antara pelat dan antenna diberikan jarak sekitar 4 mm. Pelat diasumsikan dipotong menyesuaikan ukuran panjang kali lebar dari antenna berukuran 15,65 x 13 mm, namun ketebalan sesuai yang dihasilkan dari proses pencanaan ARB, yaitu sebesar 2,1 mm. Dapat dilihat hasil simulasi bahwa aluminium tiga lapis dapat mengurangi radiasi hingga antenna memiliki radiasi tertinggi sekitar 65.244,446 V/m. Bagian dari antenna yang memancarkan radiasi berasal dari tengah antenna tersebut, yang mana bagian tersebut adalah permukaan

berbahan dasar tembaga. Satuan hasil simulasi tersebut diubah ke dalam bentuk tesla dan menghasilkan 0,0002185 T. Apabila diubah ke mikrotesla (μT), maka hasil simulasi menjadi 218,5 μT . Selanjutnya adalah gambaran hasil simulasi dengan menggunakan tembaga tiga lapis yang ada pada Gambar 4.20 di bawah ini.



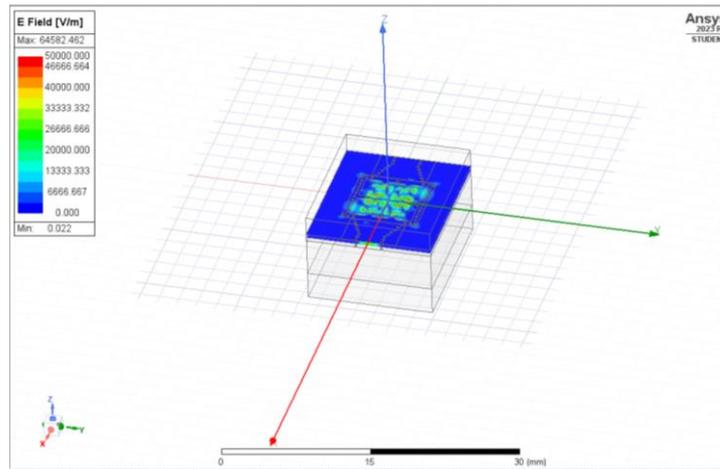
Gambar 4.20 Hasil Simulasi Radiasi dengan Tembaga Tiga Lapis

Pada gambar di atas, antara pelat dan antenna diberikan jarak sekitar 4 mm. Pelat diasumsikan dipotong menyesuaikan ukuran panjang kali lebar dari antenna berukuran 15,65 x 13 mm, dengan ketebalannya sebesar 2,6 mm. Dapat dilihat hasil simulasi bahwa tembaga tiga lapis dapat mengurangi radiasi hingga antenna memiliki radiasi tertinggi sekitar 67.313,99 V/m. Satuan hasil simulasi tersebut diubah ke dalam bentuk tesla dan menghasilkan 0,0002255 T. Apabila diubah ke mikrotesla (μT), maka hasil simulasi menjadi 225,5 μT . Selanjutnya adalah gambaran hasil simulasi menggunakan timbal tiga lapis pada Gambar 4.21.



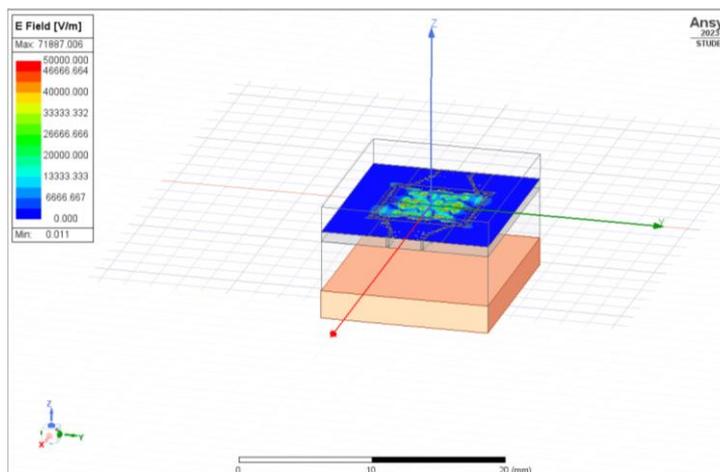
Gambar 4.21 Hasil Simulasi Radiasi dengan Timbal Tiga Lapis

Pada gambar di atas, antara pelat dan antenna diberikan jarak sekitar 4 mm. Pelat diasumsikan dipotong menyesuaikan ukuran panjang kali lebar dari antenna berukuran 15,65 x 13 mm, namun ketebalan sesuai yang dihasilkan dari proses pencanaan ARB, yaitu sebesar 2,1 mm. Dapat dilihat hasil simulasi bahwa timbal tiga lapis dapat mengurangi radiasi hingga antenna memiliki radiasi tertinggi sekitar 65.244,446 V/m. Bagian dari antenna yang memancarkan radiasi berasal dari tengah antenna tersebut, yang mana bagian tersebut adalah permukaan berbahan dasar tembaga. Satuan hasil simulasi tersebut diubah ke dalam bentuk tesla dan menghasilkan 0,0002185 T. Apabila diubah ke mikrotesla (μT), dengan keterangan $1 \text{ T} = 1.000.000 \mu\text{T}$ maka hasil simulasi menjadi 218,5 μT . Selanjutnya adalah gambaran hasil simulasi dengan menggunakan aluminium empat lapis yang ada pada Gambar 4.22 di bawah ini.



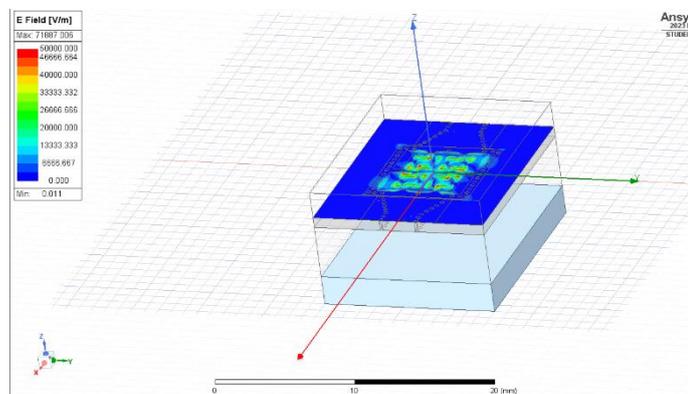
Gambar 4.22 Hasil Simulasi Radiasi dengan Aluminium Empat Lapis

Pada gambar di atas, antara pelat dan antenna diberikan jarak sekitar 4 mm. Pelat diasumsikan dipotong, dengan ketebalannya sebesar 2,9 mm. Dapat dilihat hasil simulasi bahwa aluminium empat lapis mengurangi radiasi hingga antenna memiliki radiasi tertinggi sekitar 64.582,46 V/m. Satuan hasil simulasi tersebut diubah ke dalam bentuk tesla dan menghasilkan 0,0002163 T. Apabila diubah ke mikrotesla (μT), maka hasil simulasi menjadi 216,3 μT . Berikutnya gambaran hasil simulasi menggunakan tembaga empat lapis yang ada pada Gambar 4.23.



Gambar 4.23 Hasil Simulasi Radiasi dengan Tembaga Empat Lapis

Pada gambar di atas, antara pelat dan antenna diberikan jarak sekitar 4 mm. Pelat diasumsikan dipotong, dengan ketebalannya sebesar 2,2 mm. Dapat dilihat hasil simulasi bahwa tembaga empat lapis mengurangi radiasi hingga antenna memiliki radiasi tertinggi sekitar 71.887,01 V/m. Satuan hasil simulasi tersebut diubah ke dalam bentuk tesla dan menghasilkan 0,0002408 T. Apabila diubah ke mikrotesla (μT), maka hasil simulasi menjadi 240,8 μT . Berikutnya gambaran hasil simulasi menggunakan timbal empat lapis yang ada pada Gambar 4.24.



Gambar 4.24 Hasil Simulasi Radiasi dengan Timbal Empat Lapis

Pada gambar di atas, antara pelat dan antenna diberikan jarak sekitar 4 mm. Pelat diasumsikan dipotong, dengan ketebalannya sebesar 2,2 mm. Dapat dilihat hasil simulasi bahwa timbal empat lapis mengurangi radiasi hingga antenna memiliki radiasi tertinggi sekitar 71.887,01 V/m. Satuan hasil simulasi tersebut diubah ke dalam bentuk tesla dan menghasilkan 0,0002408 T. Apabila diubah ke mikrotesla (μT), maka hasil simulasi menjadi 240,8 μT .

Hasil simulasi di atas selanjutnya dibandingkan dengan hasil radiasi yang dilakukan secara langsung dalam tugas akhir yang dibuat oleh Khoirul Rifai, menggunakan hasil radiasi yang telah dirata-ratakan dari pelindung plastik dan dua

pelindung keramik yang berbeda, serta dari tiga ponsel yang berbeda pula. Berikut merupakan tabel perbandingan hasil radiasi secara langsung dan secara simulasi pada Tabel 4.7.

Tabel 4.7 Data Hasil Radiasi Pengujian Langsung [7] dan Pengujian Simulasi

Penggunaan Pelat	Radiasi Ponsel [7] (μT)	% Absorbansi	<i>Max. Magnetic Field</i> (μT)	% Absorbansi
Tidak Ada	22,2222	0%	279,20	0%
Al 3 Lapis	3,28778	85%	218,50	22%
Al 4 Lapis	2,52556	89%	216,30	23%
Cu 3 Lapis	2,28	90%	225,50	19%
Cu 4 Lapis	1,68111	92%	240,80	14%
Pb 3 Lapis	1,07	95%	218,50	22%
Pb 4 Lapis	0,77222	97%	240,80	14%

Dapat dilihat pada Tabel 4.7, didapatkan persentase absorbansi antara pemancar radiasi (antena atau *smartphone*) tanpa pelat dengan pemancar radiasi dilindungi pelat memiliki persentase absorbansi yang terpaut jauh. Persentase absorbansi radiasi dalam simulasi memiliki rata-rata sekitar 19%, sementara itu persentase absorbansi radiasi dalam penelitian langsung memiliki rata-rata sekitar 91%. Hal ini dapat terjadi karena beberapa faktor, di antaranya adalah kurangnya karakterisasi pada material pada penelitian langsung, kurangnya pencocokan *material properties* pada simulasi radiasi, dan hasil dari simulasi pencapaian ARB yang kurang maksimal.