

## ANALISIS REGANGAN ELASTIS PADA *THIN DISC SOLID OXIDE FULL CELL (SOFC)* SELAMA PROSES *SINTERING*

\*Rayhan Calista<sup>1</sup>, Sulisty<sup>2</sup>, Mohammad Tauvqirrahman<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

<sup>2</sup>Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, S.H., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

\*E-mail: rayhan.calista.rc@gmail.com

### Abstrak

Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) merupakan teknologi sel bahan bakar yang memiliki efisiensi tinggi dan mendukung energi bersih. Salah satu tantangan utama dalam proses pembuatannya adalah terjadinya regangan elastis yang muncul selama tahap sintering, khususnya pada struktur tipis berbasis keramik. Regangan ini berpotensi menyebabkan kelentingan, deformasi, bahkan retakan mikro yang dapat menurunkan integritas struktural SOFC. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis distribusi regangan elastis yang terjadi pada struktur thin disc SOFC akibat proses sintering. Fokus utama diarahkan pada pengamatan bentuk geometri, distribusi regangan, serta potensi kelentingan yang timbul sebagai akibat dari penyusutan termal antar lapisan material seperti anoda, elektrolit, dan katoda. Hasil analisis menunjukkan bahwa ketidaksesuaian sifat termal antar material berkontribusi terhadap terbentuknya regangan tidak merata, yang menjadi pemicu utama kelentingan. Pemahaman ini diharapkan dapat menjadi landasan untuk merancang parameter sintering yang lebih optimal guna meningkatkan stabilitas mekanik dan umur pakai SOFC.

**Kata Kunci:** kelentingan; regangan elastis; sintering; *solid oxide fuel cell (sofc)*; struktur tipis

### Abstract

*Solid Oxide Fuel Cells (SOFCs) are high-efficiency fuel cell technologies that support clean energy development. One of the main challenges in their manufacturing process is the occurrence of elastic strain during the sintering stage, particularly in thin ceramic-based structures. This strain can lead to warping, deformation, or microcracks, ultimately reducing the structural integrity of the SOFC. This study aims to analyze the distribution of elastic strain that arises in thin disc SOFC structures due to the sintering process. The analysis focuses on observing geometry changes, strain distribution, and the potential for warping resulting from thermal shrinkage between different material layers such as the anode, electrolyte, and cathode. The results indicate that mismatches in thermal properties among layers contribute to non-uniform strain development, which is a key factor in warping. This understanding is expected to provide a basis for optimizing sintering parameters to improve the mechanical stability and service life of SOFCs.*

**Keywords:** *elastic strain; sintering; solid oxide fuel cell (sofc); thin structure; warping*

### 1. Pendahuluan

Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) merupakan salah satu teknologi sel bahan bakar yang menjanjikan efisiensi tinggi serta fleksibilitas dalam penggunaan berbagai jenis bahan bakar seperti hidrogen, gas alam, dan biogas. Keunggulan utama SOFC terletak pada kemampuannya menghasilkan energi listrik secara bersih dan berkelanjutan, sehingga menjadikannya kandidat utama dalam mendukung sistem energi rendah karbon di masa depan [1]. Salah satu komponen krusial dalam SOFC adalah elektrolit berbasis keramik yang umumnya dibentuk dalam struktur piringan tipis (*thin disc*). Material keramik digunakan karena memiliki stabilitas termal yang baik serta konduktivitas ionik yang tinggi. Namun demikian, tantangan utama muncul pada proses manufaktur, khususnya pada tahap sintering, di mana integritas struktural dari *thin disc* harus dijaga dengan ketat [4].

Sintering merupakan tahapan pemanasan material hingga suhu tinggi dengan tujuan menyatukan partikel menjadi struktur yang padat dan kokoh. Dalam konteks SOFC, sintering bertujuan tidak hanya untuk meningkatkan kekuatan mekanik dan densitas, tetapi juga untuk menjamin efisiensi transportasi ion oksigen yang penting dalam proses elektrokimia [2]. Akan tetapi, proses ini seringkali menyebabkan munculnya tegangan internal akibat perbedaan laju penyusutan termal antar lapisan serta ketidakteraturan distribusi panas selama pemanasan dan pendinginan. Tegangan ini dapat menimbulkan regangan elastis yang tidak merata, yang kemudian berkembang menjadi kelentingan (*warping*) atau bahkan retakan mikro pada struktur SOFC [6].

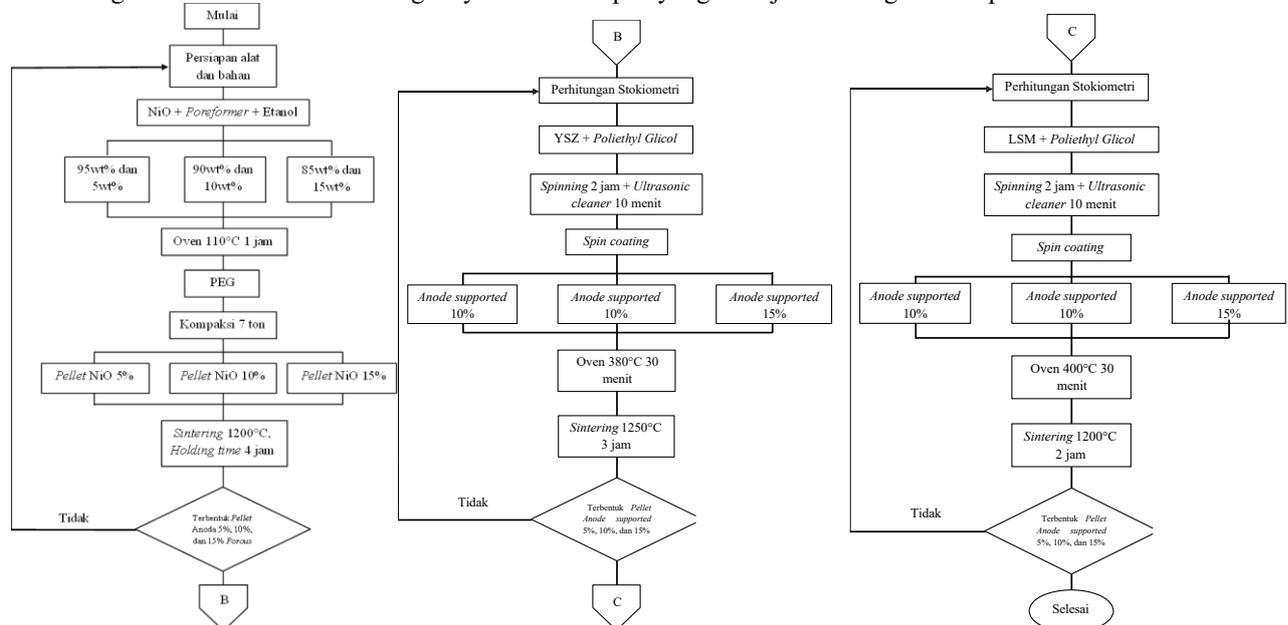
Permasalahan regangan elastis ini menjadi lebih kompleks pada konfigurasi multilayer, di mana ketidaksesuaian koefisien ekspansi termal antara lapisan anoda, elektrolit, dan katoda menyebabkan distribusi tegangan yang tidak seragam [5]. Ketika material mengalami siklus termal, setiap lapisan merespons perubahan suhu secara berbeda, dan hal ini dapat mengakibatkan deformasi geometris yang tidak diinginkan. Jika tidak dikendalikan, deformasi tersebut dapat mempercepat degradasi performa SOFC dan memperpendek umur pakainya [3].

Salah satu indikator awal dari kerusakan struktural akibat sintering adalah kelentingan pada permukaan *thin disc*, yang terlihat sebagai perubahan bentuk cembung atau cekung setelah proses pemanasan selesai. Fenomena ini umumnya muncul akibat akumulasi regangan elastis yang tidak diimbangi oleh struktur mikro yang homogen atau kontrol proses yang tepat [7]. Oleh karena itu, penting untuk memahami karakteristik regangan elastis yang berkembang selama proses sintering dan hubungannya dengan bentuk geometri akhir dari komponen SOFC.

Penelitian ini difokuskan untuk menganalisis regangan elastis yang terjadi pada struktur *thin disc* SOFC selama proses sintering. Penekanan utama diarahkan pada pengamatan bentuk fisik dan karakteristik kelentingan akibat proses termal, baik pada konfigurasi dua lapisan (anoda–elektrolit) maupun tiga lapisan (anoda–elektrolit–katoda). Dengan analisis ini, diharapkan dapat diperoleh gambaran yang lebih mendalam mengenai pengaruh sintering terhadap deformasi struktural, serta memberikan dasar teknis dalam pengembangan parameter produksi SOFC yang lebih stabil dan tahan terhadap tegangan termal jangka panjang.

## 2. Metode Penelitian

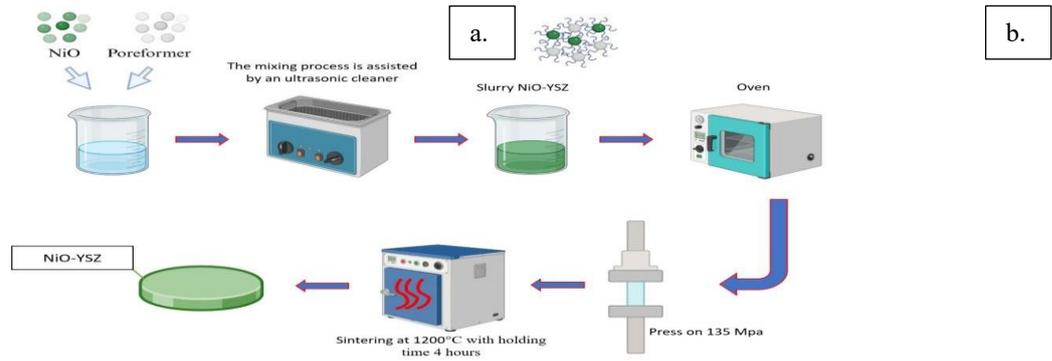
Metode simulasi yang dilakukan pada penelitian ini adalah dengan pembuatan *anode supported* yang kemudian disintering dan diidentifikasi kelentingannya sesuai tahapan yang ditunjukkan diagram alir pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir simulasi FEA

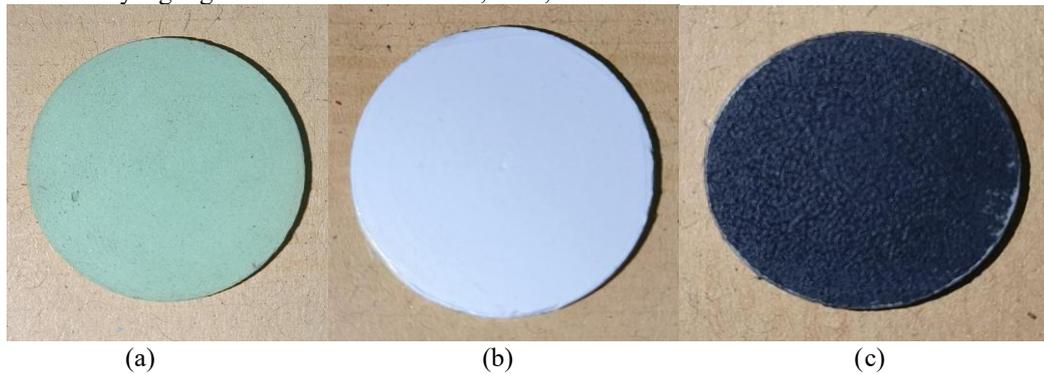
### 2.1 Pembuatan Anode Supported

Pembuatan anoda *Solid Oxide Fuel Cell* (SOFC) berbasis *Nickel Oxide* (NiO) dilakukan dengan menambahkan tepung sebagai *poreformer* dalam tiga variasi komposisi, yaitu 5wt%, 10wt%, dan 15wt%. Proses dimulai dengan mencampurkan serbuk NiO dengan tepung menggunakan metode pengadukan di atas alat *ultrasonic cleaner* untuk memastikan homogenitas pencampuran dan distribusi *poreformer* yang lebih merata dalam matriks material (Pihlatie et al., 2009). Setelah proses pencampuran, *polyethylene glycol* (PEG) digunakan sebagai *binder* untuk meningkatkan kohesi partikel selama tahap pembentukan. Campuran yang telah homogen kemudian dikompaksi menggunakan cetakan dengan tekanan 7 ton untuk membentuk sampel anoda [8]. Tahap akhir dari proses ini adalah *sintering* pada suhu 1200°C dengan *holding time* 4 jam, yang bertujuan untuk meningkatkan keterikatan antar partikel dan membentuk mikrostruktur yang stabil dan menguapkan *poreformer* (tepung). Ilustrasi gambar proses pembuatan *anode supported solid oxide fuel cell* berbasis material *nickel oxide* (NiO) dapat dilihat pada Gambar 2 berikut.



**Gambar 2.** Ilustrasi Pembuatan Anode Supported NiO

Gambar 3 merupakan Lapisan SOFC yang terdiri dari anoda, elektrolit, dan katoda. Masing-masing lapisan tersusun dan material yang digunakan adalah NiO-YSZ, YSZ, dan LSM.



**Gambar 3.** (a) NiO-YSZ, (b) YSZ (c) LSM

**Tabel 1.** Dimensi setiap lapisan pada *thin disc* SOFC

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Diameter <i>thin disc</i> SOFC	D1	25	mm
Tebal total <i>thin disc</i> SOFC	TT	1,4957	mm
Tebal anoda	T1	1,221	mm
Tebal elektrolit	T2	0,1189	mm
Tebal katoda	T3	0,1558	mm

Setiap lapisan pada *thin disc* SOFC tersusun dari material yang berbeda. Tiga material yang digunakan adalah *Nickel Oxide–Ytria Stabilized Zirconia*, *Ytria Stabilized Zirconia*, dan *Lanthanum Strontium Manganite* [9,10]. Sifat masing-masing material ini akan dimasukkan sebagai *engineering data* untuk simulasi. Sifat material untuk *thin disc* SOFC ditunjukkan pada Tabel 2.

**Tabel 2.** Sifat material

<i>Material Properties</i>	NiO-YSZ	YSZ	LSM
Density $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	6400	6100	6300
Coefficient of Thermal Expansion (1/K)	$1,2 \times 10^{-5}$	$1,05 \times 10^{-5}$	$1,2 \times 10^{-5}$
Melting Temperature (°C)	1995	2700	2000
Young's Modulus (Pa)	$1,75 \times 10^{11}$	$2,1 \times 10^{11}$	$1,2 \times 10^{11}$
Poisson's Ratio	0,28	0,37	0,3
Bulk Modulus (Pa)	$1,3258 \times 10^{11}$	$2,6923 \times 10^{11}$	$1 \times 10^{11}$
Shear Modulus (Pa)	$6,8359 \times 10^{10}$	$7,6642 \times 10^{10}$	$4,6154 \times 10^{10}$

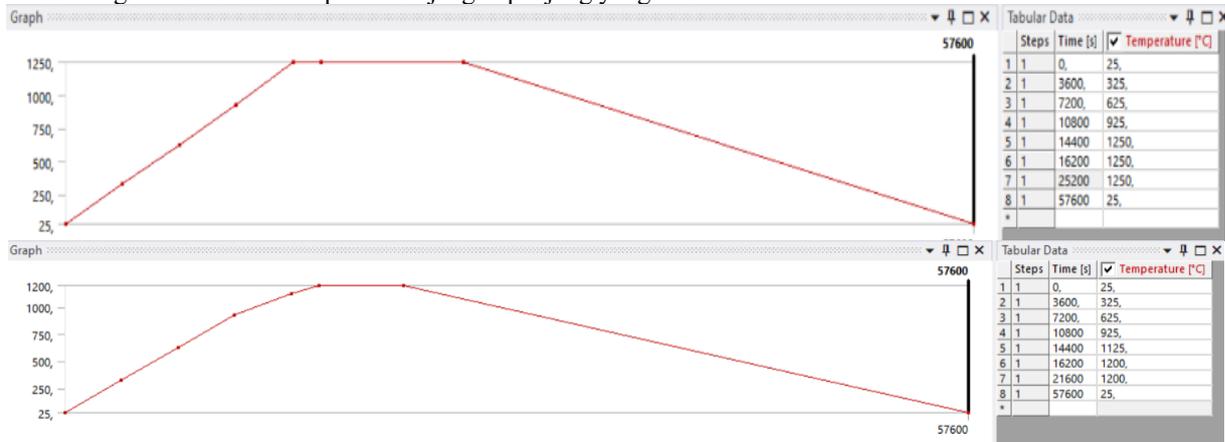
## 2.2 Sintering

Proses sintering pada Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) merupakan tahapan penting dalam manufaktur komponen keramik, di mana partikel-partikel material dipanaskan hingga suhu tinggi untuk membentuk struktur yang padat dan kuat secara permanen. Pada tahap ini, setiap lapisan penyusun SOFC seperti anoda, elektrolit, dan katoda dipanaskan dengan suhu dan durasi yang berbeda, sesuai dengan karakteristik termal masing-masing material.

Lapisan anoda dipanaskan hingga mencapai suhu maksimum 1200 °C selama 4 jam, sedangkan lapisan elektrolit disinter pada suhu 1250 °C selama 3 jam. Adapun lapisan katoda menjalani proses sintering pada suhu 1200 °C dengan

waktu penahanan selama 2 jam. Perbedaan suhu dan waktu sintering ini diperlukan untuk mengoptimalkan densifikasi serta memastikan setiap material mencapai kekuatan dan kestabilan struktural yang sesuai.

Selama proses pemanasan, distribusi suhu harus dikendalikan secara hati-hati untuk menghindari gradien termal yang ekstrem, karena perbedaan laju ekspansi termal antar lapisan dapat menimbulkan tegangan internal. Jika tidak dikelola dengan baik, hal ini dapat menyebabkan kelentingan atau bahkan retakan pada struktur akhir SOFC. Oleh karena itu, perencanaan siklus termal yang tepat menjadi kunci keberhasilan dalam menghasilkan komponen SOFC yang memiliki integritas mekanik dan performa jangka panjang yang baik.



**Gambar 4.** Thermal condition proses sintering

Gambar 4 memperlihatkan kondisi termal selama proses sintering, yang digambarkan melalui grafik perubahan suhu terhadap waktu. Berdasarkan data tabular di sebelah kanan grafik, proses dimulai dari suhu awal 25 °C dan meningkat secara bertahap hingga mencapai suhu maksimum 1250 °C. Kenaikan suhu ini berlangsung secara linier melalui beberapa titik pengamatan, seperti pada 3600 detik mencapai 325 °C, kemudian 7200 detik mencapai 625 °C, hingga suhu puncak tercapai pada 14400 detik. Setelah suhu maksimum tercapai, sistem mempertahankan suhu tersebut dalam periode penahanan selama sekitar 10800 detik (hingga 25200 detik), yang berfungsi untuk memastikan terjadinya proses densifikasi secara menyeluruh pada material. Setelah itu, suhu diturunkan secara bertahap hingga kembali ke suhu awal 25 °C pada waktu 57600 detik. Siklus pemanasan dan pendinginan ini mencerminkan prosedur sintering yang umum diterapkan pada komponen keramik seperti SOFC, dengan tujuan memperoleh struktur yang padat dan stabil secara termal, serta meminimalkan risiko deformasi seperti kelentingan akibat gradien suhu yang ekstrem.

### 2.3 Kelentingan pada Struktur SOFC Akibat Proses Sintering

Kelentingan merupakan salah satu bentuk deformasi geometris yang umum terjadi pada struktur tipis berbasis keramik, termasuk pada Solid Oxide Fuel Cell (SOFC), selama dan setelah proses sintering. Proses sintering sendiri melibatkan pemanasan komponen hingga suhu tinggi guna menyatukan partikel-partikel penyusun menjadi struktur yang padat dan homogen. Namun, pada struktur multilayer seperti SOFC, yang terdiri dari lapisan anoda, elektrolit, dan katoda, masing-masing lapisan memiliki sifat termal dan laju penyusutan yang berbeda selama pemanasan dan pendinginan. Ketidaksesuaian ini menjadi faktor utama penyebab terjadinya kelentingan.

Selama sintering, perbedaan koefisien ekspansi termal dan laju densifikasi antar lapisan menyebabkan penyusutan yang tidak merata. Akibatnya, tegangan termal internal dapat terakumulasi dalam struktur dan menghasilkan regangan elastis yang tidak seragam. Ketika tegangan tersebut melebihi ambang toleransi elastis dari material, geometri struktur SOFC dapat berubah menjadi melengkung ke arah tertentu, baik cembung maupun cekung. Fenomena inilah yang dikenal sebagai kelentingan (*warping*).

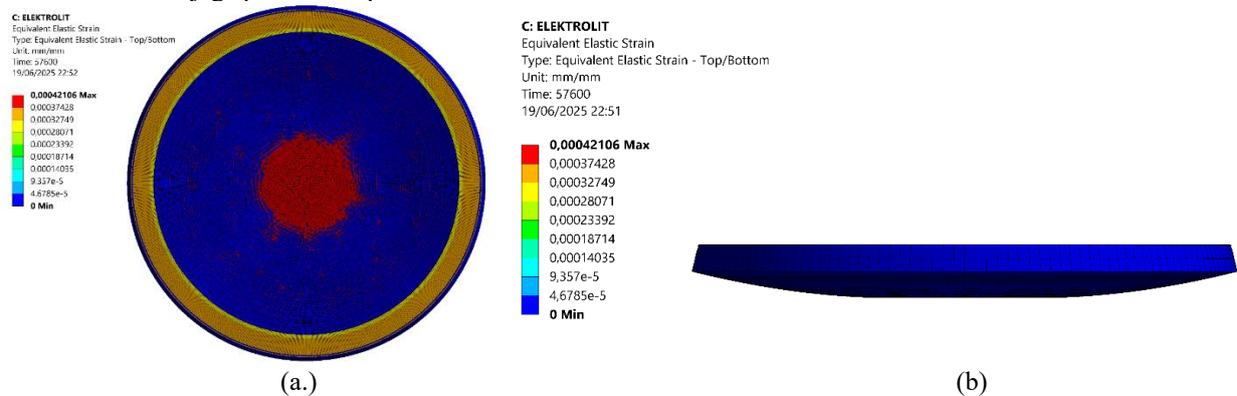
Kelentingan tidak hanya memengaruhi estetika atau bentuk akhir komponen, tetapi juga berpotensi menurunkan performa fungsional SOFC. Permukaan yang tidak rata dapat menyebabkan ketidaksesuaian saat proses perakitan, menimbulkan ketegangan tambahan, dan bahkan memperbesar risiko retak selama operasi jangka panjang. Oleh karena itu, pemahaman terhadap penyebab dan karakteristik kelentingan sangat penting dalam proses manufaktur SOFC. Pengendalian parameter sintering seperti suhu, waktu penahanan, dan kesesuaian material antar lapisan menjadi kunci dalam meminimalkan risiko kelentingan dan menjaga integritas struktural serta keandalan fungsional dari sel bahan bakar padat ini.

## 3. Hasil dan Pembahasan

### 3.1 Regangan Elastis pada Proses Sintering dengan Susunan Anoda-Elektrolit

Gambar 5 menunjukkan distribusi *Equivalent Elastic Strain* pada lapisan elektrolit SOFC selama *sintering* tanpa pembebanan eksternal, dengan regangan maksimum sebesar 0,00042106 mm/mm terpusat di area tengah dan minimum 0 mm/mm di sisi luar. Warna merah hingga biru menunjukkan distribusi regangan yang tidak merata, dengan dominasi

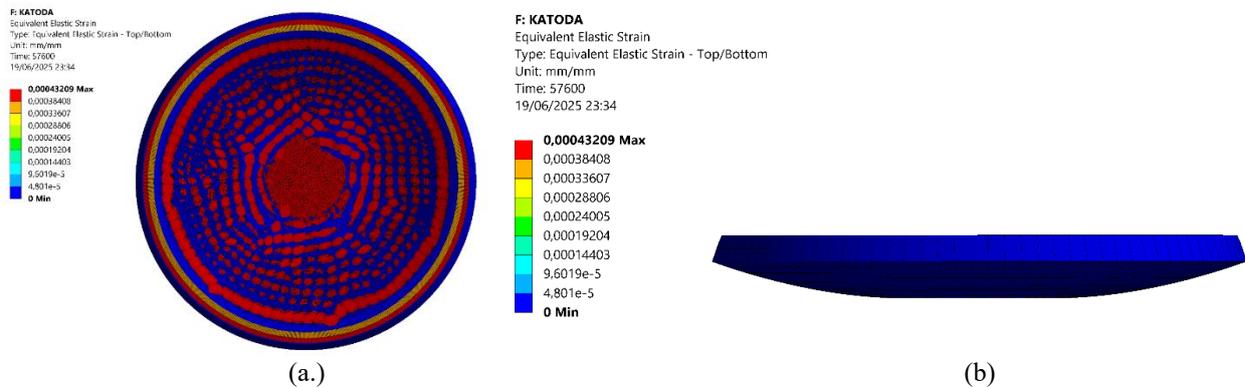
regangan tinggi di pusat dan rendah di tepi. Tampilan samping mengungkapkan kelengkungan geometri ke bawah akibat ketidakseimbangan ekspansi termal sepanjang ketebalan struktur. Hal ini menandakan terjadinya penyusutan anisotropik tanpa kendali eksternal, yang dapat meningkatkan risiko deformasi plastis atau retakan mikro, terutama di area tengah. Temuan ini menegaskan pentingnya penerapan gaya tekan eksternal selama proses *sintering* untuk meminimalkan cacat struktural dan menjaga performa lapisan elektrolit dalam SOFC.



**Gambar 5.** *Equivalent elastic strain* pada *sintering* elektrolit tanpa pembebanan eksternal (a) tampak atas, (b.) tampak samping

### 3.2 Regangan Elastis pada Proses *Sintering* dengan Susunan Anoda-Elektrolit-Katoda

Gambar 6 menunjukkan distribusi *Equivalent Elastic Strain* pada lapisan katoda selama *sintering* tanpa pembebanan eksternal, dengan regangan maksimum sebesar  $0,00043209$  mm/mm di pusat disk dan minimum  $0$  mm/mm di area luar. Tampilan atas memperlihatkan konsentrasi regangan tinggi di tengah, sedangkan tampilan samping menunjukkan kelengkungan ke bawah akibat ketidakseimbangan penyusutan termal sepanjang ketebalan struktur. Tidak adanya gaya tekan eksternal menyebabkan distribusi regangan menjadi lokal dan tidak homogen, meningkatkan risiko deformasi plastis dan retakan mikro di area tengah. Hasil ini menekankan pentingnya penerapan pembebanan eksternal untuk mengontrol regangan selama *sintering*, guna menjaga integritas struktural dan kinerja lapisan katoda dalam sistem multilayer SOFC.



**Gambar 6.** *Equivalent Elastic Strain* pada *sintering* katoda tanpa pembebanan eksternal (a) tampak atas, (b) tampak samping

Gambar 6 membandingkan nilai maksimum *Equivalent Elastic Strain* pada dua konfigurasi lapisan tipis SOFC, yaitu Anoda–Elektrolit dan Anoda–Elektrolit–Katoda, baik tanpa maupun dengan pembebanan eksternal. Pada konfigurasi dua lapis, regangan maksimum tanpa beban adalah  $4,2106 \times 10^{-4}$  mm/mm dan sedikit meningkat menjadi  $4,2115 \times 10^{-4}$  mm/mm saat diberi beban. Sementara pada konfigurasi tiga lapis, regangan meningkat dari  $4,3209 \times 10^{-4}$  mm/mm menjadi  $4,3271 \times 10^{-4}$  mm/mm dengan pembebanan. Perbedaan regangan maksimum antara kedua kondisi beban sangat kecil ( $<0,01 \times 10^{-4}$  mm/mm), menunjukkan bahwa pembebanan eksternal tidak secara signifikan memengaruhi besarnya regangan elastis maksimum.

Namun demikian, pembebanan eksternal tetap memainkan peran penting dalam meratakan distribusi regangan di seluruh struktur. Meskipun nilai maksimum tidak berubah drastis, penyebaran regangan yang lebih merata dapat mencegah konsentrasi deformasi lokal yang berisiko menimbulkan retakan mikro, terutama pada material keramik yang bersifat getas. Efektivitas strategi ini dipengaruhi oleh perilaku termomekanik material seperti NiO–YSZ, YSZ, dan LSM yang mengalami penyusutan anisotropik. Oleh karena itu, pembebanan eksternal tetap relevan sebagai metode

pengendalian deformasi untuk menjaga kestabilan dimensi dan meningkatkan keandalan struktural SOFC selama proses *sintering*.

#### 4. Kesimpulan

Proses sintering pada struktur Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) menyebabkan terbentuknya regangan elastis yang mencerminkan adanya kelentingan material selama tahap pemadatan termal. Regangan ini muncul akibat penyusutan diferensial yang terjadi antar lapisan, terutama pada konfigurasi dua lapis (Anoda–Elektrolit) maupun tiga lapis (Anoda–Elektrolit–Katoda), seiring perubahan mikrostruktur dan densifikasi material. Ketidakseimbangan regangan elastis tersebut dapat memicu konsentrasi tegangan lokal, yang berpotensi menimbulkan cacat mikro seperti retakan atau delaminasi, khususnya pada material keramik yang bersifat getas. Oleh karena itu, pemahaman terhadap perilaku kelentingan selama proses sintering sangat penting untuk memastikan integritas struktural, kestabilan dimensi, dan keandalan jangka panjang dari komponen SOFC.

#### 5. Daftar Pustaka

- [1] Wang L, Zhang H, Peng X, Wang P, Zhao N, Chu S, Wang X, Kong L. Water-sensitive damage mechanism and the injection water source optimization of low permeability sandy conglomerate reservoirs. *Petroleum Exploration and Development*. 2019 Dec;46(6):1218–30.
- [2] Subardi A. Oksida Perovskit Ganda  $\text{SmBa}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{Co}_2\text{O}_{5+\delta}$  (70%) + SDC (30%) Sebagai Material Katoda SOFC Beroperasi Pada Suhu Menengah. *Jurnal Rekayasa Mesin*. 2023 May 29;14(1):195–203.
- [3] Varun Kumar A, Selvakumar AS, Balachandar K, Waseem Ahmed A, Yashar Arabath A. Correlation between material properties and free vibration characteristics of TIG and laser welded stainless steel 304 reinforced with  $\text{Al}_2\text{O}_3$  microparticles. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2021 Oct;24(5):1253–61.
- [4] Peng S. Evaluating the accuracy of liquid permeability measurements in shale and tight rocks using transient flow method and comparison with gas permeability. *Mar Pet Geol*. 2023 Nov;157:106491.
- [5] Gibson W. Product design and development. In: *Integrated Functional Sanitation Value Chain*. IWA Publishing; 2022. p. 19–36.
- [6] Pei X, Liu Y, Xue L, Song L, Rang T. A new determination method for the anisotropic permeability tensor based on the passive differential pressure ratio. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2023 Jan;140:106544.
- [7] San Y, Wu M, Cai H, Song Z, Zhang L, Zhang L, Long W, Wang Y. Characterization of Cu-impregnated  $\text{Sr}_2\text{-MgMoO}_6$ - composite ceramic anode for SOFCs. *Ceram Int*. 2023 Oct;49(19):31975–87.
- [8] Mao G, Lai F, Li Z, Wei H, Zhou A. Characteristics of pore structure of tight gas reservoir and its influence on fluid distribution during fracturing. *J Pet Sci Eng*. 2020 Oct;193:107360.
- [9] Lu T, Xu R, Zhou B, Wang Y, Zhang F, Jiang P. Improved Method for Measuring the Permeability of Nanoporous Material and Its Application to Shale Matrix with Ultra-Low Permeability. *Materials*. 2019 May 13;12(9):1567.
- [10] Ouyang P, Dong H, He X, Cai X, Wang Y, Li J, Li H, Jin Z. Hydromechanical mechanism behind the effect of pore size of porous titanium scaffolds on osteoblast response and bone ingrowth. *Mater Des*. 2019 Dec;183:108151.