

TUGAS AKHIR – TL184834

**REVIEW PENGARUH PENAMBAHAN DOPING BORON,
FOSFOR, NITROGEN DAN SULFUR TERHADAP
KAPASITANSI *POROUS CARBON* UNTUK ELEKTRODA
SUPERKAPASITOR**

SURYA PRATAMA
NRP. 02511640000071

Dosen Pembimbing
Haniffudin Nurdiansah, S.T., M.T.
NIP. 199007262015041002
Lukman Noerochim, S.T.,M.Sc.(Eng),Ph.D
NIP. 197713032003121001

Program Studi Teknik Material
Departemen Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2022



TUGAS AKHIR – TL184834

**REVIEW PENGARUH PENAMBAHAN DOPING BORON,
FOSFOR, NITROGEN DAN SULFUR TERHADAP
KAPASITANSI *POROUS CARBON* UNTUK ELEKTRODA
SUPERKAPASITOR**

SURYA PRATAMA
NRP. 02511640000071

Dosen Pembimbing
Haniffudin Nurdiansah, S.T.,M.T.
NIP. 199007262015041002
Lukman Noerochim, S.T.,M.Sc.(Eng),Ph.D
NIP. 197713032003121001

Program Studi Teknik Material
Departemen Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2022

(Halaman ini sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT – TL184834

**REVIEW EFFECT OF BORON, PHOSPOR, NITROGEN AND
SULFUR DOPING ADDITION TO POROUS CARBON
CAPACITANCE FOR SUPERCAPACITOR ELECTRODE**

SURYA PRATAMA
NRP. 0251164000071

Advisor
Haniffudin Nurdiansah, S.T.,M.T.
NIP. 199007262015041002
Lukman Noerochim, S.T.,M.Sc.(Eng),Ph.D
NIP. 197713032003121001

Study Program of Materials Engineering
Departement of Materials and Metallurgical Engineering
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2022

(This page is intentionally blank)

LEMBAR PENGESAHAN

**REVIEW PENGARUH PENAMBAHAN DOPING BORON, FOSFOR, NITROGEN
DAN SULFUR TERHADAP KAPASITANSI *POROUS CARBON* UNTUK
ELEKTRODA SUPERKAPASITOR**


TUGAS AKHIR


Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
memperoleh gelar Sarjana Teknik pada
Program Studi S-1 Teknik Material
Departemen Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh : **SURYA PRATAMA**
NRP. 0251164000071

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Haniffudin Nurdiansah, S.T., M.T.
2. Lukman Noerochim, ST, M.Sc.Eng, Ph.D
3. Diah Susanti, S.T., M.T, PhD
4. Vania Mitha Pratiwi, S.T., M.T


Pembimbing


Ko-Pembimbing


Penguji


Penguji

SURABAYA
Juli, 2022

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

APPROVAL SHEET

**REVIEW EFFECT OF BORON, PHOSPOR, NITROGEN AND SULFUR DOPING
ADDITION TO POROUS CARBON CAPACITANCE FOR SUPERCAPACITOR
ELECTRODE**


FINAL PROJECT


Submitted to fulfill one of the requirements
for obtaining a degree of bachelor of engineering at
Undergraduate Study Program of Materials Engineering
Departement of Materials and Metallurgical Engineering
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember


By : **SURYA PRATAMA**
NRP. 0251164000071


Approved by Final Project Examiner Team :

1. Haniffudin Nurdiansah, S.T., M.T.
2. Lukman Noerochim, ST, M.Sc.Eng, Ph.D
3. Dr. Diah Susanti, S.T., M.T, PhD
4. Vania Mitha Pratiwi, S.T., M.T


Advisor


Co-Advisoor


Examiner


Examiner

SURABAYA
July, 2022

(This page is intentionally blank)

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama mahasiswa/NRP : Surya Pratama/02511640000071
Departemen : Teknik Material dan Metalurgi
Dosen Pembimbing/NIP : Haniffudin Nurdiansah, S.T., M.T./ 199007262015041002

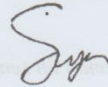
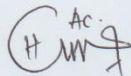
Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul "REVIEW PENGARUH PENAMBAHAN DOPING BORON, FOSFOR, NITROGEN DAN SULFUR TERHADAP KAPASITANSI POROUS CARBON UNTUK ELEKTRODA SUPERKAPASITOR" adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 21 Juli 2022

Mengetahui
Dosen Pembimbing

Mahasiswa



(Haniffudin Nurdiansah, S.T., M.T.)
NIP. 199007262015041002

(Surya Pratama)
NRP. 02511640000071

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

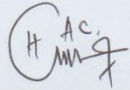
Name of student/NRP : Surya Pratama/02511640000071
Departement : Material and Metallurgical Engineering
Advisor/NIP : Haniffudin Nurdiansah, S.T., M.T/199007262015041002

Hereby declare that the Final Project with the title of "REVIEW EFFECT OF BORON, PHOSPOR, NITROGEN AND SULFUR DOPING ADDITION TO POROUS CARBON CAPACITANCE FOR SUPERCAPACITOR ELECTRODE" is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing..

If in the future there is a discrepancy with this statement, then I am willing to accept sanctions in accordance with the provisions that apply at Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

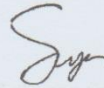
Surabaya, 21 July 2022

Acknowledged
Advisor



(Haniffudin Nurdiansah, S.T., M.T)
NIP. 199007262015041002

Student



(Surya Pratama)
NRP. 02511640000071

(This page is intentionally blank)

**REVIEW PENGARUH PENAMBAHAN DOPING BORON, FOSFOR, NITROGEN
DAN SULFUR TERHADAP KAPASITANSI *POROUS CARBON* UNTUK
ELEKTRODA SUPERKAPASITOR**

Nama : Surya Pratama / 02511640000071
Departemen : Teknik Material dan Metalurgi
Dosen Pembimbing I : Haniffudin Nurdiansah, S.T., M.T.
Dosen Pembimbing II : Lukman Noerochim, S.T., M.Sc.(Eng), Ph. D

Abstrak

Kebutuhan akan material penyimpanan energi terus meningkat dan diperkirakan akan terjadi peningkatan hingga 17 kali lipat pada 2030. Material karbon berpori banyak digunakan untuk membuat elektroda superkapasitor sebagai salah satu media penyimpanan energi masa depan. Akan tetapi, material karbon berpori memiliki kekurangan, salah satunya nilai kapasitansi yang rendah. Oleh karenanya perlu ditambahkan doping. Dalam review kali ini doping yang di *review* adalah boron, fosfor, nitrogen dan sulfur. Dari hasil analisa diketahui bahwa doping heteroatom boron, fosfor, dan sulfur menyebabkan defect pada material porous carbon dikarenakan ukuran atomnya yang lebih besar dari carbon, defect ini dapat menjadi lokasi tumbuhnya mikropori dan mesopori. Peningkatan mikropori dan mesopori ini akan meningkatkan kapasitansi. Nitrogen meningkatkan konduktivitas dan mempercepat proses transfer ion. Temperatur dan aktivator memiliki pengaruh pada luas permukaan dimana bila jumlah aktivator atau temperature terlalu tinggi ($>850^{\circ}\text{C}$) maka pori dapat mengalami peluruhan yang mengakibatkan turunya kapasitansi. Dari hasil pengujian CV doping Sulfur menunjukkan perilaku EDLC sedangkan ketiga doping lainnya menunjukkan perilaku EDLC dan pseudocapacitance. Kapasitansi tertinggi diperoleh sampel ENM700 dengan nilai 408 F/g pada 0.5A/g meski luas permukaannya lebih kecil dibanding doping lain. Boron sebagai doping membantu memperbaiki sifat EDLC dan memberikan sedikit sifat pseudocapacitance serta mempercepat difusi ion karena fungsinya sebagai katalis reaksi redox, akan tetapi bila di doping bersamaan dengan doping nitrogen akan memberikan kapasitansi yang lebih superior (412 F/g pada 0.5A/g dan 292 F/g pada 20A/g) dibandingkan sulfur (259 F/g pada 10A/g), fosfor (98 F/g pada 5A/g), hal ini dikarenakan efek sinergis antara boron dan nitrogen, dimana boron mengikat nitrogen dan membantu mempertahankan sifat pseudocapacitance dan konduktivitas yang dihasilkan oleh nitrogen meski pada kadar nitrogen rendah ataupun rapat arus yang tinggi.

Kata Kunci: *Boron, Fosfor, Nitrogen, Penyimpanan energy, Pseudokapasitansi, Sulfur*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

REVIEW EFFECT OF BORON, PHOSPOR, NITROGEN AND SULFUR DOPING ADDITION TO POROUS CARBON CAPACITANCE FOR SUPERCAPACITOR ELECTRODE

Name : Surya Pratama / 02511640000071
Departement : Teknik Material dan Metalurgi
Advisor : Haniffudin Nurdiansah, S.T., M.T.
Co-Advisor :.Lukman Noerochim, S.T.,M.Sc.(Eng),Ph.D

Abstract

The need for energy storage materials continues to increase and is expected to increase up to 17 times by 2030. Porous carbon materials are widely used to make supercapacitor electrodes as one of the future energy storage media. However, porous carbon materials have disadvantages, one of which is the low capacitance value. Therefore, it is necessary to add doping. In this review, the doping reviewed is boron, phosphorus, nitrogen and sulfur, from the results of the analysis it is known that heteroatom doping of boron, phosphorus, and sulfur causes defects in porous carbon material due to its atomic size which is larger than carbon by substitution, this defect will be the location for the growth of micropores and mesopores. The increase in micropores will increase the surface area which will eventually increase the capacitance because more active sites can be formed, while the increase in mesopores will facilitate the diffusion process of ions into micropores. Nitrogen increases conductivity and accelerates the ion transfer process. Temperature and activator have an influence on the surface area where if the amount of activator or temperature is too high ($>850^{\circ}\text{C}$) then the pore can experience decay resulting in decreased capacitance. From the results of CV testing Sulfur doping showed EDLC behavior while the other three doping showed EDLC and pseudocapacitance behavior, the highest capacitance was obtained by ENM700 sample with a value of 408 F/g at 0.5 A/g although the surface area is smaller than other doping. boron as doping helps improve EDLC properties and gives a little pseudocapacitance properties and accelerates ion diffusion because of its function as a redox reaction catalyst, but when doped together with nitrogen doping will provide superior capacitance (412 F/g at 0.5 A/g and 292 F/g at 20 A/g) compared to sulfur (259 F/g at 10 A/g), phosphorus (98 F/g at 5 A/g), this is due to the synergistic effect between boron and nitrogen, where boron binds nitrogen and helps maintain the pseudocapacitance and conductivity properties produced by nitrogen even at low nitrogen levels or high current densities.

Keywords : *Boron, Energy Storage, Nitrogen, Pseudocapacitance, Phospor, Sulfur*

(This page is intentionally blank)

KATA PENGANTAR

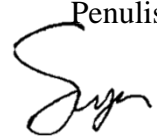
Puji dan syukur atas kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian tugas akhir dengan judul, “REVIEW PENGARUH PENAMBAHAN DOPING BORON, FOSFOR, NITROGEN DAN SULFUR TERHADAP KAPASITANSI POROUS CARBON UNTUK ELEKTRODA SUPERKAPASITOR”. terselesaikannya laporan tugas akhir ini tidak luput dari dukungan, bantuan, motivasi serta partisipasi dari semua pihak, untuk itu penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Haniffudin Nurdiansah, S.T., M.T.dan Bapak Lukman Noerachim, S.T.,M.Sc.(Eng),Ph.Dselaku dosen pembimbing tugas akhir atas segala ilmu dan bimbingan yang telah diberikan selama pelaksanaan tugas akhir hingga laporan selesai.
2. Bapak Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M..Si., Ph.D., selaku Kepala Departemen Teknik Material dan Metalurgi FT-IRS ITS.
3. Bapak/Ibu Dosen yang telah membimbing dan memberikan banyak ilmu kepada penulis
4. Orang tua, keluarga, dan teman kuliah penulis yang selalu memberikan dukungan kepada penulis selama proses penyusunan tugas akhir ini

Penulis menyadari bahwa penyusunan laporan ini masih jauh dari kata sempurna. Untuk itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari pembaca. Semoga laporan ini dapat bermanfaat bagi penulis dan semua pihak terkait.

Surabaya, 22 Juli 2022

Penulis



Surya Pratama

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

Abstrak	xiii
Abstract	xv
DAFTAR ISI	xix
DAFTAR GAMBAR	xxi
DAFTAR TABEL	xxiii
1 BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	1
1.3 Batasan Masalah	1
1.4 Tujuan Penelitian	1
1.5 Manfaat Penelitian	2
2 BAB II TINJAUAN PUSTAKA	3
2.1 Porous Carbon	3
2.2 Boron	3
2.3 Nitrogen	4
2.4 Fosfor	5
2.5 Sulfur	6
2.6 Superkapasitor	6
2.7 Penelitian Sebelumnya	9
3 BAB III METODOLOGI PENELITIAN	11
3.1 Diagram Alir	11
3.2 Persiapan Review	11
3.2.1 Persiapan Jurnal	11
3.2.2 Analisa Jurnal	12
3.2.3 Komparasi Jurnal	12
3.3 Metode Review Paper	12
3.4 Rancangan Penelitian	13
BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN	15
4.1 Hasil	15
4.1.1 Penambahan Doping Fosfor	15
4.1.2 Penambahan Doping Sulfur	23
4.1.3. Penambahan Doping Nitrogen	30
4.1.4. Penambahan Doping boron	37
4.2 Komparasi Jurnal	45
4.2.1. Pengaruh Penambahan Doping Sufur	45
4.2.2. Pengaruh Penambahan Doping Fosfor	48
4.2.3. Pengaruh Penambahan Doping Nitrogen	50
4.2.4. Pengaruh Penambahan Doping Boron	52
4.3 Pembahasan	53
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	57
5.1 Kesimpulan	57
5.2. Saran	57
DAFTAR PUSTAKA	58
LAMPIRAN	61
UCAPAN TERIMA KASIH	62
BIODATA PENULIS	63

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Struktur Kristalin Boron (Britannica , 2021).....	4
Gambar 2. 2	Kristalin Sulfur (Brasted ,2021)	6
Gambar 2. 3	Ragone plot beberapa alat penyimpanan energy (Tahir et al.,2020)	7
Gambar 2. 4	Skema 3 Jenis Superkapasitor: (a)EDLC;(b) <i>pseudocapacitor</i> ;(c) hybrid (Vangari et al.,2013).....	8
Gambar 2. 5	Kurva CV Beberapa jenis superkapasitor (Frackowiak & Beguin,2001)	8
Gambar 3. 1	Diagram Alir Paper Review	11
Gambar 4. 1	Hasil SEM Dari AC (a) , ACt (b) dan ACtP-850(c) (Rawal et al.,2021).....	15
Gambar 4. 2	Hasil XRD Sampel AC, ACt, ACtPx (Rawal et al.,2021).....	16
Gambar 4. 3	.Hasil Pengujian CV Setiap Sampel (a) dan ACtP-850(b) (Rawal et al.,2021).....	16
Gambar 4. 4	Kapasitansi Spesifik ACtP-850 Terhadap Laju Pemindaian (Rawal et al.,2021).....	17
Gambar 4. 5	Kurva GCD Setiap sampel (a) Kurva ACtP-850 Dalam Berbagai Rapat Arus (b) (Rawal et al.,2021)	17
Gambar 4. 6	Kapasitansi ACtP-850 Terhadap Rapat Arus (Rawal et al.,2021)	18
Gambar 4. 7	.SEM C-900 (a-b) dan PC-900 (c-d) (Lin et al.,2020)	19
Gambar 4. 8	Hasil XRD sampel C-X dan PC-X (Lin et al.,2020)	19
Gambar 4. 9	Hasil pengujian CV Sampel C-X dan PC-X (Lin et al.,2020).....	20
Gambar 4.10	Kurva GCD Setiap Sampel C-X dan PC-X Pada 0.5A/g (Lin et al.,2020)	20
Gambar 4.11	Kapasitansi Sampel C-X dan PC-X Terhadap Rapat Arus (Lin et al.,2020)	21
Gambar 4.12	Hasil SEM CK-Material Precursor(a), C-K-700(b), CK-P-800(c), CK-P-1000(d) (Ma et al.,2018).....	21
Gambar 4.13	Hasil Pengujian Sampel CK-P-X , CK-800 ,C-K-700 dan Mentah (Ma et al.,2018).....	22
Gambar 4.14	Hasil Pengujian CV Sampel C-K-700 CK-P-X dan CK-800 (Ma et al.,2018).....	22
Gambar 4.15	Kapasitansi CK-P-X , CK-800 dan C-K-700 (Ma et al.,2018)	23
Gambar 4.16	Pengujian Stabilitas CK-P-X , CK-800 dan C-K-700 Sebagai Elektroda (Ma et al.,2018)	23
Gambar 4.17	Hasil SEM CMS-0 (a dan b) CMS-3 (c dan d) (Hu & Lin,2021)	24
Gambar 4.18	Hasil XRD Sampel CMS-X (Hu & Lin,2021)	24
Gambar 4.19	Hasil Pengujian CV Sampel CMS-X (a) dan CMS-3 (b) (Hu & Lin,2021).....	25
Gambar 4.20	Kurva GCD Setiap Sampel (c) dan Kurva GCD CMS-3 Pada Berbagai Rapat Arus (d) (Hu & Lin,2021)	25
Gambar 4.21	Hasil pengujian stabilitas CMS-3.....	26
Gambar 4.22	Hasil SEM SP-C-50 (Tian et al.,2018)	26
Gambar 4.23	Hasil Uji XRD Sampel S-PC-X (Tian et al.,2018).....	27
Gambar 4.24	Hasil Pengujian CV Sampel S-PC-50 (a) GCD S-PC-50 (b), Kapasitansi Setiap Sampel (c), penguian siklus S-PC-50 (d) (Tian et al.,2018).....	27
Gambar 4.25	Hasil XRD Sampel SPC (Liu et al., 2022)	28
Gambar 4.26	Hasil SEM Porous Carbon (c-d), SPC-1 (e-f), SPC-2 (g-h) , SPC-3 (i-j) (Liu et al., 2022)	29
Gambar 4.27	Hasil CV Sampel SPC (Liu et al., 2022)	29
Gambar 4.28	Retensi Kapasitansi Spesifik Sampel Terhadap Rapat Arus (Liu et al., 2022).....	30

Gambar 4. 29	Hasil SEM <i>Bombyx mari</i> (a) Sampel pre-Karbonisasi (b) Sampel N-PC (c dan d) (Long et al.,2016).....	31
Gambar 4. 30	Hasil XRD Sampel N-PC dan N-PC-X (Long et al.,2016).....	31
Gambar 4. 31	Hasil Uji CV Sampel N-PC pada Berbagai Rapat Arus (Long et al.,2016)	32
Gambar 4. 32	Kurva GCD Sampel N-PC-700 dan Kapasitansi Setiap Sampel (Long et al.,2016)	32
Gambar 4. 33	Hasil Uji BET Sampel EDTA / ENM (Xu et al.,2013).....	33
Gambar 4. 34	Hasil SEM ENM700 (a) dan ENM900 (b) (Xu et al.,2013).....	33
Gambar 4.35	Hasil XRD Sampel ENMx (Xu et al.,2013).....	34
Gambar 4.36	Hasil Pengujian CV Sampel ENM (Xu et al.,2013)	34
Gambar 4.37	Hasil Pengujian Siklus Sampel ENM700 (Xu et al.,2013).....	35
Gambar 4.38	Hasil SEM Chitin nanogel (a,b) ACNC-800 (c,d) ACNC-900 (e,f) (Zheng et al.,2021).....	35
Gambar 4.39	Hasil XRD Sampel ACNC-800 dan ACNC-900 (Zheng et al.,2021)	36
Gambar 4. 40	Kurva CV ACNC-800 (a) ACNC-900 (b) dan ACNC-800 vs ACNC-900 (Zheng et al.,2021)	36
Gambar 4.41	Kurva GCD ACNC-800 (a) dan ACNC-900 (b) GCD Pada Rapat Arus 10A/g (c) dan Plot Kapasitansi Spesifik (d) (Zheng et al.,2021).....	37
Gambar 4.42	Hasil sem PC (a), NPC (b) BPC (c) BNPC (d, e) (Guo et al.,2018).....	38
Gambar 4.43	Hasil XRD Sampel PC , NPC , BPC , BNPC (Guo et al.,2018).....	38
Gambar 4.44	Kurva CV Sampel BNPC, BPC, NPC dan PC (Guo et al.,2018)	39
Gambar 4.45	Kapasitansi Spesifik Sampel BNPC , NPC, BPC dan PC(Guo et al.,2018)	40
Gambar 4.46	Skema Pembuatan B/N-PCTB (Zhao et al., 2017)	40
Gambar 4.47	(a) Dandelion. (b, c) SEM PCTBs. (d) SEM B/N-PCTBs (Zhao et al., 2017)	41
Gambar 4.48	Hasil XRD CTB, PCTB , BPCTB, NPCTB danB/NPCTB (Zhao et al., 2017)	41
Gambar 4.49	Kurva CV dan GCD Sampel CTB , PCTB, BPCTB, NPCTB , B/NPCTB (Zhao et al., 2017)	42
Gambar 4.50	Plot Kapasitansi Sampel CTB, PCTB, BPCTB, NPCTB dan B/NPCTb (Zhao et al., 2017)	42
Gambar 4.51	Hasil XRD Sampel B _x -pC (Fallah et al.,2020)	43
Gambar 4.52	(a) B0-pC, (b) B1-pC, (c) B2-pC, (d) B3-pC,(e) B4-pC (f). Foto visual Sampel (Fallah et al.,2020)	44
Gambar 4.53	Elektroda B _x -pC Pada Laju Pemindaian 5 mV/s Dengan Elektrolit (a) 1 M Na ₂ SO ₄ , (b) 1 M H ₂ SO ₄ , (c) 6 M KOH (Fallah et al.,2020).....	44
Gambar 4.54	Kurva GCD B _x -pC Dengan Elektrolit (a) 1 M Na ₂ SO ₄ , (b) 1 M H ₂ SO ₄ , (c) 6 M KOH;(d) Kurva GCD B ₂ - pC Pada Rapat Arus 0.2-10 A/g. (f) Kapasitansi Spesifik B _x -pC Pada Rapat Arus 0.2-20 A/g (Fallah et al.,2020)	45
Gambar 4.55	Grafik Perbandingan Kapasitansi 3 Jurnal Sulfur.....	47
Gambar 4.56	Grafik Perbandingan Kapasitansi Penambahan Fosfor 2 Jurnal.....	50
Gambar 4.57	Perbandingan Kapasitansi 3 Jurnal Nitrogen	52

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Klasifikasi Pori Pada Material Padat	3
Tabel 2. 2	Sifat-Sifat Nitrogen (Sanderson,2020)	5
Tabel 2. 3	Sifat-Sifat Fosfor (Britannica,2022)	6
Tabel 2. 4	Penelitian sebelumnya	10
Tabel 3.1	Tabel daftar jurnal	13
Tabel 4. 1	Hasil Uji BET dan Porositas Sampel AC , ACt, ACtP-700 dan ACtP-800 (Rawal et al.,2021).....	16
Tabel 4. 2	. Parameter Pori Sampel C-X dan PC-X (Lin et al.,2020).....	18
Tabel 4.3	Hasil Uji BET Sampel CMS-X (Hu & Lin,2021)	25
Tabel 4. 4	Hasil pengujian BET sampel S-PC-X (Tian et al.,2018).....	27
Tabel 4.5	Hasil uji BET Sampel SPC-X (Liu et al., 2022).....	29
Tabel 4. 6	Hasil Pengujian BET Sampel N-PC (Long et al.,2016)	31
Tabel 4.7	Hasil Uji BET Sampel BNPC, NPC, BPC dan PC (Guo et al.,2018)	39
Tabel 4.8	Komposisi Kimia Sampel BNPC, NPC, BPC dan PC (Guo et al.,2018)	39
Tabel 4.9	Hasil Uji BET Sampel Bx-pC (Fallah et al.,2020)	43
Tabel 4. 10	Perbandingan Komparasi Jurnal Pengaruh Penambahan Doping Sulfur Terhadap Kapasitansi Porous Carbon Untuk Elektroda Supercapaticor	47
Tabel 4. 11	Perbandingan Komparasi jurnal pengaruh penambahan doping fosfor terhadap kapasitansi porous carbon untuk elektroda supercapaticor.....	50
Tabel 4. 12	Komparasi Jurnal Pengaruh Pendopingan Nitrogen.....	52
Tabel 4. 13	Perbandingan Kapasitansi Tiap Unsur Doping dan Jurnal	56

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan akan penyimpanan energi diproyeksikan akan terus meningkat. Total cadangan dari kapasitas penyimpanan energi listrik secara global pada tahun 2017 mencapai 4.67 *terawatt-hours* dan diproyeksikan akan menjadi 11.89 – 15.72 *terawatt-hours* pada 2030 sedangkan di tahun yang sama sistem penyimpanan energi harus mengalami peningkatan hingga 17x lipat untuk memenuhi kebutuhan akan adanya cadangan energi tersebut (International Renewable Energy Agency, 2017) salah satu penyimpanan energi yang menjanjikan adalah superkapasitor.

Superkapasitor atau yang sering juga disebut dengan kapasitor elektrokimia atau ultrakapasitor merupakan pengembangan dari kapasitor biasa dan saat ini telah menarik perhatian dikarenakan *life-cyclenya* yang panjang serta densitas energi yang lebih besar dibanding kapasitor biasa. Superkapasitor saat ini banyak digunakan pada perangkat elektronik, sistem cadangan hingga pada pintu darurat pesawat terbang. Salah satu penggunaan superkapasitor yang cukup menjanjikan dimasa depan adalah untuk *fuel cell* pada mobil listrik dengan mengkombinasikan superkapasitor dengan baterai (Zhang & Zhao,2009).

Elektroda superkapasitor biasanya terbuat dari bahan karbon, misalnya karbon aktif, *carbon nanotubes* (CNT) , *graphene* ataupun porous carbon. Akan tetapi material karbon berpori yang bersifat murni memiliki kekurangan yaitu kapasitansinya yang cukup rendah (Chen ,D et al.,2020) . Hao Chen et al (2017) menyatakan bahwa doping heteroatom seperti sulfur, boron , fosfor dan nitrogen dapat meningkatkan sifat kapasitansi pada material karbon berpori (Chen, H et al.,2017). Penambahan doping sulfur dan nitrogen bertujuan untuk meningkatkan konduktivitas listrik dan kapasitansi spesifik dari karbon berpori (Jeon et al.,2021) Kemudian boron dipilih karena jari-jari atomnya yang mirip dengan carbon sehingga doping lebih mudah dilakukan serta elektronegativitasnya yang rendah yang dapat meningkatkan konduktivitas pada material karbon berpori (Chen, D et al.,2020). Review paper ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penambahan doping heteroatom tersebut secara lebih lanjut.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, rumusan masalah dari review paper ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh penambahan doping heteroatom boron, sulfur, nitrogen dan fosfor sebagai doping tambahan terhadap struktur dan morfologi material Porous carbon untuk elektroda superkapasitor.
2. Bagaimana pengaruh penambahan doping heteroatom boron, sulfur, nitrogen dan fosfor sebagai doping tambahan terhadap nilai kapasitansi dari material Porous Carbon untuk elektroda superkapasitor.

1.3 Batasan Masalah

Untuk Mendapatkan hasil akhir yang baik dan tidak menyimpang dari masalah yang ditinjau maka batasan pada paper review ini adalah sebagai berikut:

1. Sumber karbon dan doping pada sampel diabaikan.
2. Perbedaan elektrolit dan bentuk elektroda pada pengujian elektrokimia diabaikan.

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari dilakukannya paper review ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis pengaruh penambahan doping heteroatom boron, sulfur, nitrogen dan fosfor sebagai doping tambahan terhadap struktur dan morfologi *porous carbon*.

2. Menganalisis pengaruh penambahan doping heteroatom boron, sulfur, nitrogen dan fosfor sebagai doping tambahan terhadap sifat kapasitansi dari material porous carbon untuk elektroda superkapasitor.

1.5 Manfaat Penelitian

Review paper ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh doping heteroatom boron, sulfur, nitrogen dan fosfor terhadap sifat kapasitansi dari Porous Carbon untuk elektroda superkapasitor sehingga penelitian ini dapat digunakan sebagai rujukan untuk penelitian – penelitian selanjutnya dalam pengembangan material elektroda superkapasitor yang ramah lingkungan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Porous Carbon

Semua material karbon mengandung pori terkecuali beberapa jenis grafit yang merupakan polikristalin hasil dekomposisi termal prekursor organik seperti resin.

Tabel 2.1 Klasifikasi Pori Pada Material Padat

Berdasarkan Ukuran	Berdasarkan Sumber	Berdasarkan Kondisi
Mikropori < 2nm	Pori Interpartikel (Kaku dan Fleksibel)	Pori Terbuka
Mesopori 2-50nm	Pori Intrapartikel (Ekstrinsik dan intrinsic)	Pori Tertutup (Laten)
Makropori > 50nm		

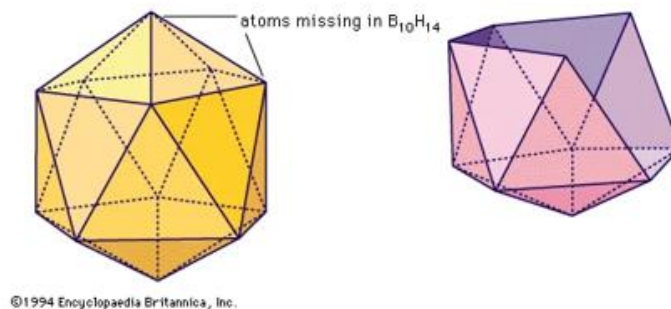
Klasifikasi pori berdasarkan ukuran diusulkan oleh IUPAC (International Union for Pure and Applied Chemistry) seperti yang dapat dilihat pada **Tabel 2.1** pori biasanya diklasifikasikan menjadi 3 tipe makropori, mesopori dan mikropori. Frasa “nanopori” sering digunakan untuk merujuk pada mikro dan mesopori pada karbon (Kang et al.,2021) disamping itu porous carbon juga dapat di kelompokkan menjadi 2 kategori: (i) *carbon foam* untuk aplikasi structural dan aplikasi pada temperatur tinggi, baru baru ini jenis porous karbon ini telah digunakan sebagai template untuk membuat keramik, (ii) *activated carbon*, porous carbon dengan permukaan yang aktif (Manocha,2003).

Material karbon berpori sejauh ini telah disintesis dengan berbagai metode beberapa diantara metode tradisional yang umum digunakan adalah:

1. *Chemical activation, physical activation* dan kombinasi keduanya.
2. Aktivasi katalitik dari prekursor karbon menggunakan garam logam atau campuran organometallic.
3. Karbonisasi dari campuran polimer yang terdiri dari polimer yang dapat terkarbonisasi dan terpirolisis.
4. Karbonisasi polimer aerogel yang di sintesa pada kondisi pengeringan supercritical (Lee et al.,2006).

2.2 Boron

Boron adalah elemen semi-metal dan menempati grup IIIa pada tabel periodik, boron memiliki nomor atom 5, massa atom 10,806 sma dan titik leleh 2200°C. Jumlah boron di alam di prediksi mencapai 0.001% dari massa kerak bumi. Kristalin boron murni bersifat semikonduktor dimana bisa menghantarkan arus listrik pada temperatur tinggi seperti logam, namun pada temperatur rendah boron bersifat hampir seperti insulator. Boron memiliki kekerasan yang cukup tinggi pada skala mohs (9.3) namun terlalu getas untuk digunakan sebagai peralatan kerja. Kristalin boron juga bersifat inert secara kimiawi pada temperatur ruang.



Gambar 2.1 Struktur Kristalin Boron (Britannica , 2021)

Di alam boron memiliki dua isotop stabil yaitu boron-10(19.9%) dan boron-11 (80.1%). Boron-10 memiliki sifat unik karena memiliki sifat afinitas yang tinggi terhadap neutron, sehingga sangat mudah menyerap neutron dan mengkonversinya menjadi partikel alfa. Partikel alfa ini biasanya tidak bisa bergerak terlalu jauh sehingga boron-10 kerap digunakan untuk perisai neutron. (Britannica, 2021).

Boron sering digunakan sebagai material pendoping bagi unsur atau senyawa lain nya. Doping adalah penambahan atom asing atau impuritas dalam jumlah kecil kedalam struktur kristal dengan tujuan untuk mengubah sifat kelistrikan suatu material atau semi-konduktor. Secara umum atom doping dibedakan menjadi dua jenis:

1. Donor adalah element yang memproduksi elektron berlebih pada material, donor terbaik berasal dari elemen pada grup 5 di tabel periodik seperti Fosfor (P), Arsenic (As) dan bismuth (Bi).
2. Acceptor membuat “lubang” pada struktur atom material, acceptor biasanya berasal dari group 3 pada tabel periodic seperti Aluminum (Al), Gallium (Ga) dan Boron (B).

Sebuah material atau semi-konduktor yang di doping dengan donor disebut dengan n-type semiconductor dan yang di doping dengan acceptor disebut dengan p-type semiconductor (Linder,2006).Diantara beberapa dopant yang disebut diatas boron adalah salah satu dopant yang menjanjikan untuk meningkatkan sifat sifat elektrokimia dari material karbon, hal ini dikarenakan panjang jari-jari atom boron sangat mirip dengan jari-jari atom karbon sehingga atom karbon dapat digantikan oleh atom boron dengan mudah. Selain itu elektronegativitas boron lebih rendah daripada carbon sehingga material karbon yang di doping dengan boron lebih mudah menarik ion OH⁻ pada elektrolit sehingga konduktivitasnya lebih tinggi. Umumnya sumber boron dalam proses doping boron saat ini berasal dari B₂O₃ , H₃BO₃ atau (NH₄)₂B₄O₇. Pada sebuah penelitian baru-baru ini dimana boron-doped graphene yang dibuat dengan H₃BO₃ menunjukkan sifat kapasitif 1.7x lebih baik dari graphene biasa (Chen, D et al.,2020).

2.3 Nitrogen

Nitrogen merupakan unsur kimia dengan fasa gas dan memiliki simbol kimia N dan nomor atom 7. nitrogen merupakan gas yang tidak berwarna, tidak berbau, tidak berasa, dan membentuk 78% atmosfer bumi serta merupakan penyusun dari semua mahluk hidup. Sebagai molekul diatomik N₂ bersifat hampir tidak reaktif, ia berguna sebagai gas inert atau untuk mengencerkan gas-gas lainnya. Nitrogen diproduksi secara komersial melalui distilasi udara cair. Fiksasi nitrogen, yang dilakukan secara alami oleh mikroba tanah dan secara industri oleh proses Haber-Bosch, mengubahnya menjadi senyawa yang larut dalam air (termasuk amonia

dan nitrat). Secara industri, amonia adalah bahan awal untuk sebagian besar senyawa nitrogen lainnya (terutama nitrat dan nitrit), yang kegunaan utamanya adalah dalam pupuk pertanian dan bahan peledak. Dalam senyawa, nitrogen biasanya memiliki valensi 3 atau 5. Nitrogen membentuk beberapa oksida, termasuk nitrous oxide (N₂O; gas tertawa), nitric oxide (NO), nitrogen dioksida (NO₂), dan bentuk-bentuk lain (seperti N₂O₃ dan N₂O₅). Beberapa nitrogen oksida, sering disebut secara umum sebagai NO_x yang terkenal sebagai kontributor polusi udara perkotaan. Senyawa lain termasuk nitrida, material yang sangat keras yang terbuat dari nitrogen dan logam; sianida; azida, yang digunakan dalam detonator dan tutup perkusi.ribuan senyawa organik mengandung nitrogen dalam gugus fungsional atau dalam struktur linier atau cincin (Sanderson,2020).

Tabel 2. 2 Sifat-Sifat Nitrogen (Sanderson,2020)

Sifat Elemen Nitrogen	
Nomor atom	7
Massa atom	14.0067
Titik leleh	-209.86 °C (-345.8 °F)
Titik didih	-195.8 °C (-320.4 °F)
Masa jenis (1 atm 0 C)	1.2506 grams/litre
Bilangan oksidasi	-3 , +3 , +5
Konfigurasi elektron	1s ² 2s ² 2p ³

2.4 Fosfor

Fosfor adalah unsur kimia non-logam, dengan simbol kimia P, nomor atom 15. fosfor memiliki beberapa alotrop namun yang paling populer adalah putih , merah dan hitam , alotrop biasa yang umum dijumpai adalah yang disebut fosfor putih berbentuk padatan dan beracun, tidak berwarna, semitransparan, lembut, seperti lilin dan dapat bersinar dalam gelap serta terbakar secara spontan di udara, menghasilkan asap putih pekat yang berasal dari oksida P₄O₁₀; fosfor jenis ini biasanya digunakan sebagai racun untuk hewan pengerat dan bom asap untuk militer. Panas atau sinar matahari mengubah fosfor jenis ini menjadi alotrop fosfor merah yang biasanya berbentuk bubuk ungu-merah yang tidak berpendar atau menyala secara spontan. Jauh lebih tidak reaktif dan larut daripada fosfor putih, fosfor merah digunakan dalam pembuatan senyawa fosfor lainnya dan semikonduktor, pupuk, korek api pengaman, dan kembang api. Fosfor hitam, dibuat dengan memanaskan bentuk putih di bawah tekanan, memiliki sifat bersisik seperti grafit. Fosfor jarang terdapat di alam tanpa bergabung dengan campuran lain sebagai ion fosfat, fosfor melimpah dan tersebar luas, dalam apatit, fosforit, dan banyak mineral lainnya. Fosfor memiliki valensi 3 atau 5 dalam senyawa, yang memiliki banyak kegunaan dalam industri. Fosfin (PH₃) adalah bahan baku kimia dan agen doping (pengotor yang sengaja ditambahkan) untuk komponen elektronik solid-state. Senyawa fosfor organik digunakan sebagai plasticizer, aditif bensin, insektisida (misalnya, parathion), dan gas saraf. Dalam organisme hidup, peran fosfor sangat penting; fosfor merupakan komponen DNA dan RNA, ATP, dan tulang.

Tabel 2. 3 Sifat-Sifat Fosfor (Britannica,2022)

Sifat Elemen Fosfor	
Nomor atom	15
Massa atom	30.9738
Titik leleh (fosfor putih)	44,1 °C (111,4 °F)
Titik didih (fosfor putih)	280 °C (536 °F)
Masa jenis (fosfor putih)	1.82 gram/cm ³ pada 20 °C (68 °F)
Bilangan oksidasi	-3 , +3 , +5
Konfigurasi elektron	1s ² 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3p ³

2.5 Sulfur

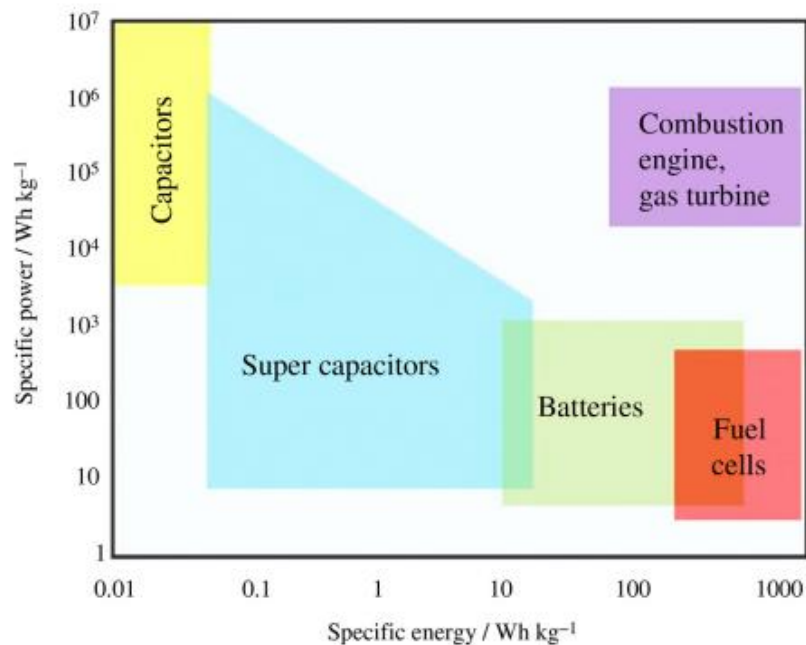
Sulfur merupakan material berwarna kuning cerah dan memiliki titik leleh sedikit dibawah titik didih air. Sulfur juga cukup lunak, padatan sulfur dapat dihancurkan dengan tangan. Sulfur di alam umumnya ditemukan dalam deposit gypsum-anhidrat Sulfur bersifat non logam dan merupakan anggota group VI A pada tabel periodic dengan nomor atom 16, massa atom 32.064 sma dan titik didih 444.6°C. Sulfur murni bersifat getas dan merupakan konduktor listrik yang buruk serta tidak larut dalam air, sulfur bereaksi dengan hampir semua logam kecuali emas dan platina, membentuk sulfide. Sebagian besar sulfur yang di produksi saat ini digunakan untuk membuat asam sulfat yang umum digunakan di dunia industri (Brasted,2021).



Gambar 2. 2 Kristalin Sulfur (Brasted ,2021)

2.6 Superkapasitor

Perkembangan teknologi dan sumber energi terbarukan telah mendorong terciptanya material penyimpanan energi dengan kapasitas besar dan biaya yang rendah, dengan perkembangan teknologi itu pula material penyimpanan energi elektrokimia mengalami perkembangan yang signifikan.

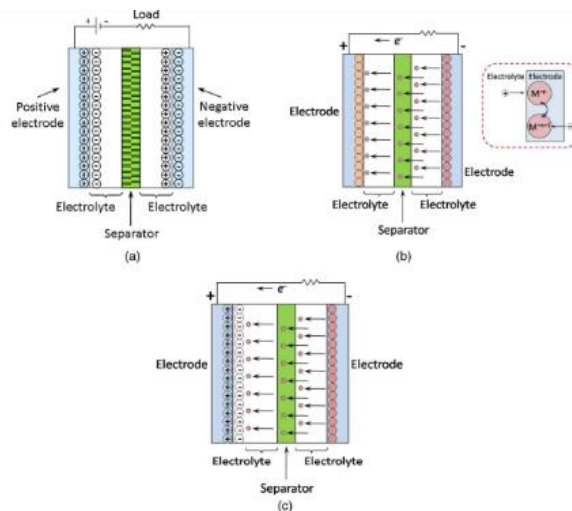


Gambar 2.3 Ragone plot beberapa alat penyimpanan energy (Tahir et al.,2020)

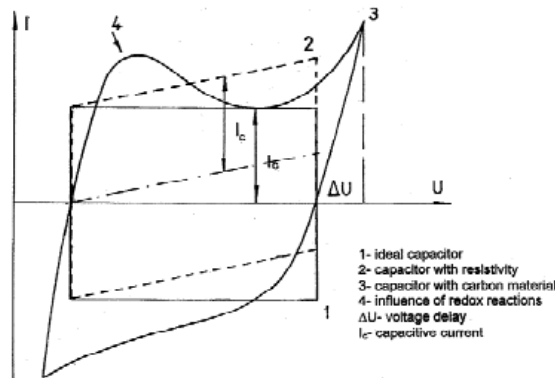
Gambar 2.3 Merupakan *ragone plot* yang membandingkan densitas energi dan performa beberapa material penyimpanan energi sumbu y menggambarkan jumlah energi yang tersedia persatuan massa sedangkan sumbu x menunjukkan seberapa cepat energi itu dapat di alirkan. Supercapacitor atau ultracapacitor berbeda dari kapacitor biasa dikarenakan supercapacitor memiliki kecepatan *charge-discharge* yang lebih tinggi, umur pakai lebih lama, kekuatan yang lebih tinggi dan densitas energi yang lebih tinggi (Vangari et al.,2013).

Supercapacitor dapat diklasifikasikan menjadi 3 tipe: *Electrochemical double layer capacitor* (EDLC), *pseudocapacitor* dan *hybrid* yang merupakan kombinasi dari EDLC dan *pseudocapacitor*. Pada EDLC mekanisme penyimpanan dan pengeluaran energi didasarkan pada pemisahan muatan diantara elektroda dan elektrolit. Mekanisme ini bersifat nonfaradaic dan tanpa reaksi reduksi oksidasi, EDLC memiliki Umur atau *life-cycle* yang relatif panjang dikarenakan proses transfer muatan terjadi hanya secara fisik. Pada pseudocapacitor terjadi reaksi reduksi oksidasi faradaic yang melibatkan elektroda berbasis oksida logam, metal-doped carbon atau polimer konduktif. Material-material elektroda ini membuat densitas energi superkapasitor menjadi lebih tinggi akan tetapi umur pakai atau *life-cycle* nya lebih rendah dari EDLC Hybrid supercapacitor menggabungkan mekanisme EDLC dan pseudocapacitor.

Secara mendasar sebuah supercapacitor terdiri dari dua elektroda yang diisolasi oleh membran *semipermeable* yang berfungsi sebagai separator. Elektroda dan separator kemudian di impregnasi dengan larutan elektrolit, sehingga arus ionik dapat mengalir diantara elektroda. Supercapacitor dapat dibuat dari berbagai material tergantung pada aplikasi yang diinginkan serta rentang kapasitansi yang dibutuhkan. Umumnya material elektroda yang digunakan berbasis karbon yang dapat di konversi menjadi berbagai bentuk. (Vangari et al.,2013).



Gambar 2.4 Skema 3 Jenis Supercapacitor: (a)EDLC;(b) *pseudocapacitor*;(c) hybrid (Vangari et al.,2013)



Gambar 2.5 Kurva CV Beberapa jenis superkapasitor (Frackowiak & Beguin,2001)

Gambar 2.6 merupakan gambar beberapa kurva yang diperoleh dari pengujian Cyclic Voltammetry beberapa jenis supercapacitor , Kurva nomor 1 yang berbentuk persegi panjang (*rectangular*) merupakan superkapasitor ideal , kurva nomor 2 menunjukkan superkapasitor dengan resistivitas dimana terjadi peningkatan current density/ arus (I) seiring dengan meningkatnya voltase (U) dan kurva nomor 3 menunjukkan kapasitor dengan *pseudocapacitance* , gundukan (*hump*) yang ditunjukkan oleh nomor 4 menandakan adanya reaksi redoks yang terjadi ^[20]Supercapacitor digunakan pada aplikasi dimana penyimpanan atau pengeluaran energi dalam jumlah besar dalam waktu yang sangat singkat diperlukan. Saat ini superkapasitor umumnya digunakan pada kendaraan elektrik *hybrid* (HEV), kendaraan listrik (EV) dan *Fuel Cell Vehicles* (FCV). Selain itu superkapasitor juga digunakan sebagai *Uninterruptible Power Supplies* (UPS) dan *volatile memory backup* pada PC. Area lain dimana superkapasitor dapat diaplikasikan adalah pada sistem pembangkit energi seperti turbin angin dan *solar cell*. Pada dunia otomotif penggunaan superkapasitor memberikan banyak manfaat dan peningkatan efisiensi. Mesin HEV modern saat ini kebanyakan akan otomatis mati saat mobil berhenti dan berjalan kembali dengan energi yang disimpan dalam superkapasitor sehingga baterai menjadi lebih awet. (Noer & Irvina,2021).

2.7 Penelitian Sebelumnya

Hui Zhang et al (2020) melakukan sintesis bahan karbon berpori yang didoping nitrogen (NPC) melalui karbonisasi dari cairan ionik, yaitu 1-ethyl-3-methylimidazolium dicyanamide (EMIM-dca), menggunakan garam eutektik ($ZnCl_2$ -NaCl) sebagai agen porogen. Kandungan nitrogen dan struktur dari bahan karbon yang diperoleh pada penelitian ini sangat bergantung pada kadar garam yang digunakan. sampel NPC yang dihasilkan memiliki struktur pori yang cukup baik, kandungan nitrogen yang tinggi serta distribusi yang homogen, dan luas permukaan yang tinggi. Ketika digunakan sebagai elektroda untuk superkapasitor, elektroda NPC-2 menunjukkan kapasitansi spesifik yang tinggi sebesar 335,3 dan 206 F/g pada kerapatan arus 0,5 dan 10 A/g, energy density yang cukup besar (hingga 10,1 Wh/kg), dan stabilitas yang sangat baik dimana hampir tidak terdapat degradasi setelah 10.000 siklus lebih dengan elektrolit KOH. (Zhang et al., 2020).

Dari penelitiannya Deng et al (2015) menyatakan bahwa Karbonisasi langsung dan aktivasi kimiawi secara simultan dari resin penukar ion asam sulfonat yang diimpregnasi oleh ion kobalt merupakan cara yang efisien untuk sintesis skala besar nanosheet karbon berpori yang didoping sulfur (S-PCNS) untuk superkapasitor dengan energi spesifik tinggi. S-PCNS yang telah disiapkan menunjukkan struktur tiga dimensi yang saling berhubungan, tingkat grafitisasi yang tinggi, rasio atom C/O yang tinggi (22,9: 1), doping sulfur tingkat tinggi (9,6 wt%), luas permukaan spesifik yang tinggi (2005 m^2/g), dan porositas yang baik. S-PCNS yang berfungsi sebagai bahan elektroda untuk superkapasitor menunjukkan kapasitansi spesifik setinggi 312 F/g pada 0,5 A/g, kemampuan laju yang sangat baik (78% retensi kapasitansi pada 50 A g^{-1}), kepadatan energi yang tinggi (11,0 W h kg^{-1} pada 0,5 A/g), dan stabilitas bersepeda yang luar biasa (~97% dari kapasitansi awal setelah 10.000 siklus pada 2 A/g) dalam 6,0 M elektrolit KOH. Karena struktur unik S-PCNS, kapasitansi spesifik S-PCNS lebih tinggi daripada karbon aktif yang didoping sulfur. Kinerja kapasitansi yang sangat baik ditambah dengan sintesis S-PCNS yang mudah menunjukkan bahan elektroda potensial untuk superkapasitor (Deng et al., 2015).

Luo et al (2020) melakukan sintesis komposit karbon berpori (BNC) yang didoping dengan nitrogen dan boron dengan menggunakan perlakuan hidrotermal dan bantuan gelombang mikro dan dikombinasikan dengan proses pirolisis. Limbah biomassa kulit pohon cemara digunakan sebagai prekursor karbon, sedangkan amonium pentaborat tetrahidrat digunakan sebagai sumber boron (B) dan nitrogen (N). Proses sintesis dan karakteristik BNC yang dikembangkan diselidiki, dan hasilnya menunjukkan bahwa N dan B berhasil didoping, menghasilkan efek sinergis pada struktur, karakteristik permukaan dan sifat elektrokimia. BNC mencapai luas permukaan spesifik hingga 955 m^2/g dengan pori yang sebagian besar merupakan mikropori, dengan kandungan 10-13% B dan 15 ~ 20% kandungan N. Nilai kapasitansi gravimetri untuk elektroda yang mengandung bahan aktif BNC-20 adalah 188 F/g pada 0,5A/g, 2 kali lipat dari karbon non-doped, sampel BNC-20 ini memiliki retensi kapasitansi 90% setelah 10.000 siklus pengisian / pengosongan (Luo et al., 2020) .

Karbon berpori hirarkis tiga dimensi yang didoping fosfor (P-3DHPCs) telah disintesis dengan pirolisis langsung dari campuran yang mengandung glukosa, mangan nitrat dan natrium hipofosfit oleh Yang et al (2018) .Glukosa dan natrium hipofosfit masing-masing digunakan sebagai sumber karbon dan fosfor P-3DHPCs tidak hanya memiliki struktur pori hirarkis yang menguntungkan dan bermanfaat bagi adsorpsi dan transportasi ion, tetapi juga menmbua doping heteroatom menjadi lebih efektif, yang selanjutnya meningkatkan kinerja kapasitif. Jumlah natrium hipofosfit memainkan peran penting dalam sifat dan kandungan fosfor pada P-3DHPCs. Hasil penelitian menunjukkan bahwa P-3DHPC-0.2 menunjukkan kinerja elektrokimia terbaik dibandingkan dengan sampel lainnya. Kapasitansi spesifik yang tinggi (367 F/g pada 0,3 A/g) diperoleh dalam 6 M KOH, dan kapasitansi masih mempertahankan 319

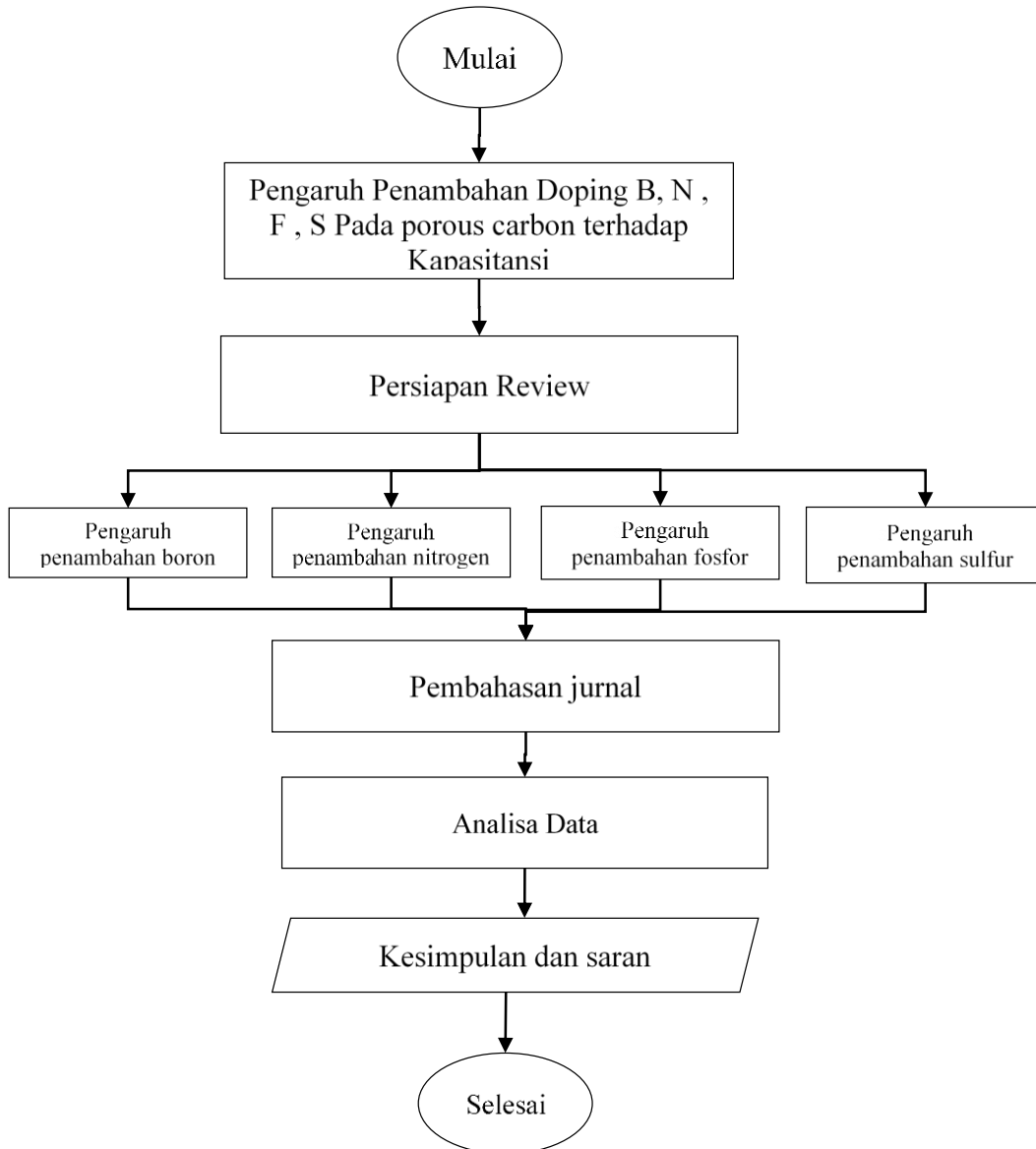
F/g ketika diuji pada 20 A/g (retensi kapasitansi ca.88%). Selain itu, P-3DHPC-0.2 juga memiliki stabilitas yang baik dengan hanya kehilangan 3,5% setelah 10.000 siklus pada 3 A/g (Yeng et al., 2018).

Tabel 2. 4 Penelitian sebelumnya

Material	Kapasitansi Spesifik (F/g)	Peneliti	Doping
1-ethyl-3-methylimidazolium dicyanamide	335.3 F/g	Zhang et al (2020)	Nitrogen
Resin	313 F/g	Den et al (2015)	Sulfur
Kulit Pohon Cemara	188 F/g	Luo et al (2020)	Boron dan Nitrogen
Glukosa	367 F/g	Yeng et al (2018)	Fosfor

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir



Gambar 3. 1 Diagram Alir Paper Review

3.2 Persiapan Review

Pada review paper ini, berikut persiapan dimulai dengan persiapan jurnal, analisa jurnal, dan komparasi jurnal yang telah dianalisa.

3.2.1 Persiapan Jurnal

Langkah pertama untuk mereview paper untuk menganalisa pengaruh penambahan doping boron, nitrogen, fosfor dan sulfur ialah mempersiapkan jurnal yang kompatibel untuk dianalisa. Pencarian jurnal dapat digunakan secara *daring*.

3.2.2 Analisa Jurnal

Berikutnya, dapat dilakukan analisa terhadap jurnal yang sudah dicari. Analisa terkait mengambil data yang relevan pada jurnal tersebut, juga menganalisa hasil yang ditampilkan pada jurnal. Data kemudian dibahas lebih lanjut untuk mengambil kesimpulan yang berkaitan dengan review paper kali ini.

3.2.3 Komparasi Jurnal

Data yang diambil dan dianalisa dari jurnal yang telah dikumpulkan kemudian dilakukan komparasi. Hal ini dilakukan untuk menguji ketepatan analisa dan membandingkan pengaruh yang diuji pada parameter yang berbeda.

3.3 Metode Review Paper

Metode yang dilakukan dalam paper review ini adalah

1. Studi Literatur

Metode ini berdasarkan pada Jurnal tentang penelitian serupa yaitu tentang pengaruh penambahan doping Fosfor, Sulfur, Nitrogen dan Boron terhadap morfologi dan sifat kapasitansi Porous carbon.

2. Diskusi

Tahap ini dilakukan untuk menambah wawasan terkait penelitian yang akan dilakukan, dengan diskusi kepada pihak-pihak yang berhubungan langsung dengan penelitian ini.

3.4 Rancangan Penelitian

Untuk mempermudah review paper maka dibuatlah rancangan jurnal berupa tabel yang mendaftarkan sampel dan jenis pengujian yang dilakukan, tabel rancangan penelitian dapat dilihat pada Tabel 3.1 berikut ini.

Tabel 3.1 Tabel daftar jurnal

Sumber Karbon	Doping	Variasi Temperature (°C)	Variasi Massa aktivator	elektrolit	Refrensi
<i>Sawdust</i>	F	700,800,900,1000	-	H ₂ SO ₄ 1M	Guanfeng Lin <i>et al</i>
Daun <i>Saccharum bengalense</i>	F	700 , 850	-	Na ₂ SO ₄ 1M	Sangeeta Rawal <i>et al</i>
Antrasit	F	600 , 800 , 1000	-	Et ₄ NBF ₄ /PC 1M	Weiping Ma <i>et al</i>
Sodium Lignosulfate	S	-	0 , 0.3 , 0.5 (Aktivator)	KOH 6M	Jingyang Tian <i>et al</i>
Ulthorix Algae	S	-	1 2 3 (Aktivator)	KOH 2M	Song Liu <i>et al</i>
<i>Surgical Mask</i>	S	-	0 , 1 , 2 , 3 , 4 (Aktivator)	KOH 6M	Xian Hu <i>et al</i>
<i>Chitin</i>	N	800 , 900	-	H ₂ SO ₄ 1M	Si Zheng <i>et al</i>
EDTA Disodium Magnesium Kepompong	N	500,600,700,800,900	-	KOH 6M	Bin Xu <i>et al</i>
<i>Bombyx Mori</i>	N	600,700,800,900	-	KOH 6M	Chao Long <i>et al</i>
Bulu Dandelion	B/N	-	-	-	Jing Yang <i>et al</i>
<i>Starch</i>	B/N	-	-	KOH 6M	Dong Guo <i>et al</i>
Sukrosa	B	-	0 , 1,2,3,4 (%at Boron)	H ₂ SO ₄ 1M Na ₂ SO ₄ 1M KOH 1M	Amirhossein Fallah <i>et al</i>

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

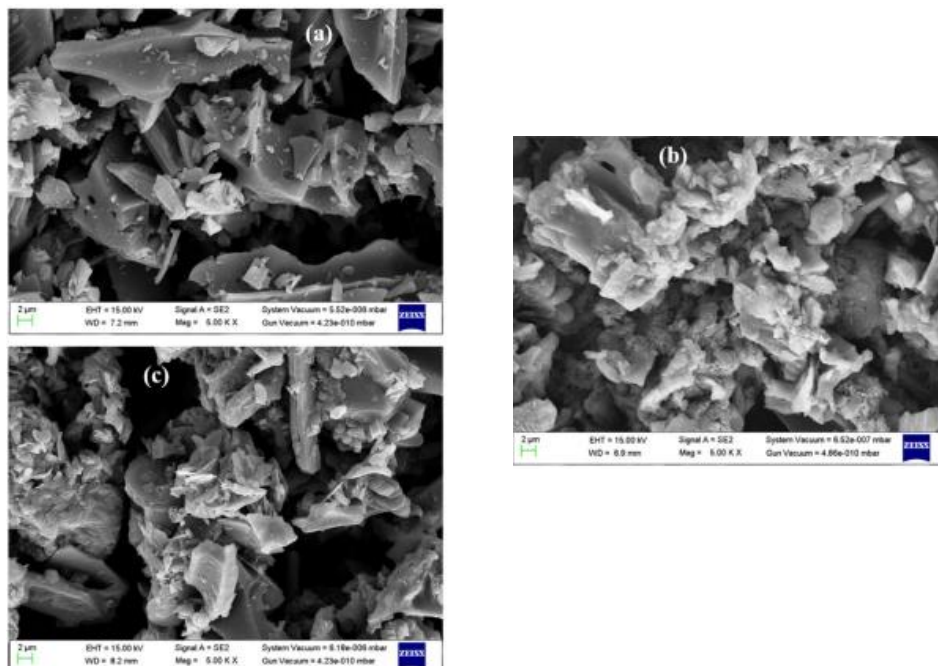
BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil

Setelah melakukan review terhadap beberapa jurnal terkait pendopongan heteroatom boron, fosfor, nitrogen dan sulfur didapatkan beberapa hasil antara lain:

4.1.1 Penambahan Doping Fosfor

Sangeeta Rawal *et al* (2021) melakukan penelitian mengenai pengaruh penambahan doping sulfur dengan menggunakan daun dari tanaman *Saccharum Bengalense*, daun ini dikeringkan dan dikeringkan secara vacuum sebelum dihancurkan menjadi bubuk. Bubuk ini kemudian dicampurkan dengan $ZnCl_2$ sebagai activating agent dengan rasio 1:2 dan dimasukkan kedalam oven dengan temperature $100^\circ C$, bubuk kering daun ini kemudian di panaskan dengan tube furnace di temperaturure $850^\circ C$ dalam atmosfer inert, hasilnya dibilas dengan deionized water dan HCl, hasil proses ini selanjutya dinamakan AC, sampel AC kemudian di beri perlakuan dengan asam nitrat 3 mol dan di panaskan pada temperature $80^\circ C$ selama 3-4 jam dan di keringkan di oven kedap udara, sampel ini selanjutnya dinamakan AC-T, sampel AC-T ini kemudian di doping dengan H_3PO_4 dan diaduk terus menerus di temperature $90^\circ C$ selama semalaman hingga membentuk pasta kental, pasti ini kemudian di kalsinasi pada temperature $700^\circ C$ dan $850^\circ C$ sebelum di bilas dengan deionized water dan di keringkan di oven pada temperature $100^\circ C$ sampel ini selanjutnya dinamakan AC-TP-700 dan 850, dimana 700 dan 850 adalah temperature kalsinasi.

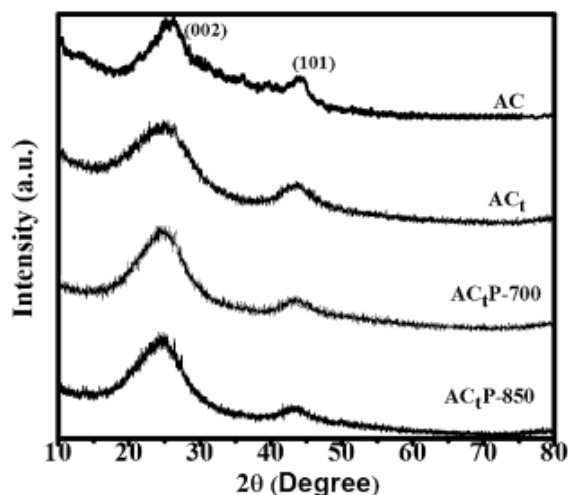


Gambar 4.1 Hasil SEM Dari AC (a), ACt (b) dan ACtP-850(c) (Rawal et al.,2021)

Gambar 4.1 menampilkan perubahan struktur mikro dan morfologi pada sampel Seperti yang terlihat dari **Gambar 4.1a** butir porous karbon berubah menjadi struktur serpihan yang lebih kecil setelah diberi perlakuan dengan asam nitrat **Gambar 4.1b** menunjukkan bahwa perlakuan HNO_3 memiliki efek destruktif dan korosif pada permukaan porous carbon yang menghasilkan penggabungan pori membentuk makropori yang sangat besar. sedangkan penambahan asam fosfat menyebabkan terjadinya pengelupasan struktur karbon menghasilkan mesopori yang lebih banyak hal ini dapat dilihat pada **Tabel 4.1**.

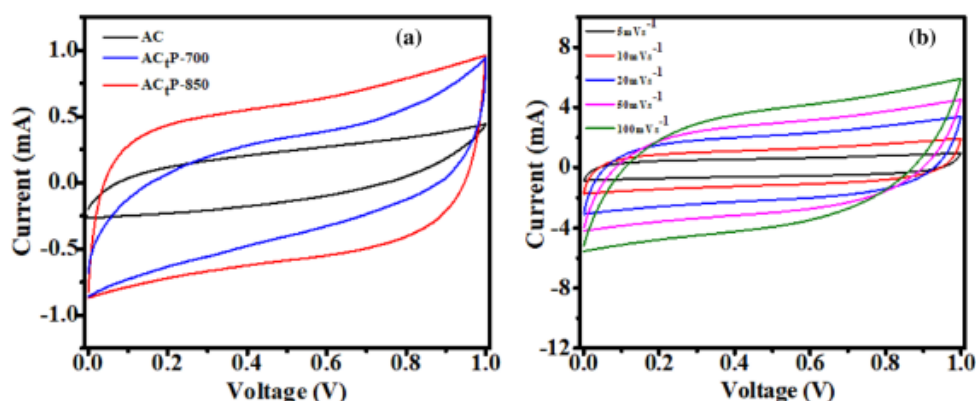
Tabel 4. 1 Hasil Uji BET dan Porositas Sampel AC , ACt, ACtP-700 dan ACtP-800 (Rawal et al.,2021)

Sample	S _{BET} (m ² /g)	V _{Mic} (cm ³ /g)	V _{Mes} (cm ³ /g)	V _{tot} (cm ³ /g)	Ukuran Rata-Rata (nm)
AC	1890	0.361	0.0392	0.40	2.1
ACt	612	0.09	0.02	0.11	3.2
ACtP-700	1460	0.296	0.135	0.431	3.3
ACtP-850	1920	0.324	0.243	0.567	4.07



Gambar 4. 2 Hasil XRD Sampel AC, ACt, ACtPx (Rawal et al.,2021)

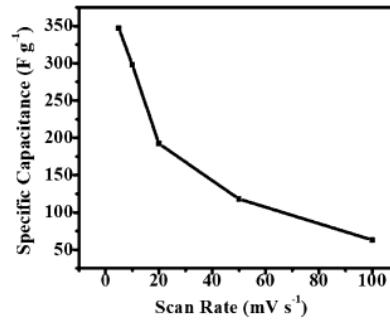
Pola xrd pada **Gambar 4.2** dari setiap sampel menunjukkan adanya puncak pada 2teta yang bernilai ~24 dan ~40 hal ini merupakan ciri khas dari struktur grafit amorfus, dapat dilihat seiring dengan meningkatnya temperature pirolisis dan doping maka puncak menjadi landai hal ini dikarenakan adanya peningkatan interlayer spacing akibat defect pada karbon akibat penambahan doping.



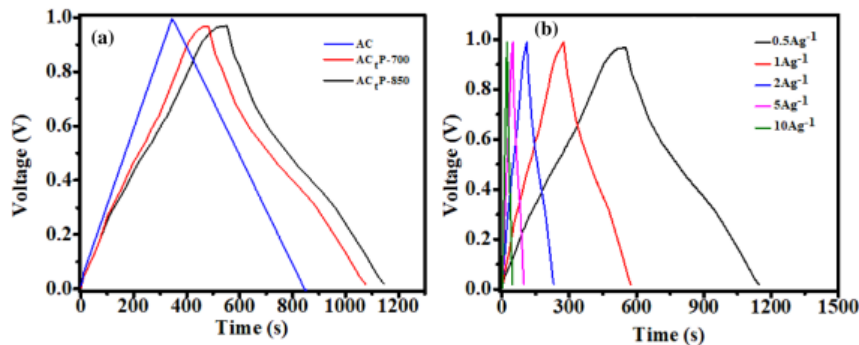
Gambar 4. 3 .Hasil Pengujian CV Setiap Sampel (a) dan ACtP-850(b) (Rawal et al.,2021)

Sedangkan dapat dilihat dari hasil pengujian CV pada **Gambar 4.3** Meskipun AC memiliki luas permukaan yang lebih tinggi, ACtP-700 dan ACtP-850 menunjukkan kurva yang lebih lebar, dengan bentuk yang menandakan perilaku EDLC dan sedikit pseudocapacitance hal ini mungkin disebabkan oleh adanya lebih banyak mikropori dan lebih sedikit mesopori dalam AC

sesuai dengan **Tabel 4.1** dikarenakan mikropori lebih sulit diakses oleh ion selama proses *charging* sedangkan pseudocapacitance dihasilkan oleh gugus fosfat di dalam sampel. **Gambar 4.4** menggambarkan kapasitansi spesifik (dihitung dari plot CV) Pada laju pemindaian yang lebih tinggi, pergerakan elektrolit melalui permukaan elektroda berkurang dan terjadi penurunan penyimpanan muatan yang tercermin dalam penurunan nilai kapasitansi spesifik pada tingkat laju pemindaian yang lebih tinggi.

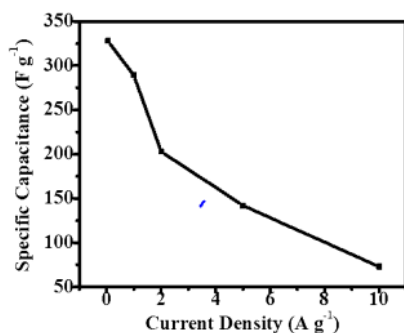


Gambar 4.4 Kapasitansi Spesifik ACtP-850 Terhadap Laju Pemindaian (Rawal et al.,2021)



Gambar 4.5 Kurva GCD Setiap sampel (a) Kurva ACtP-850 Dalam Berbagai Rapat Arus (b) (Rawal et al.,2021)

Gambar 4.5 menggambarkan kurva GCD AC, ACtP-700 dan ACtP-850 pada kerapatan arus yang berbeda. Kurva charge AC menunjukkan bentuk simetris yang merupakan ciri khas mekanisme penyimpanan EDLC. Penyimpangan pada kurva GCD untuk sampel ACtP-700 dan ACtP-850 menunjukkan adanya reaksi redoks karena doping fosfor Nilai kapasitansi spesifik untuk ACtP-850 pada berbagai kerapatan arus ditampilkan dalam **Gambar 4.6**. Kapasitansi spesifik maksimum (328 F/g) diperoleh pada kerapatan 0,5 A/g. dapat dilihat bahwa, nilai kapasitansi spesifik turun seiring dengan peningkatan kerapatan arus karena pada arus tinggi aksesibilitas pori menurun karena laju pelepasan muatan yang cepat. Sedangkan etensi kapasitansi rendah pada kerapatan arus tinggi menurut Sangeeta disebabkan oleh adanya lebih banyak kelompok fungsional oksigen yang menambah pseudocapacitance tetapi juga memburuk kinerja kapasitor.



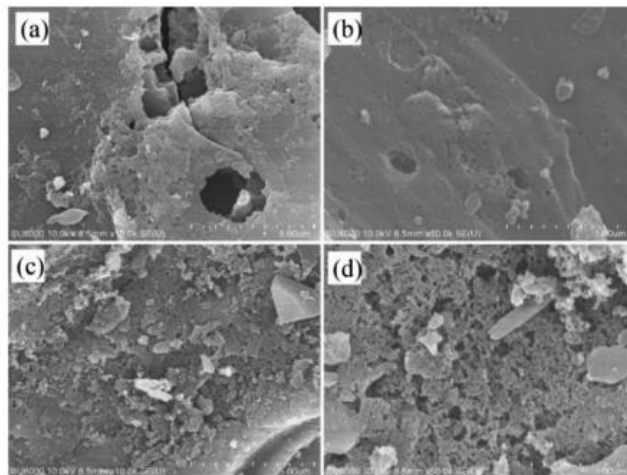
Gambar 4.6 Kapasitansi ACtP-850 Terhadap Rapat Arus (Rawal et al.,2021)

Gunfeng ling *et al* (2020) melakukan penelitian serupa dengan menggunakan serbuk gergaji sebagai sumber karbon dan asam fosfat sebagai sumber fosfor, untuk mensintesa porous carbon. Gunfeng et al mencampurkan 10g serbuk gergaji dan 30ml 1.0wt% asam fosfat dengan rasio massa 1:0.03, campuran ini kemudian di keringkan pada oven pada temperature 120 °C selama 6 jam dan di pirolisis di furnace pada temperature dengan variasi 700,800,900 dan 1000 °C sampel berdoping ini selanjutnya disebut PC-X dengan X adalah temperature pirolisis dan sampel tanpa doping C-X dengan X adalah temperature pirolisis. Pada penelitian ini dilakukan pengujian BET untuk mengetahui sifat dan karakteristik pori pada sampel.

Tabel 4.2. Parameter Pori Sampel C-X dan PC-X (Lin et al.,2020)

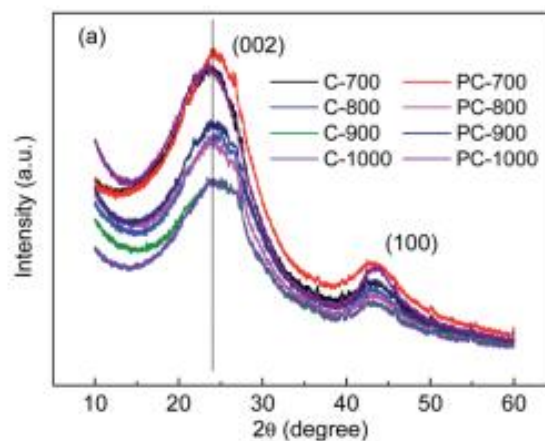
Sample	S_{BET} (m ² /g)	V_{Mic} (cm ³ /g)	S_{Mic} (cm ³ /g)	V_{tot} (cm ³ /g)	Ukuran Rata-Rata (nm)
C-700	804.2	0.207	442.2	0.483	2.40
PC-700	743.0	0.286	603.6	0.382	2.06
C-800	844.7	0.259	548.4	0.490	2.32
PC-800	1059.2	0.330	706.1	0.540	2.04
C-900	1094.0	0.453	468.5	0.829	3.03
PC-900	1281.6	0.535	835.6	0.638	1.99
C-1000	976.6	0.191	412.6	0.713	2.92
PC-1000	875.9	0.343	725.0	0.438	2.00

Seperti yang ditunjukkan pada **Tabel 4.2**, saat suhu karbonisasi meningkat, luas permukaan spesifik (S_{BET}) dan total volume pori (V_{TOT}) C-X dan PC-X meningkat dan kemudian menurun, sampel PC-X dengan H_3PO_4 menunjukkan S_{BET} dan V_{TOT} yang lebih besar daripada sampel tanpa H_3PO_4 pada suhu 800 °C dan 900 °C, hal ini menunjukkan bahwa sejumlah kecil H_3PO_4 merupakan activating agent yang efektif (pemuai gas) pada suhu ini. Namun, ketika suhu berada pada 700 °C dan 1000 °C, S_{BET} dan V_{TOT} sampel dengan H_3PO_4 lebih kecil dari sampel C-X tanpa H_3PO_4 . Menurut Lin Hal ini disebabkan pada suhu di atas 750 °C, gas yang dihasilkan oleh dekomposisi parsial H_3PO_4 , ($4 H_3PO_4 + 10C / P_4 + 10CO + 6H_2O$) akan menyebabkan perkembangan pori struktur. namun, ketika temperature lebih rendah dari 750 °C, H_3PO_4 tidak akan terurai, sehingga tidak dapat membantu pembentukan struktur pori. Ketika suhu terlalu tinggi (1000 °C), gas yang terurai dengan cepat keluar, menghancurkan struktur awal karbon aktif yang sudah terbentuk.



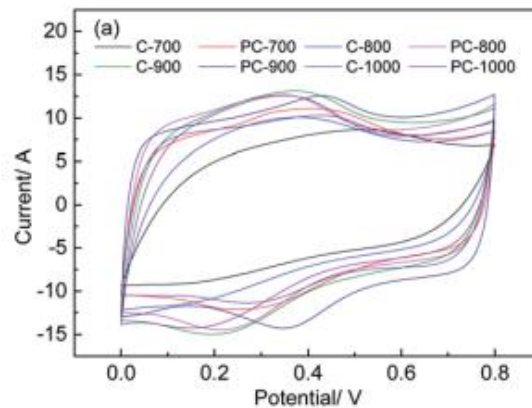
Gambar 4.7 .SEM C-900 (a-b) dan PC-900 (c-d) (Lin et al.,2020)

Sedangkan dari pengujian SEM dilakukan pada sampel PC-900 dan C-900 **Gambar 4.7** menunjukkan struktur jaringan berpori yang tersusun rapi untuk C-900 dan PC-900. Kedua sampel memiliki pori-pori seragam yang membantu migrasi ion dan menyediakan situs aktif yang lebih mudah diakses pada karbon. Seperti yang ditunjukkan pada **Gambar.4.7(c-d)** , PC-900 memiliki struktur yang relative lebih longgar dan tersusun dengan banyak mikropori dalam matriks karbon. Ini menunjukkan bahwa doping fosfor memiliki pengaruh yang besar pada morfologi matriks karbon, yang mengarah ke perluasan ruang antarlapisan dan mendorong perkembangan struktur pori.



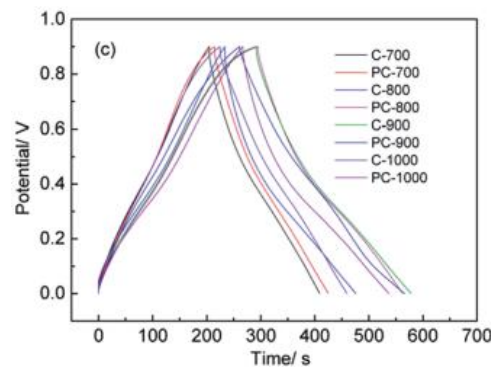
Gambar 4.8 Hasil XRD sampel C-X dan PC-X (Lin et al.,2020)

Pola XRD dari C-X dan PC-X ditunjukkan pada **Gambar 4.8**. Dua puncak pada sudut ~ 24 (002) dan ~ 43 (100), menunjukkan struktur grafit amorf dari sampel. Dibandingkan dengan C-X, PC-X mengalami penurunan nilai puncak (002) pada 800, 900 dan 1000 °C, terutama pada 1000 °C Hal ini karena selama perlakuan panas suhu tinggi, gas yang dihasilkan oleh dekomposisi asam fosfat meningkatkan jarak antar lapisan (konsisten dengan hasil analisis SEM) dan mengurangi tingkat grafitisasi dari karbon berpori.



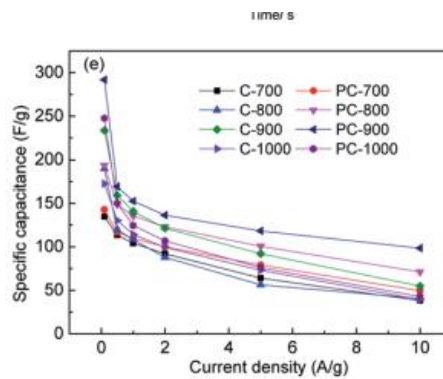
Gambar 4.9 Hasil pengujian CV Sampel C-X dan PC-X (Lin et al.,2020)

Untuk mengetahui sifat kapasitansi dari sampel hasil percobaan dilakukan pengujian elektrokimia CV dengan system tiga elektroda dengan asam sulfat 1M sebagai elektrolit , adapun elektroda pada penelitian ini dibuat dengan mencampurkan 80wt% porous carbon hasil proses pirolisis dengan 10wt% asetilen black dan 10wt% politetrafluoroetilen hingga membentuk pasta , pasta ini kemudian di oleskan pada nickel foam , di keringkan pada temperature 60 °C selama 24 jam kemudian di press pada tekanan 10Mpa selama 1 menit . Pada **Gambar 4.6** dapat diamati bahwa semua kurva CV memiliki bentuk mirip persegi panjang dan memiliki sepasang tonjolan yang menunjukkan bahwa ada sifat EDLC dan pseudokapasitansi pada sampel. Sampel (PC-X) dengan sedikit H₃PO₄ tampak memiliki area yang jauh lebih besar pada suhu yang sama dengan sampel tanpa H₃PO₄, yang menunjukkan bahwa kapasitansi meningkat akibat penambahan doping.



Gambar 4.10 Kurva GCD Setiap Sampel C-X dan PC-X Pada 0.5A/g (Lin et al.,2020)

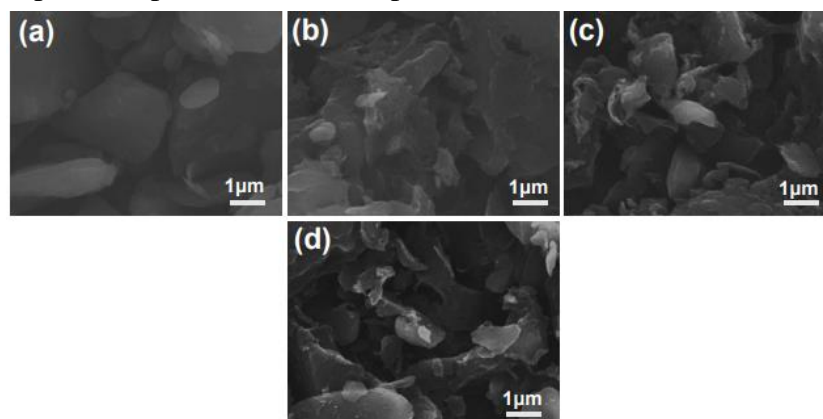
Seperti ditunjukkan pada **Gambar. 4.10**, semua kurva GCD pada rapat arus 0,5 A/g memiliki bentuk mirip segitiga sama kaki, namun tidak sepenuhnya linear yang menunjukan adanya sedikit pseudokapasitansi .



Gambar 4.11 Kapasitansi Sampel C-X dan PC-X Terhadap Rapat Arus (Lin et al.,2020)

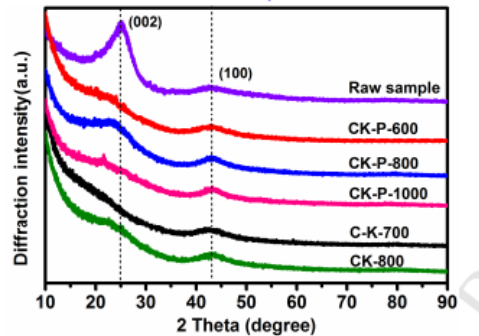
Seperti yang ditunjukkan pada **Gambar.4.11**, kapasitansi dari semua sampel menurun dengan meningkatnya kerapatan arus menurut Chang liu. Hal ini mungkin dikarenakan ion tidak dapat berdifusi ke semua mikropori untuk membentuk EDLC dan beberapa reaksi faradaik yang disebabkan oleh gugus fungsi heteroatom mungkin tidak dapat terjadi pada rapat arus tinggi. Ketika rapat arus dinaikkan dari 0,1 A/g menjadi 0,5 A/g kapasitansi rata rata sampel berkurang 41,99%. sampel PC-900 memberikan kapasitansi tertinggi senilai 292, 169.4, 152.8,136.5, 118.5 dan 98.5 F/g pada rapat arus 0.1, 0.5, 1.0, 2.0 5.0 dan 10.0 A/g.Saat sampel PC-900 diuji pada rapat arus 2 A/g selama 5.000 siklus charge discharge sampel PC-900 menunjukkan stabilitas yang sangat baik dengan tingkat retensi kapasitansi sebesar 98,3%.

Weiping ma *et al* (2018) juga melakukan penelitian serupa menggunakan antrasit sebagai sumber karbon dan H_3PO_4 serta KOH sebagai aktivator ,antrasit yang sudah dihancurkan dan diayak mula-mula di campur dengan KOH dengan perbandingan 4:1 dan di aktivasi pada temperature 700 °C selama 1 jam pada aliran gas argon , hasilnya kemudian di bilas dengan 5wt% HCL dan deionized water sehingga ph netral dan di keringkan pada temperature 110 °C selama 24 jam sampel ini selanjutnya di sebut dengan C-K-700 , sebagian sampel kemudian di tambahkan asam fosfat dengan perbandingan 3:1 kemudian di evaporasi pada temperature 110 °C , setelah itu sampel di aktivasi pada temperature 600, 800 dan 1000 °C selama 1 jam pada aliran gas argon dengan laju pemanasan 3 °C/min , serelah itu hasil aktivasi dibilas dengan deionized water hingga ph netral dan dikeringkan pada temperature 110°C selama 48 jam , hasil aktivasi ke dua ini dinamakan CK-P-X dimana X adalah temperature akivasi . sebagai control C-K-700 di anil pada temperature 800°C tanpa asam fosfat dan disebut CK-800 .



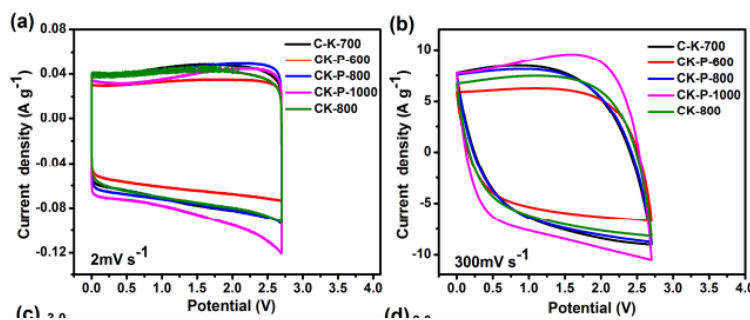
Gambar 4.12 Hasil SEM CK-Material Precursor(a), C-K-700(b), CK-P-800(c), CK-P-1000(d) (Ma et al.,2018)

Gambar 4.12(a) menggambarkan sampel mentah (prekursor karbon) dengan permukaan yang tampak halus dan memiliki struktur padat. Sedangkan pada **Gambar 4.12(b)** struktur sampel pra-aktivasi kedua C-K-700 menyediakan saluran berlimpah untuk masuknya cairan asam fosfat kedalam pori sehingga aktivasi lebih efektif. Setelah aktivasi H_3PO_4 di suhu yang berbeda, gambar SEM dari CK-P-800 dan CK-P-1000 menunjukkan struktur pori yang berkembang dengan baik pada **Gambar 4.12(c) dan (d)**, dinding pori terlihat menipis secara bertahap hal ini dapat diamati dengan jelas pada sampel CK-P-1000 dimana struktur pori yang berhubungan satu sama lain runtuh pada temperature ini. Hal ini bermanfaat untuk difusi ion elektrolit ke bagian internal material.



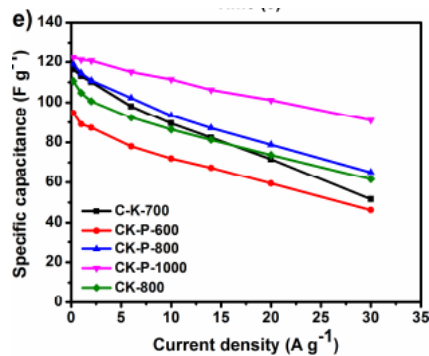
Gambar 4.13 Hasil Pengujian Sampel CK-P-X , CK-800 ,C-K-700 dan Mentah (Ma et al.,2018)

Pola XRD untuk semua sampel yang ditunjukkan pada **Gambar 4.13**, menunjukkan puncak (002) pada $\sim 24^\circ$ dan (100) pada $43,8^\circ$, yang merupakan pola puncak dari material grafit amorfus. Setelah aktivasi KOH, puncak C-K-700 ini menjadi jauh lebih lemah dan lebih luas daripada sampel mentah, menunjukkan perkembangan struktur amorf seiring dengan meningkatnya suhu aktivasi.



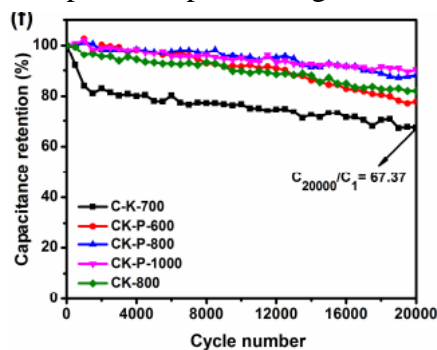
Gambar 4.14 Hasil Pengujian CV Sampel C-K-700 CK-P-X dan CK-800 (Ma et al.,2018)

Seperti yang ditunjukkan pada **Gambar. 4.14(a)**, hampir semua sampel memiliki kurva CV berbentuk persegi panjang semua elektroda pada laju pemindaian 2 mV/s dan menunjukkan sifat EDLC., pada sampel CK-P-1000 terlihat sedikit tonjolan pada pemindaian negatif. Saat laju pemindaian ditingkatkan menjadi 300 mV/s , CK-P-1000 tetap mempertahankan bentuk kurva yang menyerupai persegi panjang sedangkan yang lain berbentuk menyerupai belah ketupat.



Gambar 4.15 Kapasitansi CK-P-X , CK-800 dan C-K-700 (Ma et al.,2018)

Gambar 4.15 Menunjukkan kapasitansi C-K-700, CK-800 dan CK-P-Xs pada rentang kerapatan arus dari 1 hingga 30 A/g Dapat dilihat bahwa kapasitansi C-K-700 menurun tajam menjadi 52 F/g pada 30 A/g dan hanya mempertahankan sekitar 45,61% dari kapasitansi awal. Sebaliknya, CK-P-1000 tetap menjadi yang tertinggi dengan kapasitansi 91 F/g bahkan pada 30 A/g, yaitu sekitar 75,16% dari kapasitansi pada 1 A/g.

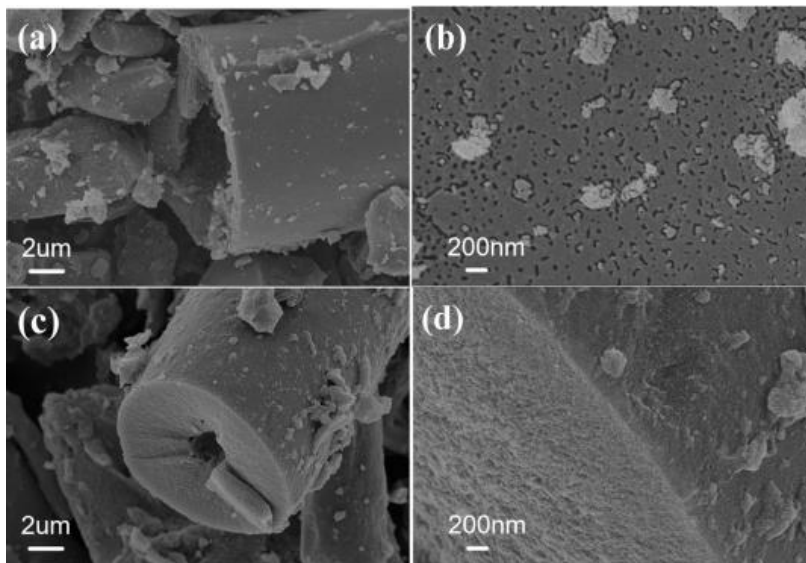


Gambar 4.16 Pengujian Stabilitas CK-P-X , CK-800 dan C-K-700 Sebagai Elektroda (Ma et al.,2018)

Stabilitas jangka panjang C-K-700, CK-800 dan CK-P-X diuji menggunakan GCD. Pada rapat arus 1 A/g dari **Gambar 4.12** CK-P-1000 memiliki rentensi kapasitansi sebesar 90,20% setelah 20000 siklus, sedangkan retensi pada sampel lain yaitu C-K-700, CK-P-600, CK-P-800 dan CK-800 adalah sebesar 67,37%, 78,87%, 88,06% dan 81,25%.

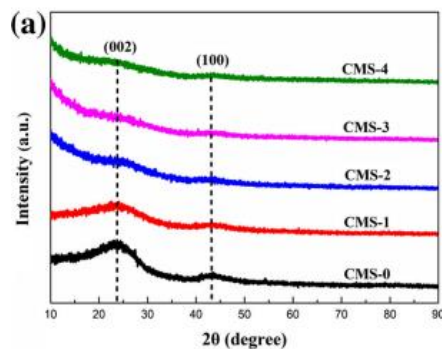
4.1.2 Penambahan Doping Sulfur

Xiang Hu *et al* (2021) melakukan penelitian dengan menggunakan limbah masker sebagai sumber karbon dan Asam sulfat sebagai sumber sulfur , untuk membuat sampel pertama tama Xiang Hu memotong motong masker menjadi potongan potongan kecil dan di campur dengan asam sulfat lalu di reaksikan pada oven dengan autoclave pada temperature 110 °C selama 12 jam serelah itu sampel dibilas dengan deionized water hingga pH netral dan di keringkan dengan oven pada temperature 70 °C selama 12 jam sampel hasil dari proses ini selanjutnya di sebut MS , MS ini dicampur dengan KOH dengan perbandingan massa yang berbeda beda (1:1 , 1:2, 1:3 dan 1:4) dan di karbonasi aktivasi pada temperature 750 °C selama 2 jam pada tubular furnace dengan aliran gas Nitrogen dengan laju pemanasan 5 °C /min sampel ini kemudian di bilas dengan HCL 1M dan di netralkan dengan Deionized water sebelum di keringkan pada temperature 70 °C selama 12 jam , sampel ini selanjutnya di sebut dengan CMS-X dengan X merupakan massa KOH .



Gambar 4.17 Hasil SEM CMS-0 (a dan b) CMS-3 (c dan d) (Hu & Lin,2021)

Aktivasi KOH dapat memunculkan pori baru dan meningkatkan volume serta luas permukaan dari sampel porous carbon. **Gambar 4.17** menunjukkan gambar SEM dari specimen CMS-0 setelah karbonisasi, dapat dilihat struktur pori yang padat muncul pada permukaan. Struktur yang sama juga muncul pada sampel CMS-3 pada **Gambar 4.17c dan d** akan tetapi pada sampel CMS 3 struktur pori terlihat lebih padat dan kecil dibandingkan dengan CMS-0, hal ini mengindikasikan bahwa aktivasi KOH dapat membantu pembentukan mikropori.



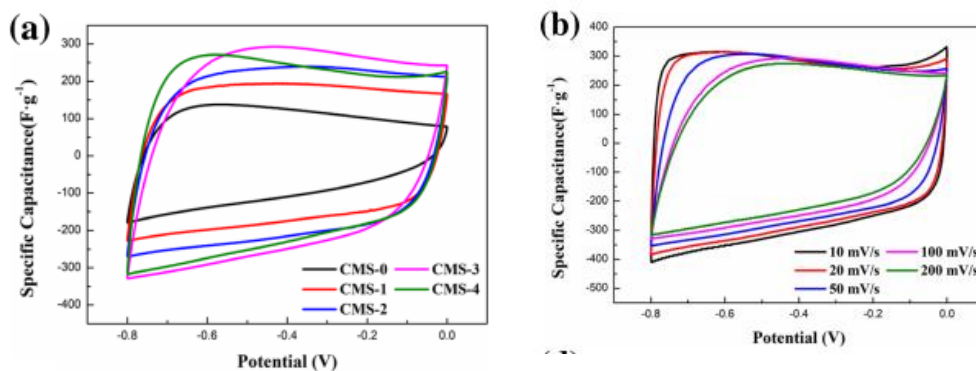
Gambar 4.18 Hasil XRD Sampel CMS-X (Hu & Lin,2021)

Dari **Gambar 4.18** Sampel menunjukkan puncak lebar pada $\sim 23,6^\circ$ dan puncak lemah pada $\sim 43,5^\circ$, yang merupakan karakteristik dari puncak material karbon amorf, Gugus asam sulfonat dapat menginduksi lebih banyak spesies belerang. Atom belerang ini berukuran besar dan menciptakan cacat pada rangka karbon yang memudahkan terjadinya proses aktivasi. Uji BET Juga dilakukan pada sampel CMS dengan hasil yang dapat dilihat pada **Tabel 4.4** dibawah.

Tabel 4.3 Hasil Uji BET Sampel CMS-X (Hu & Lin,2021)

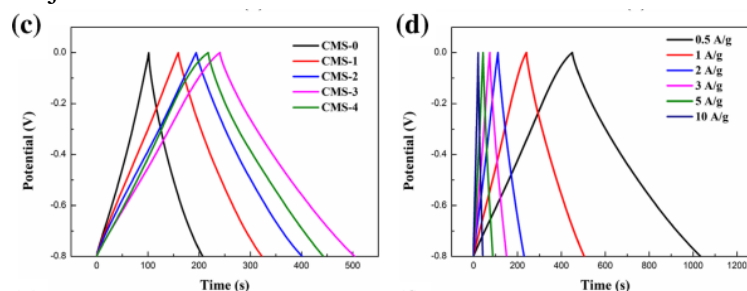
Sampel	S_{BET} (m^2/g)	V_T (cm^3/g)	D_{Avg}
CMS-0	505	0.38	7.49
CMS-1	1146	0.79	8.28
CMS-2	1922	1.10	2.42
CMS-3	2220	1.26	2.48
CMS-4	1768	1.13	2.46

Dengan bertambahnya kadar KOH, maka jumlah mikropori meningkat, menghasilkan luas permukaan secara bertahap meningkat, karena kehadiran gugus asam sulfat dapat menyebabkan lebih banyak cacat pada struktur karbon mempermudah proses aktivasi, dan membentuk struktur pori yang saling berhubungan satu sama lain.



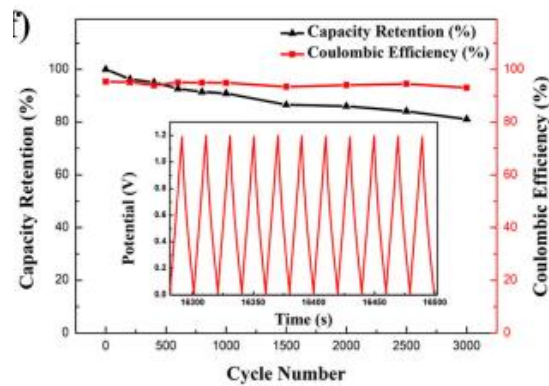
Gambar 4.19 Hasil Pengujian CV Sampel CMS-X (a) dan CMS-3 (b) (Hu & Lin,2021)

Untuk membuat elektroda yang akan digunakan dalam pengujian CV, sampel CMS-X di campurkan dengan binder PTFE dan acetylene black dengan rasio 8:1:1 hingga berbentuk pasta, pasta ini kemudian di oleskan pada nickel foam dan dilakukan pengeringan pada temperature $70^\circ C$ selama 6 jam sebelum di press menjadi elektroda, dari hasil pengujian CV yang dilakukan dengan larutan elektrolit KOH 6M dapat dilihat pada **Gambar 4.19a** setiap sampel menunjukkan kurva berbentuk persegi panjang dari rentang $-0.8V$ sampai $0V$, kurva ini menunjukkan perilaku Electric double layer capacitance (EDLC), semakin besar kurva maka semakin besar nilai kapasitansi yang dimiliki oleh sampel yang dalam kasus ini adalah sampel CMS-3, sampel CMS-3 juga menunjukkan bentuk kurva yang serupa pada scan rate $10 - 200 mV/s$ seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 4.19b**, selain itu didapatkan juga kurva charge discharge dari sampel seperti yang di tunjukan oleh **Gambar 4.20** dibawah.



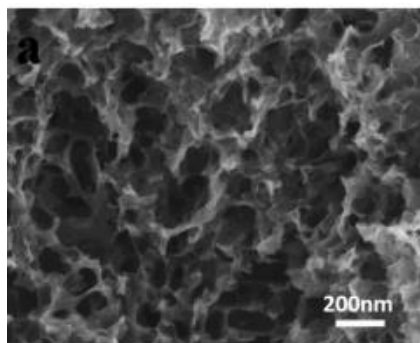
Gambar 4.20 Kurva GCD Setiap Sampel (c) dan Kurva GCD CMS-3 Pada Berbagai Rapat Arus (d) (Hu & Lin,2021)

Kurva GCD pada sampel berbentuk seperti segitiga sama sisi menunjukkan adanya sifat EDLC pada sampel, dari keempat kurva diatas diketahui bahwa sampel CMS-3 memiliki sifat kapasitansi paling baik dengan nilai 365.4F/g pada rapat arus 0.5A/g dan 259.2F/g pada rapat arus 10A/g dengan tingkat retensi 70.9%. Peningkatan kapasitansi disebabkan oleh aktivasi dari KOH yang mengubah struktur karbon menjadi berpori yang mempercepat laju difusi ion dan. Dari hasil pengujian stabilitas di temukan bahwa sampel CMS-3 memiliki retensi sebesar 90.4% setelah 10000 siklus pada rapat arus 15A/g.



Gambar 4.21 Hasil pengujian stabilitas CMS-3

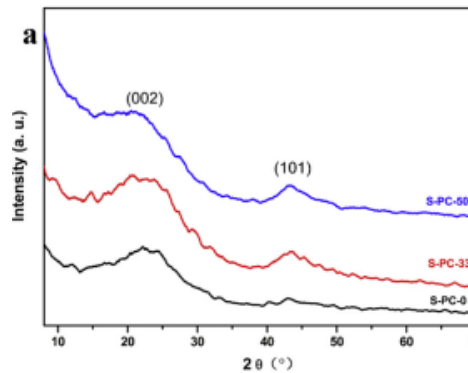
Jingyang tian et al meakukan penelitian sintesis porous carbon yang di doping dengan sulfur menggunakan sodium lignosulfat (LS 2.0g) yang sudah mengandung karbon dan sulfur , LS dimasukan kedalam tabung reaksi dan ditambahkan deionized water kemudian di aduk selama setengah jam hingga LS larut, kemudian di tambahkan KOH dengan jumlah yang bervariasi yaitu 0,33 dan 50% wt relative terhadap LS , setelah diaduk dan KOH larut campuran ini di keringkan pada temperature 110 °C selama 10 jam dan di bilas dengan gas nitrogen selama setengah jam , hasil pembilasan di karbonisasi selama 3 jam pada temperature 900 °C dengan perlindungan gas nitrogen pada laju pemanasan 5 °C /min kemudian hasil karbonisasi di bilas dengan deionized water hingga pH netral dan dikeringkan selama 24 jam pada oven dengan temperature 80C , hasil dari proses sintesis ini selanjutnya dinamakan S-PC-x dengan x kadar KOH .



Gambar 4.22 Hasil SEM SP-C-50 (Tian et al,2018)

Dari hasil sem sampel SP-C-50 dapat dilihat bahwa porous carbon memiliki struktur seperti sarang lebah dengan macropori yang tersebar secara acak yang saling terhubung satu sama lain selain itu dilakukan juga karakterisasi XRD dengan puncak yang berada pada kisaran sudut ~20 dan ~40 derajat yang merupakan karakteristik dari adanya struktur karbon amorf, hasil pengujian XRD dapat dilihat pada **Gambar 4.23** dibawah pada pendopongan ini terjadi

penyusutan puncak setelah pendopongan dan aktivasi dikarenakan adanya defect pada struktur karbon yang menyebabkan peningkatan interlayer spacing.

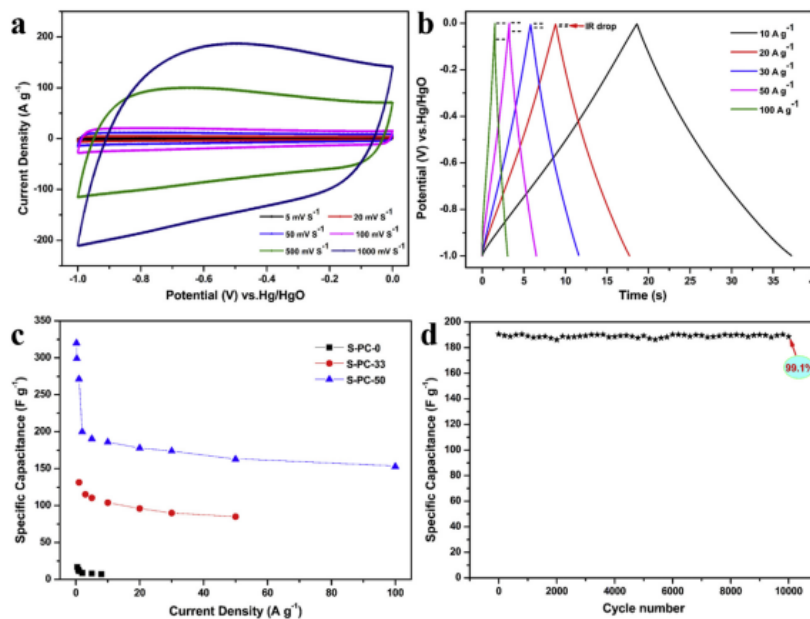


Gambar 4.23 Hasil Uji XRD Sampel S-PC-X (Tian et al.,2018)

Dari pengujian BET pada **Tabel 4.4** diketahui penambahan KOH meningkatkan luas permukaan sampel dari 264,0 (0 wt%) menjadi 1592,2 m²/g (55 wt%), sedangkan volume pori meningkat dari 0,15 cm³/g (0 berat%) menjadi 0,93 cm³/g (55% berat). Peningkatan luas permukaan dan volume pori yang signifikan menunjukkan aktivasi KOH yang efektif.

Tabel 4. 4 Hasil pengujian BET sampel S-PC-X (Tian et al.,2018)

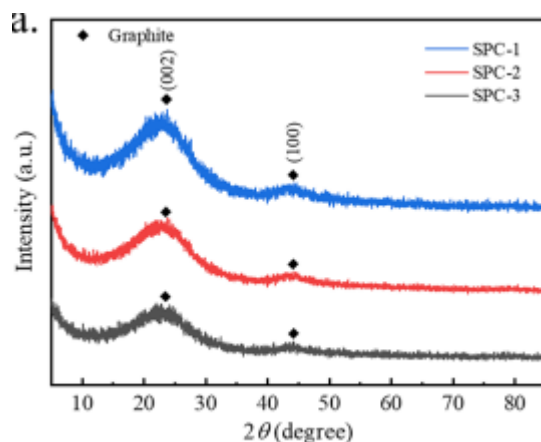
Sampel	S _{BET} (m ² /g)	V _{tot} (cm ³ /g)
S-PC-0	264.0	0.15
S-PC-33	864.0	0.63
S-PC-50	1592.2	0.93



Gambar 4.24 Hasil Pengujian CV Sampel S-PC-50 (a) GCD S-PC-50 (b), Kapasitansi Setiap Sampel (c), pengujian siklus S-PC-50 (d) (Tian et al.,2018)

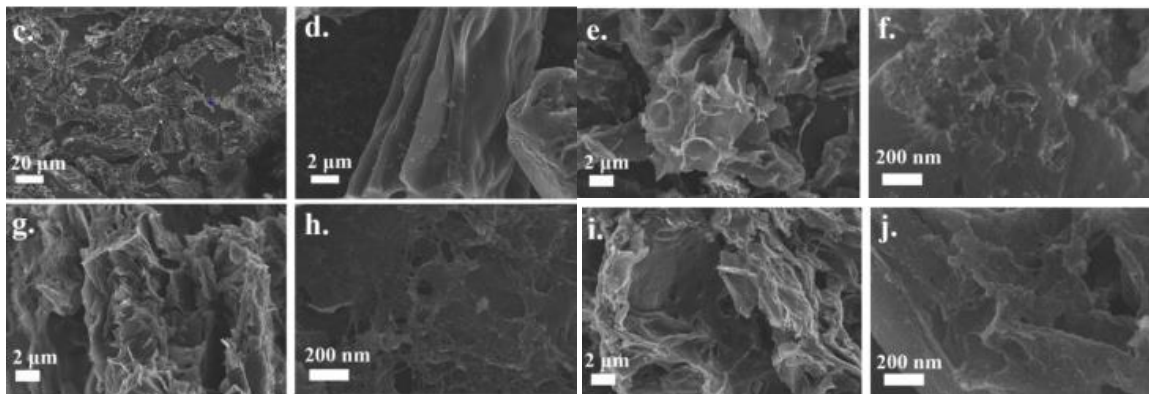
Untuk mengetahui kinerja elektrokimia dari sampel semua sampel diuji dengan pengujian CV dengan elektrolit KOH 6M **Gambar 4.24a** menunjukkan kurva CV dari S-PC-50 pada berbagai laju pemindaian hingga 1000 mV/s dan dalam rentang potensial 1 hingga 0 V. Semua kurva CV menunjukkan bentuk mirip persegi panjang tanpa adanya distorsi yang terlihat jelas bahkan hingga laju pemindaian 1000mV/s hal ini menunjukkan adanya sifat EDLC yang baik pada sampel, sedangkan pada **Gambar 4.24b** kurva GCD menunjukkan bentuk segitiga sama sisi yang menandakan stabilitas arus yang baik, dari kurva itu pula kapasitansi yang ditunjukkan oleh **Gambar 4.24c** dapat di kalkulasi, dari gambar itu diketahui S-PC-50 memiliki kapasitansi spesifik yang paling tinggi sebesar 320F/g pada rapat arus 0.2A/g disusul oleh S-PC-33 dengan nilai 132 F/g dan S-PC-0 11F/g, S-PC-50 memiliki retensi kapasitansi sebesar 76.5% dengan nilai 200F/g pada 2A/g dan 153F/g pada 100A/g, kapasitansi yang baik ini disebabkan oleh tingginya luas permukaan yang mempermudah transfer ion meski pada rapat arus tinggi. Dari hasil pengujian siklus di dapatkan bahwa S-PC-50 memiliki retensi yang sangat tinggi yaitu 99.1% setelah 10000 siklus pada rapat arus 5A/g..

Song Liu *et al* (2022) menggunakan Ulthorix, sejenis ganggang untuk membuat porous karbon untuk aplikasi superkapasitor, untuk membuat porous carbon Pertama, ulothrix yang bersih dan kering di pirolisis dalam atmosfer nitrogen pada temperature 500 ° C selama 1 jam, sampel dicampur dan digiling dengan bubuk KOH di a dengan rasio massa 1: 1, 1: 2, dan 1: 3. Kemudian campuran tersebut dicampur dengan serbuk KOH dalam mortar. Kemudian campuran diaktifkan di atmosfer nitrogen pada temperature 800 ° C selama 1 jam pada laju pemanasan 3 ° C/min. Setelah pendinginan ke suhu kamar, sampel dibilas beberapa kali dengan 2 M HCl dan deionized water. Akhirnya, sampel dikeringkan semalam dalam ruang hampa pada 120 ° C. selanjutnya sampel diberi nama SPC-1, SPC-2, dan SPC-3..



Gambar 4.25 Hasil XRD Sampel SPC (Liu et al., 2022)

Pola XRD dari sampel SPC ditunjukkan pada **Gambar 4.25**, ketiga kurva menunjukkan dua puncak difraksi khas pada 2 teta ~24 dan ~43 °, sesuai dengan bidang (002) dan (100) yang menandakan struktur grafit amorfus, puncak yang luas ini menunjukkan bahwa setelah pirolisis dan aktivasi SPC memiliki struktur karbon amorf dengan tingkat grafitisasi yang rendah.



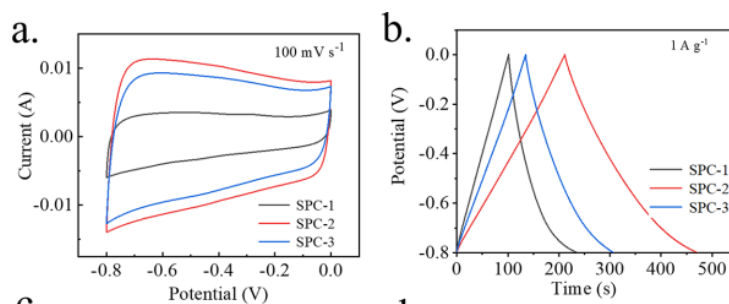
Gambar 4.26 Hasil SEM Porous Carbon (c-d), SPC-1 (e-f), SPC-2 (g-h) , SPC-3 (i-j) (Liu et al., 2022)

Foto SEM struktur setelah pirolisis pada (**Gambar 4.26c, d**), menunjukkan banyak kerutan pada permukaan sampel yang halus sedangkan Semua sampel SPC menunjukkan banyak partikel kecil yang tidak beraturan dengan pori-pori yang terusun dari berbagai ukuran. Mesopori yang dihasilkan oleh proses aktivasi dengan ukuran beberapa nanometer dapat ditemukan pada gambar resolusi tinggi SPC-1 (**Gambar 4.26f**). Untuk SPC-2 dan SPC-3, terlihat lebih banyak pori-pori di permukaan. dibanding sampel lainnya. Luas permukaan spesifik, ukuran pori distribusi pori, dan volume pori dari sampel SPC dihitung berdasarkan hasil uji adsorpsi BET dapat dilihat pada **Tabel 4.5** Luas permukaan spesifik SPC-1-SPC-3 adalah 1944, 2490, dan 2018 m^2/g dan distribusi ukuran pori dari SPC-1- SPC-3 masing-masing adalah 4,32, 5,33, dan 6,10 nm, menunjukkan adanya struktur mesopori dalam lembaran karbon.

Tabel 4.5 Hasil uji BET Sampel SPC-X (Liu et al., 2022)

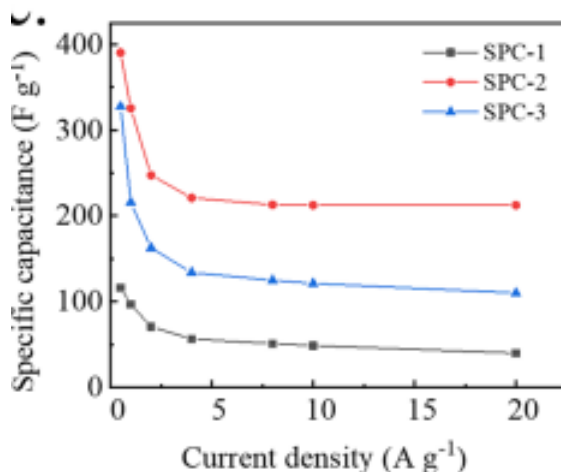
Sampel	S_{BET} (m^2/g)	V_{T} (cc/g)	D_{AVG} (nm)
SPC-1	1944	0.615	4.32
SPC-2	2018	0.532	5.33
SPC-3	2490	0.835	6.10

Untuk melakukan pengujian CV elektroda kerja disiapkan dengan mencampurkan SPC dengan binder PVDF di N-methyl-2-pyrrolidinone membentuk pasta , pasta ini selanjutnya dioleskan pada nickle foam dan di keringkan dalam keadaan kedap udara di temperature 80°C Semalaman ..



Gambar 4.27 Hasil CV Sampel SPC (Liu et al., 2022)

Seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 4.27a**, semua kurva CV pada laju pemindaian 100 mV/s memiliki bentuk persegi panjang, yang merupakan ciri khas sifat EDLC Pengukuran GCD pada kerapatan arus 1 A/g ditunjukkan pada **Gambar 4.27b** menunjukkan kurva GCD sampel memiliki bentuk segitiga yang relatif simetris. dari kurva GCD diperoleh, kapasitansi. Pada 1 A/g untuk elektroda SPC-1- SPC-3 adalah sebesar 97,02, 325,51, dan 215,75 F g⁻¹.

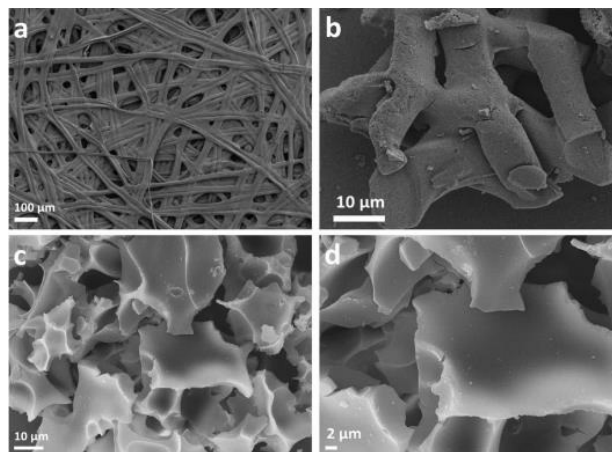


Gambar 4.28 Retensi Kapasitansi Spesifik Sampel Terhadap Rapat Arus (Liu et al., 2022)

Berdasarkan hasil pengukuran GCD, kapasitansi spesifik dari elektroda SPC pada kepadatan arus yang berbeda ditunjukkan pada **Gambar 4.28**. Pada 0,5 A/g , elektroda SPC-1-SPC-3 menampilkan kapasitansi spesifik tertinggi sebesar 116,31, 390,38, dan 327,50 F/g . Bahkan pada 20 A/g , kapasitansi spesifik masing masing sampel adalah 40,71, 212,46, dan 110,29 F/g.Sedangkan setelah 10.000 siklus charge-discharge pada 2A/g, elektroda SPC menunjukkan retensi kapasitansi yang baik dimana, elektroda SPC-1-SPC-3 masih memiliki kapasitansi senilai 88,2, 210,2, dan 129,6 F/g atau 92,0, 91,0, dan 87,8%.

4.1.3. Penambahan Doping Nitrogen

Chao long *et al* (2016) melakukan penelitian pendopingan Nitrogen untuk porous carbon dengan menggunakan karbon yang di dapatkan dari kepompong *Bombyx mori* sebagai sumber nitrogen sekaligus karbon, kepompong ini di pre-karbonisasi di dalam tube furnace dengan temperature 400 °C didalam laju gas nitrogen selama 2 jam dengan laju pemanasan 2 °C /min kemudian hasil pre karbonisasi ini di tumbuk menjadi bubuk dan di campur dengan KOH dengan perbandingan KOH : Material 3:1. Setelah itu sampel di aktvasi pada temperature dengan variasi berbeda yaitu 600 , 700 , 800 dan 900 °C selama 2 jam dalam atmosfer gas argon dengan laju pemanasan 5 °C /min , setelah itu sampel dibilas dengan larutan HCl 2M dan deionized water , hasil akhir pembilasan di keringkan dengan oven pada temperature 80 °C selama semalaman.



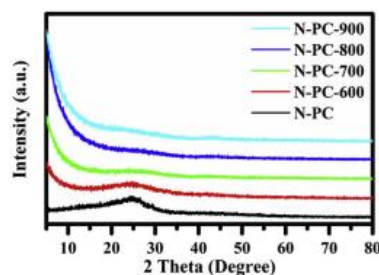
Gambar 4. 29 Hasil SEM *Bombyx mari* (a) Sampel pre-Karbonisasi (b) Sampel N-PC (c dan d) (Long et al.,2016)

Dari hasil SEM pada **Gambar 4.29a** dapat dilihat struktur menyerupai benang benang dari kepompong *Bombyx Mari* pada **Gambar 4.29b** setelah proses pre-karbonisasi dapat dilihat bahwa sampel masih menyisakan struktur seperti pada sampel mentah, area sisa ini dapat menjadi situs aktivasi setelah penambahan KOH nanti seperti yang terlihat pada **Gambar 4.29c dan d** setelah penambahan KOH dan aktivasi struktur yang tadinya tersambung menjadi hancur dan berbentuk tidak teratur dan kusut.

Tabel 4. 6 Hasil Pengujian BET Sampel N-PC (Long et al.,2016)

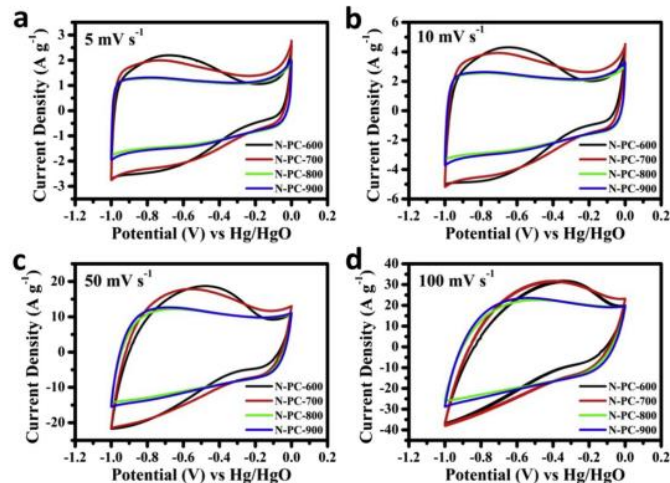
Sampel	$S_{BET}(m^2/g)$	$S_{Mic}(m^2/g)$	$S_{Mes}(m^2/g)$	$V_{Pore}(cm^3/g)$	$V_{Mic}(cm^3/g)$	$V_{Mes}(cm^3/g)$	$D_{Avg}(nm)$
N-PC-600	2558	2084	474	1.19	0.86	0.33	1.86
N-PC-700	3841	2520	1321	2.08	1.12	0.96	2.17
N-PC-800	3498	1785	1713	2.21	0.78	1.43	2.50
N-PC-900	3132	1242	1890	2.33	0.65	1.68	2.98

Dari hasil pengujian BET dapat dilihat bahwa Saat suhu aktivasi meningkat dari 600 hingga 700°, baik luas permukaan dan volume pori meningkat. Namun, luas permukaan menurun drastis secara berurutan pada suhu aktivasi 800-900 C sedangkan volume pori masih meluas, yang terutama karena runtuhnya mikropori dan pembentukan mesopori baru



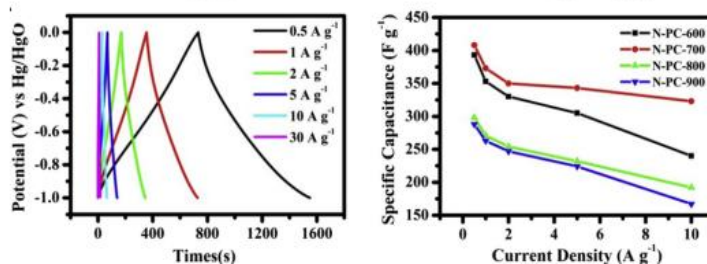
Gambar 4. 30 Hasil XRD Sampel N-PC dan N-PC-X (Long et al.,2016)

Sedangkan dari hasil XRD sampel menunjukkan struktur khas karbon amorf dengan puncak pada sudut 20 25 derajat seperti yang di tunjukan pada **Gambar 4.30** dapat dilihat pula ternjadi penurunan puncak setelah pendopingan yang dikarenakan defect yang disebabkan oleh pendopingan.



Gambar 4. 31 Hasil Uji CV Sampel N-PC pada Berbagai Rapat Arus (Long et al.,2016)

Gambar 4.31 menunjukkan kurva CV N-PC dari rentang arus 1,0 V ke 0 V pada berbagai laju pemindaian, sampel N-PC menunjukkan sifat EDLC selain itu terdapat tonjolan yang luas yang dapat diamati pada potensial 0,5 V dalam kurva CV pada scan rate rendah (hal ini nampak terutama pada sampel N-PC-600 dan N-PC-700). Hal ini mungkin diakibatkan oleh reaksi heteroatom nitrogen yang digunakan. Dapat diliht pula bahwa sampel N-PC-700 menunjukkan rapat arus tertinggi yang disebabkan oleh luas permukaan terbesar dan ukuran pori yang sesuai, kedua hal itu memudahkan difusi ion yang lebih efisien, hal itu juga menunjukkan bahwa N-PC-700 adalah sampel yang paling menjanjikan untuk elektroda superkapasitor.

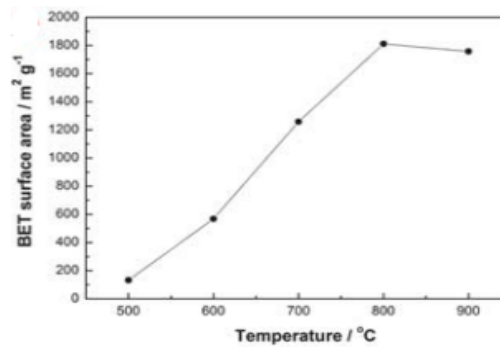


Gambar 4. 32 Kurva GCD Sampel N-PC-700 dan Kapasitansi Setiap Sampel (Long et al.,2016)

Gambar 4.32 menunjukkan kurva GCD N-PC-700 pada rapat arus yang berbeda dengan kerapatan arus berkisar dari 0,5 hingga 30 A/g. N-PC-700 menunjukkan kapasitansi spesifik yang sangat tinggi sebesar 408 F/g pada rapat arus 0,5 A/g pada kepadatan arus tinggi (30A/g) N-PC-700 masih mempertahankan kapasitansi spesifik yang tinggi yaitu 235 F/g. Kapasitansi spesifik setiap sampel juga dapat dilihat pada **Gambar 4.32** Dapat diamati bahwa kapasitansi spesifik dari semua sampel menurun saat kerapatan arus meningkat hal ini dikarenakan pada kerapatan arus tinggi ion pada elektrolit tidak memiliki waktu untuk berdifusi kedalam pori.,Stabilitas jangka panjang dari elektroda N-PC-700 diuji melalui pengukuran GCD pada

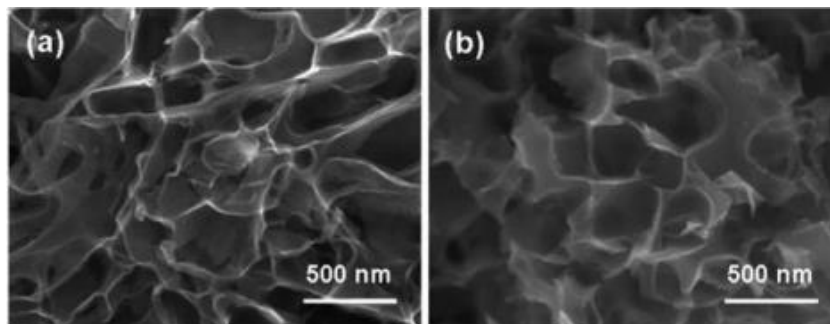
kerapatan arus 25 A/g. Material N-PC-700 hanya menunjukkan sedikit penurunan kapasitas spesifik setelah 20.000 siklus dengan retensi senilai 96%.

Bin Xu *et al* (2013) melakukan penelitian menggunakan sodium EDTA sebagai sumber karbon sekaligus nitrogen EDTA dipanaskan dalam tube furnace selama 2 jam pada temperature dengan variasi 500,600,700,800,900°C di dalam aliran gas nitrogen sebagai pelindung, setelah proses pirolisis hasilnya di bilas dengan HCl dan deionized water.



Gambar 4. 33 Hasil Uji BET Sampel EDTA / ENM (Xu et al.,2013)

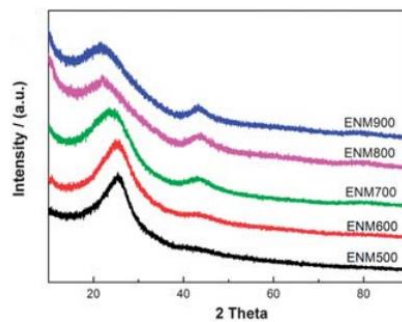
Dari **Gambar 4.33** dapat dilihat bahwa Luas permukaan BET dari ENM500 hanya sebesar 132 m²/g Nilai tersebut meningkat seiring dengan suhu pirolisis dan mencapai maksimum 1811 m²/g pada 800 C jauh lebih tinggi dari 1000 m²/g untuk karbon aktif yang dibuat dengan cara konvensional.



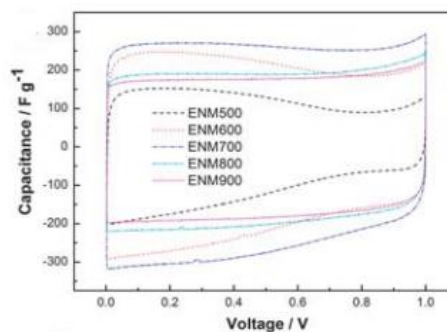
Gambar 4. 34 Hasil SEM ENM700 (a) dan ENM900 (b) (Xu et al.,2013)

Seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 4.34 a dan b**, hasil SEM sampel ENM-700 dan ENM-900 menunjukkan morfologi seperti karang dengan banyak pori-pori. Sampel yang disiapkan pada suhu yang lebih tinggi memiliki pori-pori besar yang lebih banyak .

Dari hasil XRD seperti yang terlihat pada **Gambar 4.35**, semua sampel hanya menunjukkan satu puncak difraksi yang meluas yang jelas pada sudut ~22-25 dengan puncak difraksi (002), hal ini menunjukkan bahwa struktur dari sampel adalah karbon amorf. Ketika suhu pirolisis meningkat, posisi puncak sedikit bergeser ke sudut yang lebih kecil, mengindikasikan peningkatan jarak antar lapisan grafena, yang mungkin diakibatkan oleh peningkatan cacat atau defect pada stuktur pori.



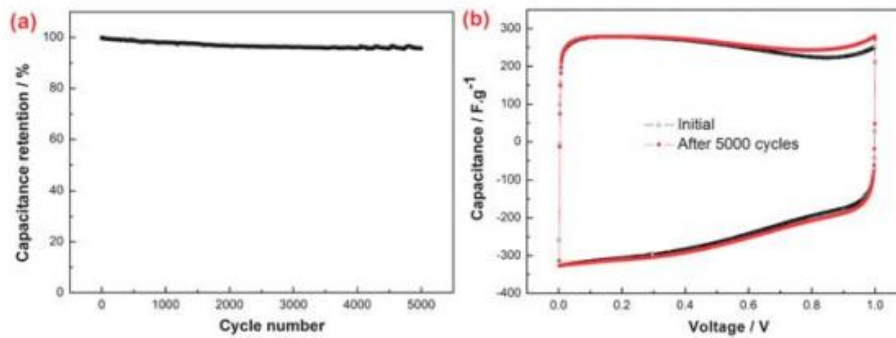
Gambar 4.35 Hasil XRD Sampel ENMx (Xu et al.,2013)



Gambar 4.36 Hasil Pengujian CV Sampel ENM (Xu et al.,2013)

Kapasitansi spesifik dari sampel EDTA pada rapat arus 0.05A/g dapat dilihat pada **Gambar 4.36** diatas, doping nitrogen dapat meningkatkan pseudocapacitance dan menurut Bin hal ini dibuktikan dengan luas permukaan BET ENM500 yang hanya 132 m²/g namun ENM500 memiliki kapasitansi sebesar 130 F/g. Ketika suhu pirolisis meningkat maka luas permukaan akan meningkat, menghasilkan peningkatan sifat EDLC, sedangkan kandungan nitrogen yang menurun membuat penurunan sifat pseudocapacitance. ENM700 yang disiapkan pada 700 C menunjukkan nilai kapasitansi spesifik maksimum 281 F/g karena memiliki luas permukaan yang tinggi (1258 m²/g) namun saat suhu pirolisis melebihi 800 C, meskipun luas permukaan dari sampel meningkat menjadi 1800 m²/g, kapasitansinya menurun menjadikannya 206 F/g pada 800 C dan 181 F/g pada 900 C, dikarenakan rendahnya kandungan nitrogen yang tersisa dalam sampel.

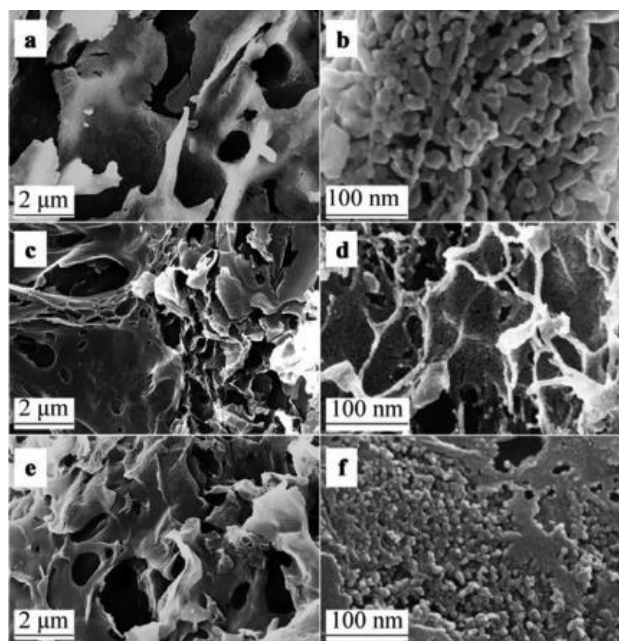
Sampel dengan temperature pirolisis yang lebih tinggi memiliki retensi kapasitansi yang lebih baik saat rapat arus dinaikan, sebagai contoh saat rapat arus dinaikan secara bertahap dari 0,05A/g hingga 5A/g, kapasitansi ENM500 bertahan sekitar 33,9% sedangkan pada sampel ENM900 kapasitansi dapat bertahan hingga 88,7%, peningkatan retensi seiring dengan peningkatan temperature pirolisis ini menurut Bin terkait dengan peningkatan konduktivitas dari sampel, dan kontribusi yang lebih rendah oleh pseudo-kapasitansi, yang memiliki daya tahan lebih rendah pada temperature tinggi ketimbang EDLC dikarenakan polarisasi elektrokimia.



Gambar 4.37 Hasil Pengujian Siklus Sampel ENM700 (Xu et al.,2013)

Untuk mengetahui stabilitas elektrokimia dari disodium magnesium EDTA yang berasal dari karbon, dilakukan pengujian *Cyclic Voltammetry* terhadap sampel ENM700 pengujian ini dilakukan pada rapat arus sebesar 0,6 A/G seperti yang dapat dilihat pada **Gambar 4. 37**. setelah 5000 siklus, kapasitansi hanya menurun sebesar 4,5%, Kurva CV dari gambar yang sama juga menunjukkan bahwa sifat pseudocapacitance yang dihasilkan oleh nitrogen tetap ada dan stabil setelah melalui 5000 siklus.

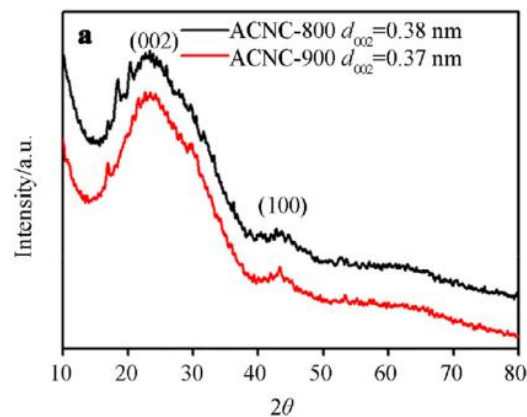
Shizeng *et al* (2021) melakukan pendopingan nitrogen terhadap porous carbon yang berasal dari chitin Pertama Tama, nanogel kitin yang didispersikan dalam urea/NaOH/air didialisis sampai rasio berat NaOH-kitin mencapai 1:1. Dengan sisa urea sebagai sumber nitrogen dan natrium hidroksida sebagai aktivator, nanogel kitin kering dipanaskan pada temperatur 800 ° C atau 900 ° C selama 2 jam, di dalam atmosfer Ar dengan laju pemanasan 3 ° C / menit dalam tubular furnace. Selanjutnya, serbuk hitam yang dihasilkan dibilas dengan dengan 1 mol / L HCl dan deionized water berulang kali untuk menghilangkan kotoran. Sebelum akhirnya, sampel dibekukan dengan nitrogen cair dan dikeringkan dengan freeze dryer, masing-masing sampel diberi kode i ACNC-800 dan ACNC-900.



Gambar 4.38 Hasil SEM Chitin nanogel (a,b) ACNC-800 (c,d) ACNC-900 (e,f) (Zheng et al.,2021)

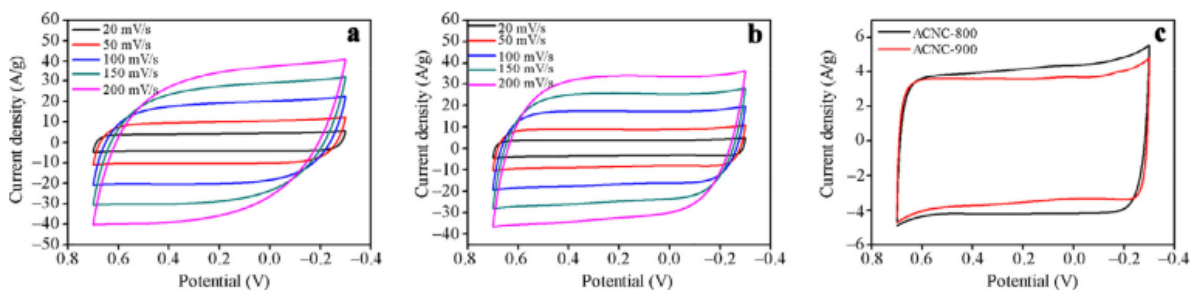
Morfologi setiap bahan dikarakterisasi menggunakan SEM seperti yang terlihat pada **Gambar 4.38** diatas. sampel nanogel terlihat memiliki pori-pori yang terbuka secara acak, serta celah-celah pada dinding pori (**Gambar 4.38a**). Dari gambar perbesaran tinggi (**Gambar 4.38b**), terlihat banyak nanopartikel yang saling berdekatan membentuk struktur yang saling berhubungan. Sementara itu struktur karbon yang telah teraktivasi masih mempertahankan struktur asli dari nanogel chitin seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 4.38c-f**. Disamping itu banyak mikropori, mesopori dan makropori tercipta karena aktivasi NaOH. Dengan mekanisme aktivasi menurut Zheng yaitu :

- 1) rangka karbon ter etsa oleh reaksi redoks antara NaOH dan karbon, menginduksi pembentukan pori-pori.
- 2) Gas perantara (CO₂, H₂O) selanjutnya bereaksi dengan karbon mengembangkan porositas.
- 3) Interkalasi Na menghasilkan perluasan kisi-kisi karbon Struktur berpori berlapis-lapis yang saling terhubung dengan baik ini memperpendek jarak transportasi ion.



Gambar 4.39 Hasil XRD Sampel ACNC-800 dan ACNC-900 (Zheng et al.,2021)

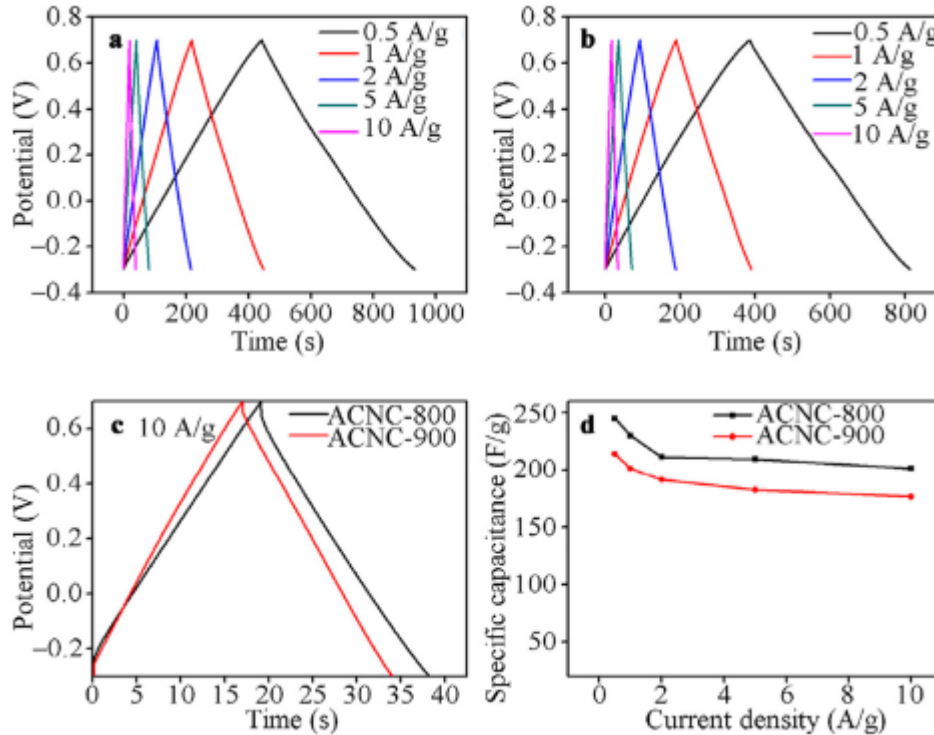
. Pola XRD Pada **Gambar 4.39** menunjukkan bahwa kurva XRD memiliki puncak pada $\sim 23^\circ$ dan pada $\sim 43^\circ$, sesuai dengan bidang (002) dari struktur kristal grafit dan (100) refleksi bidang dari fase amorf. Dan berdasarkan perhitungan, jarak antar lapisan atau interlayer spacing untuk ACNC-800 adalah 0,38 nm dan 0,37 nm untuk ACNC-900, dimana keduanya lebih besar dari grafit (0,336 nm) .



Gambar 4. 40 Kurva CV ACNC-800 (a) ACNC-900 (b) dan ACNC-800 vs ACNC-900 (Zheng et al.,2021)

Performa elektrokimia diuji menggunakan pengujian CV dengan elektrolit asam sulfat **Gambar 4.40a dan b** menunjukkan kurva CV ACNC-800 dan ACNC-900 pada laju pemindaian yang berbeda. Dapat dilihat bahwa. Semua kurva berbentuk seperti persegi

panjang, yang merupakan ciri dari sifat EDLC Sedikit tonjolan atau distorsi pada kurva dapat disebabkan oleh pseudocapacitance yang dihasilkan oleh doping, kurva ACNC-800 yang lebih lebar menunjukkan kapasitansi yang lebih baik sebagai akibat dari lebih banyak cacat pada struktur grafit dan kandungan nitrogen.



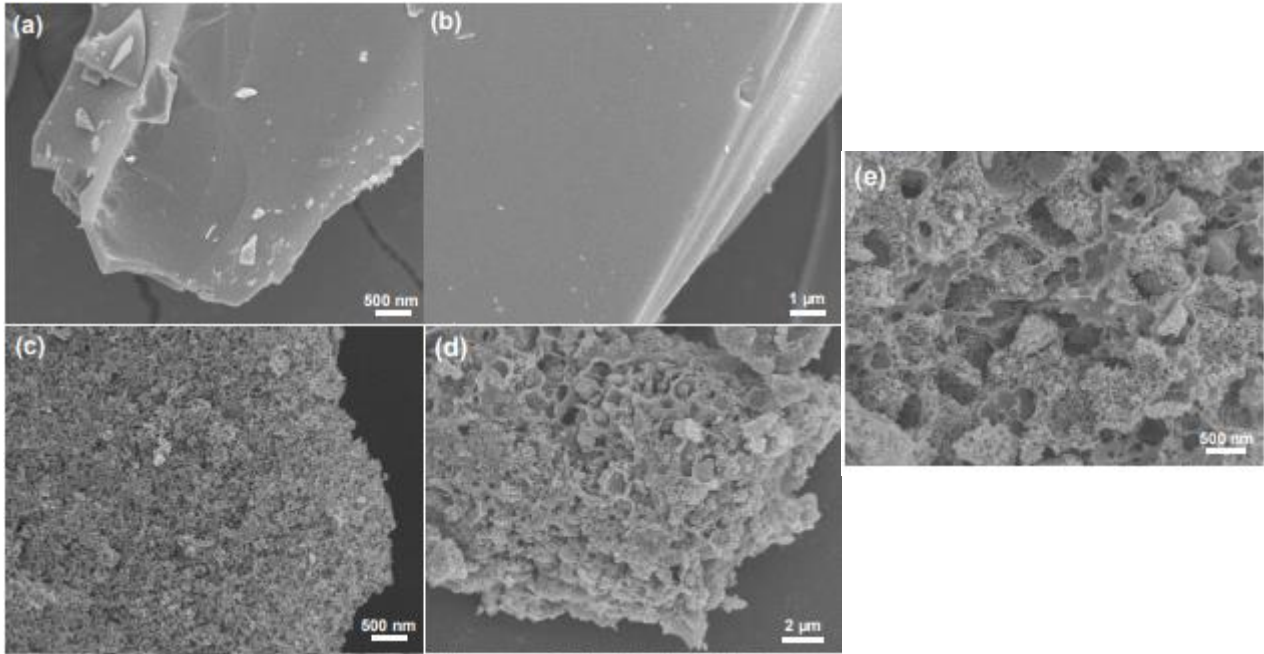
Gambar 4.41 Kurva GCD ACNC-800 (a) dan ACNC-900 (b) GCD Pada Rapat Arus 10A/g (c) dan Plot Kapasitansi Spesifik (d) (Zheng et al.,2021)

Kurva GCD ACNC-800 dan ACNC-900 pada kerapatan arus yang berbeda seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 4.41a dan b** hampir linier dengan bentuk segitiga sama kaki, hal ini menunjukkan kinerja charge discharge yang baik **Gambar 4.41c** menunjukkan kurva GCD pada rapat arus 10A/g, untuk kedua sampel dari kurva GCD ini kapasitansi dapat dihitung dan di plot sesuai **Gambar 4.41d** dimana nilai kapasitansi spesifik akan menurun seiring dengan meningkatnya kepadatan arus Pada 0,5, 1, 2, 5, 10 A / g, kapasitansi spesifik ACNC-800 adalah 245, 230, 212, 210, 202 F / g, dengan tingkat retensi kapasitansi 82%; sedangkan kapasitansi spesifik ACNC-900 adalah 214, 201, 192, 183, 177 F / dengan tingkat retensi 83%. Kapasitansi spesifik ACNC-800 dan ACNC-900 lebih tinggi daripada CNC-800 dan CNC-900, hal ini dikarenakan fakta bahwa doping nitrogen yang lebih banyak dan aktivasi NaOH secara efektif meningkatkan kinerja kapasitor Selain itu, sampel ACNC-800 menunjukkan stabilitas bersepeda yang luar biasa dengan retensi kapasitansi 98% setelah 10.000 siklus pengisian / pengosongan pada kepadatan arus tinggi 10 A / g.

4.1.4. Penambahan Doping boron

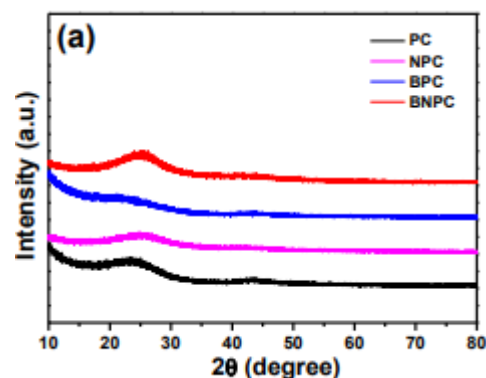
Dong Guo *et al* (2018) melakukan pendopongan boron dan nitrogen kepada porous carbon yang berasal dari carbon foam untuk melakukan sintesis material pertama-tama Dong Guo melarutkan 2 gram urea dan 2 gram asam borat dengan air suling pada temperature 80C kemudian selama proses pengadukan 2 gram tepung dan 2 gram $ZnCl_2$ di tambahkan, hasil dari proses ini kemudian di keringkan semalaman pada temperature 85°C, setelah itu sampel di

panaskan pada temperature 700°C selama 2 am di dalam aliran gas nitrogen kemudian di bilas dengan Hcl dan air suling dan dikeringkan kembali pada temperature 85°C sampel hasil sintesis ini selanjutnya dinamakan BNPC , sebagai pembanding sampel tanpa urea , asam borat dan tanpa keduanya juga disiapkan dengan cara yang sama yang selanjutnya disebut dengan BPC , NPC dan PC.



Gambar 4.42 Hasil sem PC (a), NPC (b) BPC (c) BNPC (d, e) (Guo et al.,2018)

Mikrostruktur dari sampel yang diperoleh dianalisa dengan menggunakan SEM. Seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 4.42a**, PC memiliki struktur blok tanpa adanya pori-pori yang tampak. Morfologi serupa dapat diamati untuk NPC (**Gambar 4.42b**). Sebaliknya, sampel BPC dan BNPC (**Gambar 4.42c, d, e**) menunjukkan struktur berpori dengan makropori yang tersebar. Pada resolusi yang diperbesar hasil SEM pada sampel BNPC menunjukkan struktur pori yang saling berhubungan. sementara dari hasil XRD didapatkan bahwa sampel memiliki puncak pada 25 dan 44 derajat dengan bidang 002 dan 100, puncak lebar yang dimiliki oleh sampel menandakan bahwa sampel memiliki struktur karbon amorfus.



Gambar 4.43 Hasil XRD Sampel PC , NPC , BPC , BNPC (Guo et al.,2018)

Dari hasil uji BET diketahui sampel BNPC memiliki luas permukaan spesifik 933 m²/g , nilai ini lebih rendah dari sampel lainnya. Tercatat bahwa nilai S_{MIC} atau luas mikropori BNPC

lebih rendah daripada PC, NPC dan BPC, tetapi nilai kapasitansi dari BNPC lebih tinggi daripada PC, NPC dan BPC, yang menunjukkan bahwa bagian sebagian mikropori pada sampel BNPC menghilang selama proses co-doping B, N. Distribusi ukuran pori BPC dan BNPC jauh lebih luas daripada PC dan NPC, yang lebih menguntungkan untuk transportasi ion yang lebih efisien.

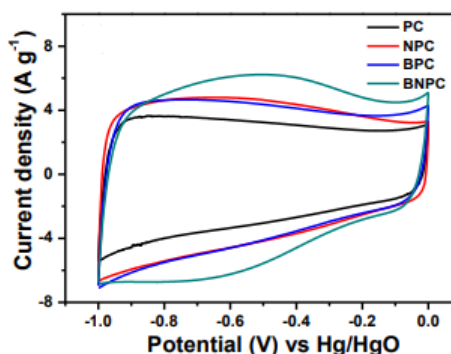
Tabel 4.7 Hasil Uji BET Sampel BNPC, NPC, BPC dan PC (Guo et al.,2018)

Sampel	$S_{BET}(m^2/g)$	$S_{Mic}(m^2/g)$	$S_{Mes}(m^2/g)$	S_{Mic}/S_{mes}	$V_{Tot}(cm^3/g)$	$D_{AVG}(nm)$
PC	1158	1022	136	0.11	0.598	2.1
NPC	1402	1150	252	0.22	0.846	2.4
BPC	1458	1166	292	0.23	1.563	4.3
BNPC	933	618	315	0.51	1.034	4.4

Komposisi kimia dari sampel tercantum pada **Tabel 4.8** dibawah. Kandungan doping N pada sampel BNPC (9,38 at. %) lebih tinggi daripada NPC (7,22at.%). Sedangkan kandungan doping B untuk BNPC adalah 3,87 at. %, yang hampir tiga kali lipat lebih tinggi dari BPC (1,22 at.%). Hasil ini menunjukkan bahwa metode co-doping B dan N dapat meningkatkan jumlah doping B dan N secara sinergis dan meningkatkan efisiensi pendopongan Boron dan nitrogen.

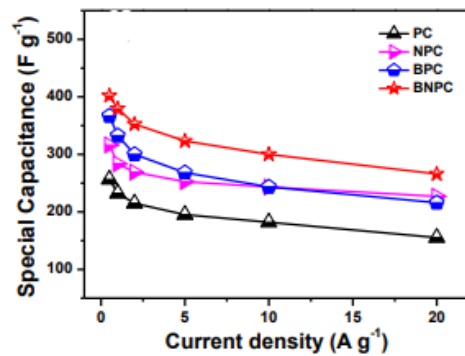
Tabel 4.8 Komposisi Kimia Sampel BNPC, NPC, BPC dan PC (Guo et al.,2018)

Sample	C at%	O at%	N at%	B at%
PC	87.76	12.24	0	0
NPC	80.16	12.62	7.22	0
BPC	85.3	12.85	0	1.22
BNPC	75.21	11.54	9.38	3.87



Gambar 4.44 Kurva CV Sampel BNPC, BPC, NPC dan PC (Guo et al.,2018)

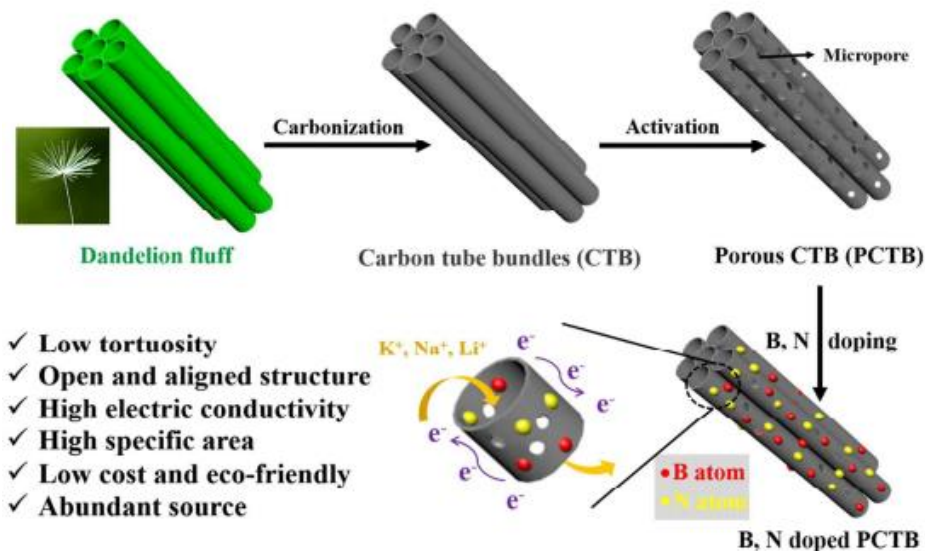
Dibandingkan dengan PC, kurva CV elektroda NPC menunjukkan sedikit tonjolan dikarenakan doping nitrogen dapat memberikan reaksi Faradik yang menyebabkan munculnya sifat pseudocapacitance. Dibandingkan dengan PC, kurva CV elektroda BPC menunjukkan bentuk seperti persegi panjang yang lebih besar karena doping boron meningkatkan kapasitansi spesifik material karbon. Seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 4.44** diatas, elektroda BNPC menunjukkan area kurva CV yang lebih besar daripada elektroda PC, NPC dan BPC. Hal ini disebabkan pendopongan boron dan nitrogen secara sinergis meningkatkan kapasitansi spesifik material karbon.



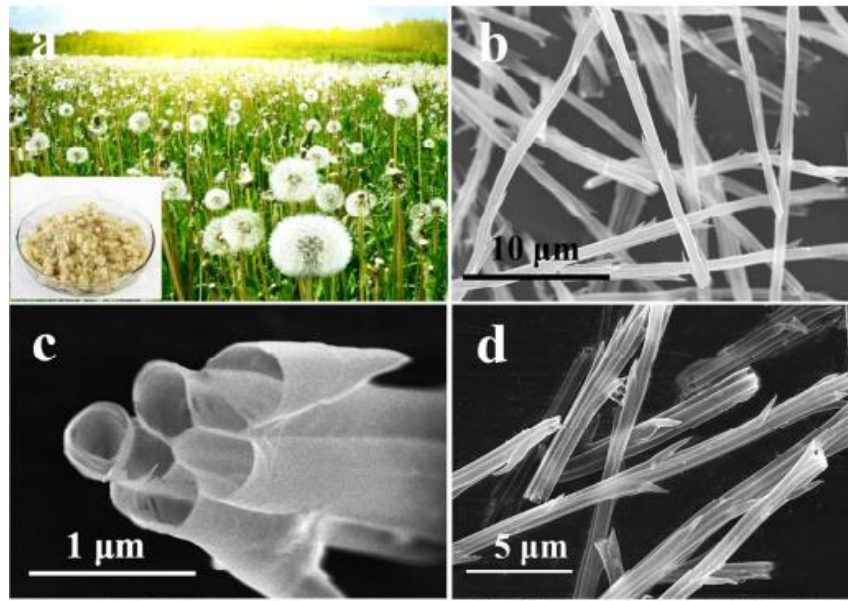
Gambar 4.45 Kapasitansi Spesifik Sampel BNPC , NPC, BPC dan PC(Guo et al.,2018)

Elektroda BNPC menunjukkan kapasitas spesifik yang sangat tinggi sebesar 402 F/g pada 0,5 A/g yang lebih tinggi daripada elektroda PC (256 F/g pada 0,5 A/g), elektroda NPC (316 F/g pada 0,5 A/g), BPC (367 F/g pada 0,5 A/g) pada rapat arus tinggi 20 A/g, elektroda BNPC mampu mempertahankan kapasitansi spesifik yang tinggi sebesar 266 F/g. Stabilitas BNPC sebagai elektroda diuji dengan Pengukuran CV pada 200 mV/s menunjukkan BNPC memiliki rentensi sebesar 87% setelah 10000 siklus yang menunjukkan menunjukkan stabilitas elektrokimia yang baik. Berkurangnya kapasitansi ini diakibatkan oleh dekomposisi parsial gugus fungsi heteroatom doping pada permukaan selama proses pelepasan muatan atau discharging.

Dalam penelitiannya Jing Zhao *et al* (2017) menggunakan bulu bunga dandelion untuk membuat elektroda superkapasitor yang di doping dengan boron dan nitrogen dengan skema pembuatan yang dapat dilihat pada **Gambar 4.46** dibawah, menurut Jing pori pada struktur karbon yang dihasilkan oleh dandelion ini dapat memfasilitasi proses transpor elektron disepanjang dinding sampel dan permeasi elektrolit di dalam rongga rongga sampel.

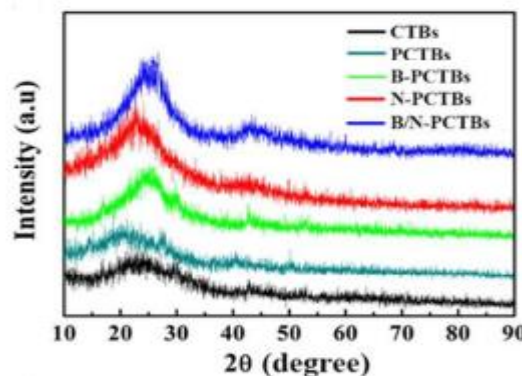


Gambar 4.46 Skema Pembuatan B/N-PCTB (Zhao et al., 2017)



Gambar 4.47 (a) Dandelion. (b, c) SEM PCTBs. (d) SEM B/N-PCTBs (Zhao et al., 2017)

Dari hasil sem pada **Gambar 4.47** dapat dilihat bahwa setelah aktivasi sampel memiliki struktur seperti pipa berongga dengan dinding tipis, struktur berongga ini menurut Jing dapat mempermudah permeasi dari elektrolit seperti lithium sodium dan potasium sehingga proses transfer ion menjadi lebih cepat dan meningkatkan performa material sebagai superkapasitor.

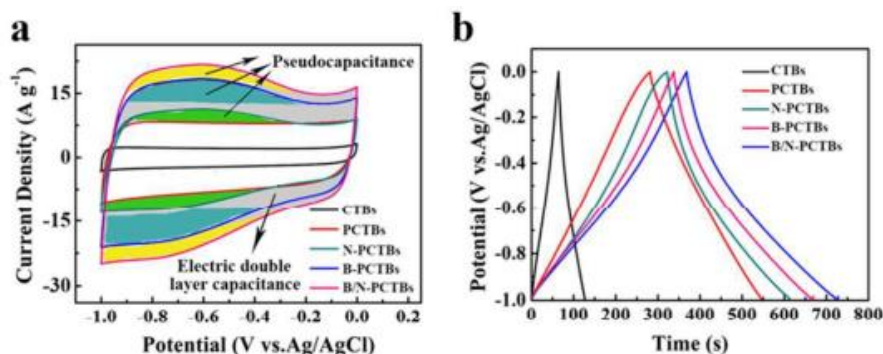


Gambar 4.48 Hasil XRD CTB, PCTB , BPCTB, NPCTB danB/NPCTB (Zhao et al., 2017)

Sedangkan dari hasil XRD pada **Gambar 4.48** sampel memiliki puncak pada sudut ~ 26 dan ~ 43.3 derajat pada bidang 002 dan 001 yang merupakan ciri khas dari material karbon amorf , setelah penambahan doping dapat dilihat bahwa terjadi peningkatan intensitas puncak yang menandakan terjadinya peningkatan derajat grafitisasi , hal ini nampak lebih jelas pada sampel yang memiliki doping boron B-PCTB dan B/N-PCTB hal ini menandakan doping boron meningkatkan derajat grafitisasi.

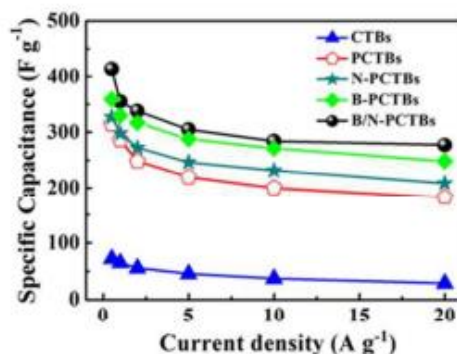
Dari pengujian BET diketahui sampel PCTB dengan aktivasi tanpa doping memiliki luas permukaan paling tinggi sebesar $1432 \text{ m}^2/\text{g}$ lebih tinggi dibanding sampel non aktivasi CTB yang memiliki nilai $536 \text{ m}^2/\text{g}$, sedangkan sampel dengan doping nitrogen N-PCTB memiliki nilai $1428 \text{ m}^2/\text{g}$, B-PCTB $1419 \text{ m}^2/\text{g}$ dan B/N-PCTB $1420 \text{ m}^2/\text{g}$, sampel sampel ini memiliki nilai

BET hampir sama dengan sampel aktivasi biasa PCTB yang mengindikasikan bahwa baik nitrogen ataupun boron tidak meningkatkan luas permukaan secara significant, sedangkan mikropori dengan ukuran rata-rata 2nm serta mesopori dengan ukuran rata-rata 2.2-4.1nm banyak dijumpai pada sampel B/N-PCTB yang berkontribusi dalam proses transfer ion meningkatkan sifat EDLC. Sedangkan dari Hasil dari element analysis ditemukan nilai bahwa sampel B/N-PCTBs memiliki kandungan heteroatom yang relatif tinggi (O:5,18 at%, N: 2,2 at%; B: 4,6 at%). Terutama, kandungan B (4,6 at%) kandungan boron pada B/N-PCTBs jauh lebih tinggi daripada B-PCTBs (2,2 at%). Menurut jing Kandungan heteroatom B yang lebih tinggi dari B/N-PCTBs mungkin disebabkan oleh atom boron yang bertindak sebagai akseptor electron dan atom N polielektron menyediakan lebih banyak situs untuk mengikat atom B.



Gambar 4.49 Kurva CV dan GCD Sampel CTB, PCTB, BPCTB, NPCTB, B/NPCTB (Zhao et al., 2017)

Kurva CV dari setiap sampel pada 50 mV/s ditunjukkan pada **Gambar 4.49** Tidak tampak deformasi yang jelas untuk kurva CV dari CTB dan PCTB, menunjukkan sifat EDLC. Untuk sampel karbon yang didoping heteroatom, sepasang Tonjolan redoks yang luas muncul di sekitar -0,5 V, menunjukkan adanya perilaku pseudocapacitance, Kurva GCD sampel karbon pada 1 A g⁻¹ ditunjukkan pada **Gambar 4.49b**, CTB dan PCTB menunjukkan bentuk segitiga yang sangat simetris, yang menunjukkan sifat EDLC dan reversibilitas elektrokimia yang baik. Sedangkan untuk karbon yang didoping heteroatom, kurva kurva berbentuk segitiga yang relatif simetris dengan dua dataran tinggi kecil menunjukkan sifat pseudocapacitor.



Gambar 4.50 Plot Kapasitansi Sampel CTB, PCTB, BPCTB, NPCTB dan B/NPCTb (Zhao et al., 2017)

Kapasitansi spesifik sampel pada berbagai rapat arus dapat dilihat pada **Gambar 4.50**. Sampel B / N-PCTB mencapai kapasitansi spesifik maksimum 355 F/g pada 1 A/g (292 F/g pada 20 A /g, dengan retensi 82,3%), lebih unggul daripada B-PCTBs (261 F/g pada 20 A/g,

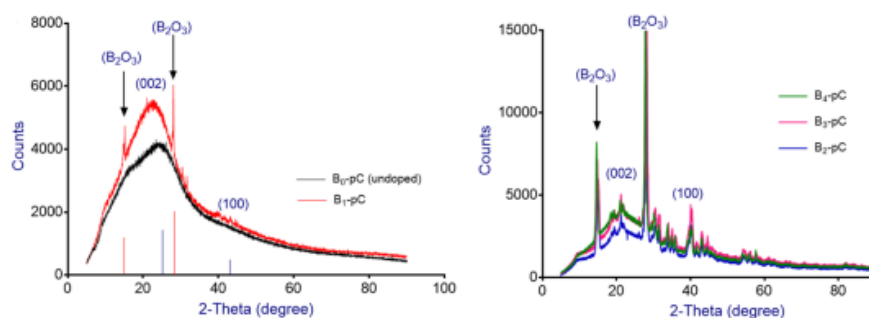
retensi 77,9%), N-PCTBs (214 F/g pada 20 A/g Retensi 71,8% i), PCTB (198 F/g pada 20A/g , retensi 69,2%) dan CTBs (38 F/g pada 20 A/g, retensi 58,5%).B / N-PCTBs juga menunjukkan stabilitas yang sangat baik sebesar 96% pada 20 A/g setelah lebih dari 10.000 siklus, jauh lebih tinggi daripada Activated carbon biasa (87%).

Amirhossein Fallah *et al* (2020) melakukan percobaan pendopingan Boron kepada porous carbon yang berasal dari beras dari sukrosa dengan perbandingan massa sukrosa: asam borat 4:0, 1, 2 dan 3, Sukrosa dan asam borat dicampur menggunakan mortar. Kemudian, 5 ml asam sulfat (1 M) ditambahkan ke setiap campuran dan diaduk pada suhu 60 ° C selama 40 menit sampai larutan homogen Setelah 10 menit, sampel dikumpulkan dan dicuci dengan deionized water untuk menghilangkan kelebihan asam sulfat dan asam borat yang tidak bereaksi. Selanjutnya, sampel dianil pada suhu 50 ° C selama 24 jam, hingga menghasilkan produk padat yang dikarbonisasi pada 800 ° C di aliran gas nitrogen pada laju pemanasan 10 ° C /min selama 60 menit dan Diperoleh karbon berpori yang didoping boron yang selanjutnya disebut Bx-pC (x mewakili kandungan boron). Untuk membuat elektroda 87wt% Bx-pC dicampur dengan 8% carbon black dan 5wt% binder PTFE di dalam N-Metilpirolidon hingga membentuk pasta, pasta ini dioleskan pada stainless steel berukuran 1cm² dan di keringkan pada oven vacuum di temperature 80°C selama 10 jam, untuk memperkuat kekuatan elektroda elektroda di beri perlakuan panas pada temperature 120 °C selama 25 menit.

Tabel 4.9 Hasil Uji BET Sampel Bx-pC (Fallah et al.,2020)

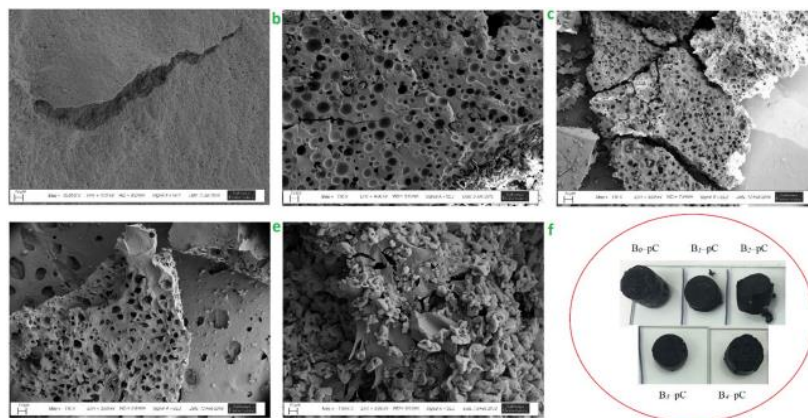
Sampel	S _{BET} (m ² /g)	V _T (cm ³ /g)	V _{Mes} (cm ³ /g)	V _{Mic} (cm ³ /g)	V _{mes} /V _T (%)	D (nm)
B ₀ -pC	388.7	0.58	0.17	0.41	29.3	1.39
B ₁ -pC	745.9	1.02	0.45	0.57	44.1	1.65
B ₂ -pC	1298.9	2.11	1.42	0.69	67.2	2.88
B ₃ -pC	879.8	1.79	1.13	0.66	63.1	2.45
B ₄ -pC	1098.7	0.98	0.35	0.63	35.7	1.89

Hasil Uji BET material Bx-pC terdapat pada **Tabel 4.9** dapat dilihat bahwa luas permukaan sampel meningkat secara drastis dari 388,7 m²g⁻¹ untuk sampel yang tidak didoping Hingga 1298,9 m²g⁻¹ untuk sampel B₂-pC (mengandung 2 at. % boron), hal ini menunjukkan bahwa asam borat berkontribusi pada peningkatan luas permukaan. Meskipun mekanisme pastinya tidak diketahui, asam borat dapat memasuki struktur sukrosa dan memperluas struktur internal sukrosa. Namun, dapat dilihat pula luas permukaan dan volume mesopori dari sampel menurun seiring meningkatnya doping boron; hal ini menunjukkan bahwa kandungan boron yang berlebihan menyebabkan aglomerasi dan penurunan volume pori dan luas permukaan.



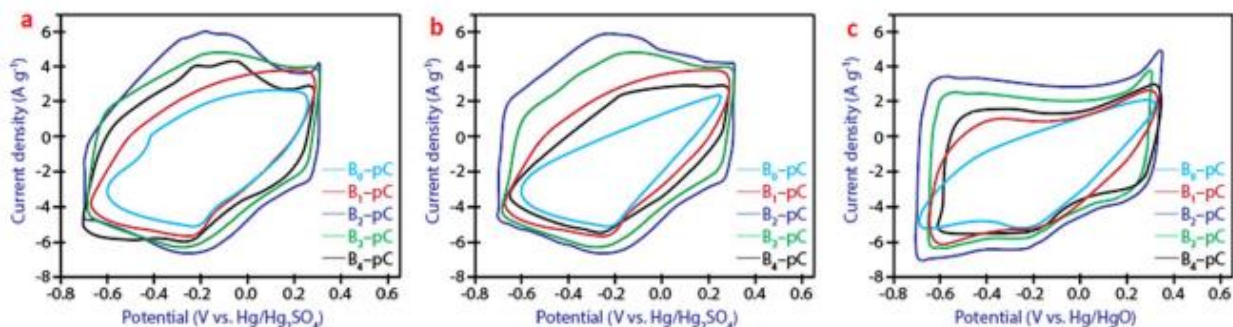
Gambar 4.51 Hasil XRD Sampel Bx-pC (Fallah et al.,2020)

Pola XRD dari bahan elektroda Dapat dilihat pada **Gambar 4.51**. Semua sampel Bx-pC memiliki puncak pada $\sim 22^\circ$ (002) dengan jarak antar lapisan ($\sim 3,56$ nm) dan $\sim 43^\circ$ (100) dengan jarak antar lapisan 1.89nm yang merupakan ciri khas dari material karbon amorf dapat dilihat juga bahwa puncak difraksi sampel yang didoping boron bergeser sedikit ke arah kiri, menunjukkan peningkatan cacat dengan pengenalan heteroatom ke dalam struktur karbon.



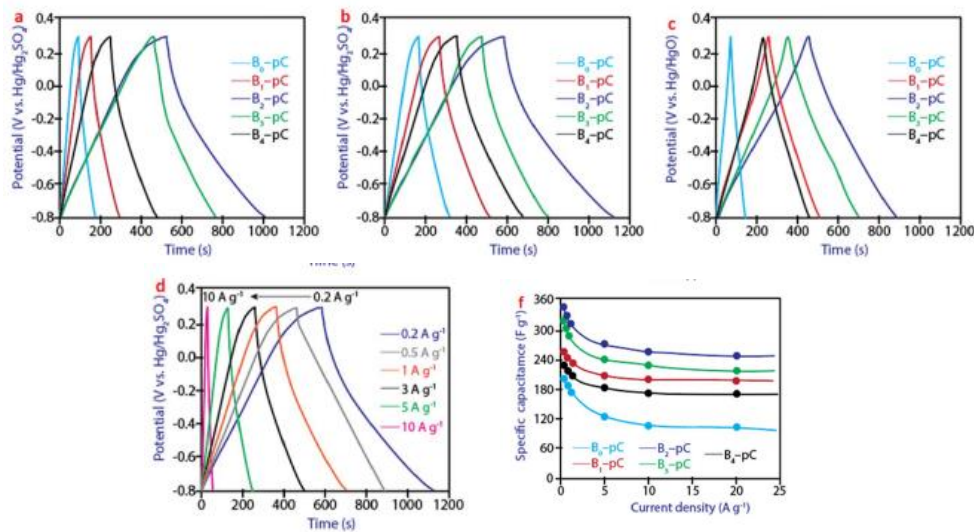
Gambar 4.52 (a) B0-pC, (b) B1-pC, (c) B2-pC, (d) B3-pC, (e) B4-pC (f). Foto visual Sampel (Fallah et al., 2020)

Informasi morfologi yang diperoleh melalui SEM disajikan pada **Gambar 4.52**. Karbon yang tidak didoping (B0-pC) menunjukkan struktur yang kasar seperti spons dengan sedikit pori-pori yang terlihat terdistribusi pada permukaannya (**Gambar 4.52a**). Sebaliknya pori-pori berstruktur terlihat banyak tersebar pada permukaan sampel yang didoping boron (B1-pC hingga B3-pC); sementara kandungan boron yang berlebihan diyakini meruntuhkan pori-pori di B4-pC yang menunjukkan morfologi yang menebal. Di antara sampel karbon yang didoping boron B4-pC memiliki volume pori total terendah menurut hasil uji BET pada **Tabel 4.9**.



Gambar 4.53 Elektroda Bx-pC Pada Laju Pemindaian 5 mV/s Dengan Elektrolit (a) 1 M Na₂SO₄, (b) 1 M H₂SO₄, (c) 6 M KOH (Fallah et al., 2020)

Gambar 4.53a-c menunjukkan kurva CV elektroda Bx-pC pada laju pemindaian 5mV/s. Selain sampel B0-pC, semua sampel menunjukkan bentuk hampir simetris dengan bentuk seperti persegi panjang dan sedikit tonjolan puncak redoks yang terlihat pada potensial sekitar -0,2 V (vs Hg / Hg₂SO₄) Seperti yang dapat dilihat dari kurva CV elektrolit yang berbeda (**Gbr.4.53a-c**), baik H₂SO₄ dan Na₂SO₄ menghasilkan bentuk kurva yang hampir serupa sementara KOH memiliki bentuk yang sedikit berbeda. Kapasitansi spesifik tertinggi dicapai dalam media H₂SO₄ (**Gambar 4.53b**) Menurut amirhossein hail ini terkait dengan konduktivitas ionik yang lebih tinggi dan lebih cepat yang dimiliki oleh H⁺ (2,80 Å) dibandingkan dengan K⁺ (3,31 Å) dan Na⁺ (3,58 Å).



Gambar 4.54 Kurva GCD Bx–pC Dengan Elektrolit (a) 1 M Na₂SO₄, (b) 1 M H₂SO₄, (c) 6 M KOH;(d) Kurva GCD B₂–pC Pada Rapat Arus 0.2–10 A/g. (f) Kapasitansi Spesifik Bx–pC Pada Rapat Arus 0.2–20 A/g (Fallah et al.,2020)

Kurva GCD Bx-pC pada kerapatan arus 0,2 A/g Yang terdapat pada **Gambar 4.54a-c**. menunjukkan bentuk semi-segitiga (terutama dalam elektrolit asam dan netral), dikarenakan kontribusi pseudocapacitance dari heteroatom B sedangkan dengan elektrolit KOH 6 M, Bx-pC Memiliki pola sifat EDLC. B₂-pC memiliki waktu discharge terbesar, yang mengindikasikan kapasitansi spesifik terbesar sesuai dengan hasil CV. **Gambar.4.54d-e** menunjukkan B₂-pC pada rapat arus yang berbeda dapat dilihat bahwa sampel B₂-pC mempertahankan bentuk semi-segitiga dengan baik bahkan pada kepadatan arus tinggi yang disebabkan oleh proporsi mesopori yang lebih tinggi dan pseudocapacitance dari atom B. Berdasarkan **Gambar 4.54f** Pada 0,2 A/g, B₂-pC menunjukkan kapasitansi spesifik 351 F /g yang lebih tinggi dari B₀-pC (196 F/g) dan B₄-pC (238 F/g) hal ini menunjukkan bahwa doping B yang cukup (2 at.%) pada karbon akan meningkatkan kapasitansi spesifik Dikarenakan oleh reaksi pseudocapacitance sementara boron berlebih (4 at. %) akan menghambat distribusi muatan pada struktur karbon. Hasil uji kinerja dari B₂-pC Menunjukan bahwa elektroda B₂-pC mempertahankan ~ 98,5% dari kapasitansi awalnya di mana kapasitansi spesifiknya berkurang dari 312,3 menjadi 307,6 F g⁻¹ setelah 2500 siklus. Hasil di sini menunjukkan bahwa elektroda yang didoping boron memiliki rentensi kapasitansi yang baik dan stabilitas yang panjang

4.2 Komparasi Jurnal

Setelah menganalisa dilakukan perbandingan hasil diantara ketiga jurnal dari masing masing doping heteroatom yaitu sebagai berikut .

4.2.1. Pengaruh Penambahan Doping Sulfur

Sebelumnya telah dibahas 3 jurnal yang berkaitan dengan pengaruh penambahan doping sulfur Jurnal pertama membahas mengenai penelitian pendopingan sulfur terhadap porous carbon untuk aplikasi supercapacitor yang dilakukan oleh Xian Hu *et al* (2021) yang menggunakan limbah masker medis sebagai sumber karbon dan asam sulfat (H₂SO₄) sebagai sumber sulfur dengan variasi jumlah KOH sebagai activator yaitu 1:1 , 1:2 , 1:3 dan 1:4 dari hasil SEM pada **Gambar 4.17** dapat dilihat bahwa terjadi pembentukan pori yang lebih kecil lebih banyak dan lebih padat setelah sampel di aktivasi dengan KOH yang lebih banyak

menurut Xiang hu hal ini mengindikasikan bahwa penambahan KOH dapat membantu pembentukan micropore sedangkan dari hasil XRD pada **Gambar 4.18** sampel memiliki puncak pada sudut 23.6° dan 43.5° yang menandakan adanya struktur grafit pada sampel. Dari hasil Uji BET pada **Tabel 4.3** dapat dilihat bahwa sampel CMS-3 Memiliki luas permukaan dan volume terbesar yaitu $2220 \text{ m}^2/\text{g}$ dan $1.26 \text{ cm}^3/\text{g}$ selaras dengan hasil SEM. dan dari kurva CV pada **Gambar 4.19** dapat dilihat bahwa kapasitansi spesifik paling baik pada rapat arus 1 A/g antara ke empat sampel di capai oleh sampel CMS-3 yaitu 328.9 F/g sedangkan sampel dengan Kapasitansi terendah adalah sampel CMS-0 atau tanpa KOH dengan nilai sekitar 100 F/g yang memiliki lebar kurva terkecil, semua kurva sampel menunjukkan perilaku EDLC yang ideal. Menurut Hu aktivasi KOH dapat mempercepat laju difusi ion, saat sulfur masuk kedalam struktur karbon area yang bersifat aktif secara elektrokimia akan meningkat, adapun sampel CMS-4 atau sampel dengan perbandingan massa 1:4 tidak memiliki kapasitansi spesifik paling tinggi dikarenakan pada KOH berlebih struktur karbon dapat mengalami abrasi atau keruntuhan yang mengakibatkan menyatunya beberapa mikropori menjadi mesopori atau bahkan makropori untuk stabilitas sendiri sampel CMS-3 memiliki stabilitas sangat baik yaitu $90,4\%$ setelah 10.000 siklus di rapat arus tinggi 15 A/g

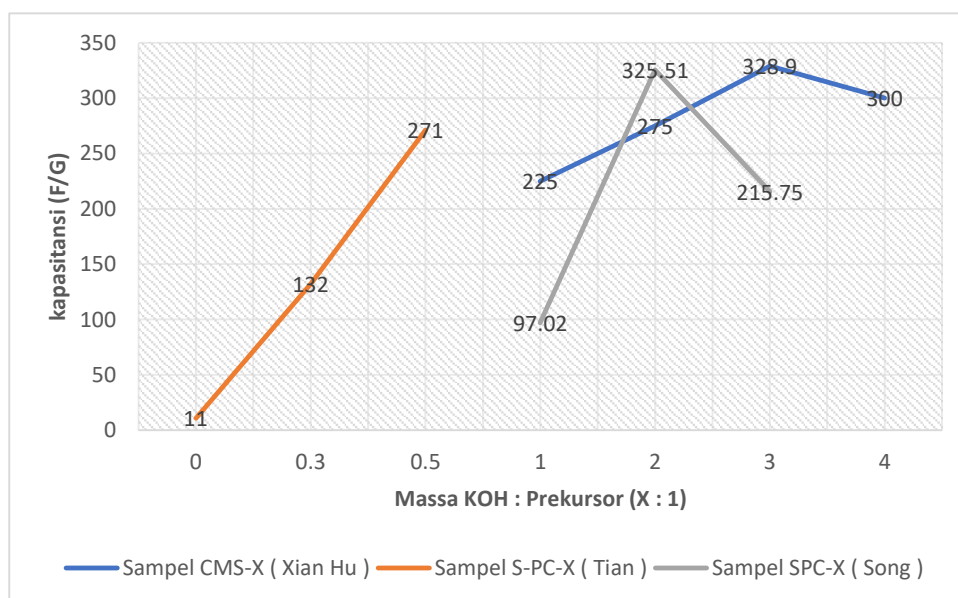
Dari segi sifat elektrokimia hasil yang sama juga dilaporkan oleh Tian *et al* (2018) yang menggunakan lignosulfate sebagai sumber sulfur dan karbon sekaligus, dengan variasi KOH 1:0.3 dan 1:0.5 dari hasil SEM pada **Gambar 4.22** dapat dilihat bahwa sampel dengan perbandingan 1:0.5 (S-PC-50) memiliki struktur sarang lebah dengan banyak micropori yang tersebar namun saling berhubungan dan pada **Gambar 4.23** hasil XRD menunjukkan bentuk pola yang sama dengan puncak pada sudut 2θ 24° dan 43° yang mengindikasikan adanya struktur grafit amorf, kedua hal ini sesuai dengan jurnal pertama oleh Xian Hu yang menyatakan bahwa penambahan KOH membantu pembentukan mikropori dan memperluas permukaan material porous karbon, sekali lagi hal ini juga di konfirmasi oleh hasil pengujian BET yang dapat dilihat pada **Tabel 4**. Dari hasil pengujian CV yang dapat dilihat di **Gambar 4.24a dan b** kurva CV sampel S-PC-50 memiliki bentuk persegi panjang yang merupakan ciri khas perilaku EDLC dan pada **Gambar 4.24c** terlihat bahwa S-PC-0 memiliki kapasitansi spesifik sangat buruk yaitu 11 F/g pada rapat arus 1 A/g sedangkan S-PC-50 memiliki performa terbaik dengan nilai 271 F/g di rapat arus yang sama. Nilai kapasitansi sampel S-PC-0 jauh lebih rendah dibandingkan CMS-0 meski keduanya sama sama tidak diaktivasi menggunakan KOH, hal ini dapat dikarenakan temperatur aktivasi yang sangat tinggi dibanding kedua jurnal lainnya yaitu 900°C , menurut Xiang Hu (2021) temperature yang terlalu tinggi dapat menurunkan yield atau hasil dan menghilangkan gugus sulfonate yang terdapat di dalam sampel sehingga kualitas sampel menurun dikarenakan menurut Tian, sulfur atau gugus sulfonate dapat membantu proses difusi ion yang meningkatkan kapasitansi, adapun dari hasil pengujian stabilitas material S-PC-50 memiliki retensi nyaris sempurna yaitu $99,1\%$ setelah 10000 siklus pada rapat arus 5 A/g .

Pada jurnal ketiga Song Liu *et al* (2022) melakukan penelitian serupa dengan menggunakan bahan Ulthorix, sejenis alga hijau yang umum ditemukan di air dalam penelitiannya Liu menggunakan variasi KOH dengan perbandingan massa 1:1, 1:2 dan 1:3 hasil dari penelitian ini juga tak jauh berbeda dengan dua penelitian sebelumnya dimana dari **Gambar 4.26** dapat dilihat bahwa pada sampel SPC-1 mulai terbentuk beberapa mesopore yang selanjutnya menjadi micropore pada sampel dengan jumlah KOH yang lebih banyak (SPC-2 dan SPC-3) hal ini sesuai dengan teori dari dua jurnal sebelumnya yang menyatakan bahwa sulfur membantu pembentukan micropore, hal ini juga sesuai dengan hasil uji BET dimana specimen SPC-3 memiliki luas permukaan paling tinggi sebesar $2490 \text{ m}^2/\text{g}$ dan volume 0.835 cc/g , sedangkan hasil XRD pada **Gambar 4.25** Menunjukkan puncak yang sama dengan dua jurnal

sebelumnya yaitu pada 24° dan 43°, dari hasil pengujian elektrokimia sampel SPC-2 Memiliki kurva CV paling lebar dan kapasitansi spesifik tinggi dengan nilai 325.1 F/g dan retensi kapasitansi sebesar 90.6% setelah 50000 siklus pada rapat arus 2A/g terdapat perbedaan pada penelitian Ling dengan penelitian Xian hua meskipun menggunakan rasio KOH yang sama ,dimana pada penelitian ini sampel terbaik adalah sampel dengan perbandingan 1:2 sedangkan pada penelitian Xian Hu (2021) adalah 1:3 hal ini dapat dikarenakan perbedaan sumber dopant sulfur , menurut Tian (2018) Ulthorix yang digunakan dalam penelitiannya mengandung fibrin dan asam amino yang mengandung sulfur dan sedikit nitrogen , selain itu proses karbonisasi dan aktifasi pada penelitian Hu (2021) lebih lama yang mungkin menyebabkan lebih banyak gugus sulfonate yang hilang. perbedaan sumber dopant inilah yang mungkin menyebabkan perbedaan ini. Dari ketiga jurnal dapat dilihat bahwa kapasitansi tidak selalu meningkat secara linear terhadap massa KOH.

Tabel 4. 10 Perbandingan Komparasi Jurnal Pengaruh Penambahan Doping Sulfur Terhadap Kapasitansi Porous Carbon Untuk Elektroda Supercapacitor

Jurnal	Variasi	Hasil
Xian hu <i>et al</i>	1:0 , 1:1 , 1:2 , 1:3 , 1:4 (Massa carbon : KOH)	Optimal pada 1:3 328.9F/g (CMS-3)
Tian Jingying <i>et al</i>	1:0 , 1:0.3 , 1:0.5 (Massa carbon : KOH)	Optimal pada 1:0.5 271F/g (S-PC-50)
Liu Song <i>et al</i>	1:1 , 1:2 , 1:3 (Massa carbon :KOH)	Optimal pada 1:2 325.51F/g (SPC-2)



Gambar 4.55 Grafik Perbandingan Kapasitansi 3 Jurnal Sulfur

4.2.2. Pengaruh Penambahan Doping Fosfor

Guanfeng *et al* (2020) melakukan pendopingan porous karbon yang berasal dari serbuk gergaji yang di doping menggunakan H_3PO_4 dengan variasi temperature 700, 800, 900 dan $1000^\circ C$ dari hasil penguian XRD tampak sampel C-X dan PC-X memiliki puncak yang berpusat pada 24° dan 43° dan indeks miller (002) dan (100) yang merupakan pola dari material ber struktur karbon amorf. Pada puncak (002) dapat dilihat bahwa untuk sampel C-X dan PC-X puncaknya bergeser menjadi lebih rendah yang mendandakan adanya pelebaran pada lapisan antar atom pada temperature tinggi nilai puncak (002) pada sampel dengan temperature aktivasi tinggi mengalami penurunan puncak yang menurut guanfeng diakibatkan oleh adanya dekomposisi asam fosfat yang digunakan sebagai doping, dekomposisi ini mengakibatkan meningkatnya lapisan antar atom yang menurunkan derajat grafitisasi sedangkan dari hasil SEM pada **Gambar 4.7**. Sampel memiliki struktur jaringan berpori yang teratur untuk C-900 dan PC-900. Kedua sampel memiliki pori-pori seragam yang membantu migrasi ion dan menyediakan situs aktif yang lebih mudah diakses pada matriks karbon. Seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 4.7**, PC-900 memiliki banyak pori yang tersebar secara berantakan dengan banyak mikropori dalam matriks karbon. Hal ini dikarenakan doping fosfor memperluas ruang antar lapisan dan menyebabkan pertumbuhan struktur pori yang mempermudah transport ion pada proses elektrokimia dari hasil uji BET diketahui sampel PC-900 memiliki luas permukaan tertinggi dengan nilai $1281 \text{ m}^2/\text{g}$, sampel PC-1000 memiliki luas permukaan yang lebih rendah bahkan dibanding dengan sampel tanpa doping di temperature yang sama, menurut guanfeng hal ini dikarenakan pada temperature diatas $750^\circ C$ gas yang dihasilkan oleh dekomposisi parsial asam fosfat yang membantu pembentukan pori, akan tetapi jika temperature terlalu tinggi seperti $1000^\circ C$ maka gas dari proses dekomposisi parsial itu akan menghancurkan struktur karbon yang sudah terbentuk karena gas keluar dengan cepat dari struktur karbon namun bila temperature terlalu rendah asam fosfat tidak akan terdekomposisi sehingga pori tidak terbentuk sedangkan dari hasil pengujian CV pada **Gambar 4.9** dapat dilihat kurva CV berbentuk semi- persegi panjang dan memiliki sepasang tonjolan kecil yang menunjukkan bahwa sifat pseudokapasitor dan EDLC ada di dalam sampel Sampel (PC-X) dengan sejumlah kecil H_3PO_4 memiliki area yang jauh lebih besar pada suhu yang sama dengan sampel non-doping yang menunjukkan bahwa kapasitansi mengalami peningkatan. S_{BET} dari PC-700 dan PC-1000 lebih rendah daripada C-700 dan C-1000, tetapi memiliki kurva CV lebih besar, menurut Lin hal ini dikarenakan meskipun S_{BET} adalah sebuah parameter penting untuk kapasitor, tidak semua struktur pori cocok untuk dimasuki oleh ion elektrolit. Oleh karena itu, S_{BET} tinggi mungkin meningkatkan risiko dekomposisi elektrolit selama proses charge discharge yang terjadi. PC-900 memberikan kapasitansi tertinggi sebesar 152.8 F/g pada rapat arus 1.0 A/g dibanding semua sampel sementara PC-900 memiliki retensi kapasitansi terbaik sebesar $98,3\%$ pada rapat arus 2 A/g setelah 5000 siklus.

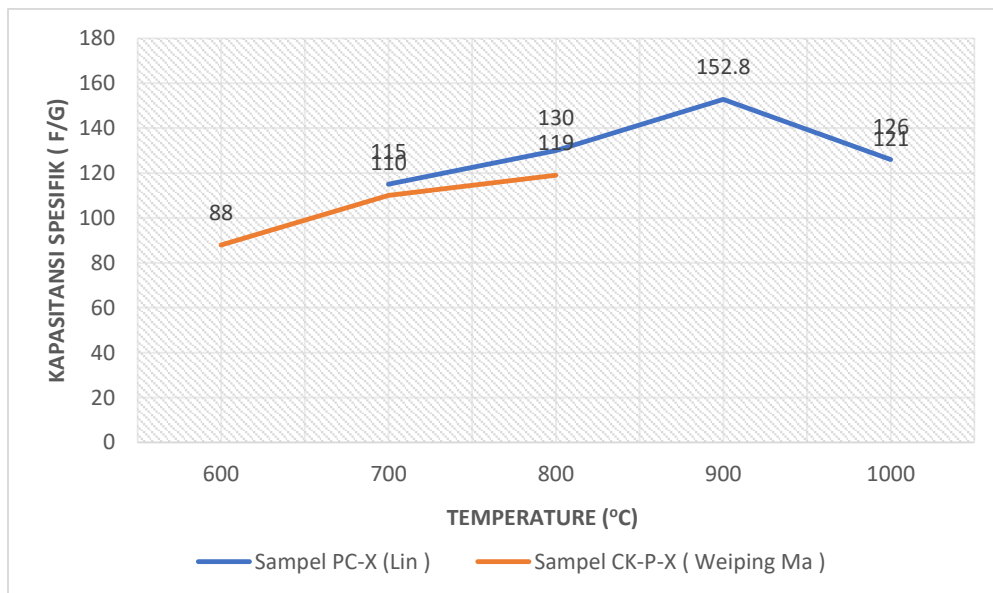
Weiping ma *et al* (2018) melakukan penelitian serupa dengan menggunakan antrasit yang sebelumnya di pre aktivasi dengan KOH dengan perbandingan 4:1 dan di berikan doping fosfor dengan rasio 3:1 sebelum di karbonisasi dengan variasi temperature 600, 800, $1000^\circ C$ dari pengujian SEM pada **Gambar 4.12** dapat dilihat struktur halus dengan pori pada sampel yang telah di aktivasi sebelumnya dengan KOH, menurut weiping pre aktivasi ini membantu membuat jalur jalur untuk ion bedifusi kedalam bagian dalam pori saan pendopingan dengan asam fosfat nanti, setelah di aktivasi pori menjadi semakin berkembang membentuk pola sarang lebah pada temperature $1000^\circ C$ struktur pori mulai menyatu satu sama lain sedangkan dari hasil XRD pada **Gambar 4.13** sampel terlihat memiliki puncak (002) 24° dan puncak (100) pada $43,8^\circ$ yang menandakan adanya struktur grafit. Setelah aktivasi KOH, kedua puncak C-K-700 ini menjadi jauh lebih lemah dan lebih luas daripada sampel mentah, menunjukkan adanya

perkembangan struktur amorf seiring dengan meningkatnya suhu aktivasi H_3PO_4 dari 600 hingga 1000 ° C, puncaknya intensitas puncak (100) untuk sampel dengan doping (CK-P-x) sedikit meningkat yang menandakan adanya peningkatan derajat grafitisasi. Dari pengujian BET sampel CK-P-1000 memiliki peningkatan mesopori hingga 87,48% dan total volume pori 1,69 cm^3/g . Dari hasil ini Guanfeng meyakini bahwa aktivasi asam fosfat tidak hanya menyediakan fosfor untuk dopan tetapi juga mengoptimalkan struktur pori pada sampel. Dari hasil pengujian elektrokimia pada **Gambar 4.14** dapat dilihat bahwa semua sampel memiliki bentuk hampir mirip persegi panjang yang menandakan adanya perilaku EDLC, adapun hasil kapasitansi terbaik dicapai oleh sampel CK-P-1000 dengan nilai 121.0911F/g pada rapat arus 1A/g selain itu sampel CK-P-1000 juga memiliki retensi kapasitansi sebesar 90.20% pada arus 1A setelah melalui 20000 siklus menurut Guanfeng tingkat retensi kapasitansi yang tinggi ini diakibatkan doping fosfor mencegah munculnya situs oksidasi aktif yang menyebabkan permukaan elektroda lebih stabil secara elektrokimia.

Sangeeta Rawal *et al* (2021) melakukan penelitian pendopingan serupa dengan menggunakan daun *saccharum bengalense*, pada penelitian ini sebelum dilakukan pendopingan sampel terlebih dahulu diberi perlakuan dengan asam nitrat, sampel di doping dan kemudian di karbonisasi dengan variasi temperatur 700 dan 850 derajat. dari hasil XRD seperti yang dapat dilihat pada **Gambar 4.2** sampel memiliki puncak di 24 dan 44 yang menandakan adanya struktur grafit di dalam sampel dapat dilihat juga sampel dengan doping memiliki puncak yang lebih lebar, hal ini menandakan adanya penurunan derajat grafitisasi pada sampel berdoping. Dari hasil perhitungan juga diketahui sampel yang mengalami pendopingan mengalami peningkatan lebar ruang antar lapisan yang selaras dengan pendapat jurnal sebelumnya dimana lapisan ini mempermudah transfer ion nantinya, dari hasil SEM pada **Gambar 4.1** dapat dilihat bahwa HNO_3 memiliki efek merusak dan korosif terhadap sampel dimana terdapat lubang dan celah celah menurut Rawal hal ini meningkatkan tingkat absorpsi atom fosfor yang digunakan saat pendopingan disamping itu penambahan HNO_3 bertujuan untuk meningkatkan pseudocapacitance pada sampel, hal ini dapat di konfirmasi dari hasil uji BET pada **Tabel 4.1**. Dimana terjadi penurunan luas permukaan akibat efek destruktif HNO_3 dari yang sebelumnya 1890 m^2/g menjadi 612 m^2/g akibat runtuhnya pori setelah pendopingan luas permukaan kembali meningkat, dari hasil pengujian Elektrokimia CV pada **Gambar 4.3** tampak kurva berbentuk semi persegi panjang dengan sedikit tonjolan di ujung ujung kurva hal ini menunjukkan sampel memiliki sifat EDLC dan pseudocapacitance yang diakibatkan oleh penambahan doping fosfor dapat dilihat bahwa luas kurva sampel ACTP-850 memiliki luas paling besar yang menandakan bahwa sampel tersebut memiliki kapasitansi paling baik, hal ini dikonfirmasi oleh perhitungan dengan hasil 328F/g pada rapat arus 0.5A/g atau sekitar 275F/g pada rapat arus 1A/g, selain itu sampel ACTP-850 memiliki stabilitas yang baik dengan retensi kapasitansi sebesar 99,4% setelah 5000 siklus pada rapat arus 5A/g.

Tabel 4.11 Perbandingan Komparasi jurnal pengaruh penambahan doping fosfor terhadap kapasitansi porous carbon untuk elektroda supercapacitor

Jurnal	Variasi	Hasil
Guanfeng Lin <i>et al</i>	700°, 800°, 900°, 1000°C (Temperatur Aktivasi)	Optimal pada 900°C 152.8F/g (PC-900)
Weiping ma <i>et al</i>	600°, 800°, 1000°C (Temperatur Aktivasi)	Optimal pada 1000°C 121,9F/g (CK-P-1000)
Sangeeta Rawal <i>et al</i>	750° dan 850°C (Temperatur aktivasi)	Optimal pada 850°C 275F/g(ACtP-850)



Gambar 4.56 Grafik Perbandingan Kapasitansi Penambahan Fosfor 2 Jurnal

4.2.3. Pengaruh Penambahan Doping Nitrogen

Chao long *et al* (2016) melakukan pendopingan Nitrogen terhadap porous carbon yang terbuat dari kepompong Bombyx morii yang diaktivasi dengan KOH dengan rasio 3:1 dan kemudian di karbonisasi pada temperatur yang bervariasi (600 , 700 , 800 dan 900) selama 2 jam dengan laju pemanasan 5C/ min sampel ini dinamakan N-PC-X dimana x adalah temperatur karbonisasi , dari hasil XRD sampel diketahui memiliki puncak pada sudut kurang lebih 25 derajat yang merupakan ciri khas dari struktur grafit amorf dan dengan meningkatnya temperatur aktivasi puncak menjadi semakin landai yang menandakan semakin menurunnya derajat grafitisasi , dari hasil SEM pada **Gambar 4.29**, dapat dilihat setelah aktivasi KOH struktur yang terbentuk menjadi rapuh dan hancur dan struktur karbon menjadi kisut menurut chao hal ini dikarenakan carbon dari protein cenderung lebih lemah dan tidak stabil , melalui pengujian BET dengan hasil pada **Tabel 4.6** dapat dilihat bahwa pada kenaikan luas permukaan terjadi saat temperatur dinaikkan dari 600 menjadi 700C akan tetapi pada temperatur 800 dan

900 luas permukaan justru menurun meskipun luas volume pori terus meningkat, hal ini dikarenakan runtuhnya mikropori membentuk mesopori. Dari hasil pengujian CV pada **Gambar 4.31** diketahui sampel memiliki bentuk kurva semi-persegi panjang dengan adanya tonjolan yang menandakan sampel memiliki sifat EDLC dan pseudocapacitance dapat dilihat pula semakin tinggi scan rate maka kurva akan semakin terdistorsi, dari hasil perhitungan diketahui sampel N-PC-700 memiliki performa terbaik dengan nilai kapasitansi 408F/g pada 0.5A/g dan 375 F/g pada rapat arus 1A/g dan setelah 20000 siklus pada rapat arus 25A/g sampel memiliki retensi sebesar 96%.

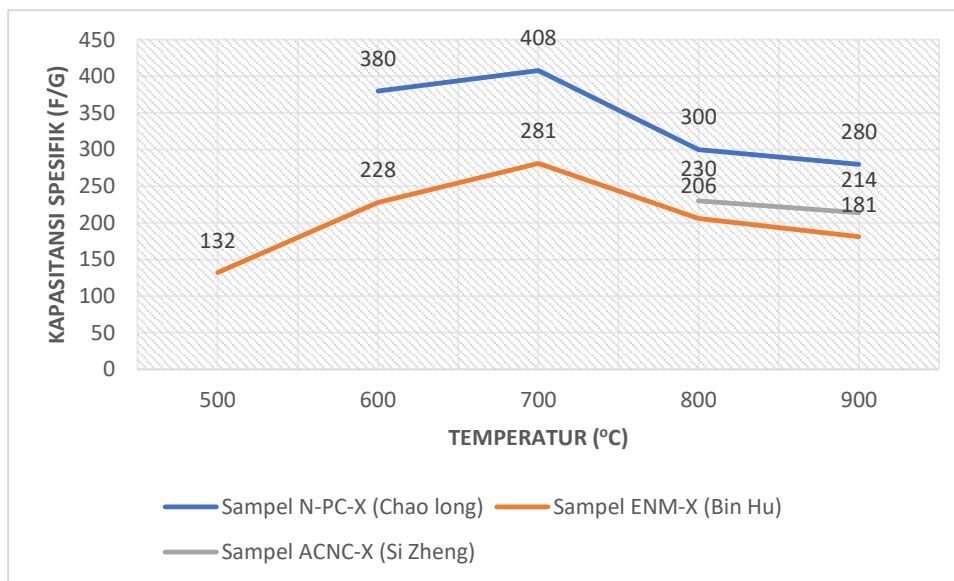
Bin Xu *et al* (2013) melakukan penelitian serupa dengan menggunakan disodium magnesium EDTA sebagai sumber nitrogen sekaligus karbon yang dipanaskan pada temperatur yang bervariasi (500,600,700,800 dan 900 °C) di aliran gas nitrogen dengan laju pemanasan dari pengujian BET yang dilakukan oleh Bin diketahui bahwa luas permukaan sampel meningkat dengan seiring bertambahnya temperature hingga temperature 800 °C. Sedangkan dari hasil sem dapat dilihat bahwa sampel memiliki struktur seperti coral atau sarang lebah dan seiring bertambahnya temperatur maka diameter pori semakin besar dikarenakan runtuhnya struktur mikropori membentuk mesopori sesuai dengan jurnal sebelumnya begitu pula dengan hasil XRD dimana puncak terdapat pada rentang sudut 20-25 (002) dan 40-45 (100) yang menandakan adanya struktur amorf dalam sampel. Selain itu seiring dengan meningkatnya temperatur pirolisis puncak (100) menjadi semakin intense yang menandakan meningkatnya derajat grafitisasi dan susunan kristal menjadi semakin teratur hal ini berbeda dengan penelitian sebelumnya dimana puncak semakin melandai dengan adanya penambahan grafit, hal ini dapat dikarenakan pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Chao Long *et al* menggunakan KOH. Kurva CV yang dihasilkan sampel memiliki sifat EDLC dan sedikit pseudocapacitance yang meningkat atau menurun tergantung jumlah nitrogen dalam sampel namun umumnya saat temperature pirolisis meningkat maka sifat pseudocapacitance akan menurun. Kapasitansi spesifik dari sampel ENM di kalkulasi dari kurva GCD sampel ENM700 memiliki kapasitansi terbaik dengan nilai 281F/g. saat temperature meningkat kapasitansi sampel ENM menurun meskipun dari hasil uji luas permukaannya meningkat, menurut Bin hal ini dikarenakan pada temperature tinggi jumlah nitrogen sisa berkurang sehingga kapasitansi nya menurun. Dari segi stabilitas sampel ENM700 hanya kehilangan 4.5% kapasitansinya setelah 5000 siklus dengan rapat arus 0.6A/g..

Adapun Jurnal terakhir yang dijadikan komparasi untuk nitrogen adalah Jurnal dari Si Zheng *et al* (2021) yang melakukan penelitian pendopingan nitrogen terhadap porous carbon yang berasal dari material organik Chitin hasil SEM seperti yang terlihat pada **Gambar 4.38** menunjukkan bahwa Nanogel memiliki pori-pori yang terbuka secara acak sedangkan Pola XRD Pada **Gambar 4.39** menunjukkan bahwa kurva XRD memiliki puncak tajam pada $\sim 23^\circ$ dan puncak yang luas pada $\sim 43^\circ$, sesuai dengan refleksi bidang (002) dari struktur kristal grafit dan (100) refleksi bidang dari fase amorf. Dan berdasarkan perhitungan jarak antar lapisan atau interlayer spacing adalah 0,38 nm untuk ACNC-800 dan 0,37 nm untuk ACNC-900, dimana keduanya lebih besar dari grafit (0,336 nm) hal ini sesuai dengan penelitian sebelumnya bahkan penelitian dengan hetero atom lain seperti fosfor dan sulfur dimana doping heteroatom ini meningkatkan jarak antar lapisan pada porous carbon menjadikannya tempat tumbuh pori adapun kedua sampel setelah pengujian CV memiliki kurva EDLC yang sedikit terdistorsi akibat adanya pseudocapacitance dari nitrogen, kadar nitrogen secara tidak langsung mempengaruhi kekuatan pseudocapacitance ini hal ini dapat dilihat dari hasil pengujian BET dimana sampel ACNC-900 memiliki luas permukaan yang lebih besar akan tetapi kapasitansinya lebih kecil dari ACNC-800 (230F/g dan 201F/g) hal ini dikarenakan pada temperatur tinggi kadar nitrogen semakin berkurang hal ini senada dengan penelitian yang dilakukan oleh Bin Hu *et al*,

sedangkan setelah penguian siklus pada rapat arus 10A/g material ACNC-800 mempertahankan sekitar 98% kapasitansi awalnya.

Tabel 4.12 Komparasi Jurnal Pengaruh Pendopongan Nitrogen

Jurnal	Variasi	Hasil
Chao Long <i>et al</i>	600°, 700°, 800°, 900°C (Temperatur Aktivasi)	Optimal pada 700°C 408F/g (N-PC-700)
Bin Hu <i>et al</i>	500, 600°, 700°, 800, 900°C (Temperatur Aktivasi)	Optimal pada 700°C 281F/g (ENM700)
Shi Zheng <i>et al</i>	800° dan 900°C (Temperatur aktivasi)	Optimal pada 800°C 230F/g(ACNC-800)



Gambar 4.57 Perbandingan Kapasitansi 3 Jurnal Nitrogen

4.2.4. Pengaruh Penambahan Doping Boron

Menurut Jing Zhao *et al* (2017) peningkatan temperature pirolisis adalah salah satu cara meningkatkan konduktivitas, dan menurut beliau pendopongan B, N dan P dapat meningkatkan konduktivitas dalam penelitiannya yang menggunakan dandelion sebagai precursor carbon dan di doping dengan boron dan nitrogen diketahui bahwa penggunaan aktivator yang berlebihan dapat mengakibatkan runtuhnya struktur pori, sedangkan dari hasil XRD diketahui bahwa penambahan doping boron dapat meningkatkan derajat grafitisasi sedangkan penambahan Nitrogen dapat meningkatkan efektifitas dan kadar doping secara sinergis yang dibuktikan dengan kadar boron pada sampel codoping lebih tinggi (4.6%) dibanding sampel dengan doping boron saja (2.2%) menurut Jing hal ini diakibatkan Boron merupakan akseptor elekton dan Nitrogen yang memiliki sifat poli elektron dapat menempel pada boron, dari hasil

pengujian BET diketahui pendopingan pada penelitian ini tidak meningkatkan luas permukaan yang kemungkinan diakibatkan oleh luas yang sudah maksimum hanya dari aktivasi dengan koh dari hasil pengujian CV diketahui bahwa sampel B/N-PCTB memiliki kapasitansi paling tinggi (355F/g pada 1A/g dan 292F/g pada 20A/g dan kurva dengan unsur EDLC dan pseudocapacitance, menurut jing pendopingan boron dapat menjaga sifat pseudocapacitance pada kandungan nitrogen rendah dan arus tinggi dikarenakan B dapat berfungsi sebagai katalis yang mempercepat reaksi redox nitrogen hal ini dibuktikan dengan stabilitas tinggi B/N-PCTB sebesar 96% pada 20A/g setelah 10000 siklus.

Hal serupa juga dijumpai pada penelitian Dong guo *et al* (2018) dengan nilai kapasitansi sampel berdoping boron dan nitrogen hingga 402F/g pada 0.5A/g dan 266F/g pada 20A/g adapun kandungan Nitrogen dan boron pada sampel BNPC ini adalah 9.38% (Vs NPC 7.22%) dan 3.87% (Vs BPC 1.22%) pada penelitian ini sampel BNPC memiliki luas permukaan terendah namun kapasitansinya tetap superior dikarenakan kadar nitrogennya yang tinggi yang meningkatkan konduktivitas, dan dijaga oleh boron sesuai dengan penelitian yang sudah dibahas sebelumnya pada penelitian dong guo ini mayoritas pori pada sampel BNPC adalah mesopori dengan persebaran yang baik yang memudahkan transpor ion retensi sampel BNPC ini juga sangat baik setelah 10000 siklus yaitu 87% dan menurut guo pengurangan kapasitansi ini dikarenakan dekomposisi gugus doping saat proses Charge discharge.

Untuk membandingkan efisiensi co doping pada jurnal terakhir penulis menggunakan jurnal penelitian Amirhossein Fallah *et al* (2020) yang hanya menggunakan boron dalam pendopingannya, dari penelitiannya Amirhossein menyimpulkan bahwa kandungan boron yang berlebih ($4\% <$) dapat mengecilkan luas permukaan dan menutup mesopori dikarenakan agglomerasi pori serta memperlambat distribusi muatan, sama seperti doping heteroatom lainnya boron dapat memunculkan cacat atau defect pada struktur karbon, dari penelitian amirhossein ini juga diketahui bahwa elektrolit mempengaruhi kapasitansi dilihat dari kurva CV dan GCD nya H₂SO₄ memiliki kapasitansi tertinggi, menurut amirhossein hal ini dikarenakan konduktivitas dan mobilitas ion H⁺ lebih tinggi (2.80A) dibanding K⁺ (3.31A) dan Na⁺ (3.58A) dari kurva yang sama juga dapat dilihat bahwa doping boron menghasilkan sedikit sifat pseudocapacitance optimal pada sampel B2-pC (2at% Boron) dengan kapasitansi 351F/g pada 0.5A, adapun untuk stabilitas sampel B2-pC memiliki retensi kapasitansi sebesar 98.5% pada 1A/g setelah 2500 siklus, relatif lebih kecil dari sampel dengan codoping.

4.3 Pembahasan

Berdasarkan Review Jurnal Diatas dapat disimpulkan bahwa penambahan doping fosfor dapat meningkatkan kapasitansi dengan cara membuka pori pori yang tertutup pada temperatur pirolisis yang optimal khususnya mikropori dan mesopori, karena jika temperatur terlalu rendah doping fosfor tidak akan terdekomposisi membentuk gas yang berperan sebagai expanding agent. Akan tetapi bila temperatur terlalu tinggi maka gas akan terlalu cepat keluar dari struktur material karbon. Disamping itu atom fosfor memiliki elektronegativitas yang lebih rendah dari karbon (2.19 vs 2.55) dan juga memiliki jari jari kovalen yang lebih besar yang mengakibatkan defect pada material yang di doping, dimana pada defect ini muatan dapat terkonsentrasi membentuk situs aktif. Defect ini terlihat pula dalam hasil XRD dimana terjadi peningkatan interlayer spacing pada bidang 002 dan penurunan derajat grafitisasi pada material berdoping.

Mikropori yang terbentuk saat proses pirolisis pada material berdoping P dapat menjadi lokasi penetrasi ion dan mesopori yang luas akan memudahkan transpor ion pada rapat arus yang lebih tinggi yang pada akhirnya meningkatkan kapasitansi, selain itu doping P juga meningkatkan wettability memudahkan penyebaran ion pada permukaan elektroda, mencegah munculnya situs oksidasi aktif dan mencegah munculnya oksigen yang bersifat electrophilic yang dapat mendegradasi elektrolit. Disamping itu dari penelitian Guanfeng Ling *et al* (2020)

ditemukan sampel dengan luas BET yang lebih kecil namun memiliki kapasitansi lebih besar dari sampel non-doping yang menurut guanfeng diakibatkan bahwa doping fosfor mencegah dekomposisi air yang merupakan pelarut dari elektrolit dimana hal ini membantu mempertahankan atau menjaga sifat EDLC, selain itu menurut guanfeng tidak semua pori ideal untuk dimasuki elektron dan luas permukaan spesifik yang terlalu tinggi dapat meningkatkan resiko elektrolit terdekomposisi dengan lebih cepat sedangkan secara umum dari ketiga jurnal kapasitansi akan menurun dengan peningkatan rapat arus dikarenakan pada rapat arus ataupun scan rate tinggi ion tidak sempat berdifusi kedalam pori membentuk EDLC.

Menurut Song Liu *et al* (2022) dan Xian Hu *et al* (2021) sulfur juga dapat meningkatkan konduktivitas seperti nitrogen sebagai doping meski efektivitasnya tidak setinggi nitrogen dengan cara meningkatkan polarisasi pada permukaan elektroda, sama seperti doping heteroatom fosfor pendopongan sulfur juga menurunkan derajat grafitisasi berdasarkan hasil XRD yang ditandai dengan melandasinya puncak difraksi sama seperti fosfor penambahan sulfur juga dapat menimbulkan defect pada struktur kristal akibat ukurannya yang lebih besar dari karbon, dari penelitian Xian Hu (2021) diketahui seiring dengan bertambahnya aktivator maka luas permukaan yang terdiri dari mikro dan mesopori akan meningkat. Mikropori dan mesopori ini akan berfungsi sebagai situs tempat ion berdifusi. Namun aktivator yang berlebihan justru dapat menghancurkan struktur pori membuat micro pori saling menyatu membentuk mesopore dan mesopore menyatu membentuk macropore sehingga kapasitansi menurun, kadar sulfur yang lebih tinggi juga dikaitkan dengan retensi kapasitansi yang baik pada rapat arus tinggi karena pembentukan thiophene sulfur pada penelitian Tian *et al* (2018) Adapun mekanisme aktivasi menurut Si Zheng *et al* (2021) adalah pertama tama rangka atau struktur karbon akan ter etsa akibat reaksi redox antara aktivator dan karbon, hal ini akan memicu pembentukan pori kemudian gas gas dari reaksi akan bereaksi lebih lanjut dengan C membentuk porositas kemudian interkalasi Na atau K akan memperluas kisi karbon, struktur berpori dari proses ini akan mempermudah transpor ion karena memperpendek jarak yang harus dilalui ion.

Menurut Si Zheng (2021) pendopongan nitrogen akan menghasilkan gugus Pyridine dan pyrrolic yang dapat menghancurkan ikatan antar karbon, hal ini akan meningkatkan cacat dan membentuk situs aktif baru serta sifat pseudocapacitance, selain itu Nitrogen yang teroksidasi dan temperature yang optimal akan meningkatkan konduktivitas listrik mempermudah proses transfer elektron hal ini dapat dilihat pada penelitian Chao Long *et al* (2016) dimana sampel N-PC-700 dengan konduktivitas tertinggi (2.72sm) memiliki kapasitansi yang sangat besar pada rapat arus rendah, dari penelitian Bin Xu *et al* (2013) dapat dilihat juga bahwa seiring dengan meningkatnya temperatur pirolisis maka kandungan nitrogen akan berkurang yang uga akan mengurangi efek pseudocapacitance, efek pseudocapacitance memiliki peran sangat besar dalam meningkatkan kapasitansi terbukti dari salah satu sampel pada penelitian bin yang memiliki kapasitansi cukup tinggi meski luas permukaannya kecil (ENM 500 BET 132m²/g, kapasitansi 130F/g) sampel paling optimal adalah ENM700 dikarenakan luas permukaan yang optimal dan kadar nitrogen yang masih cukup banyak (5.43%), sedangkan sampel lain dengan temperatur lebih tinggi kapasitansinya justru lebih kecil meski luas permukaannya lebih besar hal ini dikarenakan doping nitrogen yang kadarnya berkurang hal ini dapat di konfirmasi dimana dari 3 urnal kapasitansi tertinggi diperoleh pada temperatur 700 yang tidak terlalu tinggi dan kadar nitrogen masih banyak, doping nitrogen ini juga mempengaruhi rentensi pada arus tinggi karena pseudocapacitance tidak begitu bertahan pada arus tinggi, stabilitas berkurang karena degradasi partikel pada material konduktiv akibat ekspansi dan penyusutan saat proses Charge discharge menghasilkan situs mati atau dead site menurut Tian (2018).

Menurut Jing Zhao *et al* (2017) peningkatan temperatur pirolisis adalah salah satu cara meningkatkan konduktivitas, dan menurut beliau pendopongan B, N dan P dapat meningkatkan

konduktivitas dalam penelitiannya yang menggunakan dandelion sebagai precursor carbon dan di doping dengan boron dan nitrogen diketahui bahwa penggunaan aktivator yang berlebihan dapat mengakibatkan runtuhnya struktur pori, sedangkan dari hasil XRD diketahui bahwa penambahan doping boron dapat meningkatkan derajat grafitisasi sedangkan penambahan Nitrogen dapat meningkatkan efektifitas dan kadar doping secara sinergis yang dibuktikan dengan kadar boron pada sampel codoping lebih tinggi (4.6%) dibanding sampel dengan doping boron saja (2.2%) menurut Jing hal ini diakibatkan Boron merupakan akseptor elektron dan Nitrogen yang memiliki sifat poli elektron dapat menempel pada boron, dari hasil pengujian BET diketahui pendopingan pada penelitian ini tidak meningkatkan luas permukaan yang kemungkinan diakibatkan oleh luas yang sudah maksimum hanya dari aktivasi dengan koh dari hasil pengujian CV diketahui bahwa sampel B/N-PCTB memiliki kapasitansi paling tinggi (355F/g pada 1A/g dan 292F/g pada 20A/g dan kurva dengan unsur EDLC dan pseudocapacitance, menurut jing pendopingan boron dapat menjaga sifat pseudocapacitance pada kandungan nitrogen rendah dan arus tinggi dikarenakan B dapat berfungsi sebagai katalis yang mempercepat reaksi redox nitrogen hal ini dibuktikan dengan stabilitas tinggi B/N-PCTB sebesar 96% pada 20A/g setelah 10000 siklus.

Hal serupa juga dijumpai pada penelitian Dong Guo *et al* (2018) dengan nilai kapasitansi sampel berdoping boron dan nitrogen hingga 402F/g pada 0.5A/g dan 266F/g pada 20A/g adapun kandungan Nitrogen dan boron pada sampel BNPC ini adalah 9.38% (Vs NPC 7.22%) dan 3.87% (Vs BPC 1.22%) pada penelitian ini sampel BNPC memiliki luas permukaan terendah namun kapasitansinya tetap superior dikarenakan kadar nitrogennya yang tinggi yang meningkatkan konduktivitas, dan dijaga oleh boron sesuai dengan penelitian yang sudah dibahas sebelumnya pada penelitian dong guo ini mayoritas pori pada sampel BNPC adalah mesopori dengan persebaran yang baik yang memudahkan transpor ion retensi sampel BNPC ini juga sangat baik setelah 10000 siklus yaitu 87% dan menurut guo pengurangan kapasitansi ini dikarenakan dekomposisi gugus doping saat proses Charge discharge,

Untuk membandingkan efisiensi co doping pada jurnal terakhir penulis menggunakan jurnal penelitian Amirhossein Fallah *et al* (2020) yang hanya menggunakan boron dalam pendopingannya, dari penelitiannya Amirhossein menyimpulkan bahwa kandungan boron yang berlebih ($4% <$) dapat mengecilkan luas permukaan dan menutup mesopori dikarenakan aglomerasi pori serta memperlambat distribusi muatan, sama seperti doping heteroatom lainnya boron dapat memunculkan cacat atau defect pada struktur karbon, dari penelitian amirhossein ini juga diketahui bahwa elektrolit mempengaruhi kapasitansi dilihat dari kurva CV dan GCD nya H₂SO₄ memiliki kapasitansi tertinggi, menurut amirhossein hal ini dikarenakan konduktivitas dan mobilitas ion H⁺ lebih tinggi (2.80A) dibanding K⁺ (3.31A) dan Na⁺ (3.58A) dari kurva yang sama juga dapat dilihat bahwa doping boron menghasilkan sedikit sifat pseudocapacitance optimal pada sampel B₂-pC (2at% Boron) dengan kapasitansi 351F/g pada 0.5A, adapun untuk stabilitas sampel B₂-pC memiliki retensi kapasitansi sebesar 98.5% pada 1A/g setelah 2500 siklus, relatif lebih kecil dari sampel dengan coding.

Dari semua Unsur doping hetero atom diketahui bahwa nitrogen mengalami peningkatan kapasitansi paling signifikan hingga ada yang mencapai 402F/g pada penelitian chao long, akan tetapi secara keseluruhan performa sampel dengan co doping Nitrogen dan boron lebih superior dibanding ketiga sampel dikarenakan efek sinergis dari doping boron dan nitrogen dimana nitrogen meningkatkan konduktivitas dan menghasilkan sifat pseudocapacitance yang lebih tinggi sementara boron sebagai katalis reaksi redox akan menjaga pseudocapacitance tersebut pada kadar nitrogen rendah maupun arus tinggi serta mencegah terjadinya dekomposisi gugus doping pada saat charge discharge meningkatkan stabilitas

Tabel 4. 13 Perbandingan Kapasitansi Tiap Unsur Doping dan Jurnal

Sumber Karbon	Doping	Fungsi	Kapasitansi Minimum	Stabilitas (%/ siklus / A/g)	Refrensi
<i>Sawdust</i>	F	Memperlebar Pori	98F/g	98.3/5/2	Guanfeng Lin <i>et al</i>
Daun <i>Saccharum bengalense</i>	F	Memperlebar Pori	~75F/g	99.4/5/5	Sangeeta Rawal <i>et al</i>
Antrasit	F!	Memperlebar Pori	91F/g	90.2/20/1	Weiping Ma <i>et al</i>
Sodium Lignosulfate	S!	-Memperlebar Pori dan Meningkatkan Konduktivitas	153 F/g	99.1/10/5	Jingyang Tian <i>et al</i>
Ulthorix Algae	S!	Memperlebar Pori dan Meningkatkan Konduktivitas	212 F/g	90.6/50/5	Song Liu <i>et al</i>
<i>Surgical Mask</i>	S!	-Meperlebar Pori dan meningkatkan Konduktivitas	259 F/g	90,4/10/15	Xian Hu <i>et al</i>
<i>Chitin</i>	N!	Meningkatkan Konduktivitas dan Pseudocapacitance	202 F/g	98/10/10	Si Zheng <i>et al</i>
EDTA Disodium Magnesium	N	Meningkatkan Konduktivitas dan Pseudocapacitance	196 F/g	95.5/5/0.6	Bin Xu <i>et al</i>
Kepompong <i>Bombyx Mori</i>	N!	Meningkatkan Konduktivitas dan Pseudocapacitance	235 F/g	96/20/25	Chao Long <i>et al</i>
Bulu Dandelion	B/N	Katalis Reaksi Redox/Meningkatkan Konduktivitas	292 F/g	96/10/20	Jing Yang <i>et al</i>
<i>Starch</i>	B/N	- Katalis Reaksi Redox/Meningkatkan Konduktivitas	266 F/g	87/10	Dong Guo <i>et al</i>
Sukrosa	B	Katalis Reaksi Redox	351 F/g	98.5/1	Amirhossein Fallah <i>et al</i>

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang didapat setelah melakukan *Review* Jurnal terkait pendopongan doping hetero atom boron, fosfor, nitrogen dan sulfur ini adalah sebagai berikut

1. Pendopongan doping heteroatom mengubah struktur sampel dikarenakan terjadi defect pada struktur karbon, pada doping sulfur fosfor dan boron pendopongan menyebabkan defect dan terbukanya struktur pori akibat jari-jari atom ketiganya yang lebih besar dibandingkan karbon sehingga pendopongan terjadi secara substitusi, disamping pendopongan itu sendiri temperatur dan jumlah/massa aktivator memiliki peran penting dimana apabila aktivator dan temperatur terlalu berlebih struktur pori yang terbentuk dapat mengalami kehancuran sedangkan bila temperatur atau aktivator tidak memadai maka pori pori baru tidak akan terbentuk atau berkembang dan luas permukaan tidak bertambah. Sedangkan dengan nitrogen, pendopongan menciptakan defect dengan cara intersisi dikarenakan jari-jari atomnya yang lebih kecil selain itu nitrogen juga meningkatkan konduktivitas dan memunculkan sifat pseudokapasitansi.
2. Pendopongan heteroatom disertai temperatur aktivasi dan jumlah / massa aktivator yang ideal (700°C dan 1:3) meningkatkan kapasitansi secara signifikan hingga mencapai 365 F/g untuk doping sulfur, 292F/g untuk doping fosfor 405F/g untuk doping nitrogen dan 351F/g untuk doping boron, akan tetapi kapasitansi paling superior diperoleh dari pendopongan sekaligus boron dan nitrogen yang mencapai 405F/g, selain itu pendopongan boron dan nitrogen sekaligus ini juga menghasilkan rentensi kapasitansi yang paling superior hingga 292F/g pada rapat arus tinggi hingga 20A/g dan 10.000 siklus, dibandingkan dengan fosfor yang hanya memiliki nilai 75F/g pada 5A/g, sulfur 153F/g pada 10A/g, nitrogen 235F/g pada 25A/g. Hal ini dikarenakan efek sinergis antara boron dan nitrogen dimana boron berperan sebagai akseptor menerima electron dari nitrogen yang memiliki polielektron membentuk ikatan B-N hal ini akan meningkatkan kadar boron dan nitrogen dalam sampel dibanding dengan pendopongan secara mandiri, disamping itu boron juga berperan sebagai katalis pada reaksi redoks yang melibatkan N menyebabkan kapasitansi tetap bernilai tinggi meski pada rapat arus yang tinggi ataupun laju pemindaian yang tinggi. Pendopongan sulfur boron dan fosfor meningkatkan kapasitansi dengan cara memperluas permukaan dari pembukaan pori sementara nitrogen meningkatkan kapasitansi dengan meningkatkan konduktivitas dan sifat pseudokapasitansi.

5.2. Saran

Adapun saran penulis untuk penelitian selanjutnya berdasarkan *review paper* ini adalah

1. Melakukan penelitian lebih lanjut dalam menyelidiki pengaruh pendopongan doping hetero atom atau kombinasi heteroatom lainnya untuk mendapatkan data lebih lanjut yang dapat digunakan untuk verifikasi hasil yang tertulis pada penelitian ini.
2. Menggunakan referensi dari luar untuk melengkapi kekurangan data dari jurnal yang direview dan untuk membantu analisis pengaruh parameter terhadap sifat yang diteliti.
3. Melengkapi penelitian selanjutnya dengan *element analysis* untuk mengetahui presentase komposisi doping yang tersisa di dalam sampel setelah pirolisis.
4. Memberikan tanda pada struktur penting yang terdapat pada gambar SEM.

DAFTAR PUSTAKA

- Brasted, R. C. (2021, September 1). *sulfur*. *Encyclopedia Britannica*. <https://www.britannica.com/science/sulfur>
- Britannica, T. Editors of Encyclopaedia (2021, June 16). *boron*. *Encyclopedia Britannica*. <https://www.britannica.com/science/boron-chemical-element>
- Britannica, T. Editors of Encyclopaedia (2022, May 24). *phosphorus*. *Encyclopedia Britannica*. <https://www.britannica.com/science/phosphorus-chemical-element>
- Chen, D. D., He, Z. Q., Wang, M., Wu, D., Chen, X. Y., & Zhang, Z. J. (2020). Boron doping and structure control of carbon materials for supercapacitor application: the effect of freeze-drying and air-drying for porosity engineering. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 24(3), 641–654. <https://doi.org/10.1007/s10008-020-04498-1>
- Chen, H., Xiong, Y., Yu, T., Zhu, P., Yan, X., Wang, Z., & Guan, S. (2017). Boron and nitrogen co-doped porous carbon with a high concentration of boron and its superior capacitive behavior. *Carbon*, 113, 266–273. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2016.11.035>
- Deng, W., Zhang, Y., Yang, L., Tan, Y., Ma, M., & Xie, Q. (2015). Sulfur-doped porous carbon nanosheets as an advanced electrode material for supercapacitors. *RSC Advances*, 5(17), 13046-13051. <https://doi.org/10.1039/c4ra14820g>
- Fallah, A., Oladipo, A. A., & Gazi, M. (2020). Boron-doped sucrose carbons for supercapacitor electrode: artificial neural network-based modelling approach. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 31(17), 14563–14576. <https://doi.org/10.1007/s10854-020-04017-y>
- Frackowiak, E., & Beguin, F. (2001). Carbon materials for the electrochemical storage of energy in capacitors. In *Carbon* (Vol. 39).p937 –950
- Guo, D., Ding, B., Hu, X., Wang, Y., Han, F., & Wu, X. (2018). Synthesis of Boron and Nitrogen Codoped Porous Carbon Foam for High Performance Supercapacitors. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 6(9), 11441–11449. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b01435>
- Hu, X., & Lin, Z. (2021). *Transforming waste polypropylene face masks into S-doped porous carbon as the cathode electrode for supercapacitors*. <https://doi.org/10.1007/s11581-021-03949-7>/Published
- IRENA (International Renewable Energy Agency). 2017 Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030, I, Abu Dhabi,
- Jeon, W. S., Kim, C. H., Wee, J. H., Kim, J. H., Kim, Y. A., & Yang, C. M. (2021). Sulfur-doping effects on the supercapacitive behavior of porous spherical graphene electrode derived from layered double hydroxide template. *Applied Surface Science*, 558. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.149867>
- Kang, F., Inagaki, M. & Itoi, H..(2021). *Porous carbons*. 8-9 Elsevier Science
- Kiciński, W., Szala, M., & Bystrzejewski, M. (2014). Sulfur-doped porous carbons: Synthesis and applications. In *Carbon* (Vol. 68, pp. 1–32). <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2013.11.004>

- Lee, J., Kim, J., & Hyeon, T. (2006). Recent progress in the synthesis of porous carbon materials. In *Advanced Materials* (Vol. 18, Issue 16, pp. 2073–2094). <https://doi.org/10.1002/adma.200501576>
- Libich, J., Máca, J., Vondrák, J., Čech, O., & Sedlaříková, M. (2018). Supercapacitors: Properties and applications. *Journal of Energy Storage*, *17*, 224–227. <https://doi.org/10.1016/j.est.2018.03.012>
- Lin, G., Wang, Q., Yang, X., Cai, Z., Xiong, Y., & Huang, B. (2020). Preparation of phosphorus-doped porous carbon for high performance supercapacitors by one-step carbonization. *RSC Advances*, *10*(30), 17768–17776. <https://doi.org/10.1039/d0ra02398a>
- Linder, S. (2006) *Power Semiconductors*. 11-12 (CRC Press, 2006).
- Liu, S., Chen, K., Wu, Q., Gao, Y., Xue, C., & Dong, X. (2022). Ulothrix-Derived Sulfur-Doped Porous Carbon for High-Performance Symmetric Supercapacitors. *ACS Omega*, *7*(12), 10137–10143. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c06253>
- Long, C., Zhuang, J., Xiao, Y., Zheng, M., Hu, H., Dong, H., Lei, B., Zhang, H., & Liu, Y. (2016). Nitrogen-doped porous carbon with an ultrahigh specific surface area for superior performance supercapacitors. *Journal of Power Sources*, *310*, 145–153. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.01.052>
- Luo, L., Zhou, Y., Yan, W., Wu, X., Wang, S., & Zhao, W. (2020). Two-step synthesis of B and N co-doped porous carbon composites by microwave-assisted hydrothermal and pyrolysis process for supercapacitor application. *Electrochimica Acta*, *360*, 137010. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2020.137010>
- Ma, W., Xie, L., Dai, L., Sun, G., Chen, J., Su, F., Cao, Y., Lei, H., Kong, Q., & Chen, C. M. (2018). Influence of phosphorus doping on surface chemistry and capacitive behaviors of porous carbon electrode. *Electrochimica Acta*, *266*, 420–430. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.02.031>
- Manocha, S. M. (2003). Porous carbons. In *S⁻ adhan⁻ a* (Vol. 28). Parts 1 & 2, pp. 335–348 (2003)
- Noer, Z. & Irvina Ritongga, S. (2021). *Alat-alat Laboratorium Untuk Universitas Kategori II*. 99-100 GUEPEDIA .
- Peng, C., Lang, J., Xu, S., & Wang, X. (2014). Oxygen-enriched activated carbons from pomelo peel in high energy density supercapacitors. *RSC Advances*, *4*(97), 54662–54667. <https://doi.org/10.1039/c4ra09395j>
- Rawal, S., Kumar, Y., Mandal, U. K., Kumar, A., Tanwar, R., & Joshi, B. (2021). Synthesis and electrochemical study of phosphorus-doped porous carbon for supercapacitor applications. *SN Applied Sciences*, *3*(2). <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04187-2>
- Sanderson, R. Thomas (2020, November 5). nitrogen. Encyclopedia Britannica. <https://www.britannica.com/science/nitrogen>
- Tian, J., Zhang, H., Liu, Z., Qin, G., & Li, Z. (2018). One-step synthesis of 3D sulfur-doped porous carbon with multilevel pore structure for high-rate supercapacitors. *International Journal of Hydrogen Energy*, *43*(3), 1596–1605. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.11.091>

- Titus, D., James Jebaseelan Samuel, E., & Roopan, S. M. (2019). Nanoparticle characterization techniques. In *Green Synthesis, Characterization and Applications of Nanoparticles* (pp. 303–319). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102579-6.00012-5>
- TTahir, M. B., Abrar, M., Tehseen, A., Awan, T. I., Bashir, A., & Nabi, G. (2020). Nanotechnology: the road ahead. In *Chemistry of Nanomaterials* (pp. 289–308). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-818908-5.00011-1>
- Tyagi, V. K., & Lo, S. L. (2013). Microwave irradiation: A sustainable way for sludge treatment and resource recovery. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 18, pp. 288–305). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.032>
- Vangari, M., Pryor, T., & Jiang, L. (2013). Supercapacitors: Review of Materials and Fabrication Methods. *Journal of Energy Engineering*, 139(2), 72–79. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ey.1943-7897.0000102](https://doi.org/10.1061/(asce)ey.1943-7897.0000102)
- Vollmer, M. (2004). *SPECIAL FEATURE: FOOD PHYSICS Physics of the microwave oven Physics of a microwave oven*. www.iop.org/journals/physed
- Xu, B., Duan, H., Chu, M., Cao, G., & Yang, Y. (2013). Facile synthesis of nitrogen-doped porous carbon for supercapacitors. *Journal of Materials Chemistry A*, 1(14), 4565–4570. <https://doi.org/10.1039/c3ta01637d>
- Xu, E. G., & Ren, Z. J. (2021). Preventing masks from becoming the next plastic problem. *Frontiers of Environmental Science and Engineering*, 15(6). <https://doi.org/10.1007/s11783-021-1413-7>
- Yang, W., Yang, W., Kong, L., Song, A., Qin, X., & Shao, G. (2018). Phosphorus-doped 3D hierarchical porous carbon for high-performance supercapacitors: A balanced strategy for pore structure and chemical composition. *Carbon*, 127, 557–567. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2017.11.050>
- Zhang, H., Ling, Y., Peng, Y., Zhang, J., & Guan, S. (2020). Nitrogen-doped porous carbon materials derived from ionic liquids as electrode for supercapacitor. *Inorganic Chemistry Communications*, 115, 107856. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2020.107856>
- Zhao, J., Li, Y., Wang, G., Wei, T., Liu, Z., Cheng, K., Ye, K., Zhu, K., Cao, D., & Fan, Z. (2017). Enabling high-volumetric-energy-density supercapacitors: Designing open, low-tortuosity heteroatom-doped porous carbon-tube bundle electrodes. *Journal of Materials Chemistry A*, 5(44), 23085–23093. <https://doi.org/10.1039/c7ta07010a>
- Zheng, S., Zhang, J., Deng, H., Du, Y., & Shi, X. (2021). Chitin derived nitrogen-doped porous carbons with ultrahigh specific surface area and tailored hierarchical porosity for high performance supercapacitors. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 6(2), 142–151. <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2021.02.002>
- ZZhang, L., & Zhao, X. S. (2009). Carbon-based materials as supercapacitor electrodes. *Chemical Society Reviews*, 38(9), 2520–2531. <https://doi.org/10.1039/b813846j>

LAMPIRAN

UCAPAN TERIMA KASIH

Dalam proses penelitian dan penyusunan laporan tugas akhir ini, penulis menyadari bahwa tanpa bantuan dan dukungan dari berbagai pihak, penelitian ini tidak dapat terselesaikan dengan baik. Oleh karena itu, ucapan terima kasih tak lupa penulis sampaikan kepada pihak-pihak yang turut serta membantu, diantaranya:

1. Ibu Tri Rahayu dan adik Roki Dwi Putra selaku, keluarga yang selalu memberikan dukungan dan doa kepada penulis di setiap kondisi.
2. Marcel dan Ariiq yang selalu menjadi teman baik penulis dari sebelum berkuliah di ITS hingga menemani hari-hari penulis selama berkuliah di ITS
3. Agi dan Dimas selaku teman SMA penulis yang menemani penulis selama proses pengerjaan tugas akhir ini.
4. Keluarga besar MT18 yang telah menemani penulis selama masa-masa perkuliahan.
5. Bapak/Ibu tenaga pendidik yang membantu kegiatan akademik selama berkuliah di ITS.
6. MT16, MT17, yang telah memberikan banyak teladan.
7. MT19 dan MT20 yang telah menjadi adik terbaik selama berkuliah.
8. Seluruh pihak yang telah ambil bagian dalam kehidupan penulis sehingga bisa sampai di titik ini.

Sekali lagi penulis ucapkan banyak terima kasih dan juga ingin memohon maaf jika penulis pernah melakukan kesalahan selama berkuliah. Semoga kebaikan yang telah kalian berikan dibalas oleh Allah SWT. Semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat dalam penelitian lebih lanjut, dan khususnya demi kemajuan Departemen Teknik Material dan Metalurgi ITS serta tanah air tercinta.

Surabaya, 21 Juli 2022

Penulis



Surya Pratama

BIODATA PENULIS



Penulis bernama Surya Pratama. yang Merupakan anak pertama dari pasangan Tri Rahayu dan Indrawan Trisno yang lahir pada tanggal 26 Maret 1998 di Bandung, Jawa Barat. Penulis menempuh pendidikan formal di SD BHAKTI YKKP, SMP Negeri 111 Jakarta, SMA Negeri 78 Jakarta dan melanjutkan studi Strata-1 (S1) di Departemen Teknik Material dan Metalurgi FT-IRS ITS Pada tahun 2018. Untuk menyelesaikan studi S1, penulis mengambil tugas akhir pada bidang material inovatif dengan topik superkapasitor. Penulis dapat dihubungi melalui alamat email suryapratama88@yahoo.co.id.