

4. HASIL

Pada hasil dari penyaringan literatur, didapatkan tiga besar polutan. Polutan yang meliputi tiga besar tersebut adalah (Cu^{2+} , Cd^{2+} , dan Cr^{6+}). Limbah sereal yang dimanfaatkan menjadi adsorben antara lain limbah padi, jagung, gandum, sorgum, jawawut (*foxtail millet*), tef, jelai (*barley*) dan soba. Bagian-bagian yang digunakan dari limbah tersebut pada umumnya adalah bagian batang, kulit, dan jeraminya.

4.1. Metode Sintesis dan Modifikasi Adsorben

Pada Tabel 3., disajikan data hasil studi mengenai metode sintesis dan bagaimana adsorben dimodifikasi.

Tabel 3. Metode Sintesis dan Modifikasi Adsorben

No.	Adsorben	Pre-treatment	Pengeringan	Treatment	Modifikasi	Final Treatment	Komposisi	Gugus Fungsi	(m^2/g) Luas Permukaan	Referensi
1	Jerami padi terfermentasi <i>Aspergillus niger</i>	Pencucian, penggilingan FW 100, pengayakan dengan ukuran 0,3 mm,	Elektrik	Penambahan <i>Aspergillus niger</i>	Suspensi spora <i>Aspergillus niger</i> ditambahkan dengan perbandingan 1:1. 7 hari kemudian dipindahkan ke dalam kotak	-	C = 51,80 ± 2,59% N = 19,59 ± 0,978% O = 3,06 ± 0,153% K = 4,55 ± 0,2275% Lignin dan selulosa	-OH, C=O, -C=O dan C=C	6,3139	(Wang <i>et al.</i> , 2016)

Lanjutan Tabel 3. Metode Sintesis dan Modifikasi Adsorben

No.	Adsorben	Pre-treatment	Pengeringan	Treatment	Modifikasi	Final Treatment	Komposisi	Gugus Fungsi	(m ² /g) Luas Permukaan	Referensi
2	Jerami Padi	Penggilingan, pencucian,	Matahari, 48 jam	Penggilingan, penyaringan 250 dan 500 μ m. pencucian dengan air dan distilasi etanol. Pengeringan 100°C 24 jam. Digiling dan diayak dengan ukuran 250 dan 500 μ m	-	-	Terdeteksi C dan O, serta sedikit Si dan N	-OH, -NH, C=O, -COO, -C-O, C-O-C	4,42	(Jawad <i>et al.</i> , 2020)
3	Selulosa berlapis asam humat dari sekam padi	Pengeringan, ditambahkan NaOH, dan dipanaskan (70°C) selama 1 jam. Larutan disaring, dicuci hingga netral, dan dikeringkan	1. 50°C, 12 jam Lampu 250 W, 220 V, AC	Penggilingan	Selulosa ditambahkan 50 ml 0,1% asam humat selama 24 jam. Didiamkan dalam <i>orbital shaker</i> semalaman.	Disaring, lalu dicuci dengan 0,1 M NaOH, dan air. Selulosa dikeringkan sampai massa konstan.	Selulosa, lignin	O-H, C-H, C-O-C.	-	(Basu <i>et al.</i> , 2019)
4	Jerami Padi	Dipotong dengan ukuran 1-2 inci. Pengeringan.	Oven, 60°C, 8 jam	Penggilingan dan pengayakan 10 mesh	-	-	lignin dan selulosa	O-H, C-H, C=C	-	(Bhadoria <i>et al.</i> , 2022)

Lanjutan Tabel 3. Metode Sintesis dan Modifikasi Adsorben

No.	Adsorben	Pre-treatment	Pengeringan	Treatment	Modifikasi	Final Treatment	Komposisi	Gugus Fungsi	(m ² /g) Luas Permukaan	Referensi
5	Jerami Padi Alkali	Dipotong dengan ukuran 1-2 inci, dan diperkecil lagi. Pencucian dan dikeringkan di tempat teduh	Oven, 60°C, 8 jam	Jerami direndam dalam 1% NaOH dengan perbandingan 1:6 selama 24 jam.	Diaktivasi dengan NaOH	Jerami dipisahkan dari NaOH dan dikeringkan di tempat teduh. Lalu dilanjutkan pengeringan	lignin, selulosa, sedikit silika	O-H (lebih terekspos), C-H, C=C	-	(Bhadoria <i>et al.</i> , 2022)
6	Biochar Jerami Padi	Dipotong dengan ukuran 1-2 inci	-	Pirolisis pada suhu 400°C dengan gas N ₂ .	Pirolisis selama 4 jam pada suhu 400°C lalu didinginkan selama 20 jam	Digiling dan diayak	kandungan lignin, selulosa	O-H, C-H, C=C, Si-O	-	(Bhadoria <i>et al.</i> , 2022)
7	Sekam Padi	Pencucian, Perendaman dalam 0,1 M H ₂ SO ₄ selama 2 jam, pengeringan	Oven, 105°C, 3 jam	Penggilingan, pengayakan 20 mesh	Aktivasi dengan H ₂ SO ₄	-	-	-	-	(Azarpira & Balarak, 2016)
8	Nanosorben Padi	Sekam Penggilingan, penyaringan 68-75 µm, pengeringan	-	5 g/l sekam padi, ditambahkan dalam air kondisi asam. Sekam padi diaduk pada 10.000 rpm, selama 30 menit	Nanopartikel didapat dari supernatan	Pengeringan dengan oven pada suhu 60°C selama 4 jam	-	-NH, -OH, C-H, -CH ₂ , Si-O-Si	-	(Evy Alice Abigail & Chidambaram, 2016)

Lanjutan Tabel 3. Metode Sintesis dan Modifikasi Adsorben

No.	Adsorben	Pre-treatment	Pengeringan	Treatment	Modifikasi	Final Treatment	Komposisi	Gugus Fungsi	(m ² /g) Luas Permukaan	Referensi
9	Batang Padi Termodifikasi NaOH	Pemotongan, pencucian, pengeringan, penggilingan dan pengayakan 60 mesh	Oven, 80°C, 24 jam	Penambahan NaOH, bubuk batang padi diaduk selama 24 jam, penyaringan, dan pencucian hingga pH netral	Aktivasi dengan NaOH	Pengeringan dengan oven, 80°C, selama 24 jam	C, O, Ca, Si, dan Mg	O-H, C=O, Si=O, P-O	-	(Xiao-Teng <i>et al.</i> , 2019)
10	Brangkas jagung tercerna anaerobik	Brangkas jagung tercerna anaerobik diambil dari bioreaktor dengan waktu retensi padat 20 hari pada suhu 35°C	105 °C, semalaman	Efluen disaring dan dicuci lalu dikeringkan. Setelah kering diayak berukuran 1 mm	Brangkas jagung dicerna secara anaerobik dengan bioreaktor	-	-	-	-	(Wang <i>et al.</i> , 2013)
11	Rambut Jagung	Pencucian, pengeringan	80°C	Penggilingan dan pengayakan dengan ukuran 0,2 mm	-	-	-	-OH, -CH, C=O, C=C, -C-O, C-O-C, C-N,	1,357	(Petrović <i>et al.</i> , 2016)
12	Bubuk Batang Jagung	Pencucian, pengeringan	Oven, 60°C hingga massa konstan	Penggilingan dengan perkiraan diameter 125-187,5 µm	-	Disimpan dalam desikator	C, O, N, Mg, Ca	C=O, C-O, C-OH, C-O-C, dan I-O	27,9	(Zhang & Chen, 2018)

Lanjutan Tabel 3. Metode Sintesis dan Modifikasi Adsorben

No.	Adsorben	Pre-treatment	Pengeringan	Treatment	Modifikasi	Final Treatment	Komposisi	Gugus Fungsi	(m ² /g) Luas Permukaan	Referensi
13	Tongkol Jagung	Pembersihan dari biji jagung, penggilingan dan pengayakan dengan ukuran 70 mesh, pengeringan	Oven, 50°C, hingga massa konstan	-	-	-	Selulosa	O-H, C-O-C, C-H	-	(Vafakhah <i>et al.</i> , 2014)
14	Batang Jagung	Pembersihan dari daun, penggilingan dan pengayakan dengan ukuran 70 mesh, pengeringan	-	-	-	-	-	-	-	(Vafakhah <i>et al.</i> , 2014)
15	Batang Jagung Termodifikasi	Pengayakan dengan ukuran 70 mesh, pengeringan	-	Penambahan 40 g batang jagung, dengan 200 ml asam nitrat 1 M.	Di oksidasi selama 2 jam pada suhu 50°C	Pencucian hingga pH netral, pengeringan dengan oven pada suhu 50°C 24 jam	-	-	-	(Vafakhah <i>et al.</i> , 2014)
16	Fermentasi Jagung	Pencucian, penggilingan, pengayakan 0,3 mm, pengeringan	Elektrik	Penambahan <i>Aspergillus niger</i>	Fermentasi dengan berbagai rasio dan kondisi pH, temperatur, dan waktu	-	Selulosa	-OH, C=O, -C=O, -COOH dan, C=C.	-	(Ren <i>et al.</i> , 2018)

Lanjutan Tabel 3. Metode Sintesis dan Modifikasi Adsorben

No.	Adsorben	Pre-treatment	Pengeringan	Treatment	Modifikasi	Final Treatment	Komposisi	Gugus Fungsi	(m ² /g) Luas Permukaan	Referensi
17	Jerami gandum + <i>Eupatorium adenophorum</i>	Dikeringkan, digiling, dan disaring	105°C	Jerami gandum dan batang <i>Eupatorium adenophorum</i> dicampur dengan berbagai perbandingan	Campuran dikarbonisasi dengan suhu dan waktu yang berbeda-beda	-	-	-	-	(Song <i>et al.</i> , 2016)
18	Jerami Gandum	Pemotongan menjadi 10 cm, perendaman dengan NaOH 2 jam, dicuci hingga netral	Oven, 75°C	Penambahan suksinat anhidrida, trimetilamin, dan xilena	Disuksinilasi selama 119°C, 8 jam	Disaring lalu dicuci dengan aseton dan air, dikeringkan dalam oven 75°C. Jerami di rendam dalam larutan Na ₂ CO ₃ 0,01 M selama 1 jam	Selulosa, hemiselulosa	Lignin pada dinding sel hilang. Gugus (O-H) dan (C=O)	-	(Lin & Lee, 2018)
19	Dedak Gandum	Pencucian, pengeringan	-	Penyeragaman ukuran dengan masterizer 2000, dengan ukuran 490-505 µm	-	-	-	-	-	(Sulak & Yatmaz, 2012)
20	Batang Gandum	Pencucian, pengeringan, penggilingan	Oven, 100°C, 5 jam	-	-	-	-	-	-	(Jalali <i>et al.</i> , 2021)

Lanjutan Tabel 3. Metode Sintesis dan Modifikasi Adsorben

No.	Adsorben	Pre-treatment	Pengeringan	Treatment	Modifikasi	Final Treatment	Komposisi	Gugus Fungsi	(m ² /g) Luas Permukaan	Referensi
21	Jerami Gandum termodifikasi biasetil	Pencucian, pengeringan dengan udara, penggilingan, pengayakan dengan ukuran 80 mesh, perendaman selama 24 jam, pengeringan oven	Oven, 110°C hingga massa konstan	Pencampuran biasetil	Perendaman dengan biasetil selama 24 jam	Pencucian hingga tidak berwarna, penyaringan, pengeringan di udara.	-	-COOH, -OH, -CONH ₂	7,4207	(Farooq <i>et al.</i> , 2015)
22	Batang Termodifikasi NaHCO ₃ Sorgum	Pencucian, pengeringan	Oven, 105°C, 5 jam	Ditambahkan 1 M NaHCO ₃	1 Batang sorgum direndam 1 M NaHCO ₃ selama 2 jam	Pencucian, pengeringan dengan oven 105°C selama 3 jam, penggilingan, dan pengayakan 2 mm	-	-	-	(Zazouli <i>et al.</i> , 2015)

Lanjutan Tabel 3. Metode Sintesis dan Modifikasi Adsorben

No.	Adsorben	Pre-treatment	Pengeringan	Treatment	Modifikasi	Final Treatment	Komposisi	Gugus Fungsi	(m ² /g) Luas Permukaan	Referensi
23	Limbah manis termodifikasi Ftalat Sorgum (<i>Sorghum L.</i>) Asam Ftalat	Pencucian, pengeringan dengan udara, penggilingan, pengayakan 60-70 mesh, pencucian sampai warna hilang, pengeringan oven	Oven, 70°C	Pencampuran sorgum manis dengan asam ftalat	Sorgum manis dan asam ftalat ditambahkan piridin. Campuran diaduk pada kecepatan 300 rpm dan dipanaskan pada suhu 100°C selama 3 jam	Pendinginan di <i>ice bath</i> selama 30 menit. Pencucian dengan isopropanol, HCL 0,1 M, dan air. Pengeringan dengan oven 95°C hingga massa konstan	-	-OH, Alkil (-R), C=O. memiliki banyak pori-pori	-	(Akram <i>et al.</i> , 2020)
24	Akar Sorgum manis (<i>Sorghum bicolor L.</i>)	Pencucian, pengeringan	Oven udara, 80°C, 2 hari	Penggilingan, pengayakan 30 mesh	-	-	Selulosa, lignin	O-H, N-H, C-H, C-O, C=C, C=O	-	(Choudhary <i>et al.</i> , 2015)
25	Kulit Jawawut (<i>Foxtail Millet</i>)	Pencucian, pengeringan	Oven, 40°C, 24 jam	Digiling dan diayak dengan berbagai ukuran mesh	-	Disimpan dalam wadah plastik, pada suhu 40°C	-	C—H, C=O, C=C, C-O, O—S—O, dan Si—O	-	(Peng <i>et al.</i> , 2018)

Lanjutan Tabel 3. Metode Sintesis dan Modifikasi Adsorben

No.	Adsorben	Pre-treatment	Pengeringan	Treatment	Modifikasi	Final Treatment	Komposisi	Gugus Fungsi	(m ² /g) Luas Permukaan	Referensi	
26	Jerami dimodifikasi dengan sitrat	jelai asam	Digiling, diayak dengan ukuran 100 µm, dan dicuci dengan air deionisasi	Oven, 100°C, 24 jam	Penyeimbangan pH dengan NaOH 0,01 M dan HCl 0,01 M	Diaktivasi dengan asam sitrat, selama 24 jam, 60°C. Direaksikan selama 4 jam 120°C. Suhu diatur 110-130°C, dengan waktu 2-24 jam.	Pengurangan kadar air 30 menit. Disaring dan dicuci hingga tidak reaktif. Dikeringkan dengan suhu 45°C selama 16 jam, dan digiling	C, H, O, N	-COOH.	-	(Pehlivan <i>et al.</i> , 2012)
27	Hidrolisis jerami jelai dengan ultrasonik	jerami dengan	Pencucian, penggilingan, pengeringan	Oven, 50°C 16 jam	Jerami dan asam sulfat dicampur, dan diletakkan dalam <i>ultrasonic bath</i> selama 40 menit, 80°C. Lalu diaduk dengan <i>stirrer</i> selama 23 menit, 90°C, 500 rpm. Lalu disaring dan dicuci dengan NaOH. Jerami ditambahkan etanol dan diaduk dengan <i>stirrer</i> selama 6 jam, 700 rpm. Jerami dikeringkan pada suhu 50°C.	Larutan sodium alginat, dan hemiselulosa, ditambahkan 1M kalsium klorida lalu diaduk dengan <i>stirrer</i> selama 40 menit. Disaring dan dicuci lalu direndam dengan campuran glutaraldehid dan etanol selama 40 menit dengan terus diaduk	Pengeringan selama 48 jam	-	C-O-C, COO, O-H, C-H, C-O	1,3192	(Mohammadabadi & Javanbakht, 2020)

Lanjutan Tabel 3. Metode Sintesis dan Modifikasi Adsorben

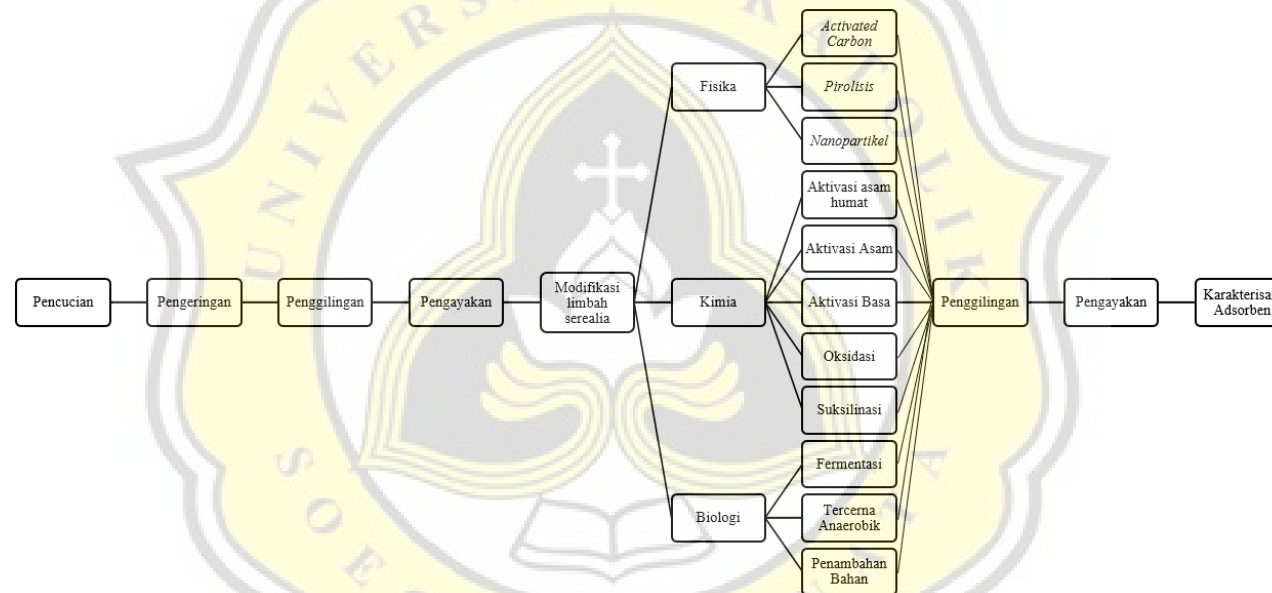
No.	Adsorben	Pre-treatment	Pengeringan	Treatment	Modifikasi	Final Treatment	Komposisi	Gugus Fungsi	(m ² /g) Luas Permukaan	Referensi
28	Jerami Tef diaktivasi KOH	Pencucian, pengeringan, penggilingan, pengayakan dengan ukuran 0,50 mm,	1. Matahari, 12 jam 2. Oven elektrik, 6 jam 105°C 3. Oven, 8 jam 105°C	Ditambahkan H ₃ PO ₄ dengan berbagai konsentrasi dan diaktivasi dengan suhu yang berbeda	Diaktivasi dengan H ₃ PO ₄ , dengan rentang waktu 1-6 jam	Pengeringan pada suhu 110°C hingga massa konstan	-	-	-	(Ayele <i>et al.</i> , 2022)
29	Jerami Tef diaktivasi H ₂ PO ₃	pencucian, pengeringan		Ditambahkan KOH dengan berbagai konsentrasi dan diaktivasi dengan suhu yang berbeda	Diaktivasi dengan KOH dengan rentang waktu 1-6 jam		-	-	-	
30	Jerami soba + <i>Eupatorium adenophorum</i> dikarbonisasi	Jerami soba dan <i>Eupatorium adenophorum</i> , dicuci dan dikeringkan secara terpisah	-	Jerami soba dan <i>Eupatorium adenophorum</i> , digiling dan diayak dengan ukuran 0,25-0,50 mm. Bubuk jerami soba dan <i>Eupatorium adenophorum</i>	Campuran di karbonisasi dengan berbagai suhu dan durasi	Sampel didinginkan dalam suhu ruang	-	-	-	(Chen <i>et al.</i> , 2014)

Pada Tabel 3., metode yang digunakan dalam sintesis adsorben terdiri dari beberapa tahap yang umum, tahap tersebut antara lain, pencucian yang bertujuan untuk menghilangkan debu dan kotoran, lalu ada pengeringan yang menggunakan oven atau sinar matahari, kemudian penggilingan dan penyaringan untuk menyeragamkan ukuran partikel dengan ukuran *mesh* atau ukuran pori-pori tertentu pada saringan yang digunakan.

Tabel 3., menunjukkan bahwa pada proses sintesis, adsorben dimodifikasi dengan perlakuan yang berbeda-beda. Perlakuan yang dilakukan pada sintesis adsorben adalah dimodifikasi secara asam atau basa, diolah menjadi *activated carbon*, difermentasi seperti fermentasi menggunakan *aspergillus niger* (Jerami padi terfermentasi *Aspergillus niger*) (Wang *et al.*, 2016), dan ditambahkan bahan lain seperti *Eupatorium adenophorum* (Chen *et al.*, 2014; Song *et al.*, 2016).

Modifikasi ini bertujuan untuk meningkatkan daya serap dari adsorben. Adsorben yang telah disintesis akan dilakukan karakterisasi menggunakan *Fourier transform infrared* (FTIR), yang merupakan alat untuk menganalisa informasi struktur dan komposisi mengenai gugus fungsi yang aktif dalam adsorben (Jawad *et al.*, 2020). Dari hasil data FTIR yang didapatkan dari jurnal-jurnal, terdapat beberapa gugus fungsi yang sama pada beberapa adsorben untuk menyerap tiga polutan terbesar. Gugus fungsi tersebut adalah -OH, -C=O, C=C, -C-O, -C-H, C-O-C, -COOH, N-H, O-S-O, Si-O, dan COO.

Garis besar dari sintesis dan modifikasi adsorben yang didapat, dapat dilihat pada diagram alir berikut ini (Gambar 5.).



Gambar 5. Diagram Alir metode sintesis dan modifikasi adsorben

Pada Gambar 5., tahapan pada diagram alir adalah pre-treatment yang terdiri dari pencucian, pengeringan, penggilingan, dan penyaringan. Setelah pre-treatment, adsorben akan dimodifikasi, modifikasi yang didapatkan dari hasil studi terbagi menjadi tiga, yaitu modifikasi secara fisika, kimia, dan biologi.

4.2. Kondisi Optimal Adsorben Pada Proses Adsorpsi

Data mengenai kondisi optimal adsorben selama proses adsorpsi akan ditampilkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Kondisi Optimal Adsorben Pada Proses Adsorpsi

No.	Adsorbat	Adsorben	pH	Temperatur (°C)	Konsentrasi Adsorben (mg/L)	Konsentrasi Adsorbat Awal (mg/L)	Waktu (menit)	Q _{max} (mg/g)	Efisiensi Adsorpsi (%)	Referensi
1	Cu ²⁺	Jerami terfermentasi padi	4	30	100	30	120	23,8	98,2	(Wang <i>et al.</i> , 2016)
2	Cu ²⁺	Brangkasan jagung tercerna anaerobik	4	30	2000	100	360	83,3	95,6	(Wang <i>et al.</i> , 2013)
3	Cu ²⁺	Tongkol Jagung	4,5	25	10000	138	120	10,902	-	(Vafakhah <i>et al.</i> , 2014)
4	Cu ²⁺	Batang Jagung	4,5	25	10000	138	120	5,198	-	(Vafakhah <i>et al.</i> , 2014)
5	Cu ²⁺	Batang Jagung Termodifikasi Nitrat	4,5	25	10000	138	120	14,95	-	(Vafakhah <i>et al.</i> , 2014)
6	Cu ²⁺	Fermentasi Batang Jagung	5,4	30	1500	20	30	12,47	93,5	(Ren <i>et al.</i> , 2018)
7	Cu ²⁺	Akar Sorgum manis (<i>Sorghum bicolor L.</i>)	2	20	4500	50	60	18,6	93	(Choudhary <i>et al.</i> , 2015)
8	Cu ²⁺	Kulit Jawawut (<i>Foxtail Millet</i>)	5	25	4000	300	120	11,89	99	(Peng <i>et al.</i> , 2018)
9	Cu ²⁺	Jerami dimodifikasi dengan asam sitrat jelai	7	20	5000	121	120	31,71	88,1	(Pehlivan <i>et al.</i> , 2012)

Lanjutan Tabel 4. Kondisi Optimal Adsorben Pada Proses Adsorpsi

No.	Adsorbat	Adsorben	pH	Temperatur (°C)	Konsentrasi Adsorben (mg/L)	Konsentrasi Adsorbat Awal (mg/L)	Waktu (menit)	Q _{max} (mg/g)	Efisiensi Adsorpsi (%)	Referensi
10	Cd ²⁺	Jerami Padi	5	27	100	70	340	-	51,73	(Bhadoria <i>et al.</i> , 2022)
11	Cd ²⁺	Jerami Padi Alkali	5	27	100	70	340	-	61,5	(Bhadoria <i>et al.</i> , 2022)
12	Cd ²⁺	Biochar Jerami Padi	5	27	550	70	>340	-	88,08	(Bhadoria <i>et al.</i> , 2022)
13	Cd ²⁺	Brangkasan jagung tercerna anaerobik	4	30	2000	100	360	50	92,1	(Wang <i>et al.</i> , 2013)
14	Cd ²⁺	Jerami Gandum	7	-	5000	50	60	113,25	≥99	(Lin & Lee, 2018)
15	Cd ²⁺	Kulit Jawawut (<i>Foxtail Millet</i>)	5	25	4000	300	120	12,48	90	(Peng <i>et al.</i> , 2018)
16	Cr ⁶⁺	Jerami gandum + <i>Eupatorium adenophorum</i>	1	35	2500	45	50	88,57	99	(Song <i>et al.</i> , 2016)
17	Cr ⁶⁺	Akar Sorgum manis (<i>Sorghum bicolor L.</i>)	2	20	4500	50	60	18,39	91,98	(Choudhary <i>et al.</i> , 2015)
18	Cr ⁶⁺	Jerami Tef diaktivasi KOH	2	25	2000	75	240	23,585	89,3	(Ayele <i>et al.</i> , 2022)
19	Cr ⁶⁺	Jerami Tef diaktivasi H ₂ PO ₃	2	25	2000	75	240	23,04	83,1	(Ayele <i>et al.</i> , 2022)
20	Cr ⁶⁺	Jerami soba + <i>Eupatorium adenophorum</i> dikarbonisasi	1	30	300	50	120	55,19	90,8	(Chen <i>et al.</i> , 2014)
21	Pb ²⁺	Rambut Jagung	5	40	100	200	120	-	-	(Petrović <i>et al.</i> , 2016)
22	Pb ²⁺	Batang Gandum	5	-	1000	2,5	90	-	75,2	(Jalali <i>et al.</i> , 2021)

Lanjutan Tabel 4. Kondisi Optimal Adsorben Pada Proses Adsorpsi

No.	Adsorbat	Adsorben	pH	Temperatur (°C)	Konsentrasi Adsorben (mg/L)	Konsentrasi Adsorbat Awal (mg/L)	Waktu (menit)	Q _{max} (mg/g)	Efisiensi Adsorpsi (%)	Referensi
23	Pb ²⁺	Jerami Gandum Termodifikasi Biasetil	5	27	-	-	30	27,39	-	(Farooq <i>et al.</i> , 2015)
24	Pb ²⁺	Hidrolisis jerami jelai dengan ultrasonik	5	55	400	210	120	277,78	≤99	(Mohammadabadi & Javanbakht, 2020)
25	Zn ²⁺	Jerami Padi	4	27	550	70	315	-	39,83	(Bhadoria <i>et al.</i> , 2022)
26	Zn ²⁺	Jerami Padi Alkali	4	27	100	70	327	-	51,9	(Bhadoria <i>et al.</i> , 2022)
27	Zn ²⁺	Biochar Jerami Padi	4	27	100	70	135	-	84,84	(Bhadoria <i>et al.</i> , 2022)
28	Zn ²⁺	Kulit Jawawut (<i>Foxtail Millet</i>)	5	25	4000	300	120	10,59	99	(Peng <i>et al.</i> , 2018)
29	Cr ³⁺	Selulosa berlapis asam humat dari sekam padi	5±0,5	-	1000	10	480	19,39	≥95	(Basu <i>et al.</i> , 2019)
30	Cr ³⁺	Kulit Jawawut (<i>Foxtail Millet</i>)	5	25	4000	300	120	11,7	74	(Peng <i>et al.</i> , 2018)
31	Ni ²⁺	Selulosa berlapis asam humat dari sekam padi	5±0,5	-	1000	10	480	12,41	≥95	(Basu <i>et al.</i> , 2019)
32	Ni ²⁺	Jerami Gandum	7	-	5000	50	60	138,504	98	(Lin & Lee, 2018)
33	2,4-diklorofenoksiasetat	Nanosorben Sekam Padi	5	30	1500	100	60	76,92	96,87	(Evy Alice Abigail & Chidambaram, 2016)

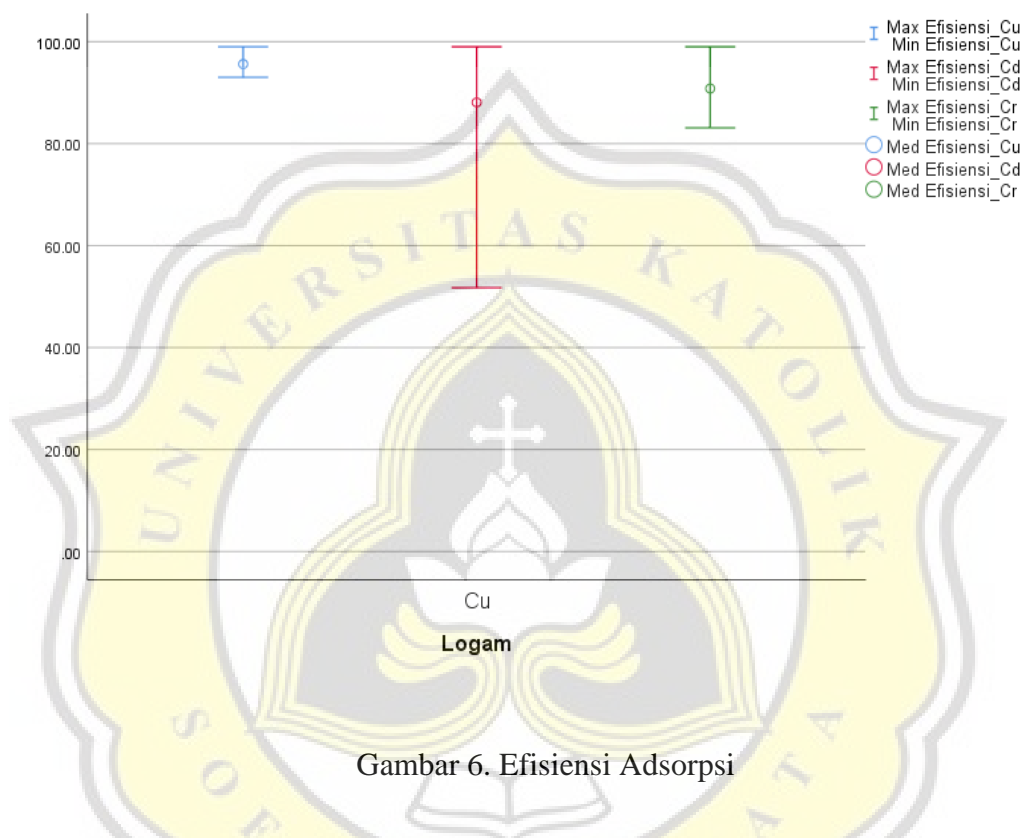
Lanjutan Tabel 4. Kondisi Optimal Adsorben Pada Proses Adsorpsi

No.	Adsorbat	Adsorben	pH	Temperatur (°C)	Konsentrasi Adsorben (mg/L)	Konsentrasi Adsorbat Awal (mg/L)	Waktu (menit)	Q_{max} (mg/g)	Efisiensi Adsorpsi (%)	Referensi
34	<i>Alizarin red S</i>	Limbah Sorgum manis (<i>Sorghum bicolor L.</i>) termodifikasi Asam Ftalat	7	27	900	50	25	285,71	-	(Akram <i>et al.</i> , 2020)
35	<i>Bromophenol blue</i>	Limbah Sorgum manis (<i>Sorghum bicolor L.</i>) termodifikasi Asam Ftalat	7	27	900	30	25	65,78	-	(Akram <i>et al.</i> , 2020)
36	F ⁻	Batang Sorgum Termodifikasi NaHCO ₃	5	30	10000	10	60	7,8	94	(Zazouli <i>et al.</i> , 2015)
37	IO ₃ ⁻	Bubuk Batang Jagung	7	25	8000	86	7200	1,9658	-	(Zhang & Chen, 2018)
38	Metilen biru	Jerami Padi	7	30	1000	100	60	158	99,4	(Jawad <i>et al.</i> , 2020)
39	Metronidazole	Sekam Padi	7	50	3000	10	90	25,81	-	(Azarpira & Balarak, 2016)
40	<i>Remazol Red F3B</i>	Dedak Gandum	2	20	250	200	240	39,42	-	(Sulak & Yatmaz, 2012)

Pada Tabel 4., terkumpul data dari kondisi optimal setiap adsorben. Kondisi optimal akan memengaruhi efisiensi atau daya serap setiap adsorben. Rentang kondisi optimal pH 1-7, temperatur 20-55°C, konsentrasi adsorben 100-10000 mg/L, konsentrasi awal adsorbat 2,5-300 mg/L, waktu adsorpsi 25 menit – 5 hari, dan Q_{max} (kapasitas adsorpsi) 1,89-285,71 mg/g. Efisiensi dari adsorben berada pada rentang 39,83-99,4%. Penjelasan Tabel 4., akan dijelaskan lebih lanjut dengan menggunakan grafik, khususnya pada tiga polutan terbanyak dari data yang didapatkan yaitu, Cu²⁺, Cd²⁺, dan Cr⁶⁺.

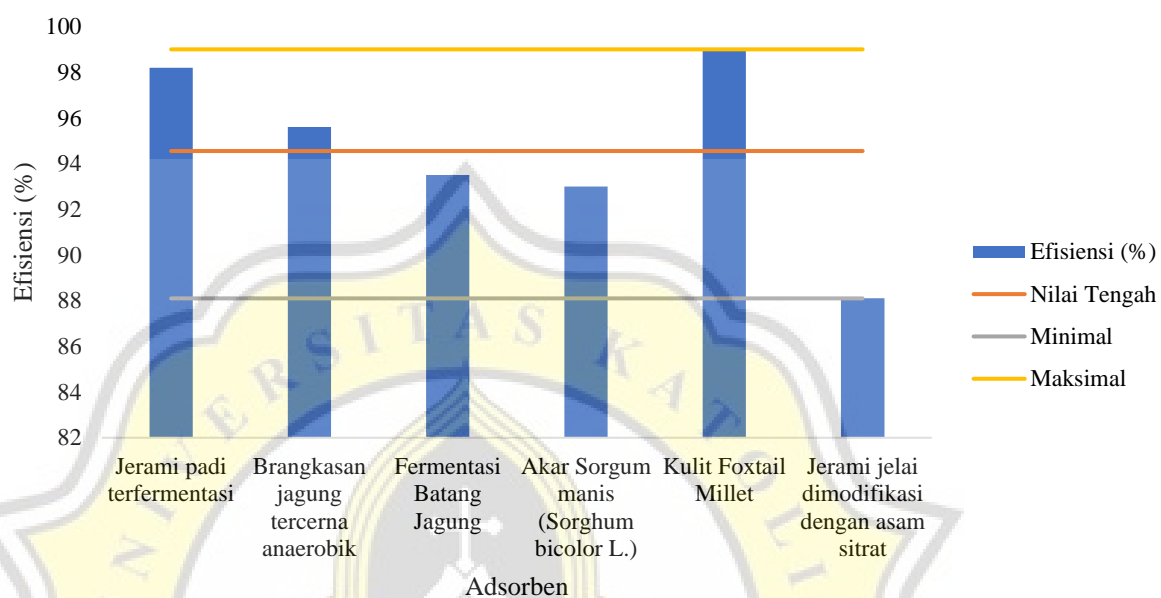
4.2.1. Efisiensi Adsorpsi Tiga Kontaminan Utama

Gambar 6., menampilkan nilai efisiensi adsorpsi tiga kontaminan utama, yaitu Ion Cu^{2+} , Cd^{2+} , dan Cr^{6+} , oleh berbagai adsorben.



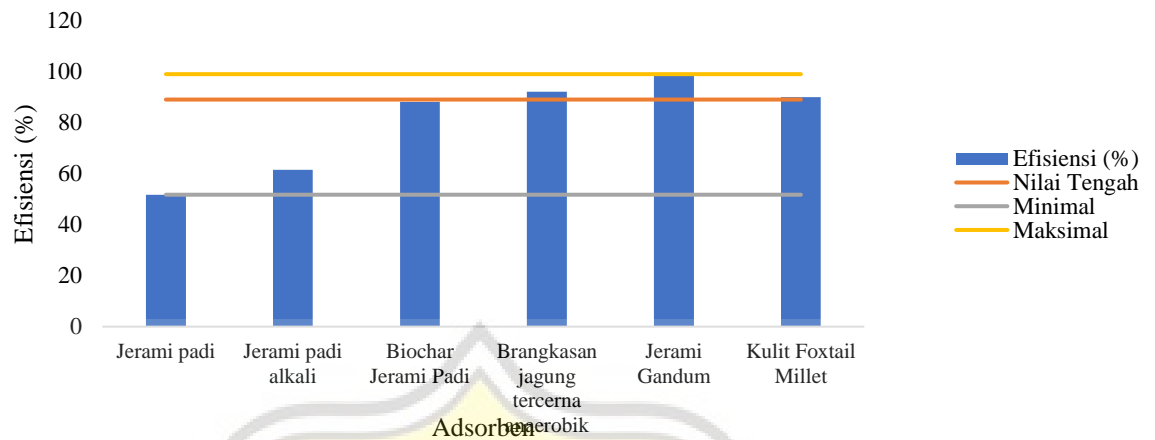
Gambar 6., menunjukkan hasil dari minimal, nilai tengah, dan maksimal efisiensi adsorpsi ion-ion polutan. Rentang efisiensi adsorpsi ion logam Cu^{2+} merupakan yang paling sempit dengan rentang 88,1-99% dan nilai tengah 94,55%. Efisiensi adsorpsi ion logam Cd^{2+} memiliki rentang yang paling besar dengan rentang 51,73-99% dan nilai tengahnya 89,04%. Rentang nilai efisiensi adsorpsi ion logam Cr^{6+} 83,1-99% dengan nilai tengah sebesar 90,8%. Gambar 6., juga menunjukkan besar kecilnya rentang efisiensi adsorpsi masing-masing ion logam, semakin kecil rentangnya maka nilai dari efisiensi adsorpsi lebih mudah dijadikan acuan.

Nilai efisiensi adsorpsi dari masing-masing adsorben untuk penyerapan ion logam Cu^{2+} , Cd^{2+} , dan Cr^{6+} disajikan dalam Gambar 7, 8, dan 9.



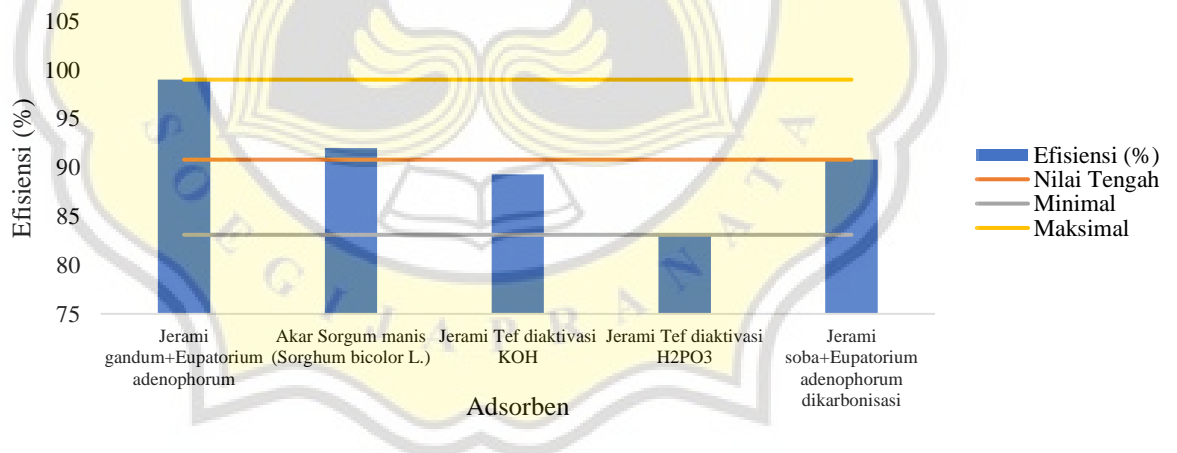
Gambar 7. Efisiensi Adsorpsi Ion Logam Cu^{2+}

Nilai efisiensi adsorpsi ion logam Cu^{2+} ditunjukkan pada Gambar 7. Nilai minimal yang didapatkan sebesar 88,1% dari hasil adsorpsi oleh adsorben jerami jelai yang dimodifikasi asam sitrat. Nilai maksimal diperoleh adsorben kulit *foxtail millet* dengan nilai efisiensi adsorpsi 99% dan nilai tengah dari efisiensi adsorpsi ion logam Cu^{2+} adalah 94,55%.



Gambar 8. Efisiensi Adsorpsi Ion Logam Cd^{2+}

Gambar 8. menunjukkan nilai efisiensi adsorpsi ion logam Cd^{2+} . Nilai minimal diperoleh adsorben jerami padi dengan 51,73%, nilai tengah sebesar 89,04%, dan nilai maksimal diperoleh adsorben jerami gandum dengan nilai 99%.

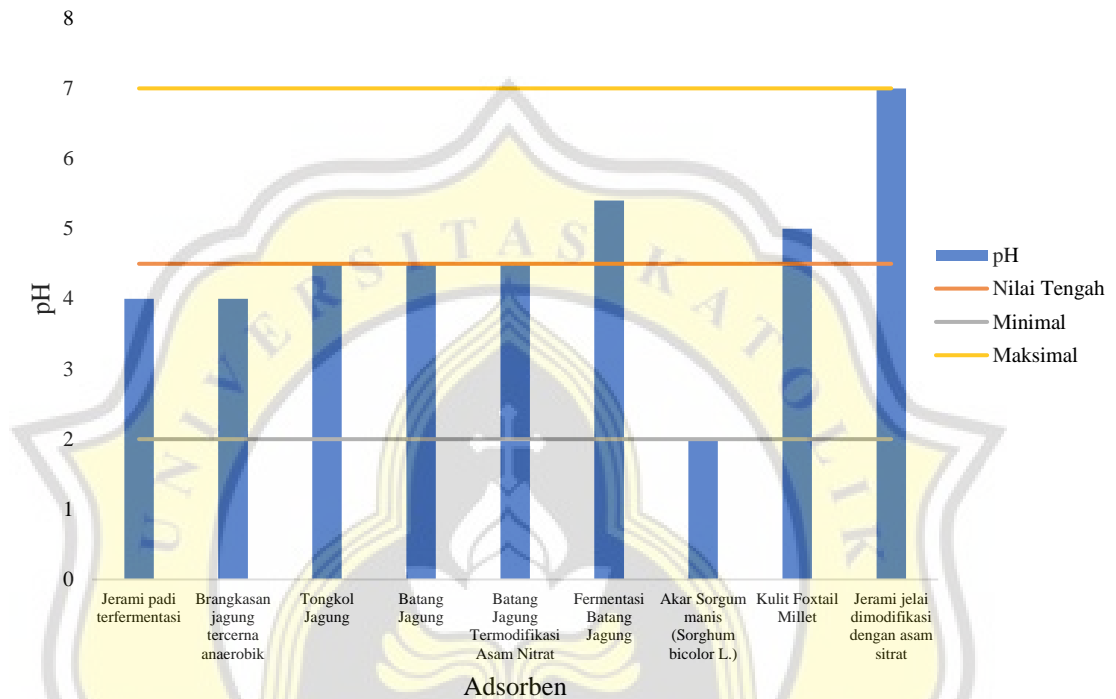


Gambar 9. Efisiensi Adsorpsi Ion Logam Cr^{6+}

Ditunjukkan pada Gambar 9. nilai efisiensi adsorpsi ion logam Cr^{6+} . Nilai minimal diperoleh adsorben jerami tef yang diaktivasi H_2PO_3 dengan nilai 83,1%. Nilai maksimal diperoleh adsorben jerami gandum yang ditambahkan *Eupatorium adenophorum* dengan nilai 99%, dan nilai tengah efisiensi adsorpsi ion logam Cr^{6+} adalah 90,8%.

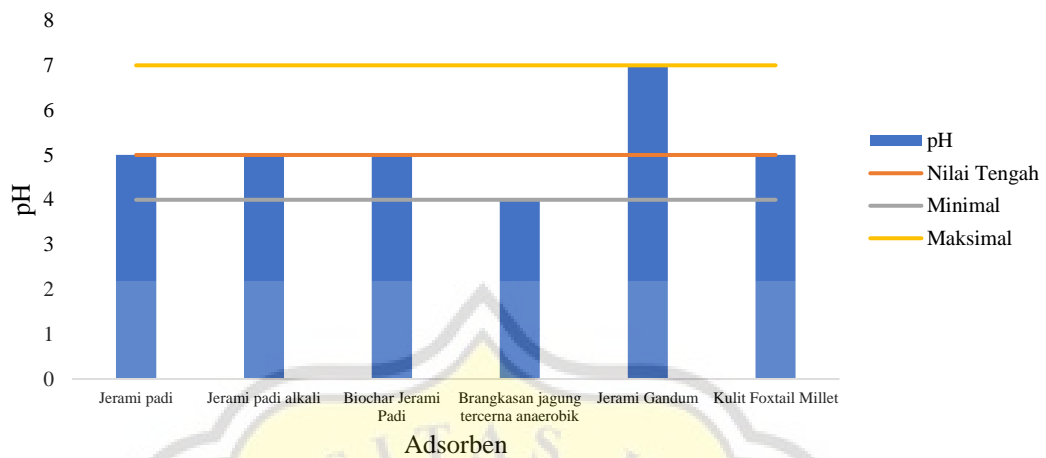
4.2.2. Analisis Pengaruh pH Terhadap Proses Adsorpsi

Nilai pH adsorpsi optimal dari tiga polutan terbanyak ditunjukkan pada Gambar 10-12.



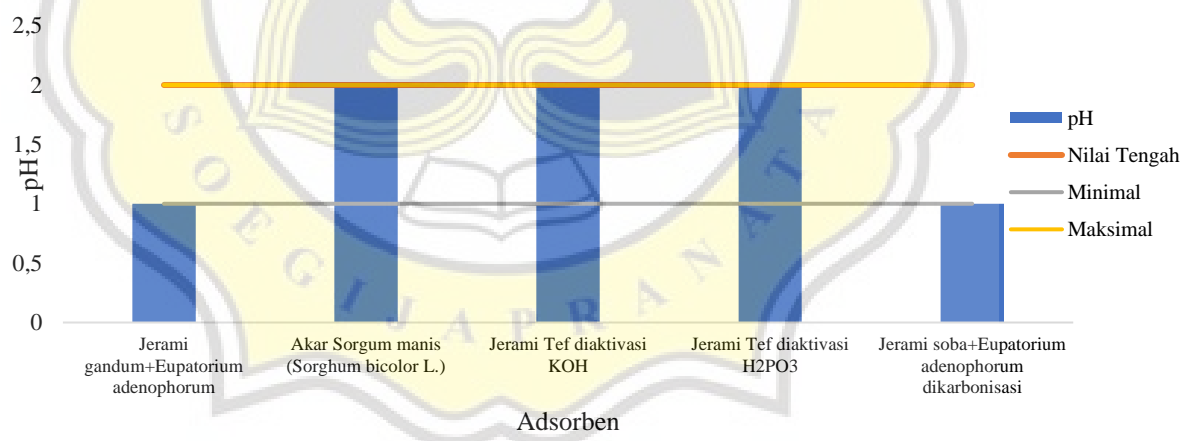
Gambar 10. pH Adsorpsi Ion Logam Cu^{2+}

Gambar 10. menyajikan pH adsorpsi dari ion logam Cu^{2+} . Didapatkan nilai minimal dari pH adsorpsi sebesar 2 (adsorben akar sorgum manis), nilai tengah sebesar 4,5, dan nilai maksimal sebesar 7 (adsorben jerami jelai yang dimodifikasi asam sitrat).



Gambar 11. pH Adsorpsi Ion Logam Cd^{2+}

Gambar 11. menyajikan nilai minimal, nilai tengah, dan nilai maksimal pH adsorpsi dari polutan tersebut adalah 4 (adsorben brangkas jagung tercerna anaerobik), 5, dan 7 (adsorben jerami gandum) secara berturut-turut.

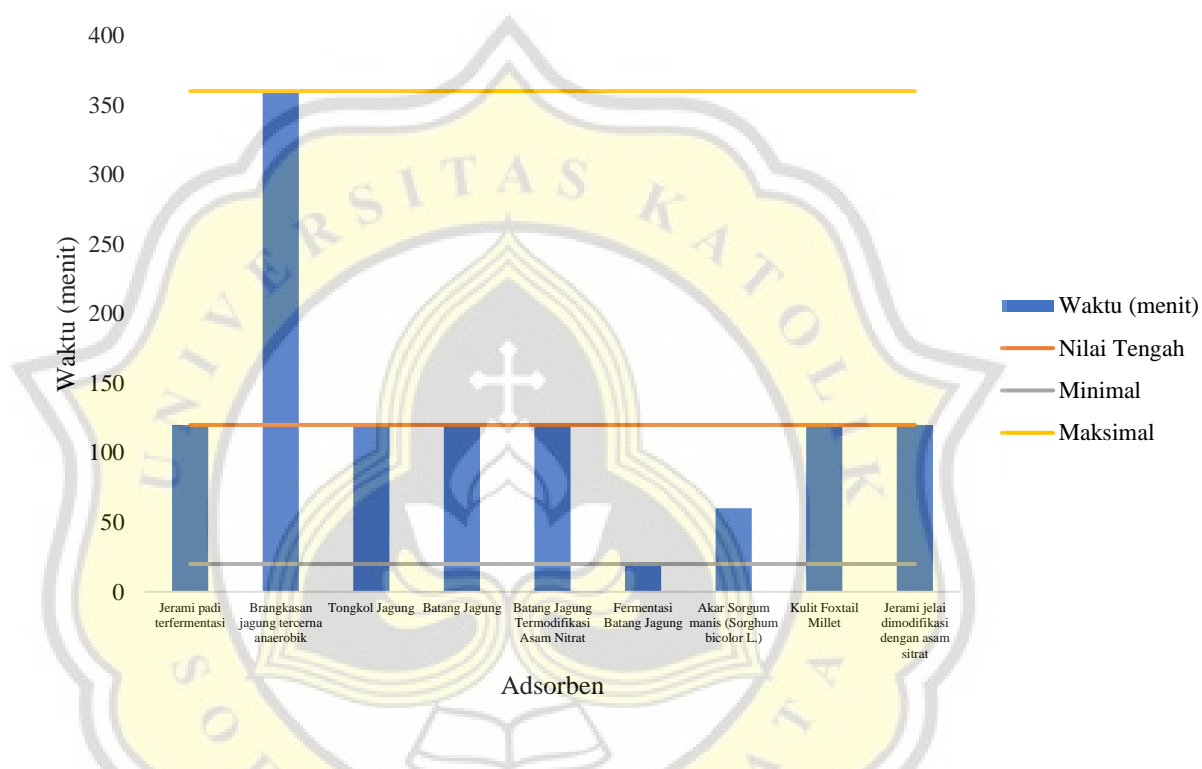


Gambar 12. pH Adsorpsi Ion Logam Cr^{6+}

Nilai pH optimal adsorpsi ion logam Cr^{6+} ditunjukkan pada Gambar 12. didapatkan batas minimum dari pH awal polutan ini adalah 1, sedangkan untuk batas tengah, dan maksimumnya, berada pada pH 1 dan 2 secara berturut-turut.

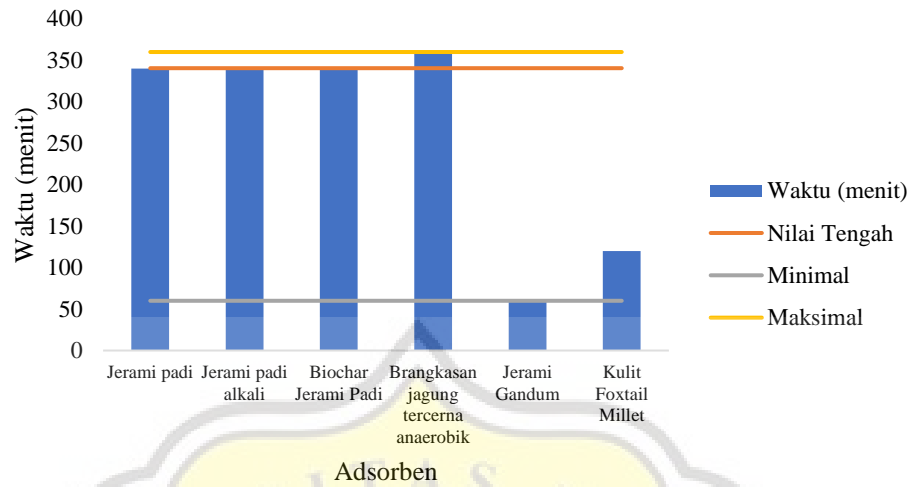
4.2.3. Analisis Pengaruh Waktu terhadap Efisiensi Adsorpsi

Waktu kontak proses adsorpsi (Gambar 13-15.) dari tiga polutan terbanyak disajikan dalam bentuk grafik dan akan ditambahkan garis batas yang merupakan batas minimal, maksimal, dan batas tengah.



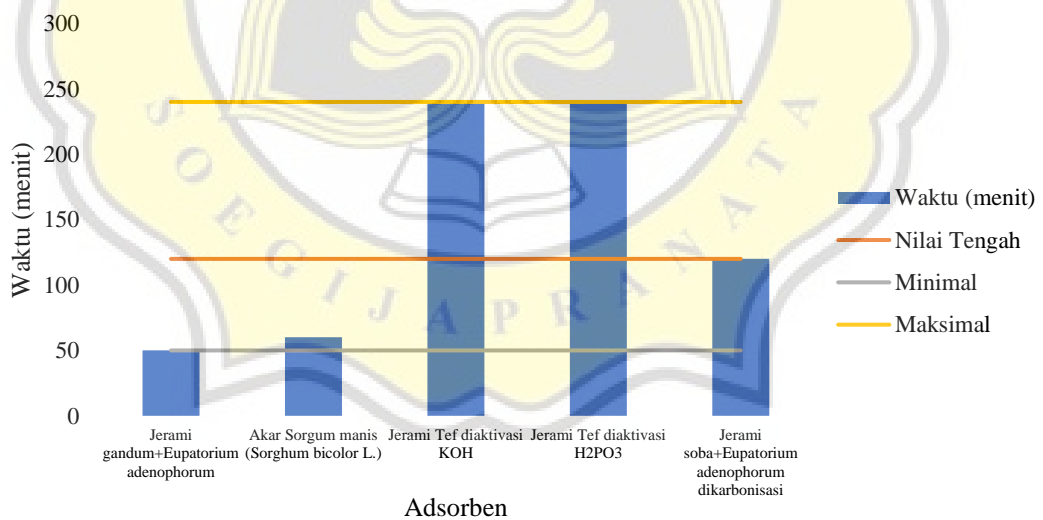
Gambar 13. Waktu Adsorpsi Ion Logam Cu^{2+}

Gambar 13. menunjukkan waktu kontak proses adsorpsi ion logam Cu^{2+} . Didapatkan batas minimal pada 20 menit, batas tengah pada 120 menit, dan batas maksimal pada 360 menit.



Gambar 14. Waktu Adsorpsi Ion Logam Cd^{2+}

Waktu kontak dari logam ion Cd^{2+} dapat dilihat pada Gambar 14., mendapatkan batas minimal dengan durasi proses adsorpsi selama 60 menit, lalu batas tengah dengan durasi 340,5 menit, dan batas maksimal dengan durasi 360 menit.

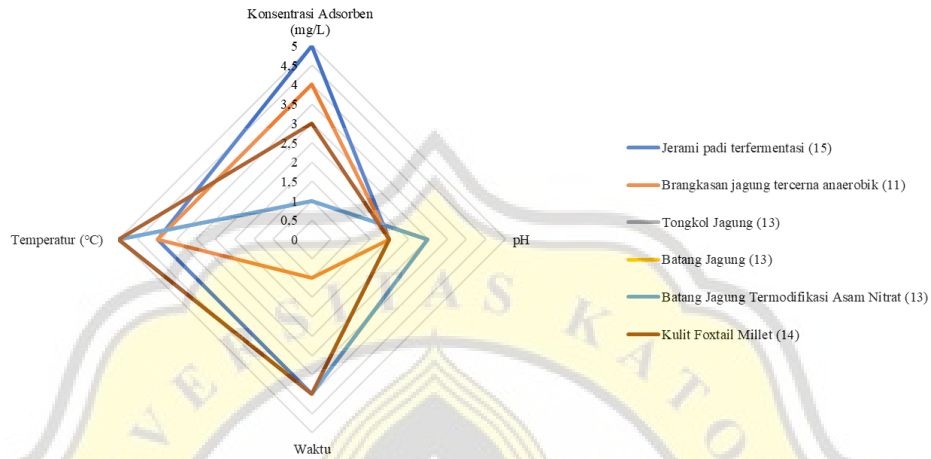


Gambar 15. Waktu Adsorpsi Ion Logam Cr^{6+}

Gambar 15., disajikan waktu adsorpsi ion logam Cr^{6+} . Pada grafik ini terlihat batas minimalnya adalah 50 menit, batas tengahnya adalah 120 menit, dan untuk batas maksimalnya adalah 240 menit.

4.2.4. Perbandingan Efektivitas Adsorben

Diagram radar efektivitas adsorben untuk tiga kontaminan disajikan pada Gambar 16. sampai dengan Gambar 18.



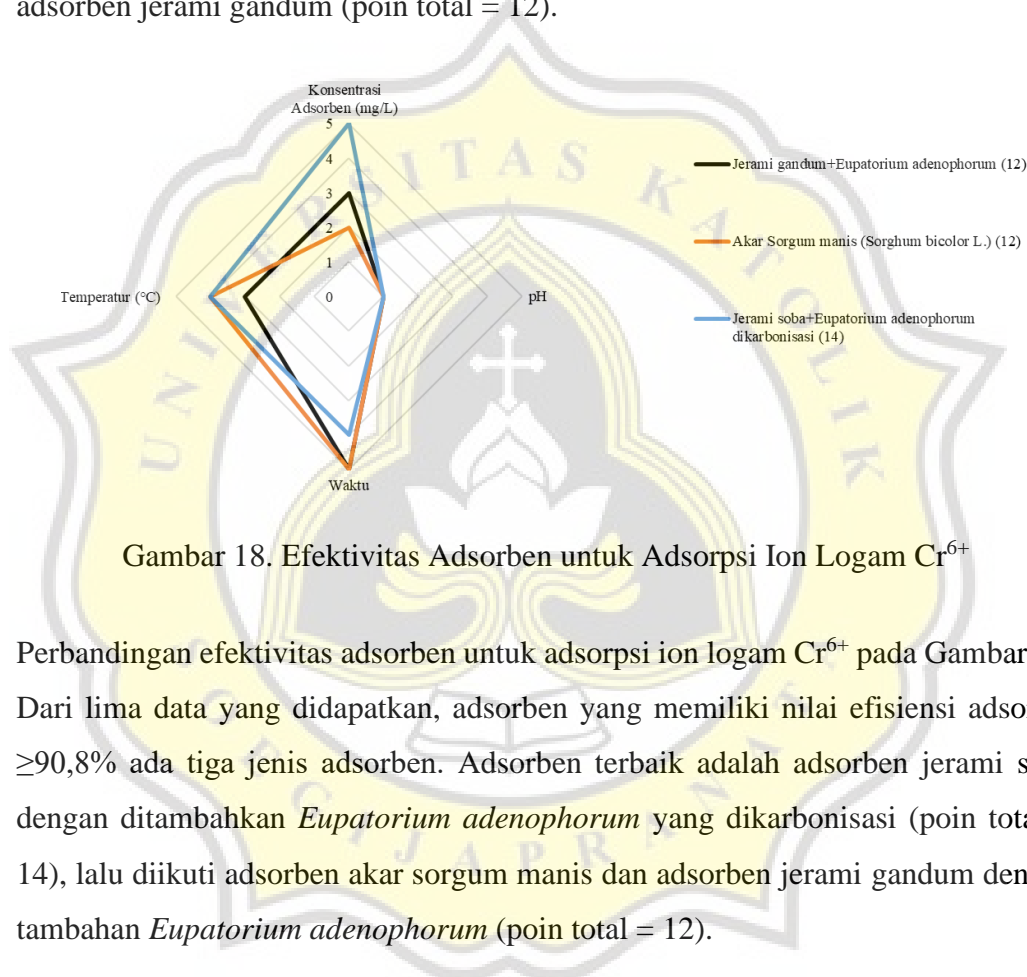
Gambar 16. Efektivitas Adsorben untuk Adsorpsi Ion Logam Cu^{2+}

Gambar 16. menunjukkan perbandingan efektivitas adsorben untuk adsorpsi ion Cu^{2+} (efisiensi adsorpsi $\geq 94,55\%$). Adsorben yang paling efektif dalam pengaplikasian adalah adsorben dari jerami padi terfermentasi (poin total = 15). Untuk adsorben yang paling rendah efektivitasnya adalah adsorben brangkas jagung tercerna anaerobik (poin total = 11).



Gambar 17. Efektivitas Adsorben untuk Adsorpsi Ion Logam Cd^{2+}

Perbandingan efektivitas adsorben untuk adsorpsi ion Cd^{2+} ditunjukkan pada Gambar 17. Terdapat tiga jenis adsorben yang memiliki nilai efisiensi adsorpsi $\geq 89,04\%$. Adsorben terbaik didapatkan pada adsorben yang terbuat dari jerami gandum (poin total = 21), diikuti adsorben kulit *foxtail millet* (poin total = 15), lalu adsorben jerami gandum (poin total = 12).



Gambar 18. Efektivitas Adsorben untuk Adsorpsi Ion Logam Cr^{6+}

Perbandingan efektivitas adsorben untuk adsorpsi ion logam Cr^{6+} pada Gambar 18. Dari lima data yang didapatkan, adsorben yang memiliki nilai efisiensi adsorpsi $\geq 90,8\%$ ada tiga jenis adsorben. Adsorben terbaik adalah adsorben jerami soba dengan ditambahkan *Eupatorium adenophorum* yang dikarbonisasi (poin total = 14), lalu diikuti adsorben akar sorgum manis dan adsorben jerami gandum dengan tambahan *Eupatorium adenophorum* (poin total = 12).